

# InfoGraph



Software für die Tragwerksplanung



Finite Elemente

Vorspannung

Dynamik

Stabwerke

CAD

InfoCAD 16

Benutzerhandbuch



# **InfoCAD 16**

**Benutzerhandbuch**

Die Beschreibung von Programmfunktionen im Rahmen dieser Dokumentation gilt nicht als Zusicherung von Produkteigenschaften. Gewährleistungs- und Haftungsansprüche aus der Benutzung der Dokumentation sind ausgeschlossen.

InfoGraph® ist ein eingetragenes Warenzeichen der InfoGraph GmbH Aachen. Im Text genannte Hersteller- und Produktbezeichnungen sind Warenzeichen der jeweiligen Inhaber.

Diese Dokumentation ist urheberrechtlich geschützt. Nachdruck, Vervielfältigung, Übersetzung und elektronische Speicherung, auch auszugsweise, sind nur nach schriftlicher Genehmigung der InfoGraph GmbH zulässig.

© 2016 InfoGraph GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Bildnachweis: Lev Kropotov, 123rf.com



# Inhaltsverzeichnis

## Einführung 11

## Installation und Konfiguration 12

### Lizenzierung 12

#### Einzelplatzlizenz 12

- Installation 12
- Programmstart 12
- Benutzerkonfiguration 13
- Sprachauswahl 13
- Bemessungsnormen 13
- Seitenrahmen 13
- Aktualisierung 13
- Deinstallation 14

#### Netzwerklicenz 14

- Netzwerkkonfiguration 14
- Schritte auf dem Lizenzrechner 14
- Virtualisierte Server unter VMware 15
- Schritte auf der Arbeitsstation 15
- Programmstart 16

## Bedienoberfläche 17

### Steuerelemente 17

- Standardleiste 17
- Zeichenleiste, Fangenleiste, Ansichtslaste 17
- Tragwerksleiste, Berechnungsleiste, Ergebnisleiste 17
- Statusleiste 18
- Datenbasisbereich 18
- Drucklistebereich 18
- Layerbereich 18
- Teilsichtbereich 18
- Darstellungsbereich 18
  - Graphikansicht 18
  - Tabellenansicht 19
- Ausgabebereich 19
- Eigenschaftenbereich 20
- Dialogleiste 20
  - Koordinateneingabe 20
  - Arithmetik 20

### Datei 21

- Bauzustand 21
- Drucken, Seite einrichten 25
- Druckliste 26
- Import und Export 27
  - Datenaustausch zwischen Projektdateien 27
  - Datenaustausch über InfoGraph Schnittstellendateien 27
  - Datenaustausch im DXF-Format 28
  - IFC-Datenaustausch 28
- Dateiservice 33

### Bearbeiten 33

- Rückgängig / Wiederherstellen 34

- Ausschneiden 34
- Kopieren 34
- Einfügen 34
- Löschen 34
- Markieren 34
- Gruppe markieren 35
- Alles markieren 35
- Alles demarkieren 35
- Bewegen 35
- Kopieren direkt 36
- Generieren 36
- Farbe 37
- Layer 37
- Linientyp 38
- Ändern 38
- Länge ändern 38
- Endpunkt ändern 38
- Verschneiden 39
- Wandöffnung 39
- Teilen 39
- Verbinden 39
- Umwandeln 40

### Ansicht 40

- Neuzeichnen 41
- Zoom 41
- 3D-Darstellung 41
- 3D-Ansicht 41
- Rotieren 41
- Projektion 42
- Verdeckt 42
- Querschnittsdarstellung 42
- Fenster 42
- Layout 43
- Teilsicht 43

### Zeichnen 44

- Linie 44
- Text 44
- Kreis 45
- Bogen 45
- Solid 45
- NURBS 46
- Modell 51
  - Rand 51
  - Loch 51
  - Eigenschaftsdialog für Rand- und Lochobjekte 52
  - Wand 52
  - Stütze 53
  - Modellfläche 54
  - Kegel 56
  - Volumen 57
- Bemaßung 58

### Fangen 59

- Relativkoordinaten 59
- Bezugspunkt 59

Fangen einstellen 60

### **Format 60**

#### **Extras 61**

Liste 61

Distanz 61

Fläche 61

Winkel 61

Variable 61

Seitenrahmen 62

Archivieren 63

Automatisches Speichern 63

### **Hilfe 63**

## **Finite Elemente 64**

### **Grundlagen 64**

Berechnungsmethode 64

Elementbibliothek 65

Koordinatensysteme 66

Baugrundmodelle 68

Elastizitätstheorie 2. Ordnung 69

Knickeigenformen 71

Kontakt 72

Laminat 75

Gleichungslöser 76

Paralleler Sparse Solver 76

Iterativer Gleichungslöser 76

Substrukturtechnik 77

Singuläres Gleichungssystem 78

Kapazitätsgrenze unter Windows 79

Programmkapazitäten 80

Berechnungsergebnisse 80

### **Strukturbeschreibung 85**

Netzgenerierung 86

Formtreu oder Rasterförmig aus Modell 87

Polygonales Gebiet 87

Kreis- oder Kegelform 88

Parabolisch berandetes Viereck 88

Dreieckiges Gebiet 88

Viereck - Raster auf vier Seiten 89

Viereck - variables Raster auf zwei Seiten 89

Viereck oder Quader 89

Tetraeder aus Volumen 89

Stabzug 90

Elementeingabe 90

Elementeigenschaften 91

Allgemein 91

Ersatzstablänge 91

Querschnitt 92

Flächenquerschnitt 94

Polygonquerschnitt 94

Rechteckquerschnitt 97

Stabquerschnitt 97

Zugstab 97

Laminat 97

Verbundquerschnitt 98

Schubspannungen 98

Material 98

Kriechbeiwerte 100

Bettung 101

Betonstahl eines Flächenquerschnitts 101

Elementinformationen 102

Darstellung 102

Netzprüfung 103

Elementsystem 104

Nummern sortieren 105

Festhaltungen 106

Vorverformung 107

Knoten bewegen 107

Knoten oder Elemente suchen 108

Verdichten 108

Koppelungen 109

Federelemente 111

Liniengelenke 112

Steifemoduln 113

Elemente ausrichten 113

Modelle für den Unterzug 114

### **Belastung 115**

Eingabe 116

Allgemein 116

Eigenlast 116

Eigenlast einer Elementauswahl 116

Einflussfläche 116

Einflusslinie 117

Einfügen von Lastfalldaten 117

Knickeigenwerte 117

Kriechen und Schwinden 118

Lagersenkung 118

Superposition von Lastfällen 118

Theorie 118

Temperatur auf Flächen- und Volumenelemente 119

Temperatur auf Stäbe und Seile 119

Freie Temperatur auf Volumenelemente 119

Vordehnung 120

Vorspannung 121

Dynamische Zuglast 121

Dynamischer Elementkollaps 121

Vorverformung 121

Brandfall 122

Thermische Einwirkung 122

Lastgruppe 122

Einzellasten 124

Freie Einzellast 124

Knotenlast 124

Einzellast auf Stäbe 124

Einzelmoment auf Stäbe 124

Volleinspannkkräfte von Stäben 125

Linienlasten 125

Freie Linienlast - global 125

Freie Linienlast - lokal 125  
 Lokale Linienlast auf Flächen- und Volumenelemente in Elementrichtung 126  
 Linienlast auf Stäbe und Seile 126  
 Trapezlast auf Stäbe 126  
 Freies Linienmoment auf Stäbe und Flächenelemente 127  
 Linientorsionsmoment auf Stäbe 127  
 Flächenlasten 127  
 Flächenelement-Last 127  
 Gebietslast auf Flächenelemente 128  
 Freie Flächenlast - Rechteck 129  
 Freie Flächenlast - n-Eck 129  
 Gleichlast auf Modellflächen 130  
 Flüssigkeitsdruck auf Flächenelemente 130  
 Flächenlast auf Stäbe 131  
 Datenbank 131

### **Bemessungsobjekte 132**

Zweck 132  
 Definition 132  
 Beispiel 132  
 Eingabe 133  
 Bearbeitung 134  
 Integration 134

### **Berechnung 135**

Einstellungen Statik 136  
 Stapelberechnung 137

### **Ergebnisse 138**

Ergebnisleiste 138  
 Ergebniskategorien 139  
 Verformungsfigur 139  
 Farbig, Isoflächen 140  
 Höhenlinien 141  
 Numerisch 142  
 Schnittdarstellung 143  
 Vektoriell 144  
 Volumenschnitt 144  
 Lagerlinien 145  
 Zustandslinien 146  
 Ergebnisdiagramm 147  
 Querschnittsspannungen 147  
 Ergebnisliste 149  
 Kombinationsinfo 149  
 Bewehrung exportieren 150  
 Durchstanznachweis 150

### **Beispiele 151**

Platte mit Mindlin-Reissner Elementen 151  
 Knickeigenformen einer Stütze 152  
 Biegedrillknicken eines Schalenmodells 154  
 Silogründung nach Steifemodulverfahren 156  
 Bauzustände, Kriechumlagerungen 158  
 Seilnetz 160  
 Hochhaus nach Substrukturtechnik 161

### **Literaturhinweise 162**

## **Räumliches Stabwerk 164**

### **Grundlagen 164**

### **Strukturbeschreibung 165**

Elementeingabe 165  
 Elementeigenschaften 166  
 Allgemein 166  
 Ersatzstablänge 166  
 Querschnitt 166  
 Polygonquerschnitt 168  
 Rechteckquerschnitt 171  
 Stabquerschnitt 171  
 Zugstab 171  
 Schubspannungen 171  
 Material 172  
 Bettung 173  
 Elementinformationen 173  
 Darstellung 174  
 Netzprüfung 175  
 Elementsystem 175  
 Nummern sortieren 175  
 Festhaltungen 176  
 Ververformung 176  
 Knoten bewegen 177  
 Knoten oder Stäbe suchen 177  
 Verdichten 178  
 Stäbe ausrichten 178  
 Koppelungen 179

### **Belastung 180**

Eingabe 180  
 Eigenlast 180  
 Einflusslinie 181  
 Einfügen von Lastfalldaten 181  
 Lagerversenkung 181  
 Superposition von Lastfällen 181  
 Temperatur 182  
 Temperatur, Vordehnung 182  
 Theorie 182  
 Ververformung 182  
 Brandfall 183  
 Lastgruppe 183  
 Einzellast 184  
 Einzelmoment 184  
 Knotenlast 185  
 Linienlast 185  
 Linientorsionsmoment 185  
 Trapezlast 186  
 Volleinspannkräfte 186

### **Berechnung 187**

Einstellungen Statik 187  
 Stapelberechnung 188

### **Ergebnisse 189**

Ergebnisleiste 189  
 Ergebniskategorien 190

Verformungsfigur 190  
Numerisch 191  
Zustandslinien 191  
Querschnittsspannungen 192  
Ergebnisliste 194  
Kombinationsinfo 194

## **Beispiel Stahlhalle nach Theorie 2. Ordnung 195**

## **Ebenes Stabwerk 199**

### **Grundlagen 199**

Koordinatensysteme 199

### **Strukturbeschreibung 200**

Elementeingabe 200  
Elementeigenschaften 201  
    Allgemein 201  
    Ersatzstablänge 201  
    Querschnitt 201  
    Polygonquerschnitt 203  
    Rechteckquerschnitt 205  
    Stabquerschnitt 206  
    Zugstab 206  
    Schubspannungen 206  
    Material 206  
    Bettung 208  
Elementinformationen 208  
Darstellung 208  
Netzprüfung 209  
Elementsystem 210  
Nummern sortieren 210  
Festhaltungen 210  
Vorverformung 211  
Knoten bewegen 211  
Knoten oder Stäbe suchen 212  
Verdichten 212  
Koppelungen 212  
Stäbe ausrichten 213

### **Belastung 214**

Eingabe 214  
Eigenlast 214  
Einflusslinie 215  
Einfügen von Lastfalldaten 215  
Lagersenkung 215  
Superposition von Lastfällen 215  
Temperatur 216  
Temperatur, Vordehnung 216  
Theorie 216  
Vorverformung 216  
Brandfall 216  
Lastgruppe 217  
Einzellast 218  
Knotenlast 218  
Linienlast 219  
Trapezlast 219  
Volleinspannkkräfte 220

### **Berechnung 220**

Einstellungen Statik 221  
Stapelberechnung 222

### **Ergebnisse 222**

Ergebnisleiste 223  
Ergebniskategorien 223  
Verformungsfigur 224  
Numerisch 224  
Zustandslinien 224  
Querschnittsspannungen 225  
Ergebnisliste 227  
Kombinationsinfo 227

### **Beispiele 228**

Stahlbetonrahmen 228  
Einflusslinien 230

## **Rotationsschale 232**

### **Grundlagen 232**

Berechnungsmethode 232  
Koordinatensysteme 233  
Elementbettung 234  
Singuläres Gleichungssystem 234  
Berechnungsergebnisse 234  
Programmkapazitäten 236

### **Strukturbeschreibung 236**

Elementeingabe 236  
Elementeigenschaften 237  
    Allgemein 237  
    Querschnitt 237  
    Material 239  
    Bettung 240  
    Betonstahl 240  
Elementinformationen 240  
Darstellung 241  
Netzprüfung 242  
Elementsystem 242  
Nummern sortieren 242  
Festhaltungen 242  
Knoten bewegen 243  
Knoten oder Elemente suchen 243  
Verdichten 243  
Koppelungen 244

### **Belastung 245**

Eingabe 245  
Eigenlast 245  
Einfügen von Lastfalldaten 245  
Einzellast 246  
Flüssigkeitsdruck 246  
Knotenlast 246  
Lagersenkung 247  
Superposition von Lastfällen 247  
Temperatur 247  
Temperatur, Vordehnung 247

Theorie 248  
 Trapezlast 248  
 Lastgruppe 249  
 Volleinspannkraft 249

### **Berechnung 250**

Einstellungen Statik 250  
 Stapelberechnung 251

### **Ergebnisse 251**

Ergebnisleiste 252  
 Ergebniskategorien 252  
 Verformungsfigur 253  
 Numerisch 253  
 Zustandslinien 254  
 Ergebnisliste 255  
 Kombinationsinfo 255

### **Beispiele 256**

Wasserbehälter 256  
 Faulbehälter 257

## **Lastfallkombination 259**

### **Grundlagen 259**

### **Eingaben 259**

### **Berechnungseinstellungen 260**

### **Ergebnisse 260**

### **Beispiele 261**

Lastfallkombination an einem Mehrfeldträger 261  
 Lastfallkombination bei einer Deckenplatte 262

## **Spannbeton 263**

### **Grundlagen 263**

Verbundquerschnitt 263  
 Kriechen und Schwinden 264  
 Einwirkungen aus Vorspannung 264  
 Spannstrangeometrie 266

### **Eingaben 266**

Vorspannung 266  
 Spannstrangeigenschaften 267  
 Spannverfahren 268  
 Spannanweisung 269  
 Beispiele zur Spannanweisung 270  
 Ansicht von Spannsträngen 273

## **EN 1992-1-1 Bemessung 275**

### **Grundlagen 275**

### **Eingaben 276**

Einwirkungen und Bemessungssituationen 276  
 Definition einer Einwirkung 277  
 Teilsicherheitsbeiwerte 278  
 Querschnittseingaben 279
 

- Nachweise 279
- Basiswerte 280
- Schubquerschnitt 282

Spannungen 283  
 Rissbreiten 284  
 Ermüdung 286  
 Streufaktoren 287

Berechnungseinstellungen 288

Einzelbemessung 289

Durchstanznachweis 290

### **Vorgespannte Tragwerke 292**

Interne Vorspannung 292  
 Externe Vorspannung, Mischbauweise 292  
 Streuung der Wirkungen aus Vorspannung 292  
 Kriechen und Schwinden 293  
 Relaxation des Spannstahls 294

### **Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 294**

Nachweiskombinationen 294  
 Spannungs-Dehnungslinien 295  
 Bemessung für Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein 296  
 Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung 297  
 Oberflächenbewehrung 298  
 Bemessung für Querkraft 298  
 Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung 301  
 Durchstanzen 303  
 Nachweise gegen Ermüdung 307
 

- Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl 307
- Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung 308
- Besonderheit bei Flächentragwerken 308

### **Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 309**

Nachweiskombinationen 309  
 Spannungsberechnung 310  
 Begrenzung der Betondruckspannungen 310  
 Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen 311  
 Nachweis der Dekompression 311  
 Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite 312  
 Berechnung der Rissbreite 314  
 Ermittlung des Wirkungsbereichs  $A_{c,eff}$  315  
 Begrenzung der Verformungen 317

### **Ergebnisse 318**

### **Beispiele 320**

Platte mit Unterzug 320  
 Vorgespannte Dachkonstruktion 326  
 Torsionsbalken 336  
 Einzelbemessung Stahlbeton 337  
 Einzelbemessung Spannbeton 338

### **Literaturhinweise 340**

## **SIA 262 Bemessung 342**

### **Grundlagen 342**

## **Eingaben 342**

- Einwirkungen und Bemessungssituationen 342
- Definition einer Einwirkung 344
- Teilsicherheitsbeiwerte 345
- Querschnittseingaben 345
  - Nachweise 345
  - Basiswerte 346
  - Schubquerschnitt 347
  - Betonspannungen 348
  - Risskontrolle 349
  - Ermüdung 350
- Berechnungseinstellungen 351
- Einzelbemessung 352
- Durchstanznachweis 353

## **Vorgespannte Tragwerke 356**

- Interne Vorspannung 356
- Externe Vorspannung, Mischbauweise 356
- Kriechen und Schwinden 356
- Relaxation des Spannstahls 357

## **Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit 357**

- Spannungs-Dehnungslinien 357
- Bemessung für Biegung und Biegung mit Normalkraft 358
- Bemessung für Querkraft 358
- Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung 360
- Durchstanzen 360
- Nachweise gegen Ermüdung 362
  - Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl 362
  - Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung 363
  - Besonderheit bei Flächentragwerken 363

## **Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 364**

- Begrenzung der Betondruckspannungen 364
- Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen 364
- Rissbewehrung bei Zwangsbeanspruchung 365
- Begrenzung der Rissbreite 366
- Begrenzung der Verformungen 366

## **Ergebnisse 366**

### **Beispiele 368**

- Platte mit Unterzug 368
- Vorgespannte Dachkonstruktion 373
- Torsionsbalken 380
- Einzelbemessung 382

## **Literaturhinweise 383**

## **DIN Fachbericht Brückennachweise 384**

### **Grundlagen 384**

#### **Eingaben 385**

- Tragwerksart 385
- Lastmodell 1 für Straßenbrücken 385

Tandemsystem des Lastmodells 1 386

- Einwirkungen und Einwirkungskombinationen 387
- Definition einer Einwirkung 388
- Definition einer Einwirkungskombination 390
- Querschnittseingaben 391
  - Nachweise 391
  - Basiswerte 392
  - Schubquerschnitt 394
  - Betonspannungen 395
  - Rissbreiten 396
  - Ermüdung 397
  - Streifaktoren 398
- Berechnungseinstellungen 399

## **Vorgespannte Tragwerke 400**

- Interne Vorspannung 400
- Externe Vorspannung, Mischbauweise 400
- Streuung der Wirkungen aus Vorspannung 400
- Kriechen und Schwinden 401
- Relaxation des Spannstahls 402

## **Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit 403**

- Nachweiskombinationen 403
- Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe 403
- Spannungs-Dehnungslinien 404
- Bemessung für Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein 404
- Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Vorankündigung 405
- Mindestoberflächenbewehrung für vorgespannte Bauteile 405
- Bemessung für Querkraft 406
- Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung 409
- Durchstanzen 410
- Nachweise gegen Ermüdung 410
  - Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl 410
  - Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung 411
  - Besonderheit bei Flächentragwerken 412

## **Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 413**

- Nachweiskombinationen 413
- Spannungsberechnung 413
- Begrenzung der Betondruckspannungen 414
- Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen 414
- Nachweis der Dekompression 415
- Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung 415
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite 416
- Berechnung der Rissbreite 417
- Ermittlung des Wirkungsbereichs  $A_{c,eff}$  419
- Nachweis der Rissbreite durch Begrenzung der Stababstände 420
- Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen 420
- Begrenzung der Verformungen 422

## **Ergebnisse 422**

**Beispiele 424**

Straßenbrücke in Massivbauweise 424  
 Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau 433  
 Brückenwiderlager 443

**Literaturhinweise 452****EN 1992-2 Brückennachweise 454****Grundlagen 454****Eingaben 454**

Tragwerksart 454  
 Lastmodell 1 für Straßenbrücken 455  
     Tandemsystem des Lastmodells 1 456  
 Einwirkungen und Einwirkungskombinationen 457  
 Definition einer Einwirkung 458  
 Definition einer Einwirkungskombination 460  
 Teilsicherheitsbeiwerte 460  
 Querschnittseingaben 461  
     Nachweise 461  
     Basiswerte 462  
     Schubquerschnitt 464  
     Spannungen 465  
     Rissbreiten 466  
     Ermüdung 468  
     Streufaktoren 470  
 Berechnungseinstellungen 471  
 Einzelbemessung 472

**Vorgespannte Tragwerke 473**

Interne Vorspannung 473  
 Externe Vorspannung, Mischbauweise 473  
 Streuung der Wirkungen aus Vorspannung 473  
 Kriechen und Schwinden 474  
 Relaxation des Spannstahls 475

**Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit 476**

Nachweiskombinationen 476  
 Spannungs-Dehnungslinien 476  
 Bemessung für Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein 477  
 Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung 478  
 Oberflächenbewehrung 478  
 Bemessung für Querkraft 479  
 Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung 482  
 Durchstanzen 483  
 Nachweise gegen Ermüdung 483  
     Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl 484  
     Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung 484  
     Besonderheit bei Flächentragwerken 485

**Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit 486**

Nachweiskombinationen 486  
 Spannungsberechnung 487

Begrenzung der Betondruckspannungen 487  
 Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen 488  
 Nachweis der Dekompression 488  
 Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung 489  
 Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite 489  
 Berechnung der Rissbreite 491  
 Ermittlung des Wirkungsbereichs  $\sigma_{c,eff}$  493  
 Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen 494  
 Begrenzung der Verformungen 496

**Ergebnisse 497****Beispiele 499**

Straßenbrücke in Massivbauweise 499  
 Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau 508  
 Brückenwiderlager 518

**Literaturhinweise 527****Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise 529****Grundlagen 529****Lastmodelle 530**

Ziellastniveaus LM1 und LMM 530  
     Tandemsystem des Lastmodells 1 532  
 Ziellastniveaus BK 60/30, BK 60, BK 30/30 533  
 Ermüdungslastmodell 3 535

**Eingaben 536**

Einwirkungen und Einwirkungskombinationen 536  
 Definition einer Einwirkung 537  
 Definition einer Einwirkungskombination 538  
 Querschnittseingaben 540  
     Nachweise 540  
     Biegung und Längskraft 541  
     Querkraft und Torsion 542  
     Schubquerschnitt 544  
     Spannungen 545  
     Rissbreiten 547  
     Ermüdung 549  
     Streufaktoren 550  
 Berechnungseinstellungen 551  
 Einzelbemessung 553

**Vorgespannte Tragwerke 554**

Interne Vorspannung 554  
 Externe Vorspannung, Mischbauweise 554  
 Streuung der Wirkungen aus Vorspannung 554  
 Kriechen und Schwinden 555  
 Relaxation des Spannstahls 556

**Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit 557**

Nachweiskombinationen 557  
 Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe 557  
 Spannungs-Dehnungslinien 558  
 Bemessung für Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein 558

Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Vorankündigung 559

Mindestoberflächenbewehrung für vorgespannte Bauteile 560

Bemessung für Querkraft 560

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach dem Hauptspannungskriterium 563

Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung 564

Nachweis der Hauptdruckspannung für kombinierte Beanspruchung 566

Nachweis der aufnehmbaren Belastung 566

Nachweis des Ausnutzungsgrads der Bewehrung 567

### **Nachweise gegen Ermüdung 568**

Nachweiskombinationen 568

Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl 569

Ermüdung von Beton unter Längsdruckbeanspruchung 570

Ermüdung der Betondruckstreben unter Querkraft und Torsion 571

Besonderheit bei Flächentragwerken 572

### **Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 573**

Nachweiskombinationen 573

Spannungsberechnung 573

Begrenzung der Betondruckspannungen 574

Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen 574

Nachweis der Dekompression 575

Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung 576

Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite 576

Berechnung der Rissbreite 578

Ermittlung des Wirkungsbereichs  $\sigma_{c,eff}$  580

Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen 581

Begrenzung der Verformungen 582

### **Ergebnisse 583**

#### **Beispiele 585**

Spannbetonbrücke mit Hohlkastenquerschnitt 585

Einzelbemessung Spannbeton nach Stufe 2 595

### **Literaturhinweise 598**

## **EN 1993-1-1 Stahlnachweise 601**

### **Grundlagen 601**

#### **Eingaben für Nachweise am Gesamtsystem 602**

Einwirkungen und Bemessungssituationen 602

Definition einer Einwirkung 603

Berechnungseinstellungen 604

#### **Eingaben für Nachweise am Ersatzstab 605**

Einstellungen 605

Querschnitt & Material 606

Last & System 607

Biegedrillknickparameter 608

Drehbettung 609

#### **Grenzzustände der Tragfähigkeit 610**

Nachweiskombinationen 610

Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung 610

Charakteristische Werte 611

Spannungsermittlung 611

Koordinatensysteme 611

Längsspannungen 611

Schubspannungen 612

Querschnittsklassifizierung 613

Elastische Querschnitttragfähigkeit 613

Plastische Querschnitttragfähigkeit 614

Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken 615

### **Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit 617**

Nachweiskombinationen 617

Begrenzung der Verformungen 617

### **Ergebnisse 618**

#### **Beispiele 619**

Stahlnachweise am Gesamtsystem 619

Biegedrillknicknachweis Zweigelenrahmen 625

Biegedrillknicknachweis Rahmenstiel mit zweiachsiger Biegung und Normalkraft 628

### **Literaturhinweise 633**

## **EN 1995-1-1 Holznachweise 635**

### **Grundlagen 635**

#### **Eingaben 635**

Einwirkungen und Bemessungssituationen 635

Definition einer Einwirkung 637

Brandeinwirkungen 638

Teilsicherheitsbeiwerte 639

Ersatzstablänge 639

Berechnungseinstellungen 640

#### **Grenzzustände der Tragfähigkeit 641**

Nachweiskombinationen 641

Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung 642

Spannungsermittlung 642

Koordinatensysteme 642

Längsspannungen 642

Schubspannungen 643

Baustoffeigenschaften 643

Charakteristische Werte 643

Feuchtegehalt und Lasteinwirkungsdauer 643

Einfluss der Bauteilgröße 645

Bemessungsverfahren für den Brandfall 645

Querschnittsnachweise 646

Bemessungswerte der Festigkeiten 646

Zug in Faserrichtung 647

Druck in Faserrichtung 647

Biegung 647

Biegung und Zug 647

Biegung und Druck 647

Schub 648

Torsion 648

Schub und Torsion 649

Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren 649



**Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit 650**

Nachweiskombinationen 650

Begrenzung der Verformungen 650

**Ergebnisse 650****Beispiele 651**

Holznachweise an einer Gelenkpfette 651

Dreigelenkrahmen unter Normaltemperatur und im Brandfall 654

**Literaturhinweise 660****Dynamik 662****Grundlagen 662**

Bewegungsgleichungen 662

Integration der Bewegungsgleichungen 663

Ungedämpftes Eigenschwingungsproblem 663

Modale Analyse 664

Direkte Integration der Bewegungsgleichungen 665

Stationärer Response 665

Systemerregung durch Bodenbeschleunigung 666

Antwortspektrumverfahren 666

Antwortspektrum nach DIN 4149:2005 668

Antwortspektrum nach DIN 4149:1981 669

Antwortspektrum nach EN 1998-1 670

Antwortspektrum nach ÖNORM B 4015 671

Antwortspektrum nach SIA 261:2014 672

Alternatives Antwortspektrum 673

Statistische Kombinationsmethoden 673

Einwirkungen infolge Erdbeben 674

Dynamische Zugüberfahrt 675

**Eingaben 676**

Berechnungseinstellungen 676

Eigenwerte 677

Wirkung der Massen 677

Bodenbeschleunigung 677

Beiwerte nach DIN 4149:2005 677

Beiwerte nach DIN 4149:1981 678

Beiwerte nach EN 1998-1 678

Beiwerte nach ÖNORM B 4015 678

Beiwerte nach SIA 261:2014 679

Alternatives Antwortspektrum 679

Statische Ersatzlasten der Modalbeiträge speichern 679

Zeitschrittintegration 680

Folgende Lastfälle berücksichtigen 680

Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen 680

Punktmassen 680

Massen aus Lastfällen erzeugen 681

Knotenbeschleunigungen 681

Modale Dämpfung 682

Lehr'sches Dämpfungsmaß 682

Knotenbezogene Last-Zeit-Verläufe 683

Instationärer Last-Zeit-Verlauf 683

Rayleigh'sche Dämpfung 684

Viskose Einzeldämpfer 684

Erregerfrequenzbereich Response 685

Erregungsspektrum 685

Alternatives Antwortspektrum 685

**Beispiele 686**

Gekoppelter Zweimassenschwinger 686

Eigenwerte und Eigenformen 686

Stationärer Response 687

Periodischer Last-Zeit-Verlauf (modale Analyse) 688

Periodischer Last-Zeit-Verlauf (direkte Analyse) 690

Konstanter Last-Zeit-Verlauf 691

Instationärer Last-Zeit-Verlauf 693

Antwortspektrum nach DIN 4149:2005 694

Antwortspektrum nach EN 1998-1 695

Naturzugkühlturm mit Eigenform 696

Erdbebennachweis nach DIN 4149:2005 697

Maschinenfundament mit mehreren Erregern 704

Abgespannter Mast 707

Dynamische Zugüberfahrt 709

**Literaturhinweise 712****Nichtlineare Systemanalyse 713****Grundlagen 713**

Anwendungsbereich 713

Berechnungsverfahren 713

Finite Stabelemente 714

Querschnittsanalyse 715

Stäbe aus Stahlbeton 715

Spannungs-Dehnungs-Linien für den Tragfähigkeitsnachweis 716

Spannungs-Dehnungs-Linien für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis 718

Torsionssteifigkeit 720

Kontrolle der Grenzdehnungen (Tragfähigkeitsnachweis) 720

Automatische Bewehrungserhöhung (Tragfähigkeitsnachweis) 721

Betonkriechen 721

Stäbe aus Stahl 721

Stäbe aus freiem Material 722

Flächenelemente 723

Flächenelemente aus Stahlbeton 723

Flächenelemente aus Stahl und freiem Material 726

Volumenelemente 727

Hinweise zum Konvergenzverhalten 728

**Berechnungseinstellungen 728****Beispiele 729**

Nachberechnung zweier Kurzzeitversuche 729

Stahlbetonplatte 729

Stahlbetonrahmen 730

Verformungsberechnung einer Hochbaudeckenplatte 732

**Literaturhinweise 735****Tragwerksanalyse für den Brandfall 736**

## **Anwendungsbereich 736**

### **Berechnung der Querschnittstemperaturen 737**

Grundlagen 737

Thermischer Querschnitt 739

Querschnittsteil hinzufügen 740

Querschnittsteil bearbeiten 744

Querschnittsrand bearbeiten 744

FE-Netz generieren 745

Einstellungen für die Temperaturberechnung 746

Temperaturverlauf berechnen 746

Ergebnisse darstellen 746

### **Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall 747**

Grundlagen 747

Lastfalldefinition 750

Berechnungseinstellungen 750

Ergebnisse 751

### **Beispiele 752**

Giebelstütze einer Halle 752

Stahlrahmen 753

Verbundträger 754

Tunnelrahmen 755

Hochbaudeckenplatte unter Brandeinwirkung 757

### **Literaturhinweise 759**

## **Thermische Berechnung von Volumen tragwerken 761**

### **Anwendungsbereich 761**

#### **Grundlagen 762**

#### **Eingabedaten 764**

Thermische Materialeigenschaften 764

Volumenoberfläche 767

Thermische Einwirkung 768

Thermische Berechnung 769

#### **Beispiele 770**

Instationärer Temperaturverlauf in einer Winkelstützmauer  
770

Vergleichsberechnung mit und ohne Strahlung 773

Stationäre Temperaturverteilung 774

#### **Literaturhinweise 775**

## **Stichwortverzeichnis 777**

---

# Einführung

Das Programmsystem **InfoCAD** ist eine speziell für das Bauwesen entwickelte Softwarelösung zur Analyse ebener und räumlicher Tragwerke. Im Einzelnen stehen die folgenden Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Behandlung von ebenen und räumlichen Stab- und Flächentragwerken, Seiltragwerken und Volumenmodellen.
- Geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnung.
- Federelemente mit nichtlinearer Kennlinie.
- Untersuchung von Kontaktproblemen.
- Ermittlung von Knickfiguren und Beuleigenformen.
- Elementlagerung nach Bettungsziffer- oder Steifemodulverfahren mit geschichtetem Baugrund; wahlweise Ausschluss der Zugbettung.
- Biegebemessung nach DIN 1045, DIN 1045-1, ÖNORM B 4700, SIA 262, EN 1992-1-1.
- Schub- und Torsionsbemessung, Durchstanz- und Rissnachweis nach DIN 1045-1, ÖNORM B 4700, SIA 262 und EN 1992-1-1.
- Stahlbaunachweise nach DIN 18800 und EN 1993-1-1 elastisch-elastisch, elastisch-plastisch und plastisch-plastisch.
- Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 und EN 1993-1-1.
- Holznachweise nach DIN 1052 und EN 1995-1-1.
- Querschnittsanalyse für polygonale Stabquerschnitte; Profildatenbank.
- Eigenwertermittlung, Zeitschrittintegration, dynamische Zugüberfahrt, nichtlineare Seildynamik.
- Antwortspektrenverfahren für den Erdbebennachweis nach DIN 4149, EN 1998-1, ÖNORM B 4015 und SIA 261.
- Thermische Berechnung von Stahl-, Holz-, Stahlbeton- und Verbundquerschnitten. Stabilitätsnachweise im Brandfall gemäß EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 und EN 1995-1-2.
- Vorspannung von Stab- und Flächentragwerken sowie Volumenmodellen.
- Spannbetonnachweise nach DIN 4227, DIN 1045-1, ÖNORM B 4750, SIA 262 und EN 1992-1-1.
- Brückennachweise nach DIN Fachbericht 102 und EN 1992-2.
- Brückennachrechnung gemäß Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken.
- Behandlung von Bauzuständen.
- Datenaustausch über DXF-, IFC-, Stahlbau- und Bewehrungsschnittstellen.

Modellaufbereitung, Berechnungssteuerung und Ergebnisausgabe erfolgen bei allen Tragwerkstypen in einer einheitlichen 3D-CAD-Oberfläche, die mit den typischen Windows-Funktionalitäten ausgestattet ist.

InfoCAD verwaltet die Tragwerke in sogenannten Projektdateien. Die Informationen innerhalb einer Projektdatei sind in Datensätzen geordnet. Auf diese hat der Benutzer über die Graphikansicht, die Tabellenansicht und die Sonderfunktion *Dateiservice* im Datei-Menü Zugriff.

Über das Tragwerk-Menü wird der Tragwerkstyp für die Projektdatei festgelegt und durch eine Dateiergänzung (FEM etc.) gekennzeichnet. In der Projektdatei kann jeweils **ein** statisches System der folgenden Tragwerkstypen gespeichert sein:

- Finite Element System (FEM)
- Räumliches Stabwerk (RSW)
- Ebenes Stabwerk (ESW)
- Rotationsschale (ROS)

Zum statischen System gehören die eingegebenen Strukturdaten wie Stäbe, Flächenelemente, Spannstränge, Querschnittswerte usw. mit den zugehörigen Lasten. Die Rechenmodule ermitteln Verformungen, Schnittgrößen, Auflager- und Bodenreaktionen und speichern diese zusammen mit den Nachweisprotokollen ebenfalls in der Projektdatei. Dort stehen dann alle Ergebnisse für die Ausgabe und Weiterverarbeitung zentral zur Verfügung.

Daneben erlaubt das Programm, Hilfszeichnungen und Erläuterungstexte zu erstellen und ebenfalls in der Projektdatei zu speichern.

## Hinweis

Die Dokumentation der Nachweise gemäß DIN 1045, DIN 1045-1, DIN 4227, DIN 1052, DIN 18800, ÖNORM B 4700 und ÖNORM B 4750 ist auf die Online-Hilfe beschränkt.

# Installation und Konfiguration

## Lizenzierung

Das Programmsystem kann entweder als Einzelplatzlizenz oder als Netzwerklizenz genutzt werden. Jede Lizenz ist durch einen Software-Schutzstecker (Hardlock) geschützt. Der aktuelle Lizenzumfang kann am Arbeitsplatz in den Lizenzinformationen (Hilfe-Menü) überprüft werden. In der Oberfläche werden nicht lizenzierte Funktionen gesperrt.

### Einzelplatzlizenz

Bei Einzelplatzlizenzen wird an jeder Arbeitsstation ein Software-Schutzstecker benötigt. Eine Nutzung über Remoteverbindungen wird nicht unterstützt. Wenn mehrere Arbeitsplätze mit unterschiedlichem Lizenzumfang ausgestattet sind, gehört zu jeder Ausstattung ein eigener Schutzstecker.

### Netzwerklizenz

Bei Netzwerklizenzen wird an den Arbeitsstationen kein Softwareschutz benötigt. Die Verwaltung der Lizenzen erfolgt durch den InfoGraph Lizenzmanager, der zusammen mit einem speziellen Netzwerk-Schutzstecker auf einem zentralen Lizenzrechner installiert wird. Die Programmanwender können die Software an beliebigen Arbeitsplätzen im Netzwerk nutzen.

## Einzelplatzlizenz

### Installation

InfoCAD kann auf Windows Betriebssystemen ab Version 7 installiert werden. Für alle Installationen sind Administratorrechte erforderlich.

Nach dem Einlegen der Programm-CD startet Windows automatisch das Installationsprogramm. Alternativ kann *Setup.exe* direkt auf der CD ausgeführt werden. Für jede Installation wird eine benutzereigene Lizenznummer benötigt, die auf der Rückseite der CD-Box vermerkt ist.

Aus dem Installationsmenü sind folgende Funktionen aufzurufen:

- *Hardlock-Treiber installieren.*  
Dieser Gerätetreiber wird für die Funktion des Software-Schutzsteckers benötigt.
- *InfoCAD installieren.*  
Als Zielordner für die lokale Installation wird „C:\Programme\InfoGraph“ vorgeschlagen. Im Zielordner werden die Anwendungs-, Hilfe- und Beispieldateien gespeichert.

## Programmstart

Vor dem ersten Programmstart muss der Software-Schutzstecker an eine freie Schnittstelle angeschlossen werden. Anschließend können die Anwendungen über Verknüpfungen im Windows-Startmenü aufgerufen werden. Diese sind im Einzelnen:

- *InfoCAD*  
Das Programmsystem für die Tragwerksbearbeitung.
- *Systemviewer*  
Einzelprogramm zur realitätsnahen Systemdarstellung und Animation von Ergebnissen.
- *InfoGraph Rissbreitenbeschränkung*  
Einzelprogramm für den Nachweis nach DIN 1045-1, ÖNORM B 4700, SIA 262 und EN 1992-1-1.
- *InfoGraph Biegedrillknicknachweis*  
Einzelprogramm für den Nachweis nach DIN 18800, Teil 2 und EN 1993-1-1.

## Benutzerkonfiguration

Die benutzerspezifischen Einstellungen werden in folgenden Dateien verwaltet:

### IGRAPH.DAT

In dieser Systemdatei sind Grundeinstellungen der Rechenprogramme, benutzerdefinierte Seitenrahmen und weitere Einstellungen für die Druckausgabe gespeichert. Sie wird automatisch beim ersten Aufruf von InfoCAD im Ordner „C:\Users\name\AppData\Roaming\InfoGraph“ angelegt, wobei „name“ den Anmeldenamen des Benutzers repräsentiert. Diese Verzeichnisse tragen das Attribut „versteckt“ und werden nur angezeigt, wenn dies in den Ordneroptionen ausgewählt wurde. InfoCAD bietet im Extras-Menü Funktionen zum Export und Import der Systemdatei.

### ANWEND.PRO

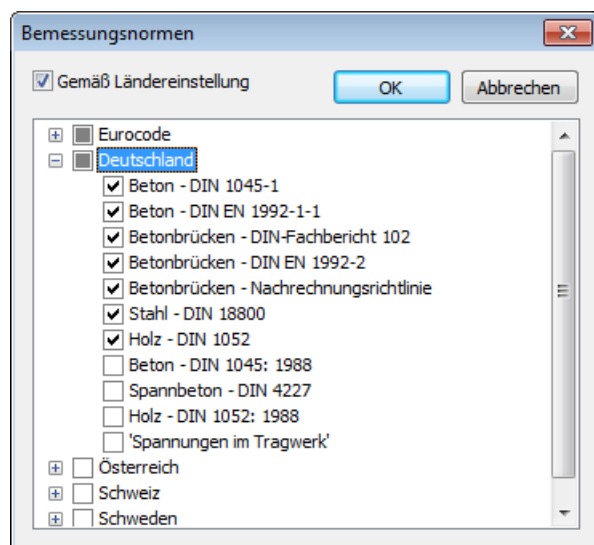
Die Anwenderdatenbank dient zum Speichern benutzerdefinierter Stabquerschnitte. Sie wird im Unterordner „Dokumente-InfoGraph“ des Benutzers angelegt.

Wenn alle Benutzer mit denselben Einstellungen arbeiten sollen, müssen diese Dateien vom Administrator manuell ins Programmverzeichnis kopiert werden. Änderungen an den Einstellungen sind dann nicht mehr möglich.

## Sprachauswahl

Die Auswahl der Dialogsprache wird während der Installation angeboten. Sie kann jederzeit über das Extras-Menü geändert werden. Die Ausgabe von Berechnungsprotokollen und Ergebnisdarstellungen wird an die Dialogsprache angepasst.

## Bemessungsnormen



Die in der Oberfläche angebotenen Bemessungsnormen sind entsprechend der Ländereinstellung des Betriebssystems voreingestellt. Über das Extras-Menü kann die Auswahl jederzeit geändert werden.

## Seitenrahmen

Der für die Druckausgabe benutzte Seitenrahmen kann im Druckdialog ausgewählt werden. Die zur Auswahl angebotenen Rahmen lassen sich mit Ausnahme des Standard-Rahmens über die Funktion *Seitenrahmen* im Extras-Menü gestalten und ergänzen.

## Aktualisierung

Die Aktualisierung (Update) des Programmsystems erfolgt in der gleichen Weise wie die Erstinstallation. Die benutzerspezifischen Konfigurationsdateien und Einstellungen bleiben dabei erhalten.

## Deinstallation

Zum Entfernen des Programmsystems von der Festplatte wird über die Funktion *Programme* der Windows Systemsteuerung das automatische Deinstallationsprogramm für InfoCAD aufgerufen. Alle vom Anwender erzeugten Dateien bleiben dabei erhalten.

## Netzwerklicenz

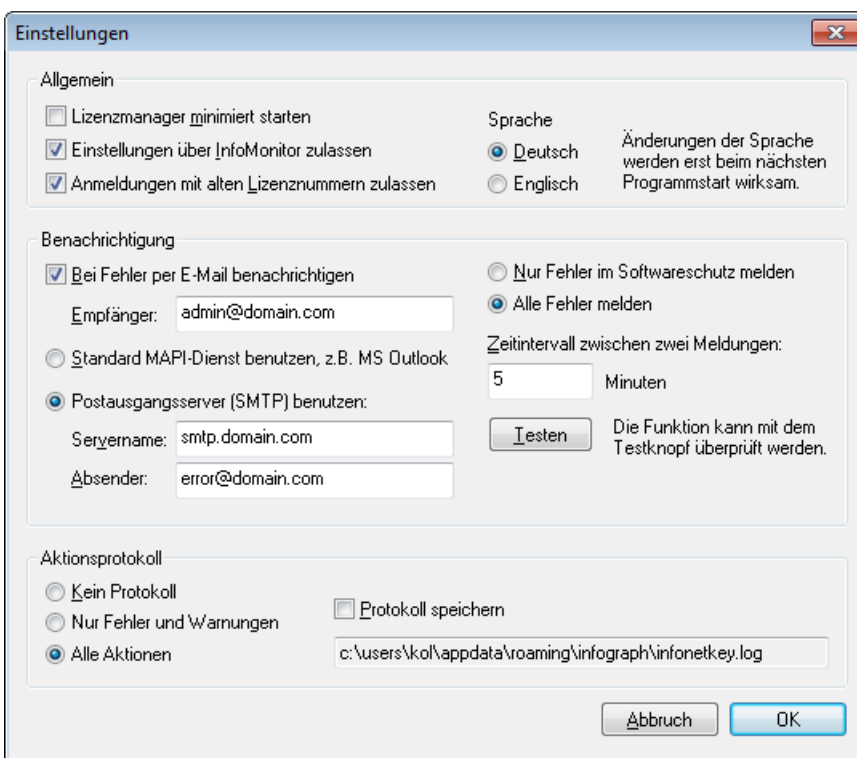
Die Installation und Konfiguration von Netzwerklicenzen sollte vom Netzwerkadministrator vorgenommen werden.

## Netzwerkconfiguration

- Als Lizenzrechner können Windows Server oder Workstations eingesetzt werden.
- Auf Workstations ist die Anzahl der Benutzer systembedingt auf 10 beschränkt.
- Auf dem Lizenzrechner müssen die Netzwerkdienste „*Client für Microsoft-Netzwerke*“ und „*Datei- und Druckerfreigabe für Microsoft-Netzwerke*“ installiert sein. Die Firewall muss den Zugriff auf das Dateisystem erlauben, da die Kommunikation über sog. *Named Pipes* erfolgt.
- Die Programmanwender müssen auf dem Lizenzrechner als Benutzer zugelassen sein. Alternativ muss das Gastkonto aktiviert (s. Windows-Funktion *Systemsteuerung/Verwaltung/Computerverwaltung/Lokale Benutzer und Gruppen/ Benutzer/Gast* ) und die „*Kennwortgeschützte Freigabe*“ ausgeschaltet sein.
- Auf der Arbeitsstation muss der Netzwerk-Dienst „*Client für Microsoft-Netzwerke*“ installiert sein.

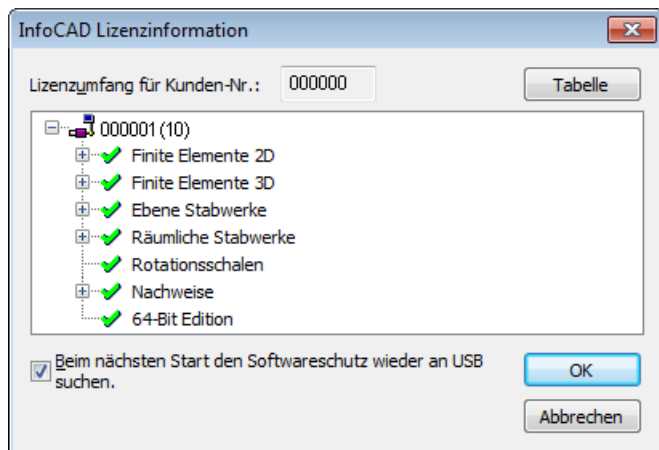
## Schritte auf dem Lizenzrechner

- Netzwerk-Schutzstecker an die USB-Schnittstelle anschließen.
- Hardlock-Treiber installieren. Hierzu sind Administratorrechte erforderlich. Die Installation erfolgt entweder aus dem Installationsmenü oder mit *admin\HASPUserSetup.exe* von der CD.
- Lizenzmanager installieren. Hierzu sind Administratorrechte erforderlich. Die Installation erfolgt entweder aus dem Installationsmenü oder mit *admin\setup.exe* von der CD.
- Auswählen, ob der Lizenzmanager als Anwendung oder als Dienst gestartet werden soll. Der Start als Anwendung erfolgt über die Autostart-Programmgruppe und erfordert eine Windows-Benutzeranmeldung.
- Einstellungen im Lizenzmanager vornehmen



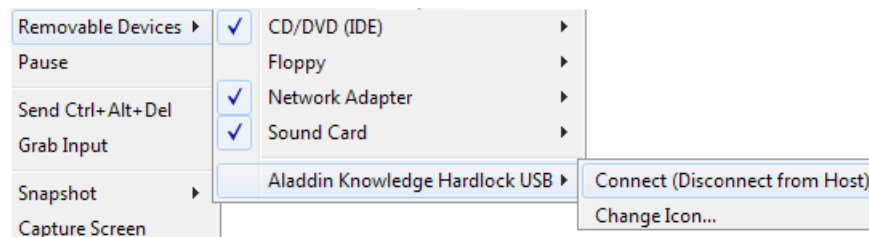
Wenn der Lizenzmanager als Dienst gestartet wird, kann er selbst keinen Dialog führen. Die Einstellungen erfolgen dann mit Hilfe des Programms *InfoMonitor.exe*, das zusammen mit dem Lizenzmanager installiert wird.

- Der Funktionsumfang der Netzwerklicenzen kann im Dialog *Lizenzinformation* überprüft werden.



## Virtualisierte Server unter VMware

Wenn der Lizenzmanager auf einem virtualisierten Server betrieben wird, muss der USB-Schutzstecker vom Hostsystem logisch getrennt und der virtuellen Maschine exklusiv zugewiesen werden. Beim Systemstart sollte die Zuweisung automatisch erfolgen.



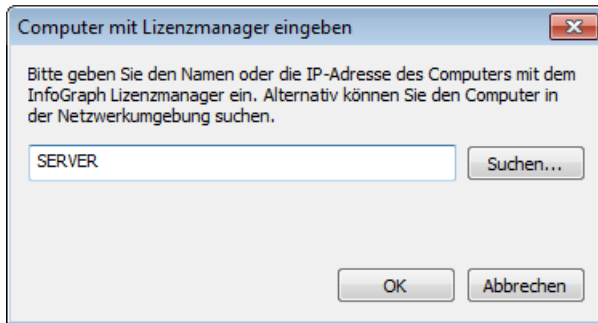
VMware Einstellungsdialog

## Schritte auf der Arbeitsstation

- Bei zentraler Installation von InfoCAD auf einem Fileserver:
  - Auf der Arbeitsstation ist keine weitere Installation erforderlich.
  - Verknüpfung mit den Anwendungsdateien *Infocadw.exe* bzw. *Infocadw64.exe*, *Infocadgl.exe* bzw. *Infocadgl64.exe*, *Bdkn.exe* und *Risse.exe* herstellen und bei Bedarf die InfoCAD-Dateitypen manuell registrieren.
  - Zur Anzeige der Miniaturansichten im Windows Explorer muss die passende DLL (*infoshex.dll* bzw. *infoshex64.dll*) aus dem Admin-Ordner der CD auf die Arbeitsstation kopiert und anschließend mit dem Konsolenbefehl `regsvr32 "drive:\path\name.dll"` registriert werden. Dieser Befehl muss als Administrator ausgeführt werden.
- Bei lokaler Installation:
  - InfoCAD auf der Arbeitsstation installieren. Hierzu sind Administratorrechte erforderlich.
  - Sicherstellen, dass alle Arbeitsstationen dieselbe zum Lizenzmanager passende Programmversion benutzen.

## Programmstart

Beim ersten Start von InfoCAD ist der Name oder die IP-Adresse des Computers mit dem Lizenzmanager einzugeben. Alternativ kann der betreffende Computer in der Netzwerkumgebung gesucht werden.



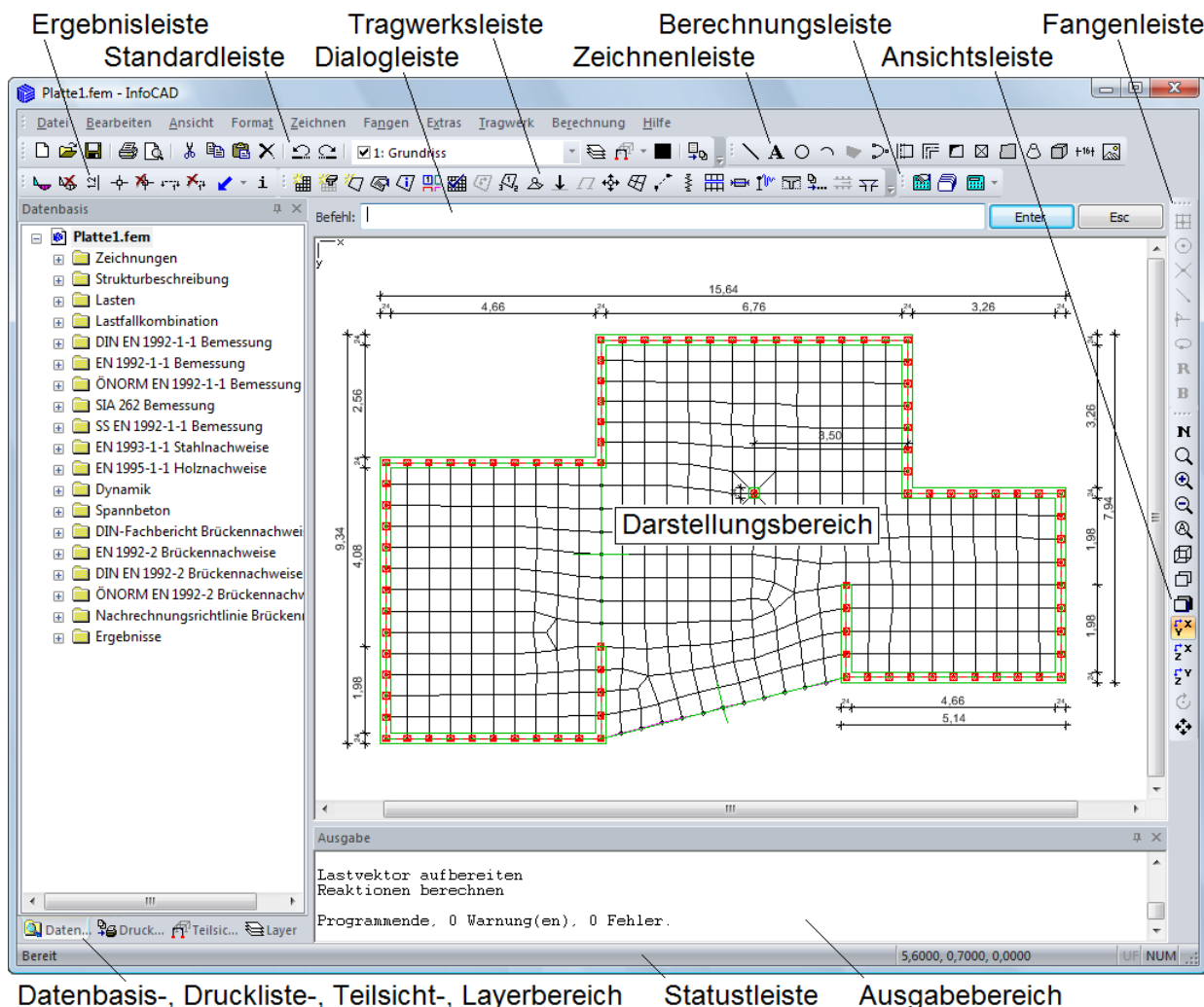
Die weitere Konfiguration ist dann wie für die Einzelplatzlizenz vorzunehmen.



# Bedienoberfläche

## Steuerelemente

Nachfolgend ist die Oberfläche nach dem Öffnen einer Projektdatei dargestellt.



## Standardleiste

In der Standardleiste sind wichtige Funktionen der Menüs Datei und Bearbeiten enthalten. Zusätzlich lassen sich die Layer-Funktion, Teilsicht-Funktion, die Farbauswahl und die Übertragung der aktuellen Ansicht in die Druckliste steuern.

## Zeichnenleiste, Fangenleiste, Ansichtleiste

Diese Symbolleisten enthalten Funktionen zur Erstellung von Zeichnungen, die Fangfunktionen zur Auswahl von Objektpunkten sowie weitere Funktionen zum Einstellen des Bildausschnitts.

## Tragwerksleiste, Berechnungleiste, Ergebnisleiste

Die Tragwerksleiste enthält die Funktionen des Tragwerksmenüs. Über die Berechnungleiste werden Funktionen des Berechnungsmenüs aufgerufen. Die Ergebnisleiste bietet Sonderfunktionen für die Ergebnisdarstellung.

## Statusleiste

Im linken Teil der Statusleiste werden Informationen zur gewählten Funktion ausgegeben. Im rechten Teil werden die Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [m] der Fadenkreuzmitte bzw. des zuletzt eingegebenen Punkts angezeigt. Durch Anklicken mit der Maus kann auf laufende Koordinatenanzeige umgeschaltet werden.

## Datenbasisbereich

Die Datenbasis stellt in einem Baum alle Eingabedaten und Berechnungsergebnisse des Projekts dar und erlaubt es, ausgewählte Daten im Darstellungsbereich graphisch oder tabellarisch wiederzugeben. Zusätzlich können über das Kontextmenü markierte Bereiche ausgedruckt und in die Druckliste übertragen werden.

## Drucklistebereich

In der Druckliste werden graphische und tabellarische Darstellungen gespeichert. Diese können später mit ihren ursprünglichen Einstellungen wieder aufgerufen und einzeln oder gruppenweise ausgedruckt werden. Darin enthaltene Ergebnisse werden automatisch aktualisiert.

## Layerbereich

In diesem Bereich wird die Layer-Funktionalität angezeigt und bedient. Durch die Layertechnik lassen sich graphische Objekte logisch gliedern, um diese z.B. getrennt bearbeiten zu können.

## Teilsichtbereich

Dieser Bereich zeigt die vorhandenen Teilsichten mit ihrem Status, sowie zugehörige Bedienelemente. Teilsichten bieten eine alternative Möglichkeit zur logischen Gliederung der graphischen Objekte.

## Darstellungsbereich

Der Darstellungsbereich zeigt entweder die Graphik- oder die Tabellenansicht des aktiven Projekts.

## Graphikansicht

In der Graphikansicht werden die Objekte in Grundriss, Aufriss oder 3D-Perspektive abgebildet. Die Darstellungsebene (Fenster) und der Bildausschnitt sind frei wählbar. Während der Bearbeitung kann der Mauszeiger verschiedene Formen annehmen:



Mit der linken Maustaste können Objekte durch Anklicken oder Aufziehen eines Fensters markiert werden. Wird das Fenster von links nach rechts aufgezogen, werden nur Objekte ausgewählt, die sich vollständig im Fenster befinden. Wird dagegen das Fenster von rechts nach links aufgezogen, werden zusätzlich alle Objekte markiert die vom Fenster angeschnitten werden. In Verbindung mit der Umschalt- und Steuerungstaste lässt sich die Auswahl erweitern oder verringern. Über die rechte Maustaste wird zusätzlich ein Kontextmenü aufgerufen. Durch Doppelklick auf Objekte wird der Eigenschaftsdialog gestartet.



Kennzeichnet eine direkte Transferoperation bei gedrückter linker Maustaste.



Mit dem Fadenkreuz werden durch Klicken der linken Maustaste Koordinaten graphisch eingegeben.



Das Fadenkreuz mit Fangfenster dient zum Auswählen von Objekten in laufenden Dialogen. In Verbindung mit den Objektfangmethoden werden Referenzpunkte von Objekten für die Koordinateneingabe genutzt.



Mit diesem Mauszeiger kann im 3D-Modus die Darstellung in beliebige Richtungen gedreht werden.



Mit diesem Mauszeiger wird der Bildausschnitt verschoben.



Dieses Symbol erscheint, wenn im Darstellungsbereich keine Funktion ausgeführt werden kann.

Für markierte Objekte werden Farbe und Layer in der Standardleiste angezeigt.

## Tabellenansicht

Die Tabellenansicht ermöglicht zusätzliche alphanumerische Ein- und Ausgaben und bietet die folgende Funktionalität:

- Eingabe und Änderung von Tragwerkseigenschaften in tabellarischer Form,
- Definition von Berechnungsvorgaben,
- Anzeige von Berechnungsprotokollen,
- Tabellarische Anzeige von Ergebnissen.

Für die Tabellen stehen in den Menüs folgende Sonderfunktionen zur Verfügung:

<i>Suchen...</i>	Sucht den angegebenen Text.
<i>Ersetzen...</i>	Ersetzt einen bestimmten Text durch einen anderen.
<i>Gehe zu...</i>	Geht zur angegebenen Zeile (Nummer).
<i>Standardansicht</i>	Wählt die bevorzugte Ansicht. Bei Kombinationsergebnissen wird in einer Tabellenzeile ein Reaktionspaar (z.B. Nx min, zugh. My, zugh. Mz, ...) eines Berechnungsortes ausgegeben.
<i>Eine Zeile je Berechnungsort</i>	Wählt eine Ansicht von Kombinationsergebnissen, in welcher in einer Zeile der Tabelle alle Reaktionen eines Berechnungsortes ausgegeben werden.
<i>Auswahl anzeigen...</i>	Startet den Dialog zur Filterung der Ergebnisdarstellung.
<i>Schriftart ...</i>	Wählt die Schriftart für die aktuelle Auswahl.
<i>Aufzählungszeichen</i>	Fügt in die markierten Zeilen ein Aufzählungszeichen ein.
<i>Zeilenumbruch</i>	Der Zeilenumbruch bewirkt, dass Sie den gesamten Text auf dem Bildschirm sehen können, hat jedoch keinen Einfluss auf das Erscheinungsbild des gedruckten Textes.
<i>Absatz...</i>	Startet den Dialog zur Festlegung der Einzüge und der Ausrichtung der markierten Absätze.
<i>Tabstopps...</i>	Die Funktion startet den Dialog zur Festlegung der Tabstopps in einem markierten Absatz.
<i>Kleine Druckerschrift</i>	Wählt für die Tabellenausgabe eine kleine Druckerschrift.
<i>Querschnittsspannungen...</i>	Startet den Dialog zur Anzeige der Querschnittsspannungen der markierten Stabschnittgrößen.

Tabelleninhalte und Berechnungsprotokolle lassen sich über die Zwischenablage an andere Programme exportieren. Die Berechnungsprotokolle werden bei jedem Berechnungslauf neu erzeugt und können durch textuelle Erläuterungen ergänzt werden.

## Auswahl anzeigen

Mit diesem Dialog kann die Tabellenanzeige von Ergebnissen auf bestimmte Objekte beschränkt werden.

### Aktive Objekte des Grafikfensters

Es werden nur Tabelleninhalte für Objekte auf eingeschalteten Layern bzw. Teilsichten angezeigt.

Durch Markierung von Knoten wird die Anzeige weiter eingeschränkt.

### Markierte Objekte des Grafikfensters

Es werden nur Tabelleninhalte für markierte Objekte angezeigt. Durch zusätzliche Markierung von Knoten wird die Anzeige weiter eingeschränkt.

### In der Druckliste gespeicherte Auswahl

Die Auswahl stammt aus der Druckliste und ist unabhängig vom aktuellen Grafikfenster.

## Ausgabebereich

In dem Ausgabebereich zeigen die Berechnungs- und Nachweisprogramme ihren Programmfortschritt an. Inhalte des Ausgabebereiches können markiert und über das Kontextmenü kopiert oder gedruckt werden.

Bei Doppelklick auf Warnungen oder Fehlermeldungen der Berechnungsmodule wird das betreffende Objekt (*Lastfall*, *Lastzeile*, *Stab*, *Element* und *Knoten*) in der Graphik- bzw. Tabellenansicht markiert und der Bildausschnitt auf das Objekt zentriert.

## Eigenschaftenbereich

In dem Bereich werden BIM-Eigenschaften von markierten IFC-Objekten angezeigt.

## Dialogleiste

Die aus dem Menü gewählten Funktionen bieten weitere Eingaben innerhalb der Dialogleiste an, die folgendermaßen unterschieden werden:



Die angebotenen Schaltflächen können mit der linken Maustaste bedient werden.



Im Eingabefeld ist die Dateneingabe über die Tastatur zugelassen. Falls die Schreibmarke nicht im Eingabefeld steht, muss sie durch Klicken dorthin versetzt werden. Alle Eingaben werden mit der Enter-Schaltfläche oder der Enter-Taste abgeschlossen. Über die rechte Maustaste ist ein Kontextmenü verfügbar.

Mit der Esc-Schaltfläche oder der Esc-Taste können Dialoge abgebrochen werden.

## Koordinateneingabe

Objektkoordinaten werden in InfoCAD mit drei Komponenten gespeichert. Sie können sowohl mit dem Fadenkreuz als auch über die Tastatur eingegeben werden.

Die Fadenkreuzeingabe erfolgt im Darstellungsbereich. In der 2D-Darstellung wird dabei die dritte Komponente mit der für das Fenster definierten Konstanten festgelegt, d.h. zum Beispiel im xy-Fenster der konstante z-Wert. Objektpunkte in der Nähe des Fadenkreuzes werden automatisch gefangen. Der wirksame Fangradius wird im Fangen-Menü eingestellt.

Bei der Tastatureingabe in der Dialogleiste werden die einzelnen Komponenten in der Einheit Meter eingegeben und durch Leerzeichen voneinander getrennt. Das Dezimaltrennzeichen ist entsprechend den Ländereinstellungen des Betriebssystems einzugeben. Über Funktionen im Fangen-Menü kann für die Eingabe ein lokales Bezugssystem definiert werden.

Es sind folgende Eingabevarianten möglich:

### Kartesische Koordinaten

In der 2D-Darstellung werden die ersten beiden Werte den Achsen des Fensters zugeordnet, also z.B. x und z. Als dritte Komponente wird die für das Fenster definierte Konstante benutzt. In der 3D-Darstellung gilt bei der Eingabe immer die Reihenfolge x, y, z. Mit dem &-Zeichen können relative Koordinaten definiert werden, die sich auf den jeweils letzten Punkt beziehen.

Beispiel: Im xy-Fenster liefert die Eingabe „& 1,55 3,05“ einen Punkt mit  $\Delta x=1,55$  und  $\Delta y=3,05$  bezogen auf den letzten Punkt.

### Zylinderkoordinaten

Bei ebener Darstellung werden Radius [m] und Drehwinkel [°] gegen die horizontale Achse eingegeben (also Polarkoordinaten). In der 3D-Darstellung sind Radius, Drehwinkel gegen die x-Achse und z-Komponente notwendig. Die Winkel sind rechtsdrehend positiv definiert.

Beispiel: In der 3D-Darstellung liefert die Eingabe „1,4142 <45 1“ die kartesische Koordinate (1 1 1).

In der rechten Hälfte der Statusleiste werden die Koordinaten x, y, z der Fadenkreuzmitte bzw. des zuletzt eingegebenen Punkts angezeigt. Durch Anklicken mit der Maus kann auf fortlaufende Anzeige umgeschaltet werden.

## Arithmetik

Numerische Eingaben im Dialogbereich können in Form von arithmetischen Ausdrücken angegeben werden. Die Ausdrücke können aus Konstanten und Variablen bestehen. Sie dürfen durch Klammern gegliedert werden, jedoch keine Leerzeichen enthalten. Die Argumente der Funktionen müssen in Klammern stehen.

### Operatoren

+ Addition  
- Subtraktion  
\* Multiplikation  
/ Division  
\*\* Potenzieren








### Funktionen

SIN	Sinus von Gradmaß	ABS	Betrag
COS	Kosinus von Gradmaß	SQRT	Quadratwurzel
TAN	Tangens von Gradmaß	EXP	e-Funktion
ASIN	Arkussinus	LOG	Natürlicher Logarithmus
ACOS	Arkuskosinus	LOG10	10-er Logarithmus
ATAN	Arkustangens		

Beispiel:  $1,50 * \sin(30)$  liefert den Wert 0,75.

## Datei

Das Datei-Menü beinhaltet Funktionen zur Verwaltung der Projektdateien. Neben dem Tragwerk kann die Projektdatei beliebig viele Zeichnungen enthalten. Diese bestehen nur aus Zeichnungsobjekten und lassen sich mit eigenen Funktionen öffnen und speichern. Um Zeichnungen ohne das Tragwerk bearbeiten zu können, muss die Projektdatei mit der Funktion *Zeichnung Öffnen* geöffnet werden.

	<i>Neu</i>	Mit einem neuen Tragwerk beginnen. Die aktuelle Projektdatei wird geschlossen.
	<i>Öffnen...</i>	Eine bestehende Projektdatei öffnen. Das Tragwerk wird automatisch geladen und dargestellt.
	<i>Speichern</i>	Die aktuelle Projektdatei speichern.
	<i>Speichern unter...</i>	Alle Eingabedaten des aktuellen Projekts unter einem neuen Namen speichern.
	<i>Kopie speichern...</i>	Alle Eingabedaten des aktuellen Projekts unter einem neuen Namen speichern. Das aktuelle Projekt bleibt geöffnet.
	<i>Bauzustand...</i>	Bauzustand erzeugen bzw. auswählen.
	<i>Zeichnung</i>	<i>Neu</i> Neue Zeichnung erstellen. Die aktuelle Zeichnung wird geschlossen. <i>Öffnen</i> Vorhandene Zeichnung öffnen. <i>Speichern</i> Aktuelle Zeichnung speichern. <i>Speichern unter</i> Aktuelle Zeichnung unter einem neuen Namen speichern. <i>Bild erzeugen</i> 2D-Zeichnung von der aktuellen Bildschirmdarstellung erzeugen.
	<i>Drucken...</i>	Graphischer Ausdruck der aktuellen Bildschirmdarstellung.
	<i>Seitenansicht</i>	Vorschau der auszudruckenden Seiten.
	<i>Seite einrichten...</i>	Seitengestaltung für den graphischen Ausdruck.
	<i>In Druckliste einfügen</i>	Fügt das aktive Dokument in die Druckliste ein.
	<i>Import</i>	Eine Projektdatei und andere Datenformate importieren.
	<i>Export</i>	Eine Projektdatei oder andere Datenformate exportieren.
	<i>Dateiservice</i>	Datensätze der Projektdatei anzeigen und bearbeiten.
	<i>1 - 8</i>	Eine der acht zuletzt benutzten Projektdateien öffnen.
	<i>Senden...</i>	Die aktuelle Projektdatei per E-Mail versenden. Die Funktion ist nur verfügbar, wenn ein Windows-Mail-Dienst installiert ist, z.B. MS-Outlook.
	<i>Nur Eingabedaten</i>	Schalter für das Senden von Projektdateien per E-Mail. Bei Beschränkung auf die Eingabedaten wird die Dateigröße in der Regel erheblich reduziert.
	<i>Beenden</i>	Die aktuelle Projektdatei wird geschlossen und das Programm beendet.

## Bauzustand

Die Funktion *Bauzustand* unterstützt die Berechnung von Tragwerken, bei denen verschiedene Bauabschnitte untersucht werden sollen. Sie hat folgende Grundlagen:

1. Das Berechnungsmodell jedes Bauzustandes wird in einer eigenen Projektdatei gespeichert.
2. Die Namen der zusammengehörenden Projektdateien sind bis auf eine laufende Nummer identisch. Die Datei des ersten Bauzustands ist mit der Nummer (1) zu benennen (z.B.: „*System(1).fem*“). Erst dann ist die Funktion aktiv.
3. Der Zusammenhang der Projektdateien wird durch ein vom Programm vergebenes Merkmal sichergestellt. Es ist daher nicht sinnvoll, unter Umgehung des Programms, Bauzustände einzufügen oder zu löschen.
4. Die Erzeugung eines neuen Bauzustandes geschieht programmseitig durch die Übernahme des aktuellen Systems, mit Ausnahme der Lastfälle. Zusätzlich werden in dem neuen Bauzustand noch die Nummern der „geerbten“ Elemente, Knoten, Festhaltungen und Spannstränge sowie die im Vorgängersystem vorhandenen Lastfälle vermerkt. Für „geerbte“ Spannstränge wird der Schalter *In Lastart Vorspannung ignorieren* gesetzt.
5. Im neuen Bauzustand können Tragwerksteile beliebig abgebaut oder hinzugefügt werden. Die aus den vorhergehenden Zuständen vermerkten Objektnummern sind dabei geschützt.
6. Die Querschnitts- und Materialeigenschaften übernommener Elemente dürfen geändert werden.
7. Es können beliebig viele neue Lastfälle definiert werden (vermerkte Lastfallnummern sind geschützt) .
8. Die Einstellungen bezüglich der Anzahl der Berechnungsorte in den Stäben und der Berechnungsorte in den Flächenelemente müssen in allen Bauzuständen identisch sein.

9. Vor jedem Berechnungslauf (Finite Elemente oder Stabwerksberechnung) werden die Ergebnisse aus den Lastfällen des Vorgängersystems in das aktuelle System übernommen. Hierbei werden nur die vermerkten Objekte berücksichtigt (siehe 4.). Im Einzelnen betrifft dies:
- Knotendeformationen (DEFORM.\*)
  - Stabdeformationen (ELDEF.\*)
  - Auflagerreaktionen (AUFLR.\*)
  - Deformationen im Auflagersystem (AUFLDEF.\*)
  - Schnittgrößen der Stäbe (SREAK.\* bzw. LERG.\*)
  - Schnittgrößen der Flächen- und Spannungen der Volumenelemente (REAK.\*)
  - Bodenpressungen (SIGB.\*)
  - Resultierende Bodenpressungen (SIGRB.\*)
  - Spannstrangkkräfte aus Kriechen und Schwinden (VSPZV.\*)
10. Die übernommenen Ergebnisse stehen in gewohnter Form zur Weiterverarbeitung bereit. Dies wären z.B. die Superposition oder die Kombination mit anderen Lastfällen.

Nachfolgend sind die Schaltflächen des Dialogs *Bauzustand* erläutert:

### Schließen

Den Dialog beenden.

### Neu

Hinter dem offenen und markierten Bauzustand einen neuen einfügen.

### Öffnen

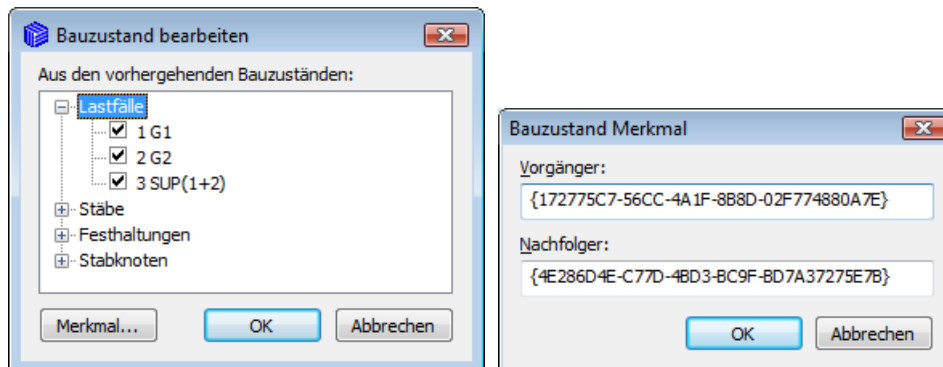
Den markierten Bauzustand öffnen.

### Löschen

Die markierten Bauzustände, welche dem offenen folgen, löschen. Die Löschungen sind endgültig. Es erfolgt eine Sicherheitsabfrage.

### Bearbeiten

Den markierten Bauzustand bearbeiten.



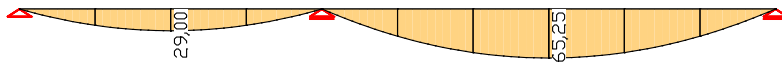
Der linke Dialog zeigt die Lastfälle und Tragwerksobjekte, für die bei jedem Berechnungslauf die Ergebnisse aus den vorhergehenden Bauzuständen übernommen werden. Bei Erzeugung eines neuen Bauzustandes werden automatisch Markierungen für alle Lastfälle und Tragwerksobjekte gesetzt, die zu diesem Zeitpunkt vorhanden sind. Falls in vorhergehenden Bauzuständen nachträglich Lastfälle ergänzt wurden, erfolgt eine Übernahme der Ergebnisse in den aktuellen Bauzustand nur dann, wenn die neuen Lastfälle hier markiert werden. Ergebnisse eines neuen Tragwerksobjekts können nur übernommen werden, wenn dieses im aktuellen Bauzustand mit derselben Nummer vorhanden ist und es zur Übernahme markiert wurde.

Der rechte Dialog zeigt die Merkmale, über die der aktuelle Bauzustand mit seinem Vorgänger und seinem Nachfolger verkettet ist. Dieses Merkmal wird von InfoCAD automatisch für jede Projektdatei festgelegt und bleibt auch nach Umbenennen der Datei erhalten. Durch Ersetzen des Merkmals für Vorgänger oder Nachfolger kann ein Bauzustand aus der Kette entfernt oder dieser hinzugefügt werden.

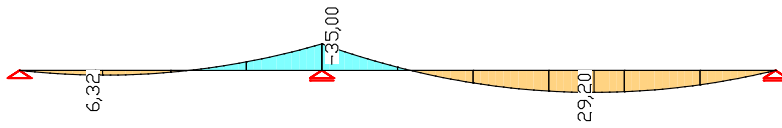
**Die Anwendung dieser Funktionen sollte auf Ausnahmefälle beschränkt bleiben. Sie kann zu Überschneidungen von Lastfall-, Element- und Knotennummern und in Folge zu einer unerwünschten Vermischung von Ergebnissen führen. Die Kontrolle der Überschneidungsfreiheit obliegt dem Anwender.**

### Beispiel 1: Träger

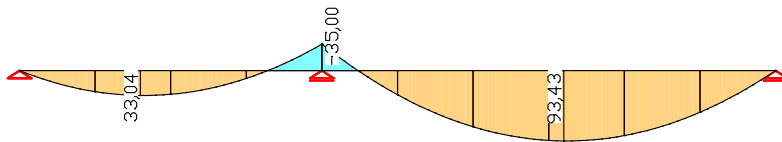
In diesem Beispiel werden zwei Einfeldträger nachträglich verbunden. Das Beispiel wird im Abschnitt „Finite Elemente / Beispiele / Bauzustände, Kriechumlagerungen“ ausführlich erläutert.



Schnittgrößen  $M_y$  am Bauzustand 1 infolge Eigenlast



Schnittgrößen  $M_y$  am Bauzustand 2 infolge Ausbaulast

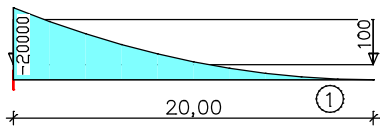


Summe der Schnittgrößen  $M_y$  aus Bauzustand 1 und 2 (Lastart Superposition)

### Beispiel 2: Brücke mit Hilfsstütze

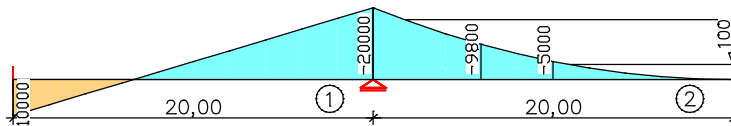
In diesem Beispiel wird eine Brücke mit einer Hilfsstütze gezeigt. Vereinfacht werden nur die folgenden drei Bauzustände betrachtet:

1. Eingespannter Kragarm kurz vor Erreichen der Hilfsstütze



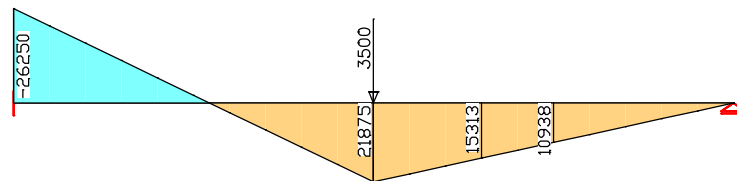
Schnittgrößen  $M_y$  am Bauzustand 1 infolge  $G_1$

2. Brücke kurz vor Erreichen des Endauflagers

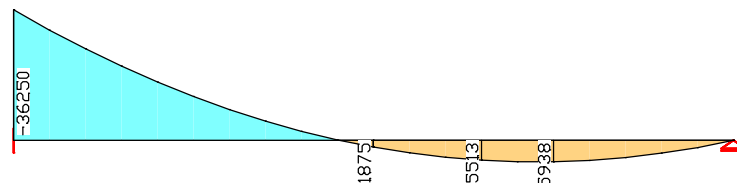


Schnittgrößen  $M_y$  am Bauzustand 2 infolge  $G_2$

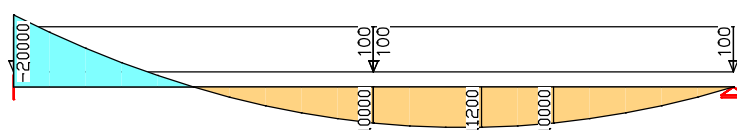
3. Brücke nach Entfernen der Hilfsstütze



Schnittgrößen  $M_y$  am Bauzustand 3 infolge Entfernens der Hilfsstütze



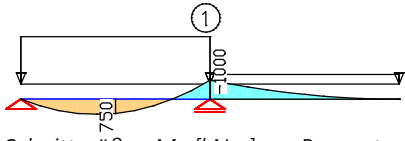
Summe der Schnittgrößen  $M_y$  aus Bauzustand 1 bis 3 (Lastart „SUP“)



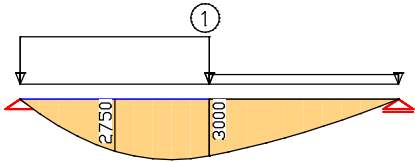
Zum Vergleich die am Endzustand berechneten Schnittgrößen  $M_y$  infolge  $G$

**Beispiel 3: Taktschiebebrücke**

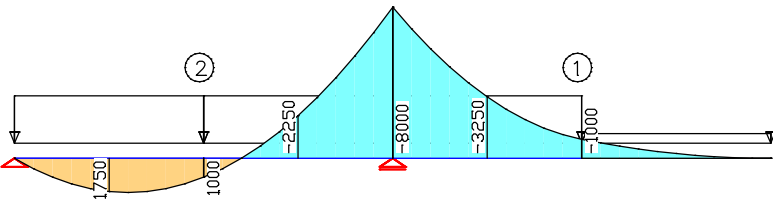
In diesem Beispiel wird eine Brücke mit Vorbau schnabel zum Endauflager geschoben. Anders als im Beispiel 2 werden die Stabknoten verschoben. Die Feldlängen betragen 20 m und die Eigenlast der Brücke 100 kN/m. Der 10 m lange Vorbau schnabel hat eine Eigenlast von 20 kN/m. Im ersten Feld wird temporär eine Hilfsstütze angeordnet.



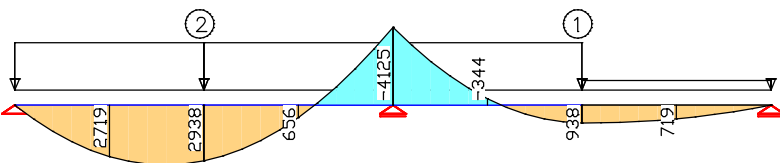
Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] am Bauzustand 1 mit Hilfsstütze infolge G



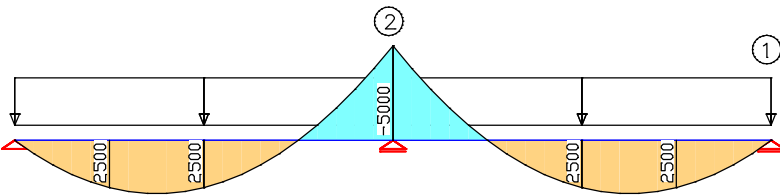
Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] am Bauzustand 2 infolge G



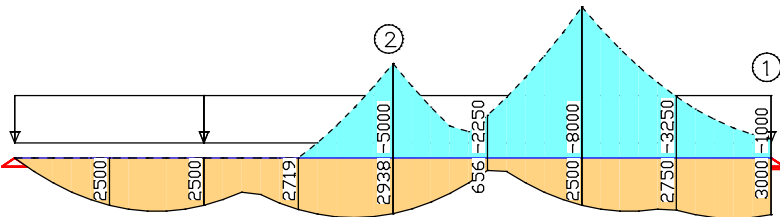
Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] am Bauzustand 3 infolge G



Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] am Bauzustand 4 infolge G



Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] am Bauzustand 5 infolge G  
Diese Schnittgrößen entsprechen hier dem Eingussystem.



Schnittgrößen min, max  $M_y$  [kNm] aus Bauzustand 1 bis 5 infolge G



## Drucken, Seite einrichten

Mit dieser Funktion werden Einstellungen für die Druckausgabe vorgenommen.

### Seitenrahmen

Ausgewählter Seitenrahmen für die Druckausgabe. Benutzerdefinierte Seitenrahmen können im Extras-Menü bearbeitet werden.

### Blattnr.

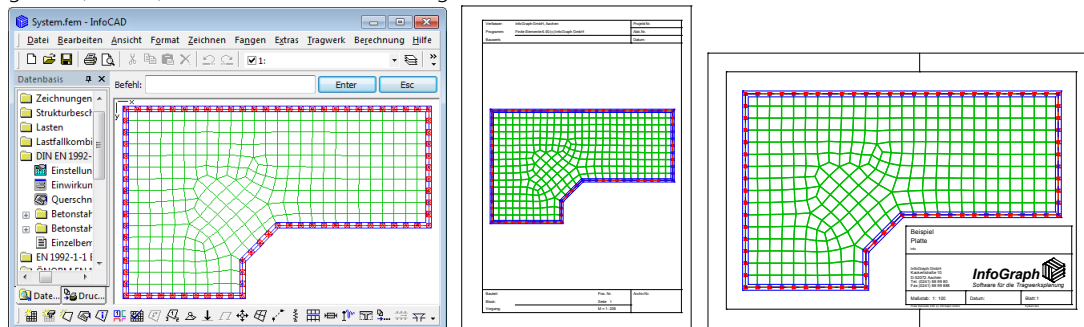
Blattnummer, die auf der nächsten zu druckenden Seite ausgegeben wird. Die Nummer wird nach jeder gedruckten Seite um eins erhöht. Durch Eingabe von „0“ kann die Nummerierung unterdrückt werden.

### Teilnummern

Die Teilnummer ist die fortlaufende Seitenzahl innerhalb eines Druckauftrages. Weicht diese von der Blattnummer ab, wird sie wahlweise in Klammern vor der Blattnummer ausgegeben.

### Maßstab

Ist der Schalter *Auto* gesetzt, wird der Darstellungsbereich größtmöglich auf dem bedruckbaren Papierausschnitt ausgegeben (s. Abb.). Anderenfalls wird der eingestellte Maßstab verwendet.



### S/W-Ausgabe

Die Linien werden in schwarzer Farbe ausgegeben. Farbflächen werden in Grauwerte umgewandelt. Die Grauwerte für die flächenhaften Ergebnisdarstellungen werden auf der Dialogseite *Grauwerte* festgelegt.

### Achsenkreuz

Das Achsenkreuz wird zusammen mit einer Maßlinie in der linken oberen Ecke des Zeichenbereiches ausgegeben.

### Datum, Uhrzeit

Diese Informationen erscheinen automatisch im Standardrahmen. In den anderen Seitenrahmen werden die Informationen mit den Platzhaltern *@Datum* bzw. *@Zeit* positioniert.

### Projekt, Bauwerksnummer, Titel

Diese Texte erscheinen automatisch im Standardrahmen. In den anderen Seitenrahmen werden die Texte mit den Platzhaltern *@Projekt* bzw. *@Titel* positioniert.

### Drucklistentext verwenden

Bei leerem Titelfeld kann mit diesem Schalter gewählt werden, dass an Stelle des Titels die Bezeichnungstexte von Graphikansichten der Druckliste ausgegeben werden. Gleiches gilt für Graphikansichten, die über die Kontextfunktion der Datenbasis ausgedruckt werden.

### Texta, b, c

Bezeichnungstexte, die mit den Platzhaltern *@Texta*, *@Textb* und *@Textc* im Seitenrahmen verwendet werden können. Die Felder sind zur Bearbeitung freigegeben, wenn die Platzhalter im eingestellten Rahmen verwendet werden. Die hier eingegebenen Texte können in der aktuellen Projektdatei gespeichert werden.

### Benutzer, Aufsteller

Der hier angegebene Benutzer wird in Verbindung mit dem Standardrahmen benutzt.

### Drucker...

Aufruf des Windows-Druckerdialoges. Dort können andere Drucker ausgewählt und druckerspezifische Einstellungen vorgenommen werden.

### Seite...

Einstellungen für Seitenausrichtung, Papierformat und Seitenränder.

### Strichstärken

Den Linienfarben werden für die Druckausgabe Strichstärken zugeordnet. Über die Seitenansicht können sie auch am Bildschirm dargestellt werden. Die Einstellung lässt sich durch die im Linientyp angegebene Strichbreite außer Kraft setzen.

### Grauwerte

Zustandsflächen und Flächenbewehrung werden mit den hier festgelegten Farben dargestellt. Für die Schwarz/Weiß-Ausgabe können den Farben Grauwerte zugeordnet werden. Bei Wahl der Windows-Hintergrundfarbe werden Zustandsflächen nicht eingefärbt.

### Textoptionen

Bezeichnungstexte, die mit den Platzhaltern @T1-@T6 im Seitenrahmen verwendet werden können.

## Druckliste

In der Druckliste werden graphische und tabellarische Darstellungen gespeichert. Diese können mit ihren ursprünglichen Einstellungen wieder aufgerufen und einzeln oder gruppenweise ausgedruckt werden. Da die Druckliste lediglich Verweise enthält, werden stets aktuelle Daten ausgegeben.

Um Ansichten in die Druckliste einzufügen, steht in der Standard-Symboleiste das Symbol  zur Verfügung. Zu den einzelnen Einträgen werden folgende Informationen gespeichert:

- Aktuelle Zeichnung
- Aktueller Lastfall
- Berechnungsergebnis mit Einstellungen
- Sichtbarkeit der Layer und Teilsichten
- Bildausschnitt und seine Anordnung
- Maßstab, wenn die Layout-Ansicht eingestellt ist
- Tabellenmarkierung
- Papiergröße und -ausrichtung
- Seitenrahmen

Wenn nicht der gesamte Inhalt der Graphikansicht, sondern nur Details von Interesse sind, lässt sich bei niedergedrückter Alt-Taste mit der linken Maustaste ein Markierungsrahmen aufziehen. Der darin enthaltene Bildausschnitt wird dann in die Druckliste eingetragen.

Der Inhalt der Druckliste wird über die gleichnamige Symboleiste bearbeitet. Die darin enthaltenen Symbole haben folgende Bedeutung:



Startet den Dialog zur Auswahl und Neueingabe von Drucklisten.



Druckt den gesamten bzw. den markierten Inhalt.



Zeigt die Seitenansicht des gesamten bzw. des markierten Inhalts.



Startet den Dialog für die Seiteneinrichtung. Wenn Einträge markiert sind, zeigt das Symbol deren aktuelle Blattausrichtung und erlaubt eine Änderung der Blattgröße, der Blattausrichtung und des Seitenrahmens.



Erzeugt ein Inhaltsverzeichnis am Anfang der Druckliste bzw. aktualisiert es.



Wechseln in den übergeordneten Ordner.



Legt einen neuen Ordner an.

Mit einem Doppelklick auf einen Listeneintrag wird die Ansicht wiederhergestellt. Das Kontextmenü hält zusätzliche Funktionen bereit:

- Umbenennen der Einträge.
- Aktualisieren der markierten Einträge. Damit wird die aktuelle Graphikansicht übernommen.
- Bildausschnitt neben dem Vorgänger anordnen.
- Einträge ausschneiden, kopieren und einfügen. Verschieben ist auch mit gedrückt gehaltener Maustaste möglich.
- Einfügen von Seitenwechseln.
- Kopieren von Bildobjekten direkt in die Zwischenablage. Damit können Graphiken, Tabellen, etc. in andere Windows-Programme übernommen werden.
- Erzeugen einer Metadatei im WMF- oder EMF-Format für den gesamten bzw. den markierten Inhalt.
- Einfügen eines benutzerdefinierten Textes.
- Änderungen an der Druckliste rückgängig machen.

## Import und Export

Mit diesen Funktionen ist der Datenaustausch in folgenden Formaten möglich:

- Autocad DXF-Format
- Produktschnittstelle Stahlbau des DSTV 4/2000 vom Stand 10/2002, Dateityp \*.stp
- IFC (Industry Foundation Classes), Dateityp \*.ifc
- InfoGraph Projektdateien der Typen \*.fem, \*.rsw, \*.esw, \*.ros
- InfoGraph Schnittstellendateien \*.icx

## Datenaustausch zwischen Projektdateien

Zwischen Projektdateien werden Elementdaten und Zeichnungen ausgetauscht.

### Importieren

*Zeichnung* Die gewählte Zeichnung einer anderen Projektdatei wird eingefügt.

*Elementdaten* Die Elemente einer anderen Projektdatei können in die aktuelle Datei eingefügt werden. Die Nummern der eingefügten Knoten und Elemente können sich unter Umständen ändern.

*Einfügepunkt* Ort an dem der Nullpunkt der importierten Daten eingefügt wird.

*Drehwinkel* Winkel um den die importierten Daten verdreht werden.

*Skalierung* Skalierungsfaktoren in x-,y- und z-Richtung für die eingefügten Objekte.

### Exportieren

*Objekte wählen* Objekte wählen, die exportiert werden sollen.

*Zeichnung* Die markierten Zeichnungsobjekte können unter einem neuen Namen exportiert werden. Elementdaten werden ohne weiteren Dialog exportiert.

## Datenaustausch über InfoGraph Schnittstellendateien

Der Austausch erfolgt im ASCII-Format auf Basis der STEP-Technologie (**ST**andard for the **E**xchange of **P**roduct model data) und umfasst folgende Daten:

- Zeichnungsobjekte, Modellobjekte
- Stäbe, Seile, Flächen- und Volumenelemente
- Bemessungsobjekte
- Koppelbedingungen
- Federn, Festhaltungen
- Spannstränge
- Querschnitt, Material, Gelenke
- Lasten

Die im Programmverzeichnis installierte EXPRESS-Datei *lcx-01.exp* beschreibt alle von der Schnittstelle unterstützten Objekte mit ihren Eigenschaften und Datentypen.

## Datenaustausch im DXF-Format

Der Datenaustausch richtet sich nach AutoCAD Version 12. Beim Import werden folgende DXF-Objekte berücksichtigt:

<i>3DFACE</i>	<i>ARC</i>	<i>BLOCK</i>	<i>CIRCLE</i>	<i>DIMENSION</i>
<i>INSERT</i>	<i>LINE</i>	<i>LWPOLYLINE</i>	<i>MTEXT</i>	<i>POLYLINE</i>
<i>SOLID</i>	<i>TEXT</i>	<i>TRACE</i>		

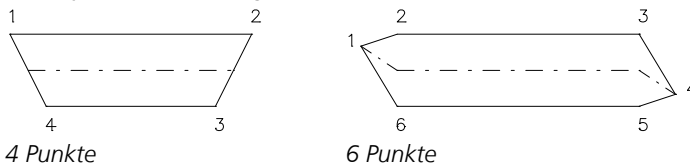
Dabei werden die Objekte *LWPOLYLINE* und *POLYLINE* in Linien und das Objekt *DIMENSION* in Linien und Text umgewandelt. Beim Exportieren werden die aktuellen Zeichnungs- und Elementdaten als *3DFACE*, *ARC*, *CIRCLE*, *LINE*, *POLYLINE* und *TEXT* abgelegt. Layer- und Farbinformationen bleiben erhalten.

### Eingabe

*Einheit*                   Maßeinheiten in der DXF-Datei (mm, cm oder m).  
*Grundriss*                Es kann gewählt werden, ob die Modellinformation für die automatische Netzgenerierung (Stütze, Loch, Rand, Wand) erhalten werden soll.

Für den Austausch von Modellinformationen gelten folgende Konventionen:

*Wände*                   Auf Layer *G\$WAND* als geschlossene *POLYLINE* in zwei Formen:



*Ränder*                   Auf Layer *G\$RAND* als *LINE* oder *ARC*.  
*Löcher*                   Auf Layer *G\$LOCH* als *LINE* oder *ARC*.  
*Stützen*                  Auf Layer *G\$STUETZE* als *POLYLINE* mit 4 Punkten (Rechteckstütze),  
*CIRCLE* mit  $r > 0,001$  (Rundstütze),  
*CIRCLE* mit  $r = 0,001$  (Punktstütze)

### Hinweis

Flächen- und Volumenelemente werden als *3DFACE*-Objekt, Stabelemente als *LINE*-Objekt exportiert. Importierte *3DFACE*-Objekte können über das Kontextmenü in Flächenelemente, importierte *LINE*-Objekte in Modellränder oder Stabelemente umgewandelt werden.

## IFC-Datenaustausch

Das Austauschformat IFC (Industry Foundation Classes) ist eine hersteller- und länderübergreifende Schnittstelle, mit der sämtliche geometrische und alphanumerische BIM-Daten ausgetauscht werden können.

buildingSMART International entwickelt und etabliert IFC als offenen Standard für das Bauwesen. IFC ist unter ISO 16739 als internationaler Standard registriert.

Es wird die IFC Version IFC 2x3 verwendet. Der Datenaustausch geschieht im Rahmen der Import- und Export-Funktionen.

### Koordinatensystem

Im IFC Produktmodell zeigt die z-Achse des globalen Koordinatensystems üblicherweise von unten nach oben. Dies steht im Gegensatz zur der in InfoCAD benutzten Konvention. Damit nach dem Export oder dem Import nicht alle Objekte auf dem Kopf stehen, werden diese im Verlaufe beider Vorgänge mit einem Winkel von 180° um die globale x-Achse gedreht.

### Import

Der Datenimport besteht aus zwei Funktionsbereichen:

- Import von Berechnungsmodellen (Stabwerke bzw. Modellobjekte)
- Import der Geometrie von Bauwerkselementen

## 1. Import von Berechnungsmodellen (Stabwerke bzw. Modellobjekte)

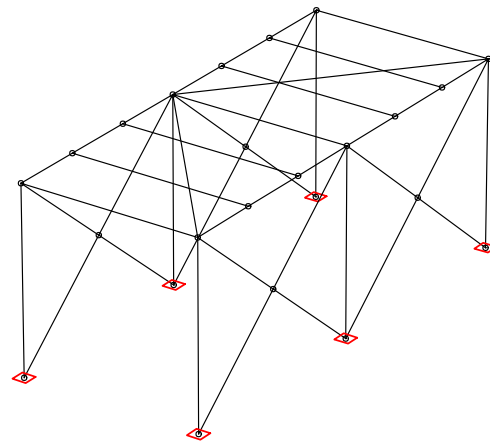
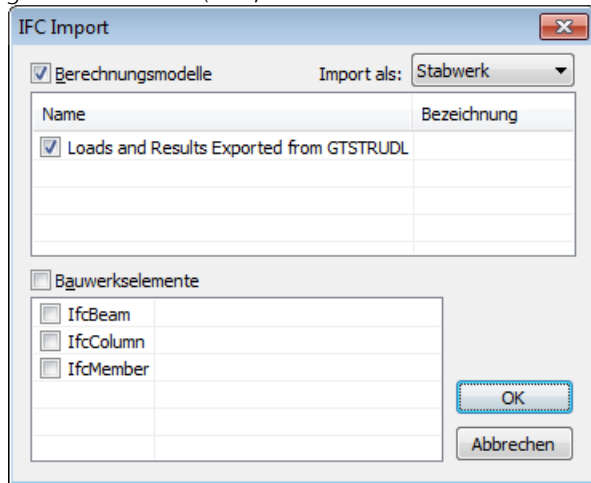
Der Import erfolgt für die in der Austauschdatei gespeicherten und vom Benutzer ausgewählten statischen Berechnungsmodelle (*IfcStructuralAnalysisModel*). Die folgende Tabelle zeigt die behandelten Objekte.

<b>Ifc Objekt</b>	<b>Importiert als</b>	<b>Bemerkungen</b>
<i>IfcArbitraryClosedProfileDef</i> <i>IfcArbitraryProfileDefWithVoids</i>	Polygonquerschnitt	Die Geometrie muss mit <i>IfcPolyline</i> beschrieben sein
<i>IfcAsymmetricIShapeProfileDef</i>	Polygonquerschnitt	
<i>IfcBoundaryNodeCondition</i>	Festhaltung, Stabgelenk	Stabgelenke müssen im Stabsystem definiert sein
<i>IfcCircleHollowProfileDef</i>	Rohrprofil bzw. Polygonquerschnitt	
<i>IfcCircleProfileDef</i>	Polygonquerschnitt	32 Polygonpunkte
<i>IfcIShapeProfileDef</i>	HEA-, HEB-, HEM- oder IPE-Profil bzw. Polygonquerschnitt	
<i>IfcLShapeProfileDef</i>	L-Profil bzw. Polygonquerschnitt	
<i>IfcMaterial</i>	Material	
<i>IfcRectangleHollowProfileDef</i>	Hohlprofil bzw. Polygonquerschnitt	
<i>IfcRectangleProfileDef</i>	Rechteckquerschnitt	
<i>IfcRelAssociatesMaterial</i>	Material eines Stabes	
<i>IfcRelAssociatesProfileProperties</i>	Querschnitt eines Stabes	
<i>IfcRelConnectsStructuralMember</i>	Knoten eines Stabes	
<i>IfcStructuralCurveMember</i>	Stab oder Rand	Gerade (nicht gekrümmt), konstanter Querschnitt, ohne Exzentrizität der Knoten
<i>IfcStructuralLinearAction</i>	Linienförmige Belastung	
<i>IfcStructuralLinearActionVarying</i>	Trapezförmige Belastung	
<i>IfcStructuralLoadGroup</i>	Lastfall	
<i>IfcStructuralLoadLinearForce</i>	Linienlast	
<i>IfcStructuralLoadPlanarForce</i>	Flächenlast	
<i>IfcStructuralLoadSingleDisplacement</i>	Lagersenkung	
<i>IfcStructuralLoadSingleForce</i>	Einzellast	
<i>IfcStructuralLoadTemperature</i>	Temperaturbelastung	
<i>IfcStructuralPlanarAction</i>	Flächenlast	
<i>IfcStructuralPointAction</i>	Punktförmige Belastung	
<i>IfcStructuralPointConnection</i>	Knoten	
<i>IfcStructuralProfileProperties</i>	Allgemeiner Stabquerschnitt	Wird ignoriert falls ein anderer Querschnitt importiert wurde
<i>IfcStructuralSurfaceMember</i>	Modellfläche	
<i>IfcTShapeProfileDef</i>	T-Profil bzw. Polygonquerschnitt	
<i>IfcUShapeProfileDef</i>	U-Profil bzw. Polygonquerschnitt	

Zum Import eines Berechnungsmodells muss entweder der FEM- oder RSW-Modus aktiviert sein.

**Beispiel**

Die folgenden Abbildungen zeigen den Import eines Stabwerkes aus der Datei „gtstrudl\_physical.ifc“. Quelle: <http://cic.nist.gov/vrml/cis2.html> (NIST, National Institute of Standards and Technology).



Dialog zur Auswahl der Importdaten

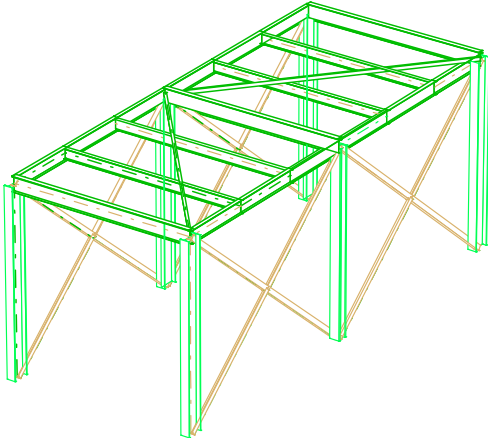
Importiertes Stabwerk

Die Datei beinhaltet ein Berechnungsmodell mit dem Namen „Loads and Results Exported from GTSTRUDL“ und gleichzeitig Bauwerkselemente verschiedener Typen, deren Import abgeschaltet wurde.

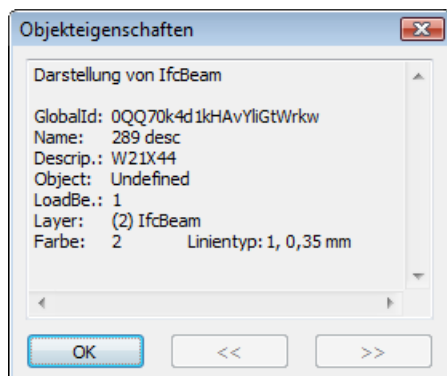
**2. Import der Geometrie von Bauwerkselementen**

Für diesen Funktionsbereich kommen in der Austauschdatei gespeicherte Objekte des Konstruktionsmodells in Frage, deren Typ von *IfcBuildingElement* abgeleitet ist. Das sind zum Beispiel *IfcBeam*, *IfcColumn*, *IfcSlab* und *IfcWall(StandardCase)*. Berücksichtigt werden nur Objekte mit der geometrischen Darstellung *SweptSolid*, *Clipping*, *Brep* und *Mapped-Representation*. In InfoCAD werden daraus spezielle Zeichnungsobjekte erzeugt, die es erlauben, insbesondere die Geometrie der Bauwerkselemente weiter zu verwenden. Mit den Fangmodi *Ende*, *Mitte* und *Normale* können z. B. charakteristische Punkte zur Bestimmung von Abmessungen oder zur Konstruktion von Modellobjekten benutzt werden.

**Beispiel**



Bauwerkselemente aus der Datei „gtstrudl\_physical.ifc“. Quelle: <http://cic.nist.gov/vrml/cis2.html> (NIST, National Institute of Standards and Technology)



Die obige Abbildung zeigt einige weitere Eigenschaften, die zusätzlich zur Geometrie der Bauwerkselemente importiert werden. Dazu gehören

- *GlobalId*: Identifizierung des Bauwerkselementes
- *Name, Descrip.:* Bezeichnungen
- *Material*: Zugeordnete Materialbezeichnung
- *LoadBe(aring)*: Zeigt an ob das Element Belastung trägt (1) oder nicht (0)

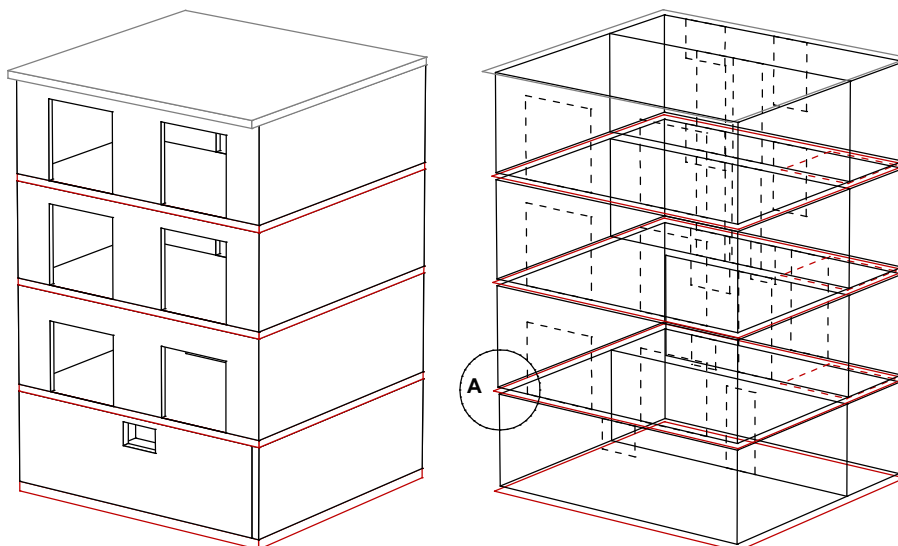
### Umwandlung in Modellobjekte

Importierte Zeichnungsobjekte, deren geometrische Darstellung auf der Extrusion einer Grundfläche basiert (*IfcExtrudedAreaSolid*) und deren Ursprung in

- *IfcBeam*
- *IfcColumn*
- *IfcMember*
- *IfcSlab*
- *IfcWall(StandardCase)*

besteht, können mit Hilfe des Programms in Modellobjekte umgewandelt werden (*Umwandeln* im Kontextmenü, FEM-Modus). Die linienförmigen Bauteile werden dabei zu Rändern mit der Bedeutung *Freier Stab*. Der erzeugte Stabquerschnitt entspricht der für die Grundfläche verwendeten Profildefinition. Objekte mit dem Ursprung *IfcWall*, deren Grundfläche aus einem Polygonzug mit genau vier Punkten besteht, und *IfcSlab* werden in Modellflächen konvertiert.

Die folgende Abbildung zeigt einen Teil der Bauwerkselemente aus der Datei „AC-90Smiley-West-14-07-2005.ifc“, sowie die daraus erzeugten Modellflächen. Quelle: <http://www.iai.fzk.de/www-extern>.

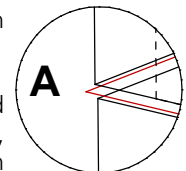


Geometrie der Bauwerkselemente

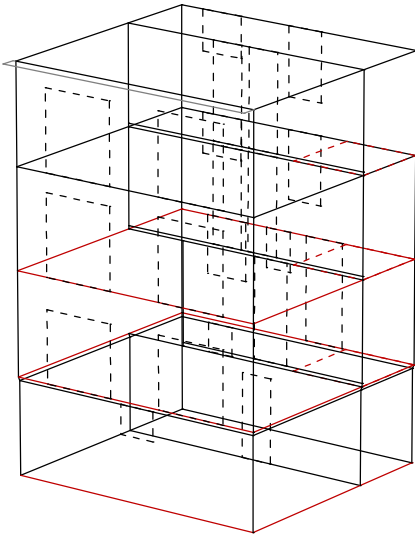
Modellobjekte unverschnitten

Da die Modellobjekte durch die Wand- bzw. Plattenachsenflächen gebildet werden, ergeben sich normalerweise Klaffungen zwischen den Nachbarobjekten (siehe Detail).

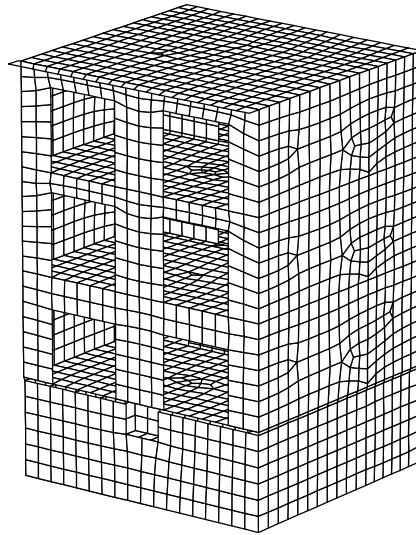
Zur Abhilfe werden alle Objekte während der Umwandlung miteinander verschnitten und gegebenenfalls geringfügig verkleinert oder vergrößert. Falls bei übereinander stehenden Wänden, z. B. aufgrund von wechselnden Wandstärken, die Wandachsen nicht zusammenpassen, müssen unter Umständen nicht lotrechte Übergangsfächen eingebaut werden. Zusätzlich werden nahe am Rand liegende Öffnungen angepasst.



Mit den beschriebenen Zusatzoperationen erreicht man einen verbesserten Zusammenhang der Modellobjekte. Dadurch wird in vielen Fällen eine manuelle Nachbearbeitung vermieden. Die folgenden Abbildungen zeigen die verschnittenen Modellobjekte und das auf deren Grundlage generierte Elementnetz.



Modellobjekte verschnitten



Generiertes Elementnetz

## Export

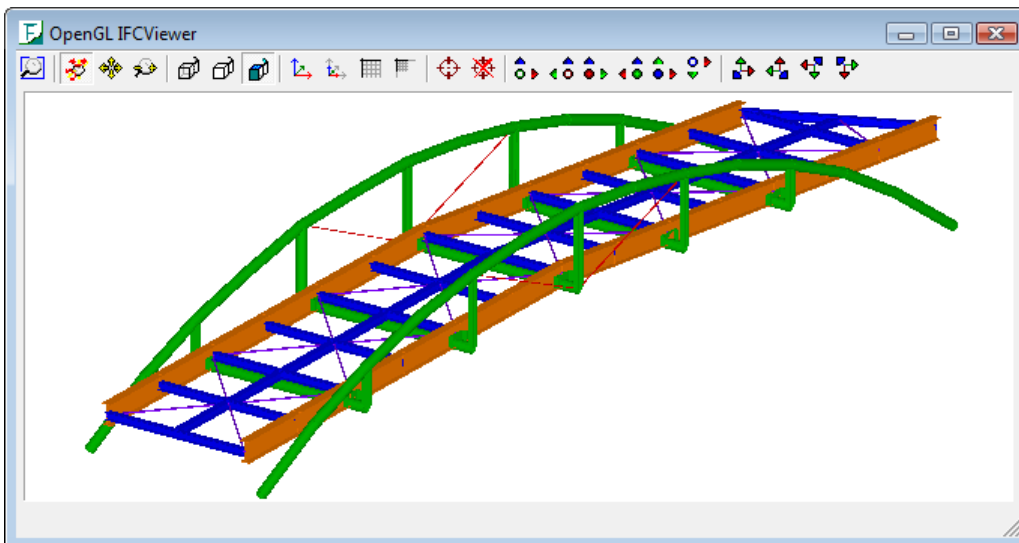
Die Funktion betrifft Modellobjekte und Stabwerke. Folgende Daten werden exportiert:

### Modellobjekte

- Modellränder mit Attribut „freier Stab“
- Modellflächen

### Stabwerk, sofern keine Modellobjekte vorhanden sind

- Statisches Berechnungsmodell ohne Ergebnisse
- Konstruktionsmodell des Stabwerkes mit den Objekten *IfcBeam*, *IfcColumn*



Mit InfoCAD exportiertes Stabwerk dargestellt in *IfcStoreyView*  
(Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für angewandte Informatik)



## Dateiservice

Alle Eingabe- und Ergebnisdaten werden in der Projektdatei in Form von Datensätzen gespeichert und verwaltet. Der Dateiservice stellt das Inhaltsverzeichnis der Datensätze in der Projektdatei dar. Hier können Datensätze gelöscht, kopiert oder umbenannt werden. Die Operationen lassen sich nicht rückgängig machen. Bei Fehlbedienung kann die Projektdatei unbrauchbar werden.

Die Datensätze können nach den Begriffen in der Kopfzeile sortiert werden. Das Menü beinhaltet u.a. folgende Funktionen:

### Datei, Ergebnisse löschen

Dabei werden alle Berechnungsergebnisse gelöscht.

### Datei, Packen

Beim Packen werden unbenutzte Bereiche aus der Datei entfernt. Dadurch kann sich der Speicherplatzbedarf auf der Festplatte verringern.

### Datensätze, Kopieren, Löschen, Umbenennen

Bei diesen Funktionen können durch den Platzhalter \* Gruppen von Datensätzen ausgewählt werden (z.B. *LAST.\**).

### Ansicht, Auswahl

Für die Darstellung im Inhaltsverzeichnis können die Datensätze über ihre Namen und Eigenschaften ausgewählt werden.

## Bearbeiten

Das Bearbeiten-Menü enthält folgende Funktionen:

	<i>Rückgängig</i>	Letzte Operation rückgängig machen.
	<i>Wiederherstellen</i>	Wiederholt die vorher rückgängig gemachte Aktion.
	<i>Ausschneiden</i>	Markierte Objekte in die Zwischenablage übertragen.
	<i>Kopieren</i>	Markierte Objekte in die Zwischenablage kopieren.
	<i>Einfügen</i>	Objekte aus der Zwischenablage einfügen.
	<i>Löschen</i>	Markierte Objekte löschen.
	<i>Markieren</i>	Objekte markieren.
	<i>Gruppe markieren...</i>	Objekte nach Gruppenzugehörigkeit markieren.
	<i>Alles markieren</i>	Alle aktiven Objekte markieren.
	<i>Bewegen</i>	Objekte verschieben, spiegeln, rotieren und skalieren.
	<i>Kopieren direkt</i>	Objekte ohne Benutzung der Zwischenablage kopieren.
	<i>Generieren</i>	Objekte vervielfältigen.
	<i>Eigenschaften kopieren</i>	Markierten Objekten ausgewählte Eigenschaften eines Referenzobjektes zuweisen.
	<i>Layer</i>	Layer verwalten oder markierten Objekten zuordnen.
	<i>Farbe</i>	Zeichenfarbe voreinstellen oder markierten Objekten zuordnen.
	<i>Linientyp</i>	Linientyp voreinstellen oder markierten Objekten zuordnen.
	<i>Ändern</i>	Eigenschaften markierter Objekte (Text, Solid, Kreis, Bogen) ändern.
	<i>Länge ändern</i>	Die Länge des markierten Objekts ändern.
	<i>Endpunkt ändern</i>	Einen Endpunkt der markierten Objekte ändern.
	<i>Verschneiden</i>	Ein markiertes Objekt mit einem anderen verschneiden.
	<i>Wandöffnung</i>	Eine Wandöffnung in die markierte Wand einfügen.

## Rückgängig / Wiederherstellen

Die letzten Änderungen an den Projektdaten können rückgängig gemacht werden. Die vorher rückgängig gemachte Aktion kann auch wiederhergestellt werden.

## Ausschneiden

Durch Ausschneiden werden markierte Objekte in die Zwischenablage übertragen und dort für späteres Einfügen gespeichert. Die Funktion ist gesperrt, wenn nicht übertragbare Objekte markiert sind.

## Kopieren

Das Kopieren arbeitet in zwei Varianten:

### Kopieren markierter Objekte

Die markierten Objekte werden in die Zwischenablage kopiert und dort für späteres Einfügen gespeichert. Die Funktion ist gesperrt, wenn nicht übertragbare Objekte markiert sind.

### Kopieren eines rechteckigen Bildausschnitts

Bei niedergedrückter ALT-Taste kann mit der linken Maustaste ein Rechteck im Zeichenbereich aufgezogen werden. Beim Kopieren wird der Bildausschnitt im WMF-Austauschformat in der Zwischenablage gespeichert und kann so in die Berechnungsprotokolle übertragen werden. Ebenso lassen sich mit dieser Methode Graphiken in andere Programme exportieren, die das Austauschformat verstehen.

## Einfügen

In der Zwischenablage gespeicherte Objekte werden mit ihren 3D-Koordinaten eingefügt. Markierte Objekte werden dabei ersetzt. Durch Bewegen lassen sich die eingefügten Objekte an die gewünschte Position bringen.

## Löschen

Alle markierten Objekte werden gelöscht.

## Markieren

Diese Funktion dient der Markierung von Objekten. Die markierten Objekte werden strichliert dargestellt.

### Auswahl

<i>Objekte</i>	Auswahl einzelner Objekte mit der Maus.
<i>Nummer</i>	Auswahl über eine Nummer (Stab, Element, Spannstrang, Lastzeile).
<i>Fenster</i>	Auswahl mit einem Fenster. Alle vollständig im Fenster liegenden Objekte werden markiert. Wird das Fenster von rechts nach links aufgezogen, werden zusätzlich alle Objekte markiert die vom Fenster angeschnitten werden.
<i>4P</i>	Suchgebiet mit vier Punkten. Alle vollständig in diesem Gebiet liegenden Objekte werden markiert.
<i>Letztes</i>	Das zuletzt eingegebene Objekt wird markiert.
<i>&lt;-</i>	Umschalten zum Streichen markierter Objekte.
<i>-&gt;</i>	Zurückschalten vom Streich- in den Auswahlmodus.

### Besonderheiten bei der Objektauswahl

- Flächen und Volumenelemente können auch im Innern des Elements identifiziert werden.
- Text ist innerhalb des durch den Text begrenzten Gebietes zu identifizieren.
- In den Fangeinstellungen kann die Option „Objekte mit kreuzendem Fenster (von rechts nach links) markieren“ ausgewählt werden.

## Gruppe markieren

Mit dieser Funktion lassen sich die Objekte nach logischen Gesichtspunkten markieren. Damit ist auch bei komplizierten Tragwerksmodellen der direkte Zugriff auf einzelne Objektgruppen möglich. Bei *UND Logik* werden die Objekte markiert, die alle gewählten Bedingungen erfüllen.

## Alles markieren

Alle sichtbaren Objekte werden markiert.

## Alles demarkieren

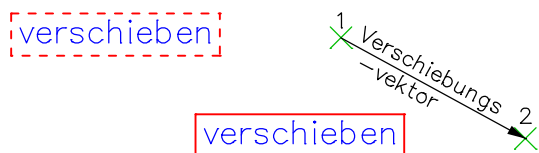
Alle markierten Objekte werden demarkiert. Über die Funktionen *Anpassen* des Ansicht-Menüs kann dieser Befehl dem Bearbeiten-Menü oder einer Tastenkombination zugeordnet werden.

## Bewegen

Markierte Objekte lassen sich mit den folgenden Methoden bewegen.

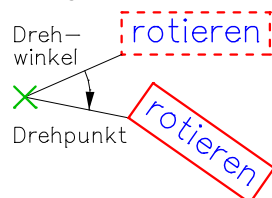
### Verschiebungsvektor

Bewegen durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert.



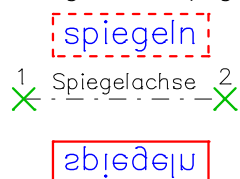
### Rotieren

Bewegen durch Rotation. Im 2D-Modus wird ein Drehpunkt, im 3D-Modus eine Drehachse definiert.



### Spiegeln

Bewegen durch Spiegelung. Im 2D-Modus wird eine Spiegelachse, im 3D-Modus eine Spiegelebene definiert.



### Skalieren

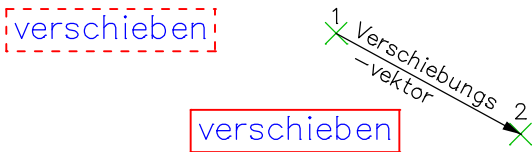
Bewegen durch Skalierung im globalen oder einem lokalen Bezugssystem. Mit einem Skalierungsfaktor von Null können Objekte auf eine Achse oder Ebene ausgerichtet werden.

## Kopieren direkt

Markierte Objekte lassen sich mit den folgenden Methoden kopieren.

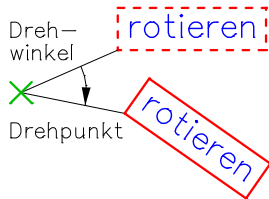
### Verschiebungsvektor

Kopieren durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert. Die Option *mehrfach* erlaubt mehrfaches Kopieren der ausgewählten Objekte.



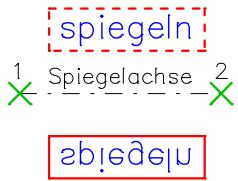
### Rotieren

Kopieren durch Rotation. Im 2D-Modus wird ein Drehpunkt, im 3D-Modus eine Drehachse definiert.



### Spiegeln

Kopieren durch Spiegelung. Im 2D-Modus wird eine Spiegelachse, im 3D-Modus eine Spiegelebene definiert.



### Parallele

Linien und Modellränder können durch Parallelverschiebung kopiert werden.

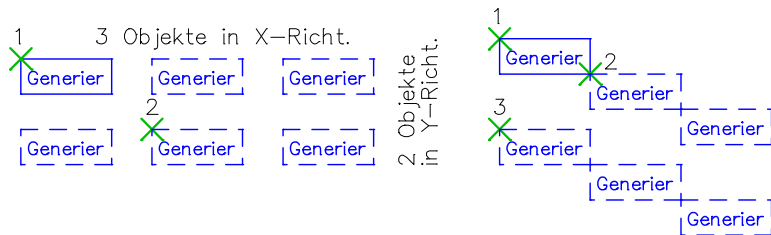
## Generieren

Markierte Objekte werden durch Verschiebung, Rotation oder einer Mischform von beiden generiert. Bei der Anzahl der zu generierenden Objekte werden die Ursprungsobjekte immer mitgezählt.

### Verschiebungsvektor

Generieren durch Verschiebung. Nach der Eingabe eines Verschiebungsvektors erfolgt die Generierung in orthogonaler Form durch schrittweise Addition der Komponenten des Verschiebungsvektors (s. linkes Bild). Die angegebene Anzahl Kopien wird auch dann erzeugt, wenn die Komponente in einer Richtung Null ist. Die kopierten Objekte liegen dann gegebenenfalls übereinander.

Nach der Eingabe eines zweiten (und im 3D-Modus eines dritten) Verschiebungsvektors wird eine sogenannte *schiefe Generierung* durch schrittweise Addition der einzelnen Verschiebungsvektoren durchgeführt (s. rechtes Bild).

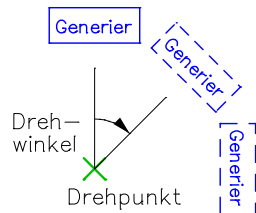


Globale Generierung

Schiefe Generierung

### Rotieren

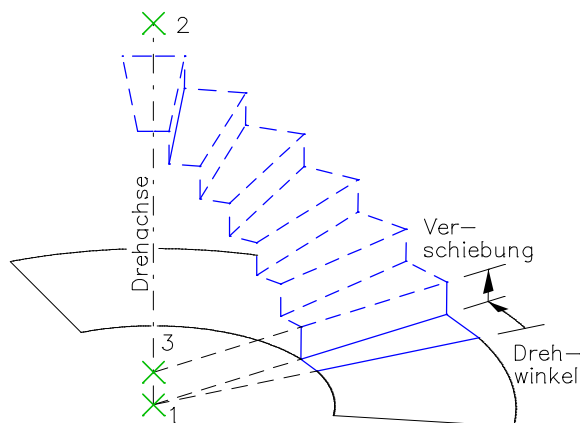
Generieren durch Rotation. Im 2D-Modus wird ein Drehpunkt, im 3D-Modus eine Drehachse definiert.



### Polar

Die Generierung erfolgt durch Rotation um den angegebenen Drehwinkel [°] und anschließende Translation mit dem Verschiebungsvektor. Bei räumlicher Anordnung lässt sich damit z.B. eine Wendel erzeugen.

Im abgebildeten Beispiel wurde zuerst ein Treppenstufe als Prototyp eingegeben. Diese wird durch die polare Generierung schrittweise um die Rotationsachse P1-P2 gedreht und dann mit dem Vektor P1-P3 auf das Niveau der nächsten Stufe verschoben.



### Farbe


Die Farbe kann für neu zu erzeugende Objekte voreingestellt oder für markierte Objekte geändert werden. In der Symbolleiste wird die aktuelle Farbe angezeigt. Falls Objekte markiert sind, wird deren Farbe angezeigt.

### Layer

Für eine logische Gliederungsmöglichkeit besitzen alle graphischen Objekte die Layereigenschaft. Ein Layer wird identifiziert über seine Nummer (von 1 bis 255). Eine anschauliche Beschreibung bietet der optionale Bezeichnungstext. Für die graphische Darstellung lassen sich bestimmte Layer unsichtbar schalten, d.h. alle Objekte mit dieser Eigenschaft werden ausgeblendet. Eine weitere Anwendung der Layereigenschaft besteht darin, Layer zu sperren. Danach sind die betroffenen Objekte zwar noch sichtbar, können aber nicht mehr bearbeitet werden.

Neue Objekte bekommen bei ihrer Erzeugung einen vom Benutzer voreingestellten Layer. Dieser kann später jederzeit geändert werden.

Für die Verwaltung der Layereigenschaft von Objekten gibt es verschiedene Bedienelemente:

- Kombinations-Listefeld  1: System  in der Standard-Symbolleiste
- Dialogfeld erreichbar über die Layer-Schaltfläche  in der Standard-Symbolleiste oder das Bearbeiten-Menü
- Layerbereich

## Linientyp

Der Linientyp kann für neu zu erzeugende Objekte voreingestellt oder für markierte Objekte geändert werden.

### Stil

Folgende Linienstile können gewählt werden:

- 1 Durchgezogen
- 2 Kurz gestrichelt
- 3 Lang gestrichelt
- 4 Strichpunktiert
- 5-15 Durchgezogen

### Breite

Eingabe der Linienbreite für die Objekte. Alternativ kann die für die Objektfarbe eingestellte Linienbreite übernommen werden (s. Drucken).

## Ändern

Durch diese Funktion lassen sich die Eigenschaften von markierten Objekten (Text, Solid, Kreis, Bogen) ändern.

### Text

<i>Position</i>	Neue Textposition definieren.
<i>Richtung</i>	Punkt in Textrichtung angeben oder den Text horizontal ausrichten.
<i>Höhe</i>	Texthöhe [m] ändern.
<i>Font</i>	Textfont ändern. Mögliche sind die Vektorschriftarten <i>Standard</i> , <i>Standard-fest</i> , <i>Text</i> oder <i>Text-fest</i> sowie True Type Schriftarten. Die festen Vektorschriftarten haben eine feste Zeichenbreite.
<i>Text</i>	Den Textinhalt ändern.

### Solid

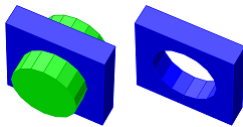
Eckpunkt eines Solids ändern.

### Kreis, Bogen

Radius ändern.

### Volumen

<i>Vereinfachen</i>	Oberflächen eines Volumens, wenn sie in einer Ebene liegen und sich berühren, zusammen fassen.
<i>Teile entfernen</i>	Löcher aus Volumen entfernen.
<i>Teilen</i>	Volumenkörper durch zu definierende Ebene zerschneiden.
<i>Addieren</i>	Volumenkörper welche sich berühren bzw. durchdringen zu einem Volumen zusammen fassen.
<i>Subtrahieren</i>	Von einem Volumenkörper einen anderen Volumenkörper abziehen.



Beispiel für die Subtraktion zweier Volumenkörper.

## Länge ändern

Durch diese Funktion lässt sich die Länge [m] eines markierten, linienförmigen Objektes ändern. Der dem Markierungspunkt am nächsten liegende Endpunkt des Objektes wird verändert.

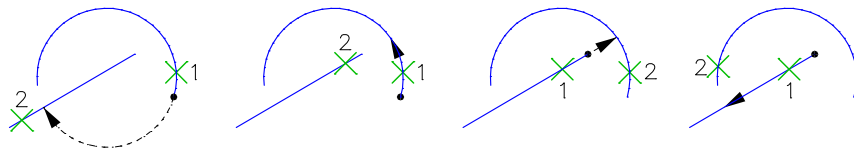
## Endpunkt ändern

Durch diese Funktion lassen sich Endpunkte von markierten Objekten (Linien, Bögen, Ränder, Löcher, Volumen) ändern. Der dem letzten Markierungspunkt am nächsten liegende Endpunkt der Objekte wird geändert. Der Radius von Bögen bleibt unverändert.

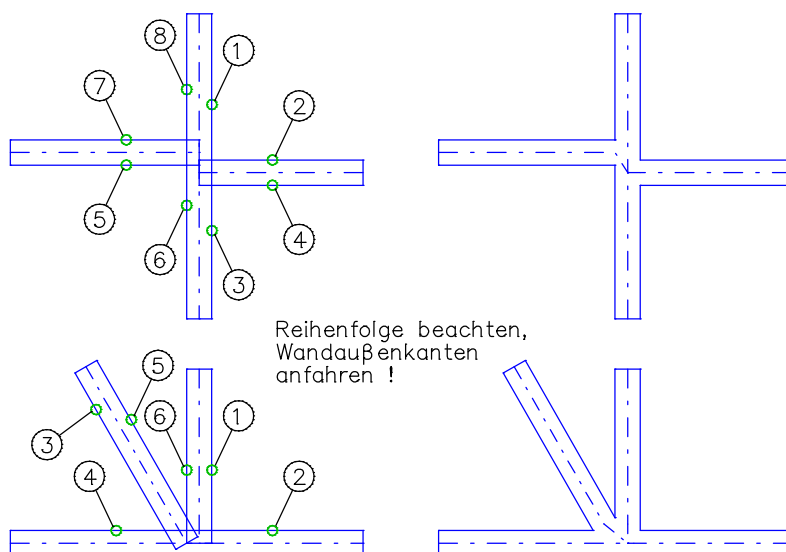
## Verschneiden

Durch diese Funktion lassen sich markierte Objekte (Linien, Bögen, Ränder, Löcher, Wände) verschneiden. Die nachfolgenden Bilder zeigen vier Beispiele zum Verschneiden von Linien und Bögen. Es wird in folgender Reihenfolge vorgegangen:

- Das zu ändernde Objekt am zu verschneidenden Ende markieren (Punkt 1).
- Die Funktion aktivieren.
- Das Begrenzungsobjekt wählen (Punkt 2).



Die nachfolgenden Bilder zeigen Besonderheiten beim Verschneiden von Wänden.



## Wandöffnung

Durch diese Funktion lässt sich eine Öffnung in die markierte Wand einfügen. Die entstehenden Enden der Wandachsen werden durch einen Rand verbunden. Die Längen der beiden entstehenden Wände müssen mindestens die Hälfte der Wandbreite betragen, da es an kurzen Wänden bei der Vernetzung zu sehr ungünstigen oder gar unzulässigen Seitenverhältnissen der Elemente kommen kann.

## Teilen

Über das Kontextmenü können markierte Linien, Bögen, Ränder, Löcher oder Volumen geteilt werden.

## Verbinden

Über das Kontextmenü werden markierte Linien, Bögen, Ränder, Löcher oder Linienlager zu einem Objekt verbunden. Die Eigenschaften des ersten markierten Objekts bleiben erhalten.

### Linien (auch Ränder, Löcher)

Die Objekte müssen kollinear sein. Sie dürfen Lücken aufweisen.

### Bögen (auch Ränder, Löcher)

Die Objekte müssen auf einem gedachten Kreis liegen. Sie dürfen Lücken aufweisen. Der neue Bogen beginnt am Anfangspunkt des ersten markierten Bogens.

### Linienlager

Linienlager werden wie Linien bzw. Bögen behandelt. Sie dürfen jedoch keine Lücken aufweisen.

## Umwandeln




Über das Kontextmenü können markierte Objekte umgewandelt werden, und zwar

- die Zeichnungsobjekte Linie, Kreis und Bogen in die Modellobjekte Rand und Loch,
- die Modellobjekte Rand und Loch in entsprechende Zeichnungsobjekte,
- die Zeichnungsobjekte Linie und 3D-Fläche in Tragwerkselemente (Stäbe bzw. Flächenelemente),
- die Objekte Linie, Kreis und Bogen in NURBS-Kurven,
- bestimmte IFC-Bauwerkselemente in Modellobjekte.

Die Umwandlung ist nützlich, wenn z.B. eine Zeichnung durch DXF-Import eingelesen wurde. Dabei werden in der Regel nur Zeichnungsobjekte übertragen. Nach Umwandlung in Modellobjekte kann einer der automatischen Netzgenerierer zur Erzeugung des FE-Netzes benutzt werden.

## Ansicht

Die nachfolgenden Funktionen stehen im Ansicht-Menü zur Verfügung:

	<i>Neuzeichnen</i>	Darstellungsbereich neuzeichnen.
	<i>Zoom</i>	Bildausschnitt wählen.
	<i>Darstellung...</i>	Darstellungsoptionen für das Tragwerk einstellen.
	<i>3D</i>	Umschalten zwischen 2D- und 3D-Darstellung.
	<i>Rotieren</i>	Rotieren in der 3D-Perspektive.
	<i>3D-Ansicht</i>	Beliebige 3D-Betrachtungsrichtung einstellen.
	<i>Projektion</i>	Zentral- oder Parallelperspektive einstellen.
	<i>Verdeckt</i>	Verdeckte Darstellung ein- oder ausschalten.
	<i>Querschnitts- darstellung</i>	Querschnittsdarstellung ein- oder ausschalten.
	<i>XY-Fenster</i>	In das XY-Fenster umschalten.
	<i>XZ-Fenster</i>	In das XZ-Fenster umschalten.
	<i>YZ-Fenster</i>	In das YZ-Fenster umschalten.
	<i>1 Fenster</i>	In die 1-Fensterdarstellung umschalten.
	<i>2 Fenster</i>	In die 2-Fensterdarstellung umschalten.
	<i>Fenster...</i>	Bildschirmfenster einstellen.
	<i>Laden...</i>	Ansicht mit Fenstereinstellung laden.
	<i>Speichern...</i>	Ansicht mit Fenstereinstellung speichern.
	<i>Normal</i>	Normalansicht einschalten.
	<i>Layout</i>	Blattansicht einschalten.
	<i>Rasterpunkte</i>	Hilfsraster ein- oder ausschalten.
	<i>Bildlaufleisten</i>	Bildlaufleisten zum Verschieben des Bildausschnitts einschalten.
	<i>Symbolleisten</i>	Symbolleisten ein- oder ausblenden.
	<i>Statusleiste</i>	Statusleiste ein- oder ausblenden.
	<i>Fensteranordnung zurücksetzen</i>	Setzt die Anordnung der Symbolleisten und Andockfester auf den Ausgangszustand.
	<i>Standardansicht</i>	Zeigt die Ergebnisse von Lastfallkombinationen in der Standardansicht. Hierbei wird in einer Tabellenzeile ein Reaktionspaar (z.B. Nx min, zugh. My, zugh. Mz, ...) eines Aufpunktes ausgegeben.
	<i>Eine Zeile je Berechnungsort</i>	Zeigt die Ergebnisse von Kombinationsergebnissen in einer Zeile je Berechnungsort.






## Neuzeichnen


Mit dieser Funktion wird der Darstellungsbereich neu gezeichnet.

## Zoom

Mit der Zoom-Funktion wird der aktuelle Bildausschnitt eingestellt.

### Eingabe

	<i>1. Punkt Zoomausschnitt</i>	Bildausschnitt durch Eingabe eines Rechtecks wählen.
	<i>Alles</i>	Der Bildausschnitt wird so gewählt, dass alle Objekte sichtbar sind.
	<i>Pan</i>	Bildausschnitt durch Eingabe eines Vektors verschieben.
	<i>+</i>	Abbildung vergrößern.
	<i>-</i>	Abbildung verkleinern.
	<i>&lt;&lt; &gt;&gt;</i>	Die vorherige bzw. nächste Zoom-Stufe wird aktiviert.
	<i>M = 1:100</i>	Maßstab des Bildausschnitts einstellen.

Wenn die Maus über ein Rad verfügt, kann damit bei gedrückter Strg-Taste ebenfalls gezoomt werden. Zusätzlich ermöglichen das Symbol  und die mittlere Maustaste das Verschieben des Bildausschnitts durch Ziehen mit der Maus.

## 3D-Darstellung

Die Funktion dient dem Umschalten zwischen der 2D- und der 3D-Darstellung.

## 3D-Ansicht

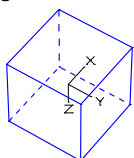
Mit dieser Funktion wird eine bestimmte Betrachtungsrichtung eingestellt.

### Eingabe

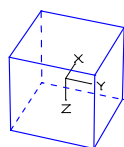
	<i>1. Punkt Betrachtungsebene</i>	Beschreibung der Betrachtungsebene durch drei Punkte. Die Blickrichtung ist senkrecht zur Ebene festgelegt.
<i>Achse</i>		Blick in Richtung einer globalen Achse.
<i>Richtung</i>		Punkt eingeben, der die Blickrichtung zum Objektschwerpunkt festlegt.
<i>Vektor</i>		Eingabe der Komponenten des Richtungsvektors vom Objektschwerpunkt zum neuen Betrachtungsort.
<i>Standard</i>		Auf Standardansicht zurücksetzen.

## Rotieren

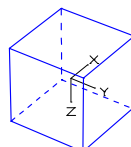
Mit dieser Funktion kann in der 3D-Darstellung die Blickrichtung des Betrachters verändert werden. Die Rotationsrichtung bezieht sich auf den Betrachtungsort, d.h. die Bewegung erfolgt um das feststehende Objekt. Der eingegebene Drehwinkel [°] ist relativ und bezieht sich auf die aktuelle Richtung. Eine Drehung über den Zenit oder Nadirpunkt hinaus ist nicht möglich.



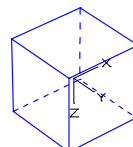
*Oben: 15°*



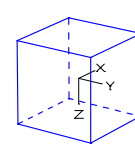
*Links: 15°*



*Grundeinstellung*



*Rechts: 15°*



*Unten: 15°*



Alternativ kann im 3D-Modus mit diesem Mauszeiger die Darstellung in beliebige Richtungen gedreht werden.

Wenn die Maus über ein Rad verfügt, kann damit bei gedrückter Umschalt-Taste um die vertikale Achse und bei gleichzeitigem Drücken der Umschalt- und Strg-Taste um die horizontale Achse gedreht werden.

## Projektion

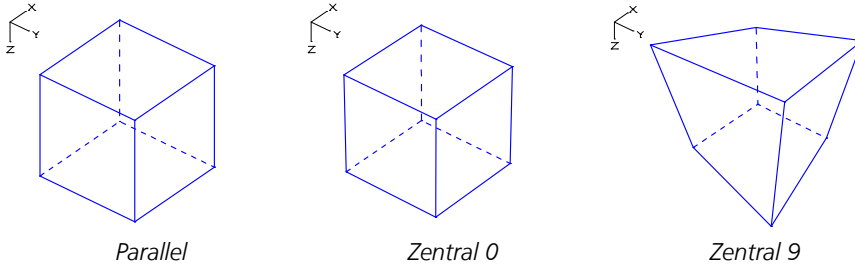
Diese Funktion wählt die Projektionsart für die 3D-Perspektive.

### Eingabe

**Zentral 0...9** Bilddarstellung in Zentralperspektive ohne Veränderung der Betrachtungswinkel. Der Wert „0“ entspricht einer Betrachtung des Objekts aus großer Entfernung mit großer Brennweite (Teleobjektiv), der Wert „9“ dagegen einer Betrachtung aus geringer Entfernung mit kleiner Brennweite (Weitwinkelobjektiv).

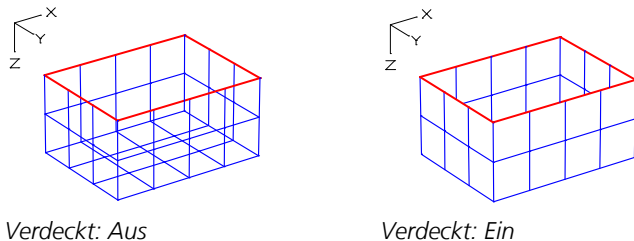
**Parallel** Darstellung in Parallelperspektive (Isometrie) ohne Veränderung der Betrachtungswinkel.

Die folgenden Bilder zeigen die Zentral- und Parallelperspektive.



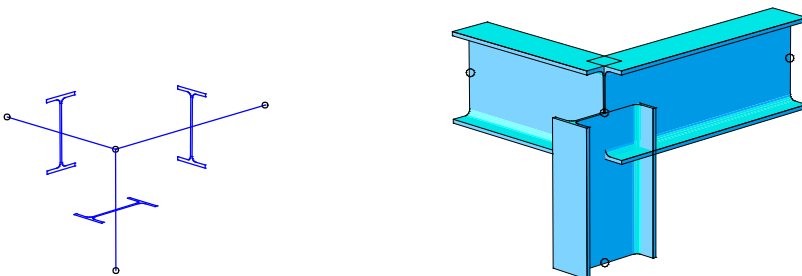
## Verdeckt

Mit dieser Funktion wird erreicht, dass in der 3D-Darstellung verdeckte Objektteile nicht gezeichnet werden.



## Querschnittsdarstellung

Mit dieser Funktion wird erreicht, dass in der 3D-Darstellung alle Elemente mit ihren Querschnittsabmessungen angezeigt werden.



Querschnittsdarstellung: Aus mit Stabquerschnitt

Querschnittsdarstellung: Ein

## Fenster

Diese Funktion dient zur Einstellung der Fensterdarstellung.

### Eingabe

- Anzahl Fenster** Auswahl von 1 oder 2 Fenstern.
- 1. Fenster** Gewünschtes Koordinatensystem für das linke Fenster festlegen.
- 2. Fenster** Gewünschtes Koordinatensystem für das rechte Fenster festlegen.
- Konstante Koordinate** Bei Auswahl eines einzigen Fensters ergänzt die konstante dritte Koordinate die ebenen Koordinaten. Das xy-Fenster kann damit z.B. auf ein bestimmtes z-Niveau gesetzt werden.
- Blickrichtung** Auswahl der Blickrichtung.

## Layout

Die Layout-Funktion schaltet in die Blattdarstellung um. Das System wird zusammen mit dem eingestellten Seitenrahmen so angezeigt, wie es gedruckt wird. In dieser Darstellung kann genauso gearbeitet werden wie in der Normal-Ansicht.

## Teilsicht

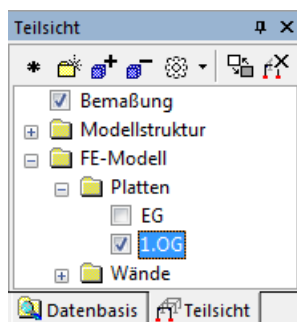
Zur gegliederten Darstellung größerer System können sogenannte *Teilsichten* erzeugt werden.

Jedes Objekt kann beliebig vielen Teilsichten angehören. Die Zuordnung zu einer Teilsicht verändert nicht die Objekteigenschaften. Es lassen sich so Darstellungen des Systems erzielen, die mit der Layertechnik praktisch nicht machbar sind. Wurde z.B. bei einem Hochbausystem die Layerstrukturierung etagenweise vorgenommen, ist es unmöglich damit die Darstellung der Objekte ausschließlich in eine Achse des Gebäudes zu bewirken. Dies gelingt aber mit einer entsprechenden Teilsicht ohne Änderung der Objekte jederzeit.

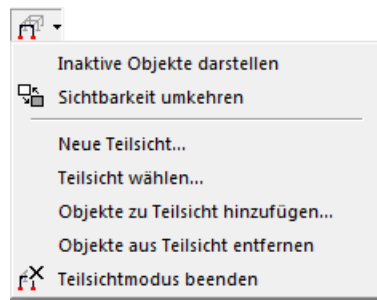
Der Benutzer kann beliebig viele Teilsichten erzeugen. Diese können frei bezeichnet werden. Die nachträgliche Umbenennung ist problemlos möglich, da die Bezeichnung nicht zur Identifizierung gebraucht wird. Gruppen von Teilsichten lassen sich in Ordnern zusammenfassen.

Werden eine oder mehrere Teilsichten zur Darstellung ausgewählt, aktiviert dies den sogenannten „Teilsichtmodus“. In dem Kombinations-Listefeld der Standard-Symbolleiste werden dann die vorhandenen Teilsichten angezeigt. Die Layer der Objekte behalten auch in diesem Modus ihre Bedeutung. D.h. Objekte auf abgeschalteten Layern bleiben weiterhin unsichtbar. Im Teilsichtmodus erzeugte Objekte werden zu den aktiven Teilsichten hinzugefügt.

Die Erzeugung und Bearbeitung von Teilsichten geschieht über den Teilsichtbereich oder über das Teilsicht-Schaltflächenmenü.










Teilsichtbereich



Teilsicht-Schaltflächenmenü

Im Teilsichtbereich stehen unter anderem folgende Funktionen zur Verfügung:

-  Mit zuvor markierten Objekten wird eine neue Teilsicht erzeugt.
-  Unter der aktuellen Teilsicht wird ein neuer Ordner erstellt.
-  Markierte Objekte werden markierten Teilsichten hinzugefügt.
-  Markierte Objekte werden aus den aktuellen Teilsichten entfernt.
-  Die Sichtbarkeit der Objekte wird umgekehrt.
-  Der Teilsichtmodus wird beendet und die Darstellung erfolgt wieder entsprechend der Layertechnik.
-  Extras
  - Sortieren
  - Leere Teilsichten entfernen
  - Inaktive Objekte darstellen
  - Modellstruktur in Ebenen gliedern
  - Modellstruktur in Stockwerke gliedern

## Zeichnen

In diesem Menü sind die Funktionen für die Eingabe von Zeichnungsobjekten zusammengefasst.



Linie



Text



Kreis



Bogen



Solid



Nurbs

Modell



Rand



Wand



Loch



Stütze



Fläche



Kegel



Volumen



Bemaßen



Image Fügt Bilder der Formate *bmp, ico, jpg, png, gif, tif, emf, wmf* in die Zeichnung ein.

Eine anschauliche Darstellung zur Verwendung von Zeichnungsobjekten kann dem Dokument *Einführungsbeispiele.pdf* entnommen werden, das im Programmverzeichnis installiert wird.

## Linie

Mit dieser Funktion wird eine Linie eingegeben.

### Eingabe

**1. Punkt** Anfang der Linie eingeben. Nach Eingabe des Endpunkts können fortlaufend weitere Linien eingegeben werden.

**Anfang** Neuen Anfangspunkt eingeben.

**Schließen** Letzten Punkt mit dem ersten Anfangspunkt verbinden.

## Text

Diese Funktion dient zur Eingabe von Texten.

### Eingabe

**Textanfangspunkt**

Textanfangspunkt eingeben.

**Links, Mitte, Rechts**

Linksbündige, zentrierte oder rechtsbündige Eingabe der Textposition auswählen. Zusätzlich sind Textrichtung und Texthöhe [m] einzugeben.

**Font**

Textfont für weitere Texteingabe vorwählen. Mögliche sind die Vektorschriftarten *Standard, Standard-fest, Text* oder *Text-fest* sowie True Type Schriftarten. Die festen Vektorschriftarten haben eine feste Zeichenbreite.



## Kreis

Mit dieser Funktion wird ein Kreis eingegeben.

### Eingabe

*Mittelpunkt* Eingabe durch Mittelpunkt, Kreisebene (nur 3D) und Radius.  
*3Punkte* Eingabe durch 3 Kreispunkte.

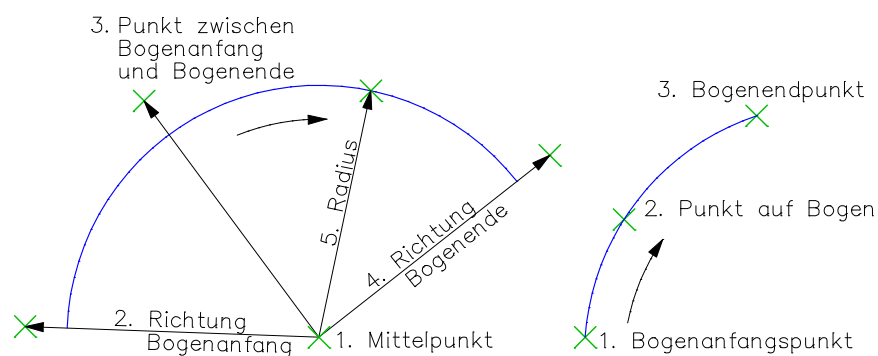
## Bogen

Diese Funktion dient zur Eingabe eines Kreisbogens.

### Eingabe

*Mittelpunkt* Eingabe eines Kreisbogens durch folgende Bestimmungsstücke:  
 1. Mittelpunkt,  
 2. Richtung zum Bogenanfang,  
 3. Richtung zwischen Bogenanfang und -ende,  
 4. Richtung zum Bogenende,  
 5. Radius.

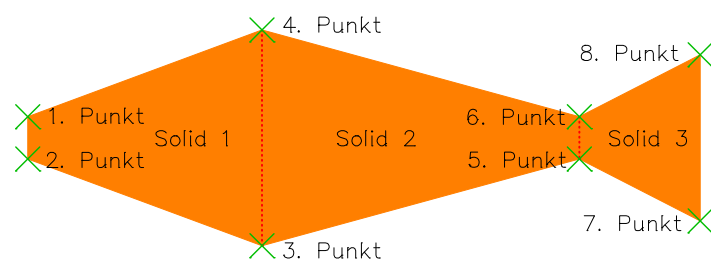
*3Punkte* Eingabe durch 3 Bogenpunkte.



Varianten zur Eingabe von Bögen

## Solid

Ein Solid dient zur Beschreibung einer viereckigen Farbfläche. Das folgende Bild zeigt die Reihenfolge bei der Eingabe.



Für die 2D-Darstellung kann festgelegt werden, dass Solids hinter allen anderen Objekten gezeichnet werden („*Zeichenreihenfolge*“ bei der Eingabe des ersten Punktes). Im Standardfall werden die Objekte in der Reihenfolge ihrer Eingabe dargestellt.

## NURBS

**Non-Uniform Rational B-Splines** sind mathematisch definierte Kurven, Flächen oder Volumen, die zur Modellierung beliebiger Formen (Freiformen) verwendet werden. Im Prinzip kann jede beliebige technisch herstellbare oder in der Natur vorkommende Form mit Hilfe von NURBS dargestellt werden. Sie dienen hier dem Ziel, ein FE-Netz zu generieren.

Eine interaktive Bearbeitung von NURBS ist in der Regel intuitiv über sogenannte Kontrollpunkte möglich. Diese liegen entweder direkt auf dem NURBS oder wirken, als ob sie mit einem Gummiband damit verbunden sind.

### Definition einer NURBS-Kurve

Eine NURBS-Kurve von Grad  $p$  ist definiert durch:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i ; \quad a \leq u \leq b$$

mit

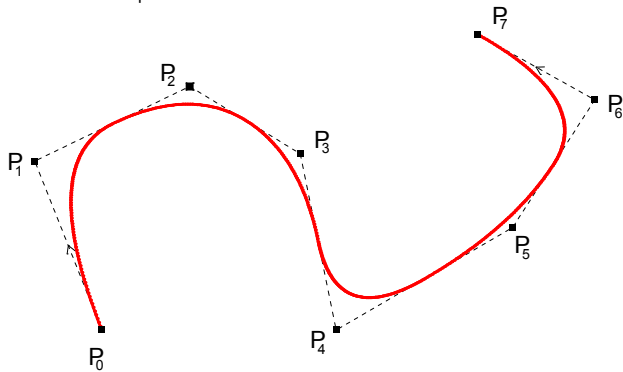
- $u$  Kurvenparameter.
- $n$  Index des Kontrollpunktes am Kurvenende.
- $p$  Polynomgrad der Kurve.
- $P_i$  Kontrollpunkte; diese erzeugen das Kontrollpolygon.
- $w_i$  Gewichte der Kontrollpunkte.
- $N_{i,p}(u)$  B-Spline Basisfunktionen vom Grad  $p$ .
- $R_{i,p}(u)$  Rationale Basisfunktionen vom Grad  $p$ .

Der Kurvenparameter  $u$  ist definiert auf dem Knotenvektor

$$U = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, b, \dots, b\}$$

Dieser hat  $m+1$  Elemente. Der erste und letzte Knoten wiederholt sich  $p+1$ -fach. Die Elemente des Knotenvektors sind in aufsteigender, nicht zyklischer Reihenfolge angeordnet, können jedoch ungleichförmig verteilt sein. In der Regel wird  $a=0$  und  $b=1$  gesetzt. Der Grad der Basisfunktionen kann im Prinzip beliebig gewählt werden. Aus konstruktiven und rechentechnischen Gründen sollte  $p$  zwischen 1 und 5 angenommen werden.

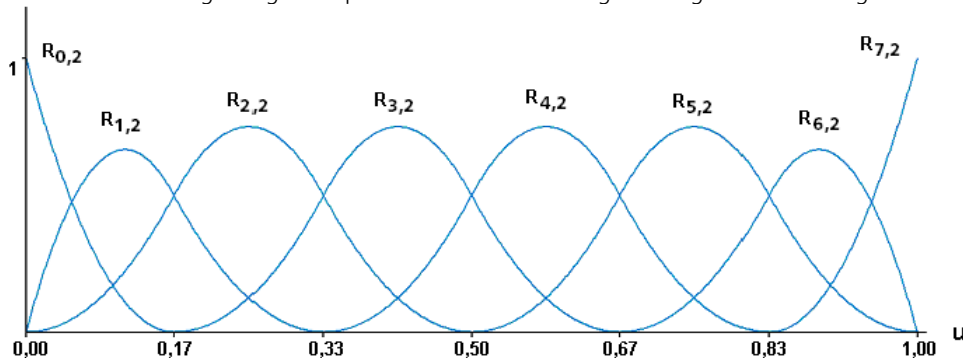
Die nachfolgende Abbildung zeigt eine NURBS-Kurve vom Grad 2 mit dem zugehörigen Kontrollpolygon. Die Gewichtung aller Kontrollpunkte ist  $w = 1$ .



Der zugrunde liegende Knotenvektor lautet:

$$U = \{0, 0, 0, 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6, 1, 1, 1\}$$

Den Verlauf der zugehörigen B-Spline Basisfunktionen zeigt die folgende Abbildung.



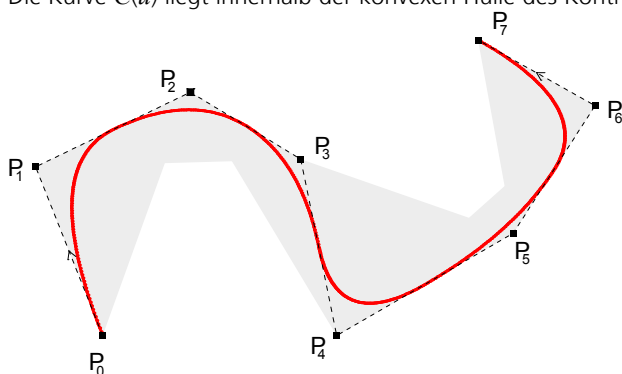
### Wichtige Eigenschaften der rationalen Basisfunktionen $R_{i,p}$

- $R_{i,p}(u) \geq 0$  für alle  $u \in [a, b]$ .
- Die Summe aller Basisfunktionen an jedem Ort  $u \in [a, b]$  ist gleich 1.
- Jede Basisfunktion hat im Intervall  $u \in [a, b]$  genau ein Maximum.
- $R_{i,p}(u) = 0$  außerhalb des Intervalls  $[u_i, u_{i+p+1}]$ .
- Für  $w_i = \text{const.}$  gilt  $R_{i,p}(u) = N_{i,p}(u)$ .
- Innerhalb einer Knotenspanne existieren alle Ableitungen von  $R_{i,p}(u)$ , an einem Knoten ist  $R_{i,p}(u)$   $(p-k)$ -mal stetig differenzierbar.  $k$  ist die Vielfachheit des jeweiligen Knotens.

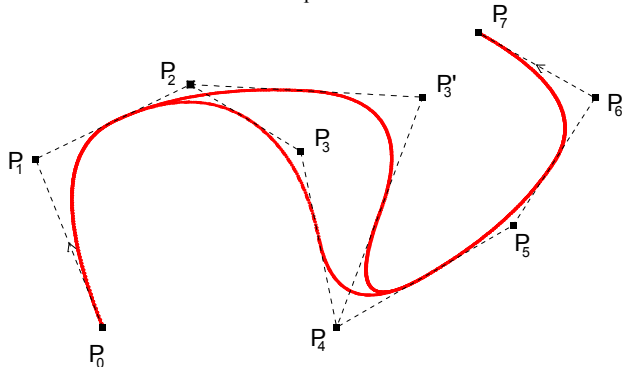
### Wichtige Eigenschaften von NURBS-Kurven

Aus den o.g. Eigenschaften der rationalen Basisfunktionen ergeben sich die folgenden Eigenschaften der NURBS-Kurven:

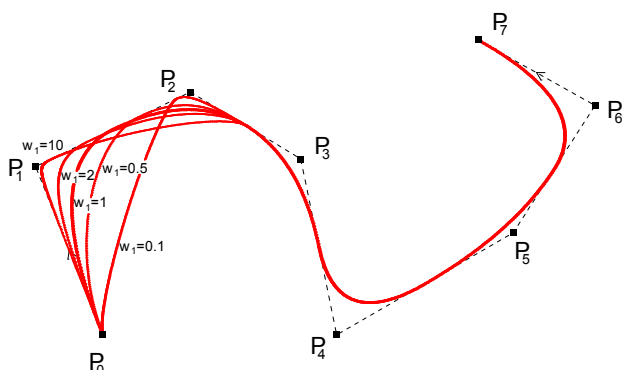
- $C(a) = P_0$  und  $C(b) = P_n$  für  $u \in [a, b]$ .
- Eine affine Transformation von NURBS-Kurven erfolgt durch Transformation der Kontrollpunkte.
- Die Kurve  $C(u)$  liegt innerhalb der konvexen Hülle des Kontrollpolygons.



- Eine NURBS-Kurve ohne innere Knoten ist eine rationale Bézier-Kurve. Somit beinhalten NURBS-Kurven sowohl nichtrationale B-Spline- als auch nichtrationale Bézier-Kurven.
- Die Änderung der Koordinaten oder des Gewichts eines Kontrollpunktes  $P_i$  wirkt sich nur auf den Teil der Kurve aus, der dem Intervall  $u \in [u_i, u_{i+p+1}]$  zugeordnet ist.

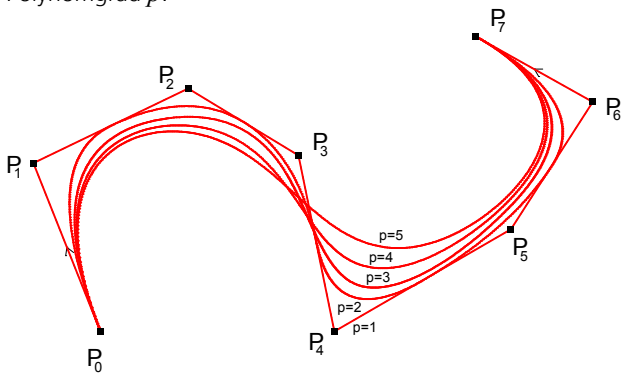


Verschiebung des Kontrollpunktes  $P_3$  nach  $P_3'$



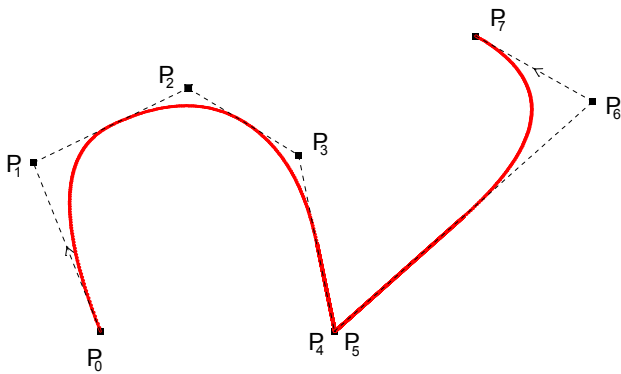
Änderung des Kurvenverlaufs durch unterschiedliche Gewichtung des Kontrollpunktes  $P_1$

- Je kleiner der Grad einer NURBS-Kurve ist, desto geringer ist die Abweichung vom zugehörigen Kontrollpolygon. Die nachfolgenden Kurven haben alle dasselbe Kontrollpolygon und denselben Knotenvektor jedoch unterschiedlichen Polynomgrad  $p$ .



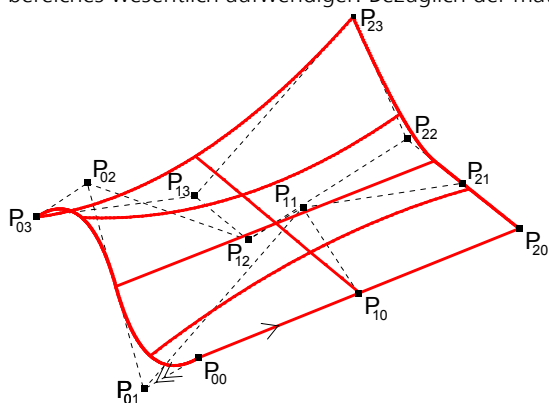
- Die Verwendung mehrfacher Kontrollpunkte führt zu Knicken in der Kurve. Dies ergibt sich unmittelbar aus der o.g. Bedingung der konvexen Hülle.

Die nächste Abbildung zeigt den Verlauf, nachdem Kontrollpunkt  $P_5$  auf  $P_4$  geschoben worden ist. In der Umgebung des Knicks verläuft die NURBS-Kurve linear. Einen vergleichbaren Effekt kann man durch Verwendung  $p$ -facher Knoten erreichen, da dies wie erwähnt zu einer Diskontinuität führt.



### NURBS-Flächen und -Volumen

Die Eigenschaften von NURBS-Kurven können formal auf Flächen und Volumen übertragen werden. Sämtliche Prinzipien bleiben dabei erhalten. Die numerische Behandlung wird jedoch aufgrund des zwei- bzw. dreidimensionalen Parameterbereiches wesentlich aufwendiger. Bezüglich der mathematischen Grundlagen wird auf die Fachliteratur verwiesen.



NURBS-Fläche mit zugehörigem Kontrollpolygon



## Eingabe und Bearbeitung

Die Eingabe einer NURBS-Kurve geschieht entweder über ihre Kontrollpunkte oder über Interpolationspunkte auf der NURBS-Kurve. Zur Bearbeitung von NURBS stehen folgende Kontextfunktionen zur Verfügung:

- Kurvenrichtung umkehren
- Kontrollpunkt verschieben
- Kontrollpunkt-Gewicht ändern
- Kurven verbinden
- Flächenrichtungen  $u, v$  vertauschen
- Knoten einfügen

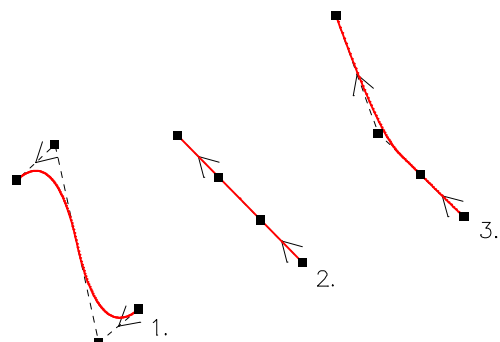
NURBS-Flächen werden mit Hilfe von NURBS-Kurven erzeugt. Dazu stehen folgende Kontextfunktionen zur Verfügung:

- Fläche aus Profilkurven erzeugen
- Fläche aus 4 Randkurven erzeugen
- Rotationsfläche erzeugen

NURBS-Volumen werden mit Hilfe von NURBS-Flächen erzeugt. Dazu stehen folgende Kontextfunktionen zur Verfügung:

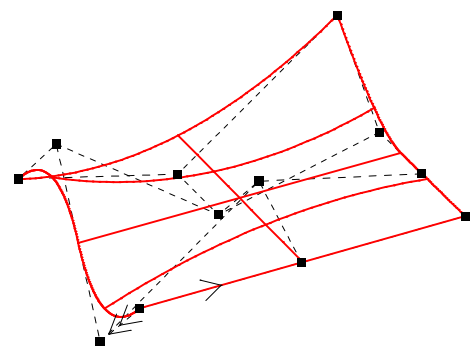
- Rotationsvolumen erzeugen
- Volumen aus Flächen erzeugen

### Beispiel für eine Fläche aus Profilkurven



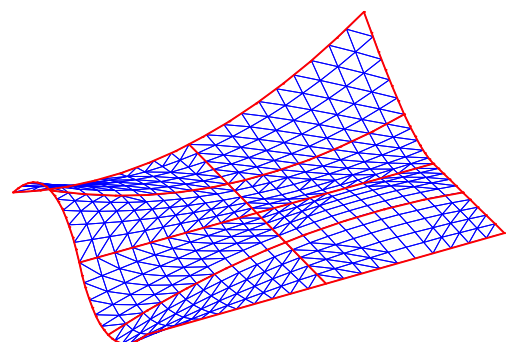
Drei NURBS-Kurven

Mit der Funktion *NURBS-Kurve* werden drei NURBS-Kurven gezeichnet. Dabei ist auf eine einheitliche Ausrichtung der Kurven zu achten.



NURBS-Fläche

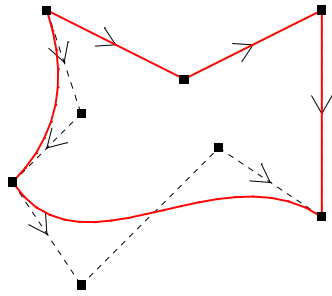
Die drei NURBS-Kurven werden in der Reihenfolge (1./2./3.) markiert. Sind die NURBS-Kurven markiert, wird die Kontextfunktion *Fläche aus Profilkurven erzeugen* ausgewählt. Der Grad der Fläche in der 2. Richtung wird in diesem Beispiel zu 2 gewählt.



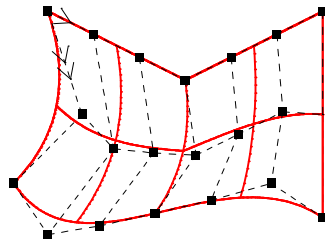
NURBS-Fläche mit FE-Netz

Über die Kontextfunktion *FE-Netz generieren* der NURBS-Fläche wird ein FE-Netz erzeugt.

**Beispiel für eine Fläche aus vier Randkurven**



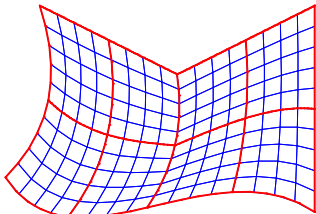
Zwei NURBS-Kurven



NURBS-Fläche

Mit der Funktion *NURBS-Kurve* werden vier unterschiedliche, zusammenhängende, NURBS-Kurven gezeichnet.

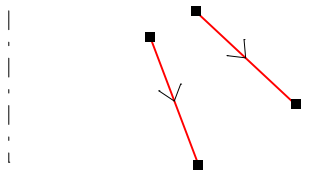
Sind die NURBS-Kurven markiert, wird die Kontextfunktion *Fläche aus 4 Randkurven erzeugen* ausgewählt.



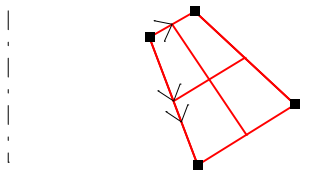
NURBS-Fläche mit FE-Netz

Über die Kontextfunktion *FE-Netz generieren* der NURBS-Fläche wird ein FE-Netz erzeugt.

**Beispiel für ein Rotationsvolumen**



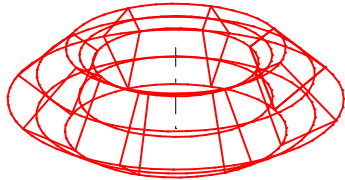
Zwei NURBS-Kurven



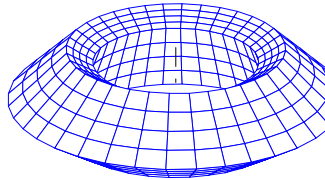
NURBS-Fläche

Mit der Funktion *NURBS-Kurve* werden NURBS-Kurven ersten Grades, mit jeweils zwei Kontrollpunkten, gezeichnet.

Sind die NURBS-Kurven markiert, wird die Kontextfunktion *Fläche aus Profilkurven erzeugen* ausgewählt.



NURBS-Volumen

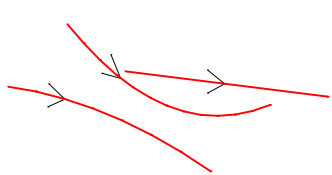


FE-Volumenmodell

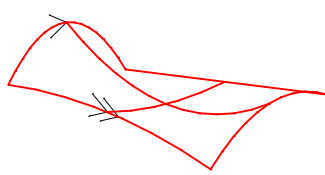
Über die Kontextfunktion *Rotationsvolumen erzeugen* der NURBS-Fläche wird ein NURBS-Volumen erzeugt.

Über die Kontextfunktion *FE-Netz generieren* des NURBS-Volumens werden Volumenelemente (VQ83) erzeugt.

**Beispiel für ein Volumen aus Flächen**

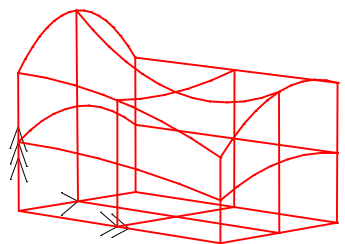


NURBS-Kurven

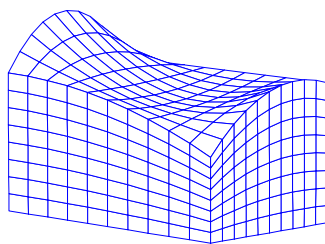


NURBS-Flächen

Mit den Funktionen *NURBS-Kurve* und der Kontextfunktion *Fläche aus Profilkurven erzeugen* werden zwei räumliche NURBS-Flächen erzeugt. Dabei ist auf eine einheitliche Orientierung der NURBS zu achten.



NURBS-Volumen



FE-Volumenmodell

Sind die NURBS-Flächen markiert, wird die Kontextfunktion *Volumen aus Flächen erzeugen* ausgewählt. Im Anschluss werden über die Kontextfunktion *FE-Netz generieren* des NURBS-Volumens Volumenelemente (VQ83) erzeugt.

## Modell

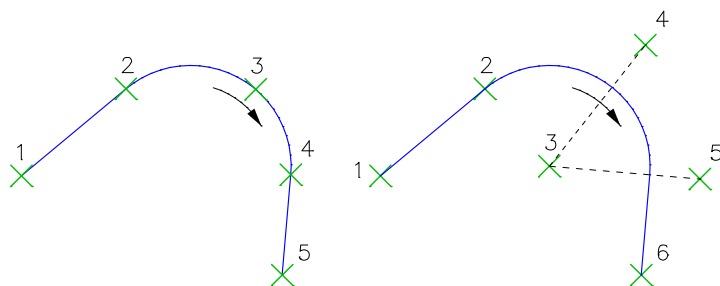
Modellobjekte beschreiben die Geometrie und die Eigenschaften einzelner Tragwerksteile. Sie bilden die Grundlage zur programmgesteuerten Erzeugung des Finite-Element-Netzes durch einen Netzgenerierer.

### Rand

Ränder definieren den Rand und die Achsen von Tragwerksteilen. Abhängig von ihren Eigenschaften können sie zusätzlich eine Linienlagerung, einen Stabzug, freie Stäbe (z.B. Stützen), Federn oder Koppelungen definieren (siehe *Eigenschaftsdialog für Rand- und Lochobjekte*). Ränder begrenzen zusammen mit dem Modellobjekt *Wand* ein ebenes Gebiet für die Netzgenerierung.

#### Eingabe

<i>Randanfang</i>	Randanfang eingeben.
<i>Randende</i>	Randende eingeben.
<i>Anfang</i>	Anfang eines neuen Randes eingeben.
<i>Bogen</i>	Bogenförmigen Randabschnitt eingeben.
<i>Kreis</i>	Eingabe eines kreisförmigen Randes.
<i>Eigenschaften</i>	Randeigenschaften voreinstellen.



Varianten zur Konstruktion von Rändern

Eingabe via Bogenpunkt	Eingabe Mittelpunkt
1 Randanfangspunkt	1 Randanfangspunkt
2 Randendpunkt	2 Randendpunkt
3 Punkt auf Bogen	3 Mittelpunkt
4 Bogenendpunkt	4 Richtung zwischen Anfang und Ende
5 Randendpunkt	5 Richtung Bogenendpunkt
	6 Randendpunkt

### Loch

Lochobjekte definieren Aussparungen für die Netzgenerierung. Diese müssen geschlossene Polygone bilden und sind linien- oder bogenförmig. Sie werden mit Liniensstil 2 (kurz gestrichelt) dargestellt und können optional z.B. einen Stabzug definieren (siehe *Eigenschaftsdialog für Rand- und Lochobjekte*).

#### Eingabe

<i>Lochanfang</i>	Anfangspunkt eines Lochobjekts eingeben.
<i>Lochendpunkt</i>	Endpunkt eines Lochobjekts eingeben.
<i>Schließen</i>	Polygon schließen.
<i>Anfang</i>	Anfang eines neuen Lochobjekts eingeben.
<i>Bogen</i>	Bogenförmiges Lochobjekt eingeben.
<i>Kreis</i>	Eingabe eines kreisförmigen Lochs.

Im Hinblick auf die Netzgenerierung ist darauf zu achten, dass Löcher entlang von Wänden bis an die Wandachsen vergrößert werden, da ansonsten Elemente zwischen dem Loch und der Wandachse erzeugt werden.



*schlecht*

*besser*

## Eigenschaftsdialog für Rand- und Lochobjekte

Im Wesentlichen wird die Bedeutung für die Netzgenerierung eingestellt.

Zur Auswahl stehen:

- *Standard*  
Berandung oder Zwangslinie für die Generierung von Flächenelementen.
- *Lager*  
Linienlager im Flächenelementnetz. Die Lagereigenschaften werden mit den Dialogfeldern unter *Lagerung* eingegeben.
- *Stabzug*  
Zusätzlicher Stabzug im Flächenelementnetz z.B. für Unterzüge. Der Querschnitt wird mit Hilfe der Dialogfelder *Querschnitt am Anfang* bzw. *Querschnitt am Ende* ausgewählt. In Verbindung mit den Querschnittsarten *Polygon*, *Rechteck* und *Stab* können unterschiedliche Anfangs- und Endquerschnitte vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann für jedes Stabelement einen Querschnitt. Dies ermöglicht die Modellierung einer Voute. Bei Polygonquerschnitten wird die Lage der Polygonpunkte interpoliert. Dafür müssen die Anzahl und die Anordnung der Polygonpunkte übereinstimmen.
- *Lager+Stabzug*  
Linienlager und Stabzug im Flächenelementnetz.
- *Freier Stab*  
Es werden gleichlange Stabelemente entsprechend der angegebenen Teilung erzeugt (Querschnitt siehe *Stabzug*). Das Koordinatensystem der Stäbe wird mit dem gewählten Winkel um die Stabachse gedreht. Die Verwendung dieser Eigenschaft am Rand oder innerhalb von Flächenelementnetzen ist nicht sinnvoll!
- *Pfahl-Stab*  
Je Bodenschicht werden Stabelemente entsprechend der angegebenen Teilung und Bettungseigenschaften erzeugt. Die Schichten des Bettungsprofils sowie die Ordinate  $z_0$  gelten in globaler z-Richtung. Stäbe oberhalb von  $z_0$  sowie unterhalb des Bettungsprofils erhalten die Bettungseigenschaften des *Querschnitts am Anfang*. Das Koordinatensystem der Stäbe wird mit dem gewählten Winkel um die Stabachse gedreht. Die Verwendung dieser Eigenschaft am Rand oder innerhalb von Flächenelementnetzen ist nicht sinnvoll!
- *Feder*  
Es werden Federn zwischen dem Anfang und dem Ende der Rand- bzw. Lochobjekte erzeugt.
- *Koppelung*  
Es werden Koppelungen zwischen dem Knoten am Anfang und am Ende der Rand- bzw. Lochobjekte erzeugt.

Layer und Farbe der zu erzeugenden Objekte werden durch die in der Oberfläche eingestellten Eigenschaften (*Standard*), die Eigenschaften des Randes (*Übernehmen*) oder durch direkte Auswahl festgelegt.

## Wand

Wände definieren den Rand von Tragwerksteilen für die Netzgenerierung und zusätzlich eine Linienlagerung. Geometrisch maßgebend sind die Wandachsen. Wände sind speziell für die Erzeugung von Plattensystemen geeignet.

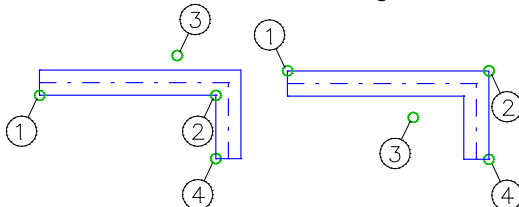
### Eingabe

*Wandanfang*      Anfangspunkt der Wand eingeben.

*Wandende*        Endpunkt der Wand eingeben. Die Länge einer Wand muss mindestens die Hälfte der Wandbreite betragen, da es an kurzen Wänden bei der Vernetzung zu sehr ungünstigen oder gar unzulässigen Seitenverhältnissen der Elemente kommen kann.

*Seite auf der die Wand liegt*

Durch einen weiteren Punkt wird festgelegt, auf welcher Seite die Wand in Bezug auf den eingegebenen Anfangs- und Endpunkt liegt. Die folgenden Bilder zeigen zwei Varianten zur Eingabe des dritten Punktes und die mit einem vierten Punkt fortgesetzte Wandeingabe.



Statt die Wandseite festzulegen kann alternativ auch die Wandachse gewählt werden.

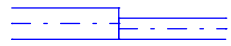
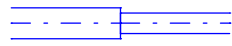

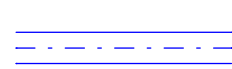
*Anfang*            Anfang einer neuen Wand eingeben.

*B =*                Eingabe der Wandstärke.

*Achse: Ein*       Darstellung der Wandachsen ein- oder ausschalten.

*Eigenschaften*    Wandeigenschaften voreinstellen. Dies sind die Lagerungsbedingungen und die Wandbezeichnung.



Im Hinblick auf die Netzgenerierung ist auf folgende Punkte zu achten:

Problematik	schlecht	besser
Wandversprünge sollten vermieden werden. Diese führen zu ungünstigen Seitenverhältnissen bei der Elementierung und zu unerwünschten Singularitäten in den Ergebnissen.		
Kurze Wandvorlagen sollten vermieden werden, da die bei der Vernetzung erzeugten Festhaltungen meist zu unerwünschten Einspannungen führen.		

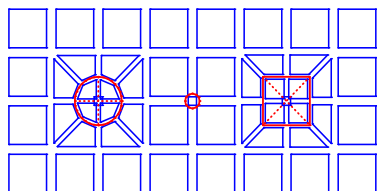
## Stütze

Stützen definieren ein Punktlager und wahlweise eine Stützenkopfverdichtung im Elementnetz.



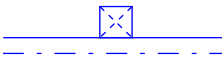

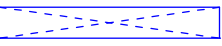


### Eingabe

<i>Stützenmittelpunkt</i>	Eingabe einer Punktstütze ohne Abmessungen.
<i>Kreis</i>	Eingabe einer Rundstütze durch Mittelpunkt und Durchmesser.
<i>Rechteck</i>	Eingabe einer Rechteckstütze durch den Mittelpunkt, die Abmessungen in x- und y-Richtung sowie einen Drehwinkel.
<i>Ecken</i>	Eingabe einer Rechteckstütze durch drei Eckpunkte.
<i>Eigenschaften</i>	Stützeigenschaften voreinstellen. Diese umfassen die Lagerungsbedingung, eine Bezeichnung und die Stützenkopfverdichtung, für die folgende Symbolik verwendet wird: Eingeschaltete Verdichtung:  Ausgeschaltete Verdichtung: 

Das nachfolgende Bild zeigt die *Kreisstütze*, *Punktstütze* und *Rechteckstütze* mit entsprechender Elementierung nach der automatischen Netzgenerierung (Darstellung im Schrumpfmodus).

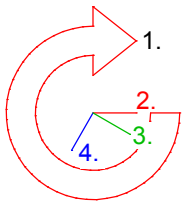


Im Hinblick auf die Netzgenerierung ist auf folgende Punkte zu achten:

Problematik	schlecht	besser
Stützen sollten mittig unter Unterzüge (Ränder) gesetzt werden, da ansonsten keine direkte Lagerung der Unterzüge besteht.		
Kurze Wandvorlagen sollten vermieden werden, da die bei der Vernetzung erzeugten Festhaltungen der Wand und der Stütze meist zu unerwünschten Einspannungen führen.		
Bei Stützenabmessungen $\gg 2/1$ sollte die Stützenkopfverdichtung abgeschaltet sein oder eine Wand anstelle der Stütze gezeichnet werden, da ansonsten die Seitenverhältnisse der Elemente ungünstig sind.		 bzw. 

## Modellfläche

Eine Modellfläche beschreibt ein ebenes Gebiet für die spätere Vernetzung durch einen Netzgenerierer. Ränder, Wände und Löcher bilden die äußere Begrenzung des Gebietes und müssen daher vor der Modellfläche eingegeben werden. Alle Modellobjekte im Inneren der Fläche werden bei der Netzgenerierung berücksichtigt.



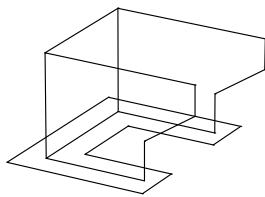
Symbolik einer markierten Modellfläche:

1. Drehsinn der lokalen z-Achsen. Die Richtung kann über das Kontextmenü umgekehrt werden.
2. Lokale x-Achse des Elementensystems (rot).
3. Lokale x-Achse des Schnittkraftsystems (grün, wenn abweichend vom Elementensystem).
4. Lokale y-Achse des Bewehrungssystems (blau).

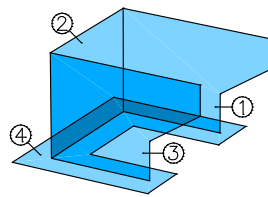
Einer Fläche können über das Kontextmenü Liniengelenke und über einen eigenen Dialog weitere Eigenschaften für das FE-Netz zugeordnet werden.

Für markierte Modellflächen und Kegel lassen sich über das Kontextmenü die Durchdringungskurven berechnen. Die dabei entstehenden Teilflächen werden durch eingerückte Konturlinien kenntlich gemacht (siehe Beispiel).

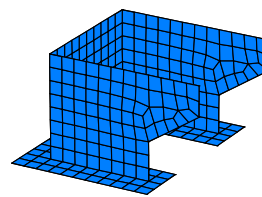
Die Kontextoption *Modellflächenkontur* stellt Begrenzungsobjekte von Modellflächen, die nur eine Modellfläche begrenzen, in rot dar.



Ränder



Modellflächen



FE-Netz

## Eingabe

### Wähle Begrenzungsobjekte

Auswahl von Rändern, Wänden oder Lochobjekten, welche die Umrandung der Modellfläche bilden.

Nach jeder Auswahl sucht das Programm weitere Begrenzungsobjekte, bis die Fläche eindeutig beschrieben ist. Sie ist nicht ausschließlich durch Lochobjekte begrenzt. Markierte Objekte werden durch nochmalige Auswahl wieder abgewählt.

*Rand suchen* Sucht die Begrenzungsobjekte, welche die größtmögliche Modellfläche beschreiben.

*Eigenschaften* Eigenschaften voreinstellen.

Werden Begrenzungsobjekte einer Fläche gelöscht oder verschoben, so wird die Modellfläche entfernt.

## Eigenschaftsdialog

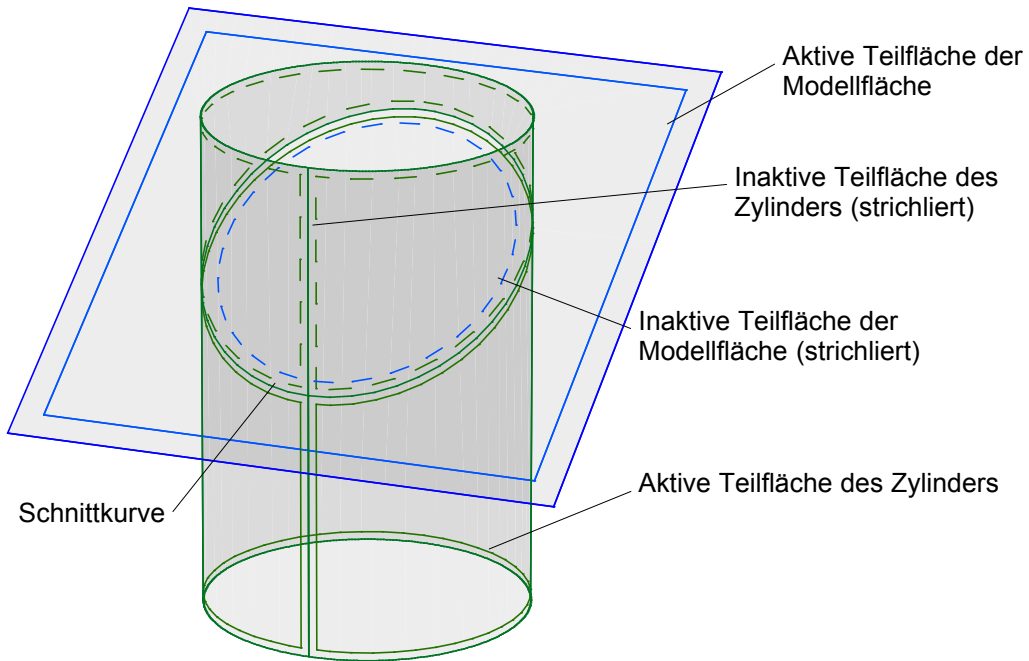
Der Dialog umfasst folgende Eigenschaften:

- Querschnitt der Elemente
- Layer der Elemente
- Farbe der Elemente
- Teilsicht der Elemente
- Bezeichnung
- Faktor für Netzweite
- Berücksichtigung von etwaigen Teilflächen bei der Netzgenerierung
- Drehung der Element-, Schnittkraft- und Bewehrungssysteme [°]

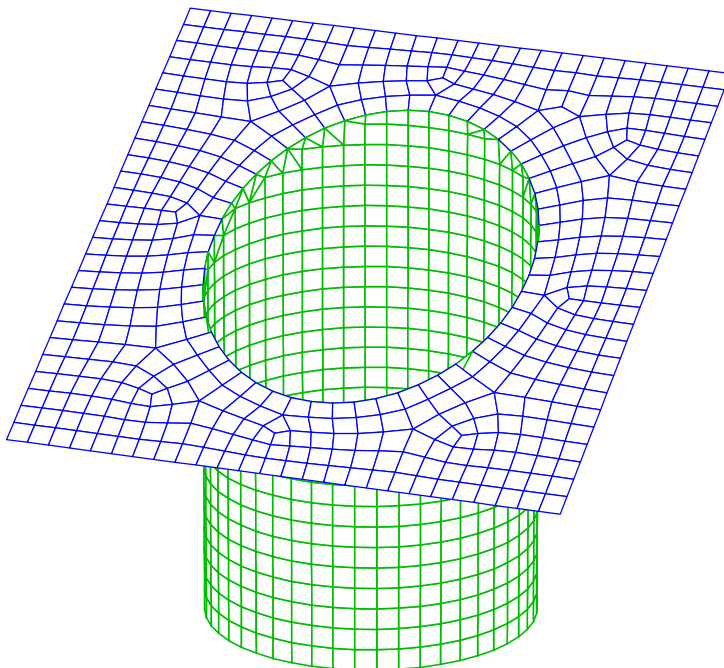
Bei der Auswahl *Standard* gilt die in der Oberfläche eingestellte Eigenschaft, bei *Übernehmen* die Eigenschaft der Modellfläche. Die Bedeutung der Teilflächen wird in dem nachfolgenden Beispiel verdeutlicht.

**Beispiel: Anschluss eines Zylinders an eine Modellfläche**

Das Beispiel zeigt die Bedeutung von aktiven und inaktiven Teilflächen eines Zylinders und einer Modellfläche.



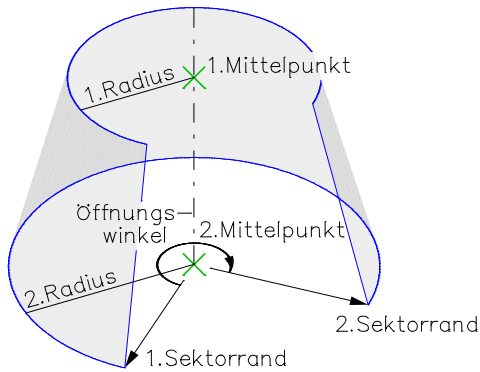
Modellfläche und Zylinder mit Schnittkurve und Teilflächen



Generiertes Elementnetz

## Kegel

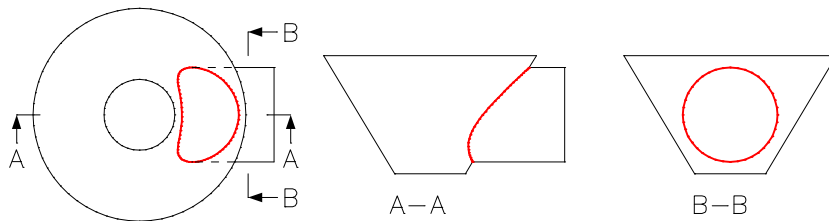
Das Modellobjekt *Kegel* beschreibt ein Kegelstumpfsegment für die spätere Vernetzung. Über das Kontextmenü kann die Durchdringung mit anderen markierten Kegeln oder Modellflächen ermittelt werden. Ferner können einem Kegel Eigenschaften für das FE-Netz zugeordnet werden.



Die Definition eines Kegelstumpfes geschieht mit den Bestimmungsstücken 1. und 2. Mittelpunkt, 1. und 2. Radius, Sektor. Alternativ ist die Definition durch Auswahl von Begrenzungsobjekten (Ränder) möglich.

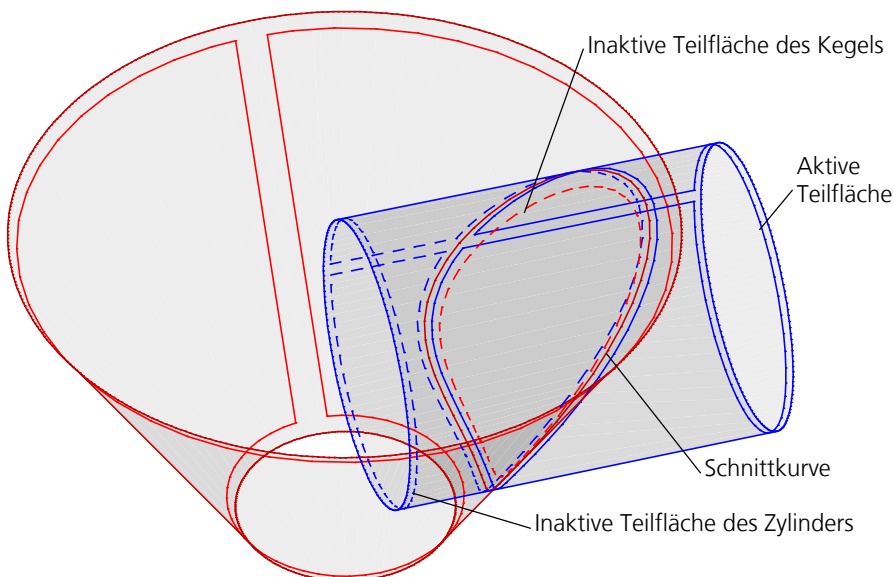
### Beispiel: Abfluß eines Behälters

Das Beispiel zeigt die Vernetzung eines Kegels und eines Zylinders unter Berücksichtigung ihrer Durchdringung.



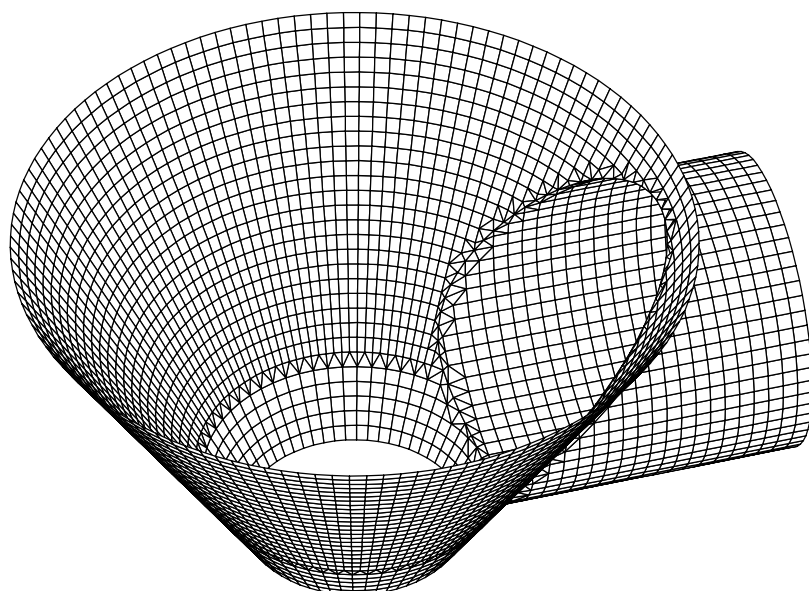
Es wird in folgenden Schritten vorgegangen:

1. Zeichnen des Kegels und des Zylinders.
2. Beide Objekte markieren und die Durchdringung berechnen (Kontextmenü). Die dabei entstandenen Teilflächen werden durch einen eingerückten Linienzug kenntlich und markierbar gemacht.
3. Die innenliegenden Teilflächen des Kegels und des Zylinders markieren und inaktiv schalten (Modellfläche, -kegel aus dem Kontextmenü). Inaktive Teilflächen werden strichliert dargestellt.
4. Generieren des Elementnetzes mit dem formtreuen Netzgenerierer.



Kegel und Zylinder mit Schnittkurve und Teilflächen



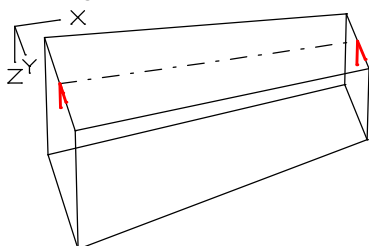


Generiertes Elementnetz

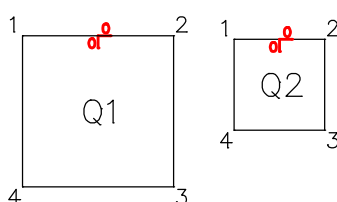
## Volumen

Das Modellobjekt *Volumen* beschreibt einen Volumenkörper für die spätere Vernetzung mit Tetraederelementen *VT10*. Dem Volumen können Eigenschaften für das FE-Netz zugeordnet werden. Der Körper kann auf folgende Arten erzeugt werden:

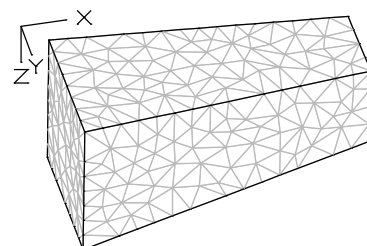
- Extrusion einer polygonal berandeten Fläche
- Extrusion zweier unterschiedlicher Flächen am Anfang und Ende der Extrusionsachse
- Eingabe eines Quaders über 8 diskrete Punkte



Volumen mit Extrusionsachse



Querschnitte am Anfang und Ende



Tetraederelemente

Die Definition eines Volumens geschieht mit folgenden Bestimmungsstücken:

- Querschnitt am Anfang
- Querschnitt am Ende (optional)
- Start- und Endpunkt der Extrusionsachse
- Punkt in lokaler *xz*-Ebene oder Enter (nur in 3D)
- Mit der Option *Bogen* wird eine bogenförmige Extrusionsachse durch eine gewählte Anzahl Segmente angenähert.

Die beiden Querschnittspolygone müssen die gleiche Anzahl an Polygonpunkten aufweisen. Anderenfalls wird der Querschnitt am Anfang extrudiert. Die Extrusionsachse verläuft zwischen den Nullpunkten der beiden Polygone.

## Eigenschaften des Volumens

Der Dialog umfasst folgende Eigenschaften:

- Querschnitt der Elemente
- Layer der Elemente
- Farbe der Elemente
- Teilsicht der Elemente
- Bezeichnung
- Kriterien zur Steuerung der Elementqualität bei der Netzgenerierung
  - *Gesamtvolumen / Elementvolumen*: Dieses Verhältnis begrenzt die Größe der Elemente.
  - *Umkugelradius / min. Kantenlänge*: Dieses Verhältnis beschreibt die Qualität der Elementformen. Mit kleineren Werten wird die Qualität der Elemente verbessert, ihre Anzahl allerdings erhöht.
- Koordinatensystem der Spannungen. Dieses kann auch mit der Funktion *Elementsystem* geändert werden.

### Eigenschaften der Oberflächen

Jeder Oberfläche eines Volumenkörpers können über das Kontextmenü folgende Eigenschaften zugeordnet werden:

- Farbe
- Bezeichnung
- Bettung mit den im Querschnitt definierten Bettungsmoduln
- Beschreibung von Kontaktproblemen (siehe *Kontakt*)

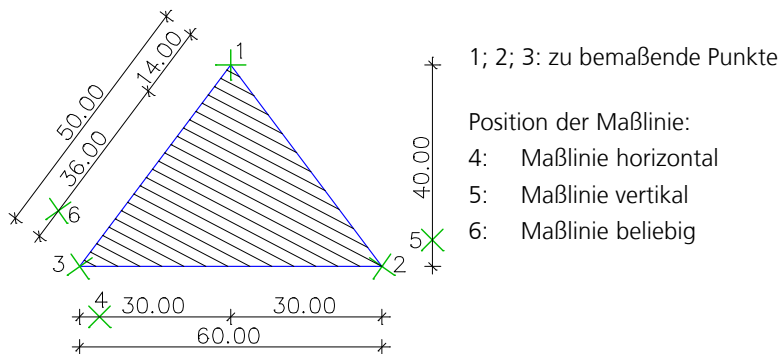
Um Oberflächen markieren zu können, muss im 3D-Modus die *Verdeckt-* oder *Querschnittsdarstellung* eingeschaltet werden. Die Oberflächeneigenschaften werden nummeriert.

### Ändern, teilen und Endpunkt ändern

Über die Kontextfunktionen *Ändern*, *Teilen* und *Endpunkt ändern* kann der Volumenkörper bearbeitet werden.

## Bemaßung

Mit dieser Funktion ist eine halbautomatische ebene und räumliche Bemaßung von Objekten möglich.











### Eingabe

<i>Punkt</i>	Einzelne Punkte wählen, die vermaßt werden sollen.
<i>Schnitt</i>	Linie definieren, deren Schnittpunkte mit Objekten vermaßt werden.
<i>Objekte</i>	Objekte wählen, deren Referenzpunkte (z.B. Anfang, Ende) vermaßt werden sollen.
<i>Horizontal</i>	Horizontale Orientierung der Maßlinie im 2D-Modus.
<i>Vertikal</i>	Vertikale Orientierung der Maßlinie im 2D-Modus.
<i>Beliebig</i>	Orientierung der Maßlinie durch Definition einer freien Richtung.
<i>Neueingabe</i>	Zu vermaßende Punkte neu wählen.
<i>Position</i>	Lage der Maßlinie ändern.
<i>Font</i>	Schriftart der Maßlinie.
<i>Texthöhe</i>	Höhe der Maßzahlen [m] vorgeben.
<i>Ausgabe</i>	Ausgabegenauigkeit auf [cm] bzw. [mm] festlegen.
<i>Art</i>	Festlegung ob ein Teilmaß, ein Gesamtmaß oder beides (Standard) erzeugt werden soll.

Ausgewählte Punkte können nacheinander in mehreren Richtungen bemaßt werden. Bei Wänden werden mit den Bemaßungsoptionen *Objekte* und *Schnitt* die Achsen oder die Ränder vermaßt, je nachdem, ob die Achsen der Wände sichtbar oder unsichtbar sind. Die abgespeicherte Bemaßung besteht aus Linien und Texten und ist nicht assoziativ.

## Fangen

Das Fangen-Menü enthält Hilfsfunktionen für die Koordinateneingabe. Die Fangmodi dienen dazu, mit dem Fadenkreuz exakte Koordinaten von Objektpunkten einzugeben. Ein Fangmodus kann während des laufenden Dialogs eingeschaltet werden und bleibt solange aktiv, bis er ausgeschaltet oder ein anderer Modus gewählt wird. Der gewählte Modus übersteuert den automatischen Fangmodus.

	<i>Knoten</i>	Fangen von Stab- und Elementknoten einschalten.
	<i>Ende</i>	Fangen der Endpunkte von Linien, Bögen, Solids, Wänden und Stützen einschalten.
	<i>Mitte</i>	Fangen des Mittelpunkts von Kreisen, Bögen und Stützen sowie der Mitte von Linien einschalten.
	<i>Schnittpunkt</i>	Fangen der Schnittpunkte von Linien, Kreisen, Bögen und Stäben einschalten.
	<i>Normale</i>	Fangen von Lotpunkten einschalten. Mit dieser Funktion wird die Normale vom letzten Punkt auf eine Linie, eine Wand, einen Kreis, einen Bogen, einen Stab oder ein Flächenelement ermittelt.
	<i>Objektpunkt</i>	Fangen des nächstgelegenen Punkts von Linien, Wänden, Kreisen oder Bögen einschalten.
	<i>Relativkoordinaten</i>	Permanente relative Koordinateneingabe ein- oder ausschalten.
	<i>Bezugspunkt</i>	Lokales Bezugssystem definieren.
	<i>Orthogonal</i>	Orthogonal Modus ein- oder ausschalten.
	<i>Fangraster</i>	Fangraster ein- oder ausschalten.
	<i>Einstellen...</i>	Fangraster, Rasterpunkte, Orthogonal Modus und Fangradius einstellen.

## Relativkoordinaten

Mit dieser Funktion kann in die permanente relative Koordinateneingabe umgeschaltet werden. Die Eingabe des &-Zeichens vor den Koordinatenwerten ist dann nicht mehr nötig. Wenn der Modus aktiv ist, wird das Bezugssystem am aktuellen Bezugspunkt angezeigt.

## Bezugspunkt

Diese Funktion dient zum Festlegen eines lokalen Bezugssystems für die Tastatureingabe von Relativkoordinaten.

### Eingabe

#### *Neuer Bezugspunkt*

Neuen Bezugspunkt eingeben.

*Alter* Alten Bezugspunkt beibehalten.

*Standard* Bezugssystem auf Standardeinstellung zurücksetzen.

*Anzeige* Aktuelles Bezugssystem anzeigen.

#### *Neue Richtung lokale x-Achse*

Punkt zur Festlegung der lokalen x-Achse eingeben.

*Alte* Richtung der alten lokalen x-Achse beibehalten.

*Global* Richtung der globalen x-Achse wählen.

*Winkel* Winkel [°] gegen die globale x-Achse eingeben.

## Fangen einstellen

Mit diesem Dialog werden Fangoptionen eingestellt.

### Fangraster

Das Fangraster dient zur Koordinateneingabe mit dem Fadenkreuz. Bei eingeschaltetem Fangraster springt das Fadenkreuz zum nächstgelegenen Fangpunkt. Die Fangpunkte werden durch ihren Abstand [m] festgelegt.

### Rasterpunkte

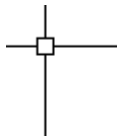
Hilfsraster ein- oder ausschalten. Der Abstand der Rasterpunkte [m] ist einzustellen.

### Orthogonal Modus

Orthogonal Modus ein- oder ausschalten.

### Fangradius für Objekte

Beim Markieren von Objekten mit dem Fadenkreuz wird in dessen Zentrum ein Fangfenster dargestellt. Die Objekte werden ausgewählt, wenn sie im Fangfenster liegen oder davon berührt werden. Die Größe des Fangfensters wird durch den Fangradius in Bildpunkten definiert.



### Objekte mit kreuzendem Fenster (von rechts nach links) markieren

Wird ein Fenster aufgezogen, werden alle Objekte ausgewählt, die sich vollständig im Fenster befinden. Ist diese Option gewählt und wird das Fenster von rechts nach links aufgezogen, werden zusätzlich alle Objekte markiert die vom Fenster angeschnitten werden.

## Format

Die nachfolgenden Funktionen stehen im Format-Menü zur Formatierung von Tabellen und insbesondere von Texten bzw. Berechnungsprotokollen zur Verfügung.

### Schriftart ...

Wählt die Schriftart für die aktuelle Auswahl.

### Aufzählungszeichen

Fügt in die markierten Zeilen ein Aufzählungszeichen ein.

### Zeilenumbruch

Der Zeilenumbruch bewirkt, dass der gesamte Text auf dem Bildschirm sichtbar ist, hat jedoch keinen Einfluss auf das Erscheinungsbild des gedruckten Textes.

### Absatz...

Startet den Dialog zur Einstellung folgender Formatierungen der markierten Absätze:

- Texteinzug vom linken Rand [cm].
- Texteinzug vom rechten Rand [cm].
- Texteinzug der ersten Zeile vom linken Rand [cm].  
Es kann ein negativer Wert eingegeben werden, um einen hängenden Einzug einzustellen.
- Der markierte Absatz kann linksbündig, zentriert oder rechtsbündig ausgerichtet werden. Diese Funktion steht nur bei eingeschaltetem *Zeilenumbruch* zur Verfügung.

### Tabstopps...

Die Funktion startet den Dialog zur Festlegung der Tabstopps in einem markierten Absatz.

- Um eine Tabstoppposition zu setzen, ist die Position des neuen Tabstopps (z. B. 0,5) im Feld *Tabulatorposition* einzugeben und durch die Schaltfläche *Festlegen* zu übernehmen [cm].
- Um eine Tabstoppposition aus dem markierten Absatz zu löschen, ist der betreffende Eintrag aus der Liste zu wählen und anschließend mit der Schaltfläche *Löschen* zu entfernen.
- Um alle Tabstopppositionen des markierten Absatzes zu löschen, ist die Schaltfläche *Alles löschen* zu betätigen.

### Kleine Druckerschrift

Wählt für die Tabellenausgabe eine kleine Druckerschrift.

## Extras

Die nachfolgenden Funktionen stehen im Extras-Menü zur Verfügung:

<i>Liste</i>	Informationen zu Objekten anzeigen.
<i>Koordinaten</i>	Koordinaten bestimmen.
<i>Distanz</i>	Entfernung bestimmen.
<i>Fläche</i>	Fläche und Umfang bestimmen.
<i>Winkel</i>	Winkel bestimmen.
<i>Variable</i>	Zahlenvariable definieren.
<i>Seitenrahmen</i>	Seitenrahmen bearbeiten.
<i>Systemdatei</i>	Systemdatei <i>lgraph.dat</i> mit benutzerspezifischen Einstellungen importieren oder exportieren.
<i>Archivieren...</i>	Ausgewählte Projektdateien archivieren.
<i>Automatisches Speichern...</i>	Zeitintervall für das automatische Sichern einstellen.
<i>Ziehen markierter Objekte</i>	Transferoperation markierter Objekte bei gedrückter linker Maustaste ermöglichen.
<i>Fensterhintergrund schwarz</i>	Der Hintergrund der Graphikansicht wird in schwarz dargestellt.
<i>Bemessungsnormen</i>	Startet den Dialog zur Einstellung der in der Benutzeroberfläche zur Verfügung stehenden Bemessungsnormen.
<i>Sprache</i>	Schaltet die Oberflächensprache um.

## Liste

Mit dieser Funktion werden die Eigenschaften von markierten Objekten angezeigt.

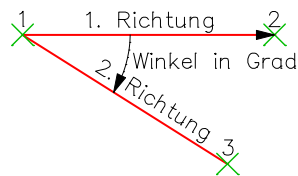
## Distanz

Mit der Distanz-Funktion wird der Abstand zwischen zwei Punkten oder die Länge eines Polygonzugs berechnet. Das Ergebnis wird in der Statusleiste angezeigt [m].

## Fläche

Diese Funktion ermittelt Flächeninhalt und Umfang eines ebenen Polygonzugs. Die Ergebnisse werden in der Statusleiste angezeigt.

## Winkel



Der Winkel zwischen zwei Richtungen wird durch Eingabe von drei Referenzpunkten berechnet. Das Ergebnis wird in der Statusleiste angezeigt.

## Variable

Variablen dienen zum Speichern von Skalaren, um sie bei einer späteren Tastatureingabe wiederzuverwenden. Der Anfang der Variablennamen darf keinem Funktionsausdruck entsprechen.

Variablen können zusammen mit Konstanten in arithmetischen Ausdrücken benutzt werden.

## Seitenrahmen

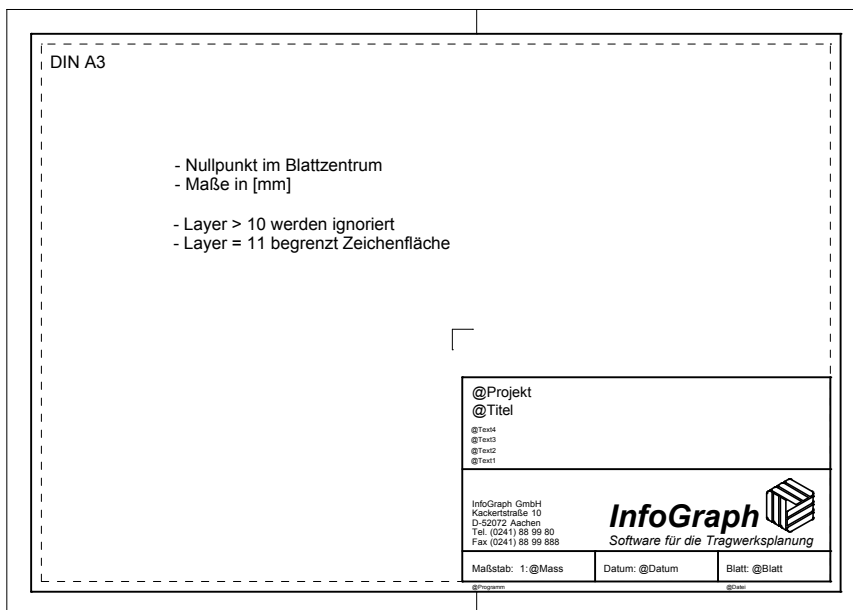
Seitenrahmen werden für die Druckausgabe benutzt. Folgende besondere Funktionen stehen im Dateimenü des Seitenrahmenfensters zur Verfügung:

<i>Neu</i>	Erstellt einen neuen Seitenrahmen. Der aktuelle Seitenrahmen wird geschlossen.
<i>Öffnen</i>	Öffnet einen bestehenden Seitenrahmen.
<i>Speichern</i>	Speichert den aktuellen Seitenrahmen.
<i>Speichern unter</i>	Speichert den aktuellen Seitenrahmen unter neuem Namen. Er kann projektbezogen in der Projektdatei oder projektübergreifend in der Systemdatei <i>lgraph.dat</i> gespeichert werden.
<i>Beenden</i>	Verlässt das Seitenrahmenfenster und fragt, ob Änderungen im aktuellen Seitenrahmen gespeichert werden sollen.

Zur Gestaltung des Seitenrahmens sind alle Zeichnungsobjekte nutzbar. Zusätzlich können folgende Textvariablen frei positioniert werden:

<i>@Projekt</i>	Projektbezeichnung. *)
<i>@Titel</i>	Bezeichnung der Abbildung. *)
<i>@T1...6</i>	Zusätzliche Titelzeilen. *)
<i>@Text1...9</i>	Erläuterungen der jeweiligen Darstellungen. Sind diese Textvariablen nicht vorhanden, werden die Erläuterungen in der unteren linken Ecke der Zeichenfläche ausgegeben.
<i>@Texta, b, c</i>	Freie Variablen mit zusätzlichen Texten. *)
<i>@Objekt</i>	Bezeichnungstext von Graphikansichten der Druckliste.
<i>@Ordner</i>	Aktueller Ordnername für Einträge der Druckliste.
<i>@Ordner1, 2, 3</i>	Ordnername der entsprechenden Ebene für Einträge der Druckliste.
<i>@Kapitel</i>	Vollständiger Ordnerpfad für Einträge der Druckliste.
<i>@Mass</i>	Maßstab des Plots. *)
<i>@Datum</i>	Tagesdatum. *)
<i>@Zeit</i>	Uhrzeit. *)
<i>@Blatt</i>	Blattnummer. *)
<i>@Programm</i>	Versionsbezeichnung von InfoCAD.
<i>@Datei</i>	Name der Projektdatei.
<i>@Pfad</i>	Vollständiger Pfad zu der Projektdatei.

\*) Diese Variablen werden beim Ausdruck mit den Texten ersetzt, die im Dialog *Seite einrichten* des Dateimenüs eingegeben wurden. Die weiteren Besonderheiten zeigt nachfolgende Abbildung:



Bei der Ausgabe wird der Nullpunkt des Zeichnungsrahmens in die Blattmitte gelegt. Die längere Seite der Zeichenfläche wird nach der längeren Papierkante ausgerichtet, unabhängig davon, ob im Hoch- oder Querformat gedruckt wird.

Die Zeichenfläche wird durch das auf Layer 11 eingegebene Rechteck begrenzt. Wenn auf Layer 11 keine eindeutige Begrenzung gefunden wird, dann werden die Linien auf den Layern 1-10 zur Ermittlung der Grenzen benutzt.

## Archivieren

Diese Funktion dient zum Archivieren der Eingabedaten von Projektdateien. Berechnungsergebnisse werden grundsätzlich nicht archiviert, da sie aus den Eingabedaten jederzeit wiederhergestellt werden können.

## Automatisches Speichern

Für das automatische Speichern kann ein Zeitintervall eingestellt werden. Die noch nicht gespeicherten Eingabedaten der aktuellen Projektdatei werden in einer Datei mit dem Namen „*Sicherung von ...*“ gesichert. Falls noch keine Projektdatei angegeben wurde, wird die Sicherungsdatei im Ordner *Eigene Dateien\InfoGraph* abgelegt. Bei ordnungsgemäßem Schließen der Projektdatei wird die Sicherungsdatei automatisch entfernt.

## Hilfe

Die nachfolgenden Funktionen stehen im Hilfe-Menü zur Verfügung.

### Hilfethemen

Diese Funktion zeigt die Hilfethemen der InfoCAD-Programmdokumentation an. Erläuterungen zur aktuellen Programm-Funktion können mit der F1-Taste abgerufen werden.

### InfoGraph Homepage

Startseite auf dem InfoGraph Webserver öffnen.

### Neuigkeiten

Seite mit den Neuigkeiten auf dem InfoGraph Webserver öffnen.

### Downloads

Service-Seite auf dem InfoGraph Webserver öffnen.

### Info über InfoCAD

Programm-Informationen, Versionsnummer und Copyright anzeigen.

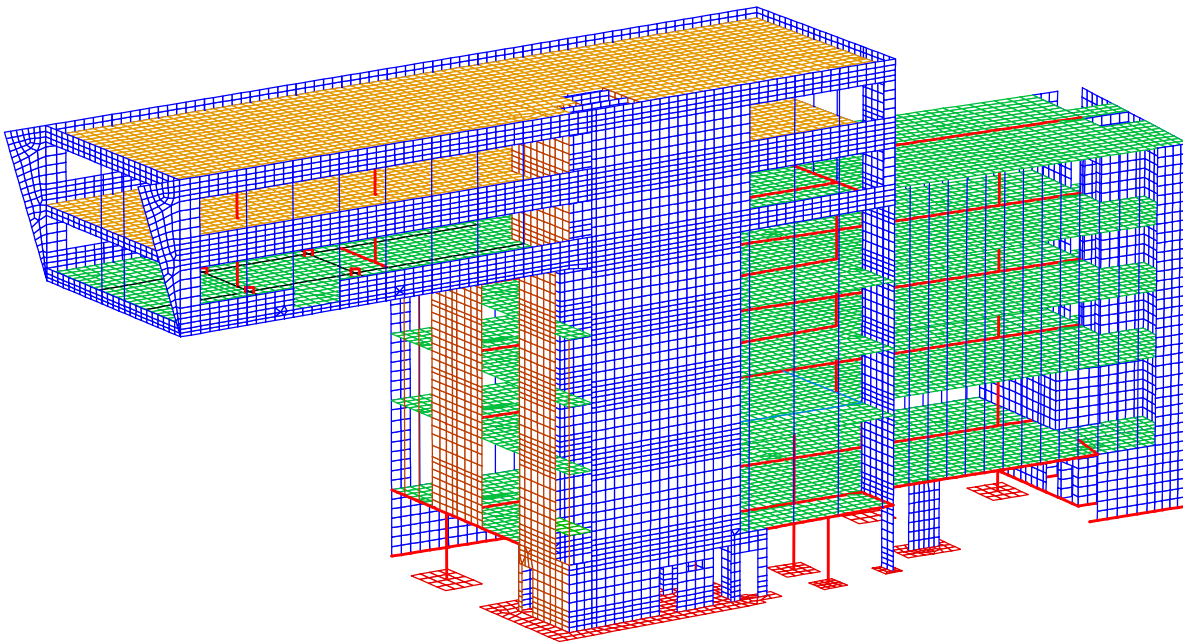
### Lizenzinformationen

Dieser Dialog zeigt die Kundennummer und den am Arbeitsplatz verfügbaren Lizenzumfang an. Bei Nutzung einer Einzelplatzlizenz ist die Lizenzdatei *lgraph.def* im InfoCAD-Programmverzeichnis maßgebend. Für Netzwerklizenzen gilt die Lizenzdatei im Programmverzeichnis des Lizenzmanagers. Über das Kontextmenü kann die Lizenzinformation als Tabelle in die Zwischenablage kopiert werden.

# Finite Elemente

## Grundlagen

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) wird im Bereich der Tragwerksplanung zur numerischen Lösung von Problemen der Platten-, Schalen-, Stab- und Kontinuumsstatik herangezogen. Sie ist heute ein akzeptiertes Werkzeug, dessen Handhabung sich aufgrund der leistungsfähigen graphischen Oberflächen stark vereinfacht hat. Die problemgerechte Modellierung und die Interpretation der Ergebnisse erfordern jedoch insbesondere bei komplexen Tragwerken Erfahrung und statisches Verständnis des Ingenieurs.



Statisches System eines Gebäudes

## Berechnungsmethode

Das Grundprinzip zur Lösung von Problemen der Strukturmechanik mit der Methode der Finiten Elemente besteht in der Unterteilung einer Gesamtstruktur in diskrete Elemente, die in den Elementknoten miteinander verbunden sind.

Als Unbekannte treten je Knoten die globalen Verformungen  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  und  $\varphi_z$  auf, welche durch Formulierung der sechs Gleichgewichtsbedingungen am Knoten bestimmbar sind. Dies geschieht durch Aufbau der Elementsteifigkeitsmatrizen im jeweiligen lokalen System, Transformation auf globale Koordinaten und Einsortieren in die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems. Nach Transformation der Lasten auf globale Koordinaten und Einführung der Lagerungsbedingungen des Tragwerks ergibt sich ein lineares Gleichungssystem ( $K \cdot u = p$ ) zur Bestimmung der unbekanntenen Knotenverformungen mit

- $K$  Gesamtsteifigkeitsmatrix,
- $u$  Verformungsvektor der globalen Knotenverformungen,
- $p$  globaler Lastvektor.



## Elementbibliothek

Im FEM-Modul wird eine Elementbibliothek zur Verfügung gestellt. Alle verwendeten Elemente erfüllen den Patch-Test, d.h. sie konvergieren unabhängig von der Art der Einteilung bei Verfeinerung des Elementnetzes gegen die exakte Lösung des Randwertproblems.

Die Stäbe werden nach der allgemeinen Deformationsmethode berechnet und liefern nach Theorie 1. Ordnung exakte Ergebnisse.

Die Scheibenelemente mit 3 bzw. 4 Knoten sind hybride Elementtypen mit Rotationsfreiheitsgraden  $\varphi_z$ . Die Scheibenelemente mit 6 Knoten sind reine Deformationselemente mit zwei unbekanntenen Verschiebungen je Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz. Alle Scheibenelemente sind voll verträglich und dienen zur Berechnung ebener Spannungszustände.

Die Plattenelemente sind wahlweise „discrete Kirchhoff theory“ (DKT) - Elemente oder „Mindlin-Reissner“ (MR) - Elemente. Bei der ersten Elementart (DKT) werden zunächst die Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehungen für die dicke Platte formuliert, um dann an diskreten Punkten der Elementberandung die Kirchhoff'schen Bedingungen für die dünne Platte einzuführen. Dadurch können auch bei diesen Elementen die Unbekannten des Verformungsansatzes durch die Eckknotenverformungen ausgedrückt werden. Der Vorteil gegenüber einem reinen Verschiebungsansatz bei Plattenelementen zeigt sich in einem wesentlich verbesserten Konvergenzverhalten.

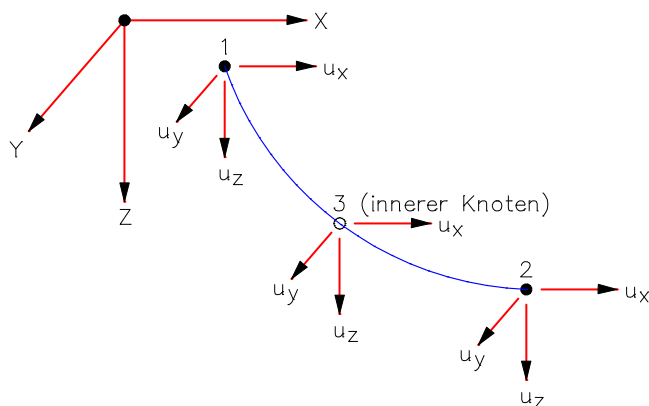
Bei der zweiten Elementart (MR) handelt es sich um schubweiche Plattenelemente, bei denen unabhängige Ansätze für die Verdrehungen/Krümmungen und die Schubverzerrungen gemacht werden. Dies hat zur Folge, dass sowohl die Momente als auch die Querkräfte in die Gleichgewichtsbedingungen des Gleichungssystems eingehen. Daraus ergibt sich, dass bei entsprechend feiner Diskretisierung die Querkräfte im Gleichgewicht mit den äußeren Kräften stehen. Während bei Kirchhoff'schen Elementen die Querkräfte aus der Ableitung der Momente resultieren, ergeben sich diese nach der Reissner'schen Plattentheorie unmittelbar aus den berechneten Schubverzerrungen. Um Ergebnisse zu erzielen, die mit der Kirchhoff'schen Plattentheorie vergleichbar sind, ist bei gelenkiger Randlagerung darauf zu achten, dass an den Lagerknoten Navier'sche Randbedingungen vorgegeben werden (siehe Beispiel „Platte mit Mindlin-Reissner Elementen“).

Die Schalenelemente sind eine Kombination der Elementsteifigkeitsmatrizen der Scheiben und Plattenelemente, d.h. eine gekrümmte Schalenfläche wird facettenartig approximiert. Dies bedeutet jedoch bezüglich der erreichbaren Resultate keine nennenswerte Einschränkung.

Das Volumenelement VQ83 ist ein Element mit 8 Knoten, wobei bis zu 4 Knoten identisch sein können. Dies erlaubt die Modellierung beliebiger räumlicher Geometrien. Bei Verwendung identischer Knoten muss mit reduzierter Genauigkeit gerechnet werden.

Das Volumenelement VT10 ist ein Tetraederelement mit 4 Eckknoten und 6 Seitenmittenknoten. Aufgrund des vollständig quadratischen Verschiebungsansatzes können hiermit lineare Verläufe aller Spannungskomponenten berechnet werden.

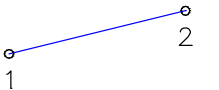
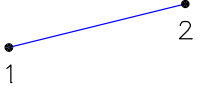
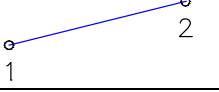
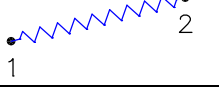
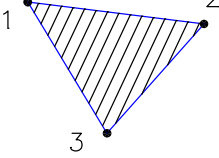
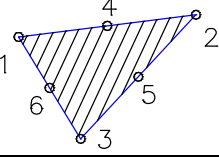
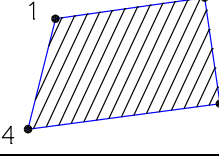
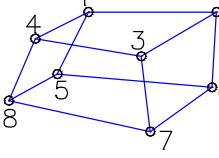
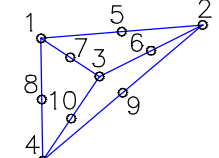
Die Seilelemente werden nach der Theorie großer Verschiebungen berechnet und basieren auf einem quadratisch isoparametrischen Ansatz für Geometrie und Verschiebungen. Die Geometrie wird durch zwei äußere Knoten, welche vom Anwender vorgegeben werden, und einen inneren Knoten, der vom Programm erzeugt wird, beschrieben. Jeder Knoten hat die globalen Verschiebungsfreiheitsgrade  $u_x$ ,  $u_y$  und  $u_z$ . Damit kann im Element ein linear veränderlicher Verlauf der Seilkraft realisiert werden. Es wird linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt.



### Seilgeometrie und globale Knotenverschiebungen

Der vorliegende Elementansatz ermöglicht die Erfassung großer Verformungen. Dies führt zu einem nichtlinearen Gleichungssystem, welches durch eine Newton-Raphson-Iteration gelöst wird. Das Konvergenzverhalten ist in der Regel gut, kann jedoch problemabhängig variieren. Hierbei ist neben der ursprünglichen Seilgeometrie insbesondere der Vorspanngrad von entscheidender Bedeutung. Die endgültige Seilgeometrie ist lastabhängig und ergibt sich somit erst nach der Gleichgewichtsiteration. Eine Überlagerung einzelner Lastfälle ist wegen der beschriebenen Nichtlinearität unzulässig.

Die Federelemente werden auch nach der allgemeinen Deformationsmethode berechnet. Für jeden Freiheitsgrad werden die Kraft-Verformungs-Verläufe vom Benutzer getrennt beschrieben. Die Verläufe können auch nichtlineare charakteristiken aufweisen (z.B. Kontakt, Federspiel, Elastisch-plastisch).

Geometrie	Name	Elementart	Elementfreiheitsgrade
	RF	Räumlicher Fachwerkstab	$u_x, u_y, u_z$
	RS	Räumlicher Biegestab	$u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
	SEIL	Räumliches Seilelement	$u_x, u_y, u_z$
	Feder	Räumliches Federelement	$u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
	SD33	Scheibenelement	$u_x, u_y, \varphi_z$
	PD33	Plattenelement	$u_z, \varphi_x, \varphi_y$
	SH36	Schalenelement	$u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
	SD62	Scheibenelement	$u_x, u_y$
	SV43	Scheibenelement	$u_x, u_y, \varphi_z$
	PV43	Plattenelement	$u_z, \varphi_x, \varphi_y$
	SH46	Schalenelement	$u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
	VQ83	Volumenelement	$u_x, u_y, u_z$
	VT10	Volumenelement (Tetraeder)	$u_x, u_y, u_z$

## Koordinatensysteme

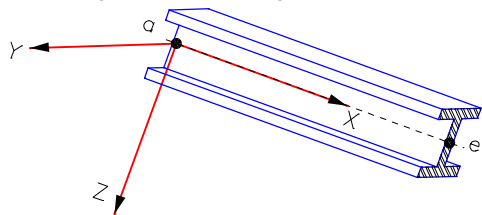
Ein FEM-Modell besteht aus den folgenden Tragwerksobjekten mit jeweils eigenen (lokalen) Koordinatensystemen:

- Stäbe
- Seile
- Flächenelemente
- Volumenelemente
- Festhaltungen
- Federelemente

Alle Koordinatensysteme sind Rechtssysteme.

**Stäbe**

In der folgenden Abbildung ist das lokale Koordinatensystem eines Stabes dargestellt.



Die lokalen Stabkoordinaten haben ihren Ursprung im Stabanfangsknoten (a). Die lokale x-Achse verläuft von (a) nach (e), dem Stabendknoten. Die lokale z-Richtung wird durch einen Richtungsvektor festgelegt. In der Standardausrichtung verläuft die lokale y-Achse parallel zur globalen xy-Ebene. Ist hierdurch keine eindeutige Richtung festgelegt, so wird diese in Richtung der globalen y-Achse ausgerichtet.

**Seile**

Das lokale Koordinatensystem eines Seils hat seinen Ursprung im Seilanfangsknoten. Die lokale x-Achse zeigt zum Seilendknoten.

**Flächenelemente**

*Elementsystem*

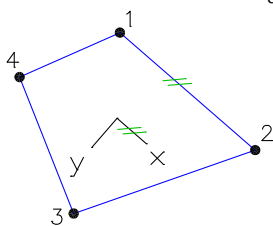
Die lokale x-Achse zeigt standardmäßig vom ersten zum zweiten Elementknoten. Die lokale y-Achse steht senkrecht auf der lokalen x-Achse und verläuft in Richtung des dritten Elementknotens. Die Elementeigenschaften wie Orthotropie und Bettung beziehen sich auf dieses Koordinatensystem. Es kann um die lokale z-Achse verdreht werden. Die z-Achse zeigt zur Elementunterseite und muß bei Platten und Scheibenelementen mit der globalen z-Achse zusammenfallen.

*Schnittkraftsystem*

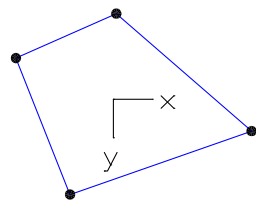
Es beschreibt die Ausrichtung der Schnittgrößen. Standardmäßig verläuft seine x-Achse horizontal und wenn möglich parallel zur globalen x-Achse. Auch dieses Koordinatensystem kann um die lokale z-Achse verdreht werden.

*Bewehrungssystem*

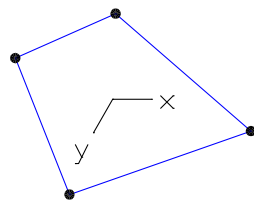
Dieses Koordinatensystem beschreibt die Ausrichtung der Flächenbewehrung und ist standardmäßig wie das Schnittkraftsystem ausgerichtet. Die lokale y-Achse kann vom 90°-Winkel abweichend definiert werden.



*Elementsystem (Standard)*



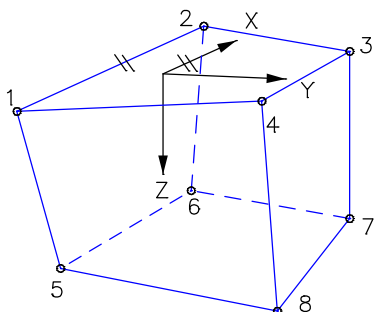
*Schnittkraftsystem (Standard)*



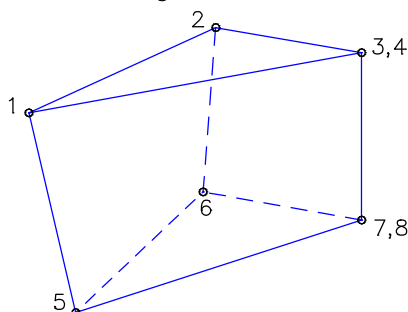
*Bewehrungssystem (y-Richtung geändert)*

**Volumenelemente**

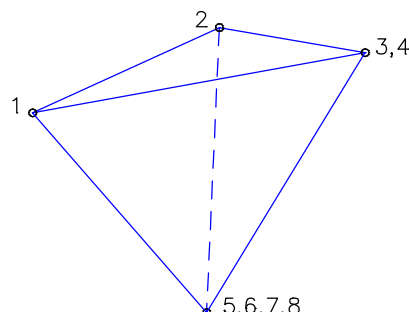
Die Richtungen der Elementspannungen werden durch ein beliebig im Raum ausgerichtetes Schnittkraftsystem bestimmt. Für die Ausrichtung des Elementsystems des Volumenelements VQ83 gelten dieselben Vorschriften wie bei den Flächenelementen, wobei die z-Achse in das Element hinein zeigen.



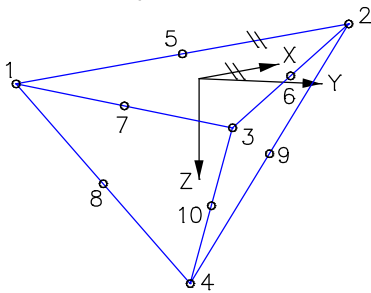
*Volumenelement VQ83 mit Elementsystem in der Standardausrichtung*



*Varianten von Volumenelementen VQ83*



Das Elementsystem des Tetraederelements VT10 ist unveränderlich.



Tetraederelement VT10

**Festhaltungen**

Das Festhaltungssystem wird durch zwei Richtungsvektoren für die lokale x- und y-Richtung festgelegt. Die Standardausrichtung entspricht dem globalen Koordinatensystem. Der Benutzer kann eine davon abweichende Orientierung definieren.

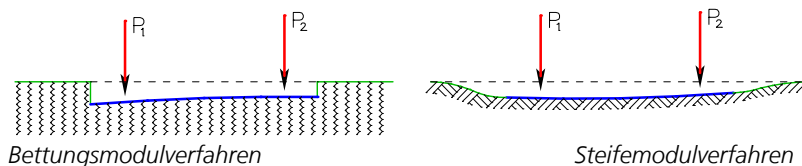
**Federelemente**

Die lokale x-Achse verläuft vom Anfangsknoten zum Endknoten. Befinden sich die beiden Knoten am gleichen Ort, ist die x-Richtung festzulegen. Die lokale z-Richtung wird vom Benutzer festgelegt.

**Baugrundmodelle**

Der Baugrund kann durch folgende Modelle erfasst werden:

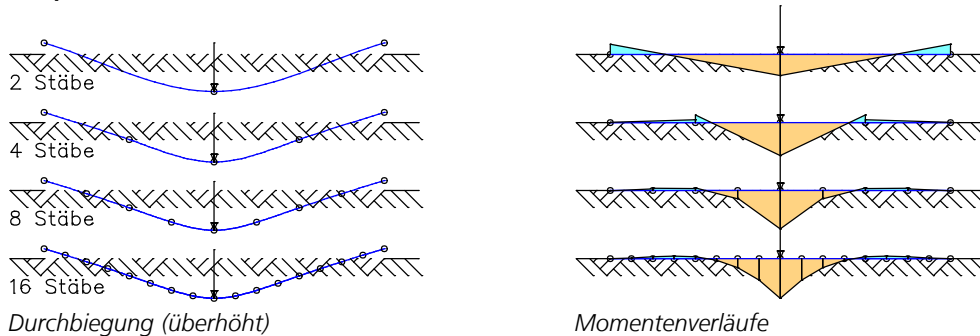
- Das *Bettungsmodulverfahren* beruht auf der Annahme, dass die Setzung ( $s$ ) proportional zur Sohlspannung  $\sigma_0$  ist, also  $\sigma_0/s = k_b = \text{konstant}$  ( $k_b$  = Bettungsmodul). Dies bedeutet, dass eine vertikale Last nur Setzungen unter ihrem Einflussbereich hervorruft.
- Das *Steifemodulverfahren* beruht auf der Annahme, dass Setzungsmulde und Verformung des Gründungkörpers übereinstimmen. Der Baugrund wird durch die Theorie des elastischen, geschichteten Halbraumes abgebildet. Die Berechnung nach dem Steifemodulverfahren erfolgt iterativ. Zusätzliche Konvergenzkriterien sind hierbei das Gesamtgleichgewicht und die Minimierung des Residuums.

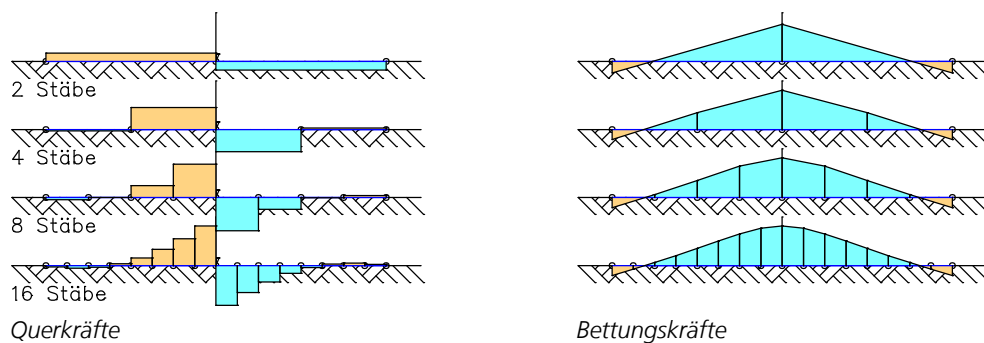


**Stabbettung**

Die Modellierung des elastisch gebetteten Stabes erfolgt mit Hilfe eines kubischen Elementansatzes unter Berücksichtigung von Bettungstermen innerhalb der Steifigkeitsmatrix. Stablasten werden dabei in äquivalente Knotenkräfte umgewandelt. Aufgrund des Ansatzes lassen sich Biegemomente mit linearem und Querkräfte mit konstantem Verlauf wiedergeben. Eine Verbesserung der Ergebnisse ist somit nur durch eine feinere Stabeinteilung zu erreichen. Das nachfolgende Beispiel demonstriert den Einfluss der Stabeinteilung.

**Beispiel: Gebetteter Balken mit Einzellast**





### Gründung ohne Zugspannungen

Beide o.g. Verfahren können unter Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche berechnet werden. Hebt ein Flächen- oder Volumenelement vom Boden ab, fallen alle Bodenspannungen aus. Bei Stäben können die Zugspannungen in y- bzw. z-Richtung des Stabsystems ausfallen. Fallen beide Richtungen aus, wird die Mantelreibung (x-Richtung) nicht berücksichtigt.

### Nichtlineare Bettung

Im Rahmen einer nichtlinearen Systemanalyse wird eine bilineare Bettungscharakteristik verwendet. Die Zug- und Druckfestigkeit der Bettung ist für die lokalen Richtungen x, y und z getrennt festgelegt.

## Elastizitätstheorie 2. Ordnung

Das Programmmodul Theorie 2. Ordnung ist eine Erweiterung des Finite-Element-Programms und ermöglicht die Lösung der nachfolgenden elastischen Problemstellungen:

- Stabknicken. Hierbei können die Stabkräfte auf die verformte oder unverformte Stabsehne bezogen sein.
- Platten- und Schalenbeulen.
- Berechnung kombinierter Tragwerke nach der Elastizitätstheorie 2. Ordnung (Gleichgewicht am verformten System).

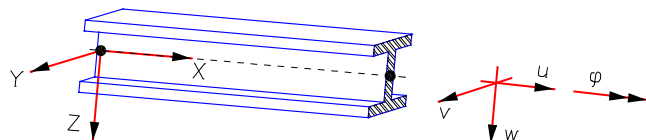
Die Gleichgewichtiteration erfolgt nach dem Lagrange'schen Verfahren unter Zugrundelegung der totalen tangentialen Steifigkeitsmatrix nach der Elastizitätstheorie 2. Ordnung. Das Verfahren konvergiert i.d.R. bereits nach wenigen Iterationsschritten. Stabilitätsversagen wird durch Singularität der Gesamtsteifigkeitsmatrix angezeigt.

Es gelten die folgenden Voraussetzungen:

- Elemente sind planmäßig gerade.
- Querschnittsabmessungen sind klein gegenüber den Systemabmessungen.
- Die Querschnittsform eines Stabelements bleibt bei der Tragwerksverformung unverändert, d.h. auch Querschnittsverwölbungen werden nicht berücksichtigt.
- Deformationen sind klein gegenüber den übrigen Abmessungen.
- Die mathematische Krümmung wird linearisiert.
- Das Material verhält sich linear elastisch.
- Die Belastung wird langsam auf ihren Endwert gesteigert und erfährt durch die Systemverformung keine Richtungsänderung.

### Ansatz für Stabelemente

Die Steifigkeitsmatrix des räumlichen Stabelementes wird durch Formulierung der virtuellen Arbeit der inneren Kraftgrößen gewonnen. Für die Verformungen im Stabsystem ( $u, v, w, \varphi$ ) gelten folgende Vorzeichen:



Es gilt:

$$\delta A_i = \int_V \delta \varepsilon \sigma_x dV + \int_L \delta \varphi' M_x dx$$

(Normalspannungen) (St. Venant'sche Torsion)

mit

$$\varepsilon = u' - yv'' - zw'' - y\varphi w'' + z\varphi v'' + \frac{1}{2}[v'^2 + w'^2 + (y^2 + z^2)\varphi'^2]$$

$$\sigma_x = E(u' - yv'' - zw'') \text{ (linearisiert)}$$

$$M_x = G I_x \varphi'$$

Nach Einführung der oben genannten Beziehungen, Vernachlässigung von Größen höherer Ordnung, Durchführung der Variation und Integration der querschnittsabhängigen Größen ergibt sich:

$$\begin{aligned} \delta A_i = & \int_L [\delta u' EAu' + \delta v'' EI_z v'' + \delta w'' EI_y w'' \\ & \text{(Lineare Anteile aus Normalkraft und Biegung)} \\ & + \delta \varphi' G I_x \varphi' \\ & \text{(Linearer Anteil aus St. Venant'scher Torsion)} \\ & + \delta v' N_x v' + \delta w' N_x w' + \delta \varphi' M_{\text{Tr}} \varphi' \\ & + \delta v'' M_y \varphi + \delta w'' M_z \varphi \\ & + \delta \varphi M_y v'' + \delta \varphi M_z w''] dx \\ & \text{(Geometrisch nichtlineare Anteile)} \end{aligned}$$

Das Querschnittsintegral  $M_{\text{Tr}}$  (Kindmann) hat die Bedeutung

$$M_{\text{Tr}} = M_{\text{Tr}}(N_x, M_y, M_z) = \int_A \sigma_x (y^2 + z^2) dA$$

und kann formal als Schnittgröße angesehen werden.

Da die Berücksichtigung vom  $M_{\text{Tr}}$  in der Elementsteifigkeitsmatrix die Bereitstellung von zusätzlichen Querschnittsgrößen erfordert, die im allgemeinen Fall nur durch aufwendige Integration gewonnen werden kann, wird dessen Einfluss zur Zeit vernachlässigt.

Die Wirkungsweise der übrigen Schnittgrößen entspricht den in der Baustatik üblichen Konventionen. Die Stabendkräfte beziehen sich, wenn nichts abweichendes definiert wurde, auf die unverformte Stabsehne.

Um die Integration durchführen zu können, werden die vier unabhängigen Verformungsfunktionen durch Interpolationspolynome der Knotenverformungen ersetzt. Für  $u(x)$  und  $\varphi(x)$  wird ein linearer Interpolationsansatz, für  $v(x)$  und  $w(x)$  ein kubischer Ansatz gewählt.

### Nichtlineare Iteration

Die geometrisch nichtlinearen Terme der Arbeitsgleichung werden durch Einführung der Schnittgrößen  $N_x, M_y, M_z, M_{\text{Tr}}$  linearisiert. Zur Erfassung der Nichtlinearitäten wird demzufolge im Programm eine Iteration über die Schnittgrößen durch wiederholten Aufbau der Elementsteifigkeitsmatrizen durchgeführt. Konvergenzkriterium ist dabei der Fehlervektor der iterierten Deformationen. Der Lastvektor bleibt bei der Iteration unverändert.

Die genannten Ansatzfunktionen gewährleisten bei einer Berechnung nach Theorie 1. Ordnung theoretisch exakte Resultate.

Bei einer Systemanalyse nach Elastizitätstheorie 2. Ordnung geben die Interpolationspolynome jedoch nur einen genäherten Verlauf der Verformungen wieder. Für hochbeanspruchte Bauteile ist deshalb eine verfeinerte Diskretisierung, d.h. mindestens ein Zwischenknoten je Druckstab, zu empfehlen.

### Ansatz für Flächen- und Volumenelemente

Die tangentielle Steifigkeitsmatrix wird durch Formulierung der virtuellen Arbeit und Variation nach den Knotenfreiheitsgraden gewonnen.

Es gilt:

$$K_{\text{T}} = \int_V dB_{\text{L}}^{\text{T}} \sigma dV + \int_V B_0^{\text{T}} DB_0 dV + \int_V (B_0^{\text{T}} DB_{\text{L}} + B_{\text{L}}^{\text{T}} DB_{\text{L}} + B_{\text{L}}^{\text{T}} DB_0) dV$$

mit

$B_0$  bezogene Verzerrungsmatrix für kleine Verschiebungen

- $B_L$  bezogene Verzerrungsmatrix für große Verschiebungen  
 $D$  Elastizitätsmatrix  
 $\sigma$  Spannungsvektor

sowie in vereinfachter Schreibweise:

$$K_T = \underbrace{K_\sigma}_{\text{geometrische Matrix}} + \underbrace{K_0}_{\text{Matrix für kleine Verformungen}} + \underbrace{K_L}_{\text{Matrix für große Verformungen}}$$

Bei der Berechnung nach Theorie 2. Ordnung wird der Einfluss der großen Verformungen (Theorie 3. Ordnung) nicht berücksichtigt.

Die Matrix  $K_\sigma$  ist im Gegensatz zur linearen Matrix  $K_0$  eine Funktion der unbekanntenen Knotenverschiebungen, da der Spannungsvektor  $\sigma$  diese indirekt enthält. Deshalb ist auch hier, wie bereits oben erwähnt, eine iterative Lösung erforderlich.

## Knickeigenformen

Stabilitätsprobleme der Elastizitätstheorie 2. Ordnung werden durch das nachfolgende Eigenwertproblem beschrieben:

$$K_0 \Phi = \lambda K_\sigma \Phi$$

mit

- $K_0$  lineare Steifigkeitsmatrix nach Theorie 1. Ordnung  
 $K_\sigma$  nichtlineare Geometriematrix der Theorie 2. Ordnung  
 $\lambda$  Knicklastfaktoren (Eigenwerte)  
 $\Phi$  Knickeigenformen

Grundlage für die Berechnung sind die Schnittgrößen des Beanspruchungslastfalls nach Theorie 1. Ordnung. Diese finden beim Aufbau der Geometriematrix  $K_\sigma$  Verwendung. Die ermittelten Knicklastfaktoren  $\lambda$  beziehen sich ebenfalls auf den Beanspruchungslastfall. Während  $K_0$  stets positiv definit ist, kann dies für  $K_\sigma$  nicht vorausgesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass in der Regel sowohl positive als auch negative Eigenwerte  $\lambda$  vorhanden sind. Um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten, werden nur die positiven Eigenwerte mit den zugehörigen Eigenformen unter der Nummer des Beanspruchungslastfalls zur Verfügung gestellt. Es können somit mehrere Stabilitätslastfälle nebeneinander untersucht werden. Sollten im definierten Eigenvektorraum nicht genügend positive Eigenwerte vorhanden sein, werden auch die betragsmäßig kleinsten negativen Eigenwerte gespeichert.

Die Untersuchung von Knickeigenformen und Knicklastfaktoren kann einen Nachweis nach Theorie 2. Ordnung mit Gleichgewicht am verformten System nicht ersetzen.

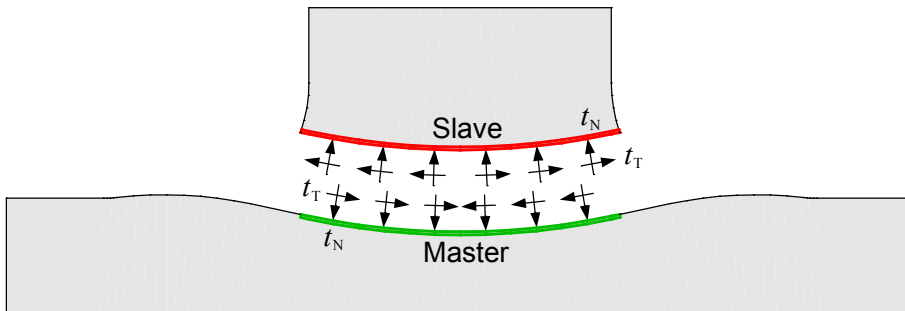
## Kontakt

Der Anwendungsbereich für eine numerische Simulation von Kontaktproblemen ist vielfältig.

So treten in der Regel immer dann, wenn Körper interagieren, die nicht monolithisch miteinander verbunden sind, Einwirkungen auf, welche mittels Kontakt übertragen werden.

Beispiele im Bauwesen sind Kopfplattenverbindungen, Auflagerungen, Ankerplatten, Fertigteilverbindungen, Staudämme etc. Auch der Fall, dass Bauteile, die sich zunächst nicht berühren, jedoch aufgrund ihrer Verformung miteinander kontaktieren, muss berücksichtigt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch zwei Körper, die in Kontakt treten.



*Master- und Slave-Fläche mit Kontaktspannungen*

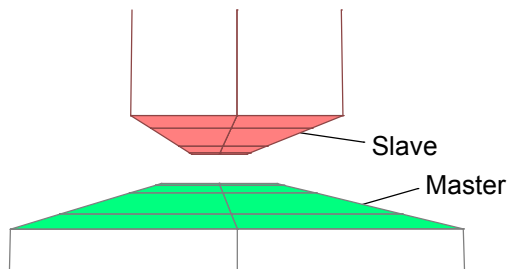
Dabei treten Normal- und ggf. auch Schubspannungen auf (Reibung). Zur Definition der interagierenden Oberflächen unterscheidet man zwischen Slave- und Master-Flächen. Die Kontaktanalyse muss sicherstellen, dass Punkte der Slave-Fläche nicht in die Master-Fläche eindringen. Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung besteht in der Auffindung der Oberflächenteile, die unter Berücksichtigung der Systemverformungen miteinander in Kontakt treten. Bis auf wenige Sonderfälle sind diese a priori nicht bekannt.

Aus den genannten Tatsachen resultiert, dass Kontaktprobleme hochgradig nichtlinear sind.

Eine Modellierung von Kontaktproblemen mittels der Methode der finiten Elemente kann als Punkt/Punkt-, Punkt/Fläche- oder Fläche/Fläche-Kontakt erfolgen.

Im folgenden soll die Behandlung von Kontaktproblemen in Verbindung mit Tetraeder-Elementen beschrieben werden. Hierbei kommen Fläche/Fläche-Kontaktelemente zur Anwendung, für deren Herleitung auf die angegebene Literatur verwiesen wird.

Um die Modellierung für den Programmbenutzer möglichst einfach zu gestalten, wurde auf eine direkte Eingabe von Kontaktelementen verzichtet. Zur Problembeschreibung müssen lediglich Master- und Slaveflächen definiert werden, die paarweise einander zugeordnet sind.



*Modellvolumen mit Master- und Slave-Flächen*

Die obige Abbildung zeigt Modellvolumen mit Master- und Slave-Flächen. Da die genauen Kontaktflächen nicht bekannt sind, können diese großzügig gewählt werden. Aus diesen Informationen ermittelt das Programm automatisch die infrage kommenden Kontaktbereiche und baut intern die zugehörigen Kontaktelemente auf. Hierzu ist es nicht erforderlich, dass die Elementierung von Master- und Slave-Fläche übereinstimmt. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Knoten von Master- und Slave-Flächen nicht miteinander verbunden sind.

Die Ermittlung der Kontaktsteifigkeit wird ebenfalls programmintern durch Auswertung der beteiligten Elementsteifigkeiten durchgeführt.

Neben den bereits beschriebenen Eingabedaten werden noch zusätzliche Kontakteigenschaften bereitgestellt:

### Faktor für Kontaktsteifigkeit

Der Benutzer kann die Kontaktsteifigkeit durch Eingabe eines Korrekturfaktors modifizieren, um eine genauere Einhaltung der Kontaktbedingungen oder bessere Konvergenz zu erzielen.

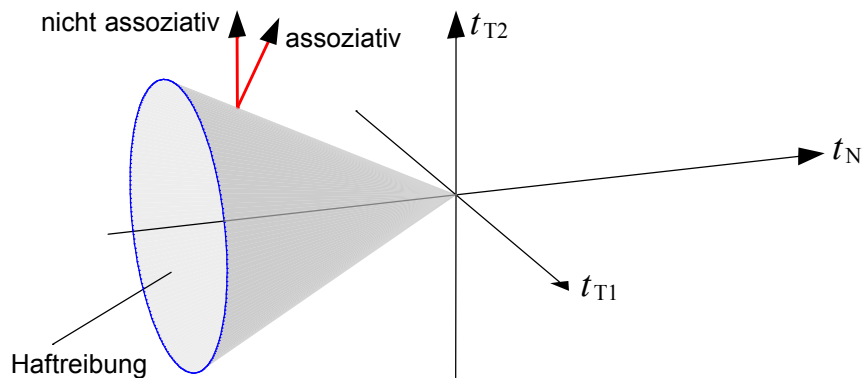
Eine überhöhte Kontaktsteifigkeit führt zu einer schlechten Kondition des Gleichungssystems und damit zu Konvergenzproblemen.



### Reibungskoeffizient

Zur Berücksichtigung der Coulomb'schen Reibung muss ein Reibungskoeffizient definiert werden. Das Reibungsgesetz wird durch die nachfolgende Fließbedingung beschrieben.

$$f = \|t_T\| + \mu \cdot t_N = 0$$



Fließfläche für Coulomb'sche Reibung

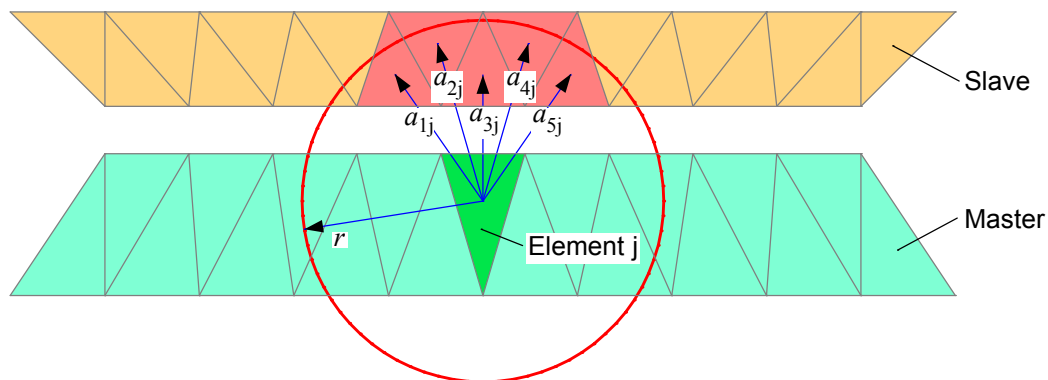
Eine Übertragung von Schubspannungen ist nur bei negativer Normalspannung möglich. Solange die resultierende Schubspannung innerhalb des Kegels verbleibt, tritt Haftreibung auf, ansonsten Gleitreibung. Letztere kann bei statischen Beanspruchungen jedoch nicht auftreten. Die Erfassung von Gleitreibung erfordert eine Zeitschrittintegration und bleibt somit dynamischen Problemstellungen vorbehalten.

Die Erfüllung der Kontaktbedingungen ist mit Hilfe einer Penaltyformulierung implementiert.

Diese erhöht im Gegensatz zur Methode der LAGRANGE'schen Multiplikatoren nicht die Anzahl der Unbekannten. Das oben beschriebene Reibungsgesetz verlangt die Berücksichtigung eines nicht assoziativen Fließgesetzes. Dies hat zur Folge, dass die Steifigkeitsmatrix unsymmetrisch wird. Da im Programmsystem z.Zt. stets von einer symmetrischen Gesamtsteifigkeitsmatrix ausgegangen wird, kann das Reibungsgesetz bei Gleitreibung nur näherungsweise erfasst werden.

### Einflussradius

Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch den Einflussradius mit zugehöriger Umkugel. Hiermit kann der Benutzer den Suchbereich für die Kontaktfindung der beteiligten Tetraederelemente begrenzen. Dies ist zur Beschleunigung der Konvergenz und Verringerung der Rechenzeit angezeigt, da hiermit der Einbau der internen Kontaktelemente auf den relevanten Bereich beschränkt wird.



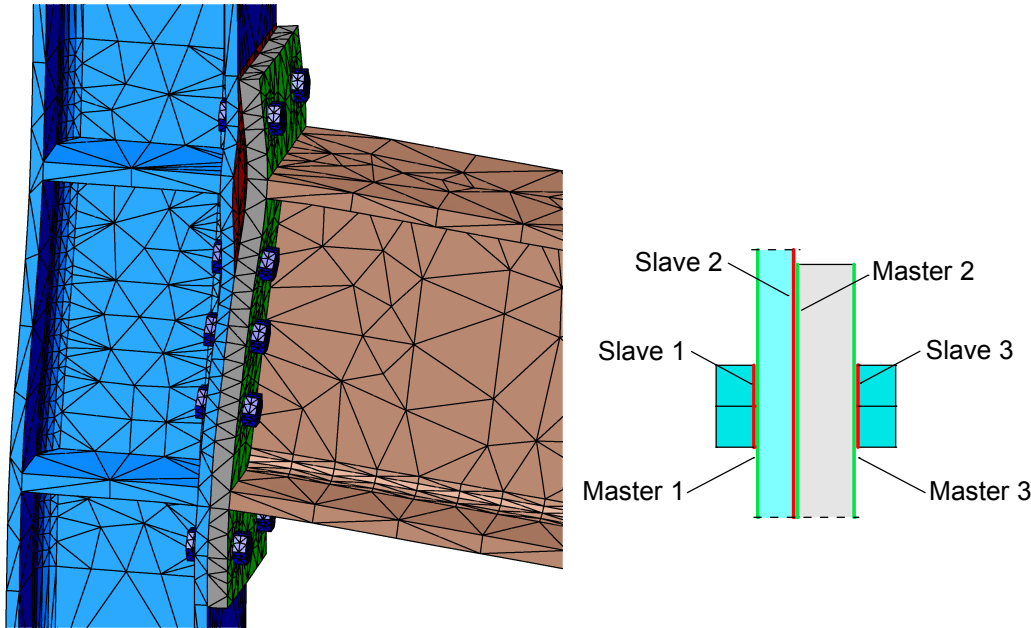
$r$  = Einflussradius der Umkugel

$a_{ij}$  = Abstand im Raum von Element „i“ der Slave-Fläche zum Element „j“ der Master-Fläche mit  $a_{ij} < r$ .

Elemente der Slave-Fläche, deren Abstand zum Masterelement „j“ größer als der Einflussradius ist, erhalten kein internes Kontaktelement (i-j) und können daher während der Berechnung nicht kontaktieren.

**Besonderheiten**

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Kopfplattenanschluss in deformierter Darstellung.



*Kopfplattenanschluss*

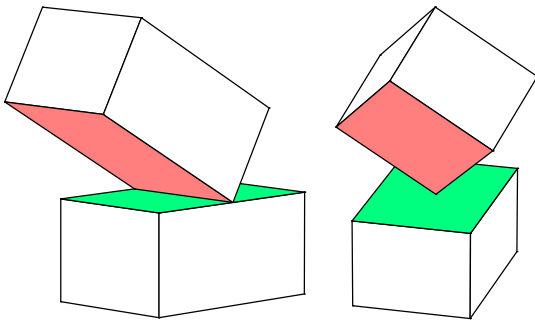
Zur Beschreibung dieses Kontaktproblems sind drei Master/Slave-Bereiche zu unterscheiden.

1. Stützenflansch (innen) / Schraubenmutter
2. Stützenflansch (außen) / Kopfplatte (innen)
3. Kopfplatte (außen) / Schraubenkopf

Eine Trennung der einzelnen Kontaktbereiche ist hier unbedingt erforderlich, da sich diese ansonsten überschneiden würden und es somit zu unerwünschten Interaktionen käme.

Die Vorspannung der Schrauben wurde hierbei berücksichtigt. Der gesamte Anschluss trägt nur mittels Kontakt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt zwei Sonderfälle, die durch die verwendeten Fläche/Fläche-Kontaktelemente nicht modelliert werden können.



*Nicht modellierbare Sonderfälle*

Selbst bei strikter Einhaltung der Kontaktbedingungen dringen die kontaktierenden Punkte der Slave-Flächen in die Masterfläche ein. Um dies zu verhindern, wären Punkt/Fläche- bzw. Linie/Fläche-Kontaktelemente einzuführen.

**Wie bereits oben erwähnt, sind Kontaktprobleme hochgradig nichtlinear. Deshalb sind als Einwirkungen stets vollständige, gewichtete Lastsituationen in Ansatz zu bringen. Für die Ergebnisse gilt folglich nicht mehr das Superpositionsprinzip, d.h. sie dürfen nicht mit anderen Resultaten additiv überlagert werden.**

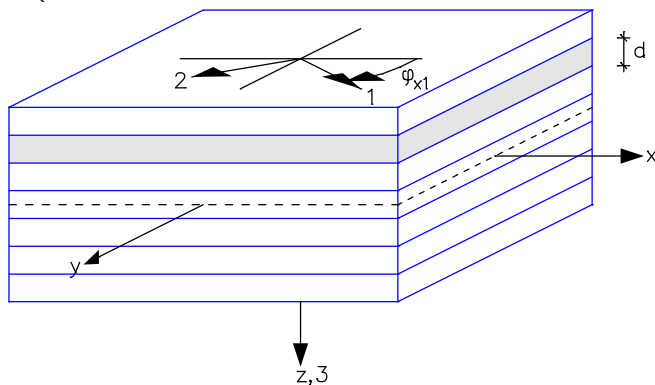
**Aufgrund der Nichtlinearitäten kann nicht in allen Fällen eine Konvergenz der Iteration sichergestellt werden.**

**Eine Abschaltung von Kontaktbedingungen ist nach deren Einführung aufgrund der Knotentrennung von Master- und Slave-Flächen nicht mehr möglich, da ansonsten die Körper ineinander eindringen bzw. Systemverschieblichkeiten auftreten würden. Um wieder ein System mit monolithischer Verbindung zu erzeugen, ist deshalb eine Neuvernetzung ohne Knotentrennung erforderlich.**

## Laminat

Laminats werden für die numerische Simulation von Flächentragwerken aus geschichtetem Material verwendet. Hierbei kann es sich z.B. um GFK oder Sperrholz handeln.

Ein Laminatquerschnitt ist aus orthotropen Schichten aufgebaut, welche jeweils unterschiedlich ausgerichtet sein können. Die Orthotropierichtungen "1" und "2" einer Schicht, in denen die Nachgiebigkeitsmatrix definiert ist, sind über den Winkel  $\varphi_{x1}$  festgelegt. Die Bezugsebene für die Elastizitätsmatrizen ist die Schalenmittelfläche. Im Ansatz wird davon ausgegangen, dass über die Querschnittsdicke eine konstante Krümmung existiert. Im Standardfall wird bei der Berechnung vollständiger Verbund zwischen den Schichten vorausgesetzt. Optional kann auch ohne Schubverbund zwischen den Schichten gerechnet werden. In Querschnitten ohne Schubverbund sind die mittleren Dehnungen der Schichten gleich der mittleren Dehnung des Querschnitts.



Laminat mit Schichten, Elementkoordinatensystem (x, y, z) und Koordinatensystem einer Laminatschicht (1, 2, 3)

Die Nachgiebigkeitsmatrix einer Laminatschicht ist für ihre Orthotropierichtungen definiert durch:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{dabei ist} \quad \frac{\mu_{12}}{E_1} = \frac{\mu_{21}}{E_2}$$

Die Werte  $d, \varphi_{x1}, E_1, E_2, \mu_{21}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$  sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_t$  werden getrennt für jede Schicht festgelegt. Die G-Moduli  $G_{13}$  und  $G_{23}$  finden nur bei schubweichen „Mindlin-Reissner“ Elementen Verwendung.

Bei isotropem Material ist  $E_1 = E_2 = E, \mu_{21} = \mu_{12} = \mu, G_{12} = E / [2 \cdot (1 + \mu)]$ .

Sind die Laminatschichten nicht symmetrisch im Querschnitt angeordnet und schubfest miteinander verbunden, so sind in der integralen Elastizitätsmatrix Koppelterme ungleich Null vorhanden. Diese Koppelterme bewirken Normalkräfte infolge Krümmungen bzw. Biegemomente infolge Dehnungen. Die einzelnen Terme der Elastizitätsmatrix werden im Protokoll aufgeführt.

$$\begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \\ m_x \\ m_y \\ m_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_S & D_K \\ D_K & D_P \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

Integrale Elastizitätsmatrix mit  $D_S =$  Scheiben-,  $D_P =$  Platten-,  $D_K =$  Koppelanteil

## Gleichungslöser

### Paralleler Sparse Solver

Der *Parallele Sparse Solver* ist ein für dünn besetzte Gleichungssysteme optimierter, direkter Gleichungslöser und einsetzbar für alle Anwendungsfälle der Statik und Dynamik einschließlich der Untersuchung von Stabilitätsproblemen. Durch eine besonders effiziente Datenorganisation wird der benötigte Speicherplatz gegenüber dem Standard-Gleichungslöser deutlich reduziert und die Anzahl der erforderlichen Rechenoperationen minimiert. Die Auswahl erfolgt in den Statik-Berechnungseinstellungen.

Auf Mehrprozessorsystemen wird durch Parallelisierung nach dem OpenMP-Standard eine weitere Geschwindigkeitssteigerung erreicht. Standardmäßig werden alle zur Verfügung stehenden Prozessorkerne aktiviert. Mit Hilfe der Umgebungsvariablen `OMP_NUM_THREADS` kann dieses Verhalten übersteuert werden. Die Einstellung `OMP_NUM_THREADS=1` bewirkt zum Beispiel, dass der Gleichungslöser nur einen einzigen Prozessorkern nutzt. Die Definition der Umgebungsvariablen erfolgt in der Systemsteuerung. Änderungen werden unter Umständen erst nach erneuter Benutzeranmeldung wirksam.

Bei besonders großen oder dicht besetzten Gleichungssystemen kann der Speicherbedarf den Adressraum der 32-Bit Programmversion übersteigen. Die Berechnung wird dann mit folgender Fehlermeldung abgebrochen:

```
Gleichungssystem triangulieren
** Fehlermeldungen **
FEM-F147: Sparse Solver: Adressierbarer Speicher überschritten.
Programmabbruch, 0 Warnung(en), 1 Fehler.
```

Durch Einsatz der 64-Bit-Edition lässt sich das Problem beheben.

Bei verschieblichen Systemen wird die Berechnung entweder mit einer Fehlermeldung wegen Singularität des Gleichungssystems oder mit einer Warnung wegen zu großer Verformungen beendet. Stabilitätsversagen wird generell durch Singularität des Gleichungssystems angezeigt.

### Iterativer Gleichungslöser

Die iterative Lösung des Gleichungssystems erfolgt nach dem „vorkonditionierten Algorithmus der konjugierten Gradienten“ (Schwarz, 1984). Der wesentliche Vorteil dieser Lösungsmethode besteht in der kompakten Speicherung der Koeffizientenmatrix. Es werden nur die Koeffizienten ungleich Null des ursprünglichen Gleichungssystems gespeichert. Zusätzlich kann sich für bestimmte Tragwerke eine kürzere Lösungszeit ergeben. Als Nachteil einer iterativen Lösung ist anzusehen, dass für jeden Lastfall von neuem mit der Iteration begonnen werden muss.

Die Anzahl der erforderlichen Iterationsschritte ist problemabhängig, liegt jedoch bei größeren Gleichungssystemen bei etwa 5 bis 15 % der Anzahl der Unbekannten.

Im Gegensatz zur Lösung durch Triangulation kann bei der iterativen Lösung eine Singularität des Gleichungssystems, z.B. aufgrund fehlender Lagerung oder Stabilitätsversagen nach Theorie 2. Ordnung, nicht unmittelbar festgestellt werden.

Die Iterationsmethode ermittelt das Minimum des quadratischen Funktionals

$$f(x) = \frac{1}{2} x^T \cdot A \cdot x + b^T \cdot x$$

Die notwendige Bedingung hierfür ist durch das zu lösende Gleichungssystem

$$A \cdot x + b = 0$$

gegeben. Das Minimum von  $f(x)$  wird iterativ bestimmt, indem in jedem Teilschritt von der Richtung des Gradienten von  $f(x)$  Gebrauch gemacht wird.

Das Konvergenzverhalten einer iterativen Lösungsmethode ist direkt abhängig von der Konditionszahl der Koeffizientenmatrix  $A$  des Gleichungssystems. Je kleiner die Konditionszahl, desto weniger Iterationsschritte sind für die Lösung erforderlich. Der vorliegende Algorithmus verwendet eine Vorkonditionierung je Iterationsschritt mit der Konditionierungsmatrix

$$H = I + \omega \cdot E$$

mit

$I$  Einheitsmatrix

$E$  Unteres Dreieck der skalierten Koeffizientenmatrix

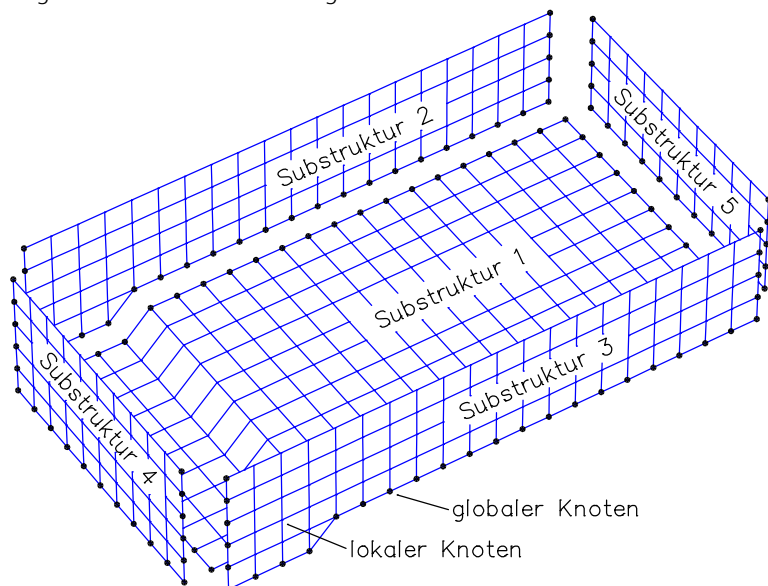
$\omega$  Parameter

Bei optimaler Wahl des Parameters  $\omega$  ist die Konditionszahl der vorkonditionierten Matrix gleich der Quadratwurzel der ursprünglichen Konditionszahl. Im Programm wurde der Parameter  $\omega$  auf 1,10 festgelegt.

## Substrukturtechnik

Die Substrukturtechnik stellt eine alternative direkte Lösungsmethode dar. Bei besonderen Tragwerksmodellen wie z.B. Hochhäusern, deren Geschossdecken über die aufgehenden Bauteile (Wände und Stützen) nur schwach gekoppelt sind, zeichnet sie sich gegenüber dem Standard-Gleichungslöser durch reduzierten Speicherbedarf aus.

Der Grundgedanke dieser Methode besteht darin, das Tragwerksmodell in eine Anzahl von Substrukturen zu zerlegen, welche über gemeinsame (globale) Knoten gekoppelt sind. Festhaltungen und Koppelknoten sind grundsätzlich globale Knoten. Die Freiheitsgrade aller übrigen (lokalen) Knoten einer Substruktur können nach Kondensierung als Funktion der globalen Knotenfreiheitsgrade ausgedrückt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein einfaches Tragwerk mit einer möglichen Substruktureinteilung.



Substruktureinteilung eines Regenrückhaltebeckens in Explosionsdarstellung

Als Ergebnis des Kondensationsprozesses erhält man Subelementmatrizen, die nur noch globale Knotenfreiheitsgrade enthalten. Diese werden anschließend in die Gesamtsteifigkeits- bzw. Gesamtmassenmatrix der globalen Knotenfreiheitsgrade einsortiert. Mit dem Lastvektor wird in ähnlicher Weise verfahren. Nach Berechnung der globalen Knotenfreiheitsgrade können die lokalen Freiheitsgrade aus den Subelementmatrizen ermittelt werden.

### Kondensationsprozess für statische Probleme

Der Kondensationsprozess stellt sich formal folgendermaßen dar:

1. Gleichungssystem für eine Substruktur aufbauen  
 $K \cdot u = b$
2. Trennung lokaler (Index  $l$ ) und globaler (Index  $g$ ) Freiheitsgrade

$$\begin{bmatrix} K_{ll} & K_{lg} \\ K_{gl} & K_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_l \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_l \\ b_g \end{bmatrix}$$

3. Elimination der lokalen Freiheitsgrade einer Substruktur

$$K_{\text{kond.}} = K_{gg} - K_{gl} \cdot K_{ll}^{-1} \cdot K_{lg} \quad b_{\text{kond.}} = b_g - K_{gl} \cdot K_{ll}^{-1} \cdot b_l$$

kondensierte Steifigkeitsmatrix

kondensierter Lastvektor

4. Aufbau und Lösung der Gesamtsteifigkeitsmatrix der globalen Knotenfreiheitsgrade
5. Berechnung der lokalen Freiheitsgrade der Substrukturen

$$u_l = K_{ll}^{-1} \cdot (b_l - K_{lg} \cdot u_g)$$

### Kondensationsprozess für dynamische Eigenwertprobleme

Der Kondensationsprozess stellt sich formal folgendermaßen dar:

1. Eigenwertproblem für eine Substruktur formulieren  
 $K \cdot u = \lambda \cdot M \cdot u$
2. Trennung lokaler (Index  $l$ ) und globaler (Index  $g$ ) Freiheitsgrade

$$\begin{bmatrix} K_{ll} & K_{lg} \\ K_{gl} & K_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_l \\ u_g \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} M_{ll} & M_{lg} \\ M_{gl} & M_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_l \\ u_g \end{bmatrix}$$

## 3. Elimination der lokalen Freiheitsgrade

$$u_l = -(K_{ll} - \lambda \cdot M_{ll})^{-1} \cdot (K_{lg} - \lambda \cdot M_{lg}) \cdot u_g = T_{lg} \cdot u_g$$

Da der Eigenwert  $\lambda$  unbekannt ist, wird er im Sinne einer statischen Kondensation gleich Null gesetzt. Daraus ergeben sich folgende kondensierte Subelementmatrizen:

$$K_{\text{kond.}} = K_{gg} - K_{gl} \cdot K_{ll}^{-1} \cdot K_{lg}$$

*kondensierte Steifigkeitsmatrix*

$$M_{\text{kond.}} = M_{gg} + T_{lg}^T \cdot M_{lg} + M_{gl} \cdot T_{lg} + T_{lg}^T \cdot M_{lg} \cdot T_{lg}$$

*kondensierte Massenmatrix*

4. Aufbau der Gesamtsteifigkeits- und Gesamtmassenmatrix der globalen Freiheitsgrade. Lösung des Eigenwertproblems für die globalen Freiheitsgrade.
5. Berechnung der lokalen Freiheitsgrade der Eigenvektoren der Substrukturen.

Da bei der Kondensation der Eigenwert  $\lambda$  zu Null gesetzt wurde, liefert das kondensierte Eigenwertproblem nicht die exakten Eigenwerte. Für Schwingungsformen, deren wesentlichen Anteile durch die globalen Freiheitsgrade bestimmt werden, ergeben sich diese jedoch mit ausreichender Genauigkeit.

Der wesentliche Vorteil des beschriebenen Verfahrens besteht darin, daß die Gesamtsteifigkeits- und Gesamtmassenmatrix aller Knotenfreiheitsgrade zu keiner Zeit benötigt werden, und somit der Speicherplatzbedarf und die Rechenzeit i.d.R. erheblich geringer sind. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich bei ungünstigem Verhältnis von globalen zu lokalen Knoten auch höhere Rechenzeiten bzw. ein erhöhter Speicherplatzbedarf ergeben können. Die Anwendung der Substrukturtechnik ist grundsätzlich erst bei großen Tragwerksmodellen sinnvoll, da der beschriebene Prozess gegenüber der herkömmlichen Lösung einen deutlich höheren Verwaltungsaufwand nach sich zieht. Um sich vorab einen Überblick über die Substruktur-Topologie zu verschaffen, kann bei den Einstellungen zur Berechnung ein Informationsprotokoll angefordert werden, welches Aufschluss über die Größe und die Anzahl lokaler bzw. globaler Knoten einer Substruktur gibt. Nachfolgend ist für das oben gezeigte Rückhaltebecken eine solche Liste abgedruckt.

**AUFBAU DES GESAMTSYSTEMS**

```
Knoten           : 488
Elemente         : 458
Max. Bandbreite  : 144
Anzahl Unbekannte : 2928
Steifigkeitsmatrix : 2.7 MB
```

**AUFBAU DER SUBSTRUKTUREN**

Substruktur	lokale Knoten	globale Knoten	Elemente	Bandbreite	Steifigkeitsmatrix
1	171	60	200	66	2.5 MB
2	79	30	84	48	622.9 KB
3	79	30	84	48	622.6 KB
4	45	21	50	60	308.1 KB
5	36	19	40	48	221.1 KB

Man erkennt, dass bei diesem Beispiel die Anwendung der Substrukturierung keine Vorteile gegenüber einer Berechnung als Gesamtsystem bietet. Grundsätzlich sollten die Substrukturen so ausgelegt werden, dass der Speicherplatzbedarf der Steifigkeitsmatrix einer Substruktur geringer ist als der verfügbare Kernspeicher, da sonst der Kondensierungsprozess sehr zeitintensiv ist.

**Singuläres Gleichungssystem**

Gesamtsteifigkeitsmatrizen werden im Standard-Gleichungslöser, im Sparse Solver und bei Anwendung der Substrukturtechnik durch Triangulation gelöst. Wenn das Gleichungssystem nicht eindeutig lösbar, d.h. singular ist, wird die Berechnung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Lastfall 1

```
Gesamtsteifigkeitsmatrix aufbereiten (100 %)
Festhaltungen einbauen
Gleichungssystem triangulieren
```

\*\* Fehlermeldungen \*\*

```
FEM-F001: Gleichungssystem ist singular, Zeile 1274, Knoten 138 (Ux).
```

```
Programmabbruch, 0 Warnung(en), 1 Fehler.
```

Die Meldung weist auf den Knotenfreiheitsgrad hin, an dem die Singularität festgestellt wurde. Als Ursache kommen folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Das System ist verschieblich.
- Nach Ausfall der Zugbettung oder Zuglager sind Freiheitsgrade nicht mehr gehalten.
- Bei Berechnung nach Theorie 2. Ordnung versagt das System durch Stabknicken oder Schalenbeulen.
- In Tragwerken mit Zugstäben oder Seilen wird das System durch Ausfallen eines Stabes oder Seiles instabil.
- Bei einer nichtlinearen Systemanalyse führt die Bildung von Fließgelenken zum Systemversagen.

In der Mehrzahl der Fälle ist die Verschieblichkeit des Systems auf Fehleingaben zurückzuführen:

- Stabzüge in Platten oder Scheibentragwerken sind nicht festgehalten. Stabelemente besitzen immer 6 Knotenfreiheitsgrade, werden über Platten- oder Scheibenelemente jedoch nur mit 3 Freiheitsgraden gehalten. Die überschüssigen Freiheitsgrade müssen mit Festhaltungen gebunden werden.
- Platten- oder Scheibentragwerke enthalten irrtümlich einzelne Schalenelemente. Von den 6 Freiheitsgraden der Schalenelemente werden in einer Platte oder Scheibe nur 3 Freiheitsgrade gehalten.
- Schalentragwerke sind nur in z-Richtung gelagert oder gebettet und haben somit ungebundene Freiheitsgrade.
- Ein Stabwerk besitzt Gelenkketten, die das System kinematisch machen. Zur Fehlersuche kann es hilfreich sein, zunächst alle Gelenke durch starre Verbindungen zu ersetzen und sie dann nacheinander wieder zu aktivieren, bis der Fehler gemeldet wird.
- Ein geradliniger Stabzug besitzt am Anfang und Ende ein Kugelgelenk und ist deshalb um seine Längsachse drehbar.
- Berechnungen unter Ausschluss der Zugbettung oder Zuglager erfolgen unter unrealistischer Lastannahme, z.B. ohne Eigenlast, und führen zum Abheben des Tragwerks.
- Eine nichtlineare Systemanalyse wird für Tragwerke aus Stahlbeton ohne ausreichende Ausgangsbewehrung durchgeführt.

## Kapazitätsgrenze unter Windows

Bei der Berechnung großer Tragwerke, insbesondere Schalen- und Volumentragwerke, können die während der Berechnung verwalteten Datenmengen (Gesamtsteifigkeitsmatrix, Massenmatrix, Lastvektor etc.) Größenordnungen von mehreren hundert Megabyte (MB) bis zu einigen Gigabyte (GB) erreichen. Wenn die vorhandene Speicherkapazität nicht ausreicht, wird die Berechnung mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Hierfür können folgende Ursachen verantwortlich sein:

- Die Auslagerungsdatei des Betriebssystems ist zu klein. Die Größe dieser Datei wird in der Systemsteuerung festgelegt.
- Die maximale Kapazität der 32-Bit-Programmversion von 2 GB wurde erreicht. Diese Grenze ist durch den 32-Bit-Adressraum bedingt und unabhängig von der Ausstattung des Rechners mit RAM oder Festplattenspeicher.

Bei Abbruch der Berechnung sollten in jedem Fall die in der Ausgabeleiste ausgegebenen Meldungen überprüft werden. Sie können bei Bedarf über das Kontextmenü kopiert oder ausgedruckt werden. Nachfolgend sind die Meldungen für ein sehr großes Schalentragwerk (Hochhaus) wiedergegeben:

Systemkenngrößen

```
Knoten          86359
Elemente        80968
Festhaltungen   44
Unbekannte     517980
Bandbreite      2106
Steifigkeitsmatrix 5567,4 MB
Massenmatrix    104,5 MB
```

\*\* Fehlermeldungen \*\*

Nicht genügend Speicher.

Programmabbruch, 0 Warnung(en), 1 Fehler.

Das obige Gleichungssystem mit 517980 Unbekannten hat trotz Bandbreitenoptimierung und hüllenorientierter Speichertechnik noch einen Speicherbedarf von 5,5 GB und überschreitet damit die Kapazität des Betriebssystems. Zur Lösung bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Einsatz des Parallelen Sparse Solvers,
- Einsatz des iterativen Gleichungslösers,
- Einsatz der 64-Bit Edition,
- Anwendung der Substrukturtechnik,
- Verringerung der Knotenzahl durch Vereinfachung des Systems, z.B. durch Ausnutzung von Symmetrien.

Der geringste Speicherplatzbedarf entsteht im allgemeinen bei Benutzung des iterativen Gleichungslösers. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den direkten Gleichungslösern eine Singularität des Gleichungssystems, z.B. aufgrund fehlender Lagerung oder Stabilitätsversagen nach Theorie 2. Ordnung, nicht unmittelbar feststellbar ist. Dieser Zustand kann meist nur daran erkannt werden, dass nach einer großen Anzahl Iterationen - über etwa 15% der Anzahl der Unbekannten - noch keine Konvergenz sichtbar ist.

## Programmkapazitäten

Knoten	9999999
Elemente	999999
Lastfälle	9999
Lastfallkombinationen	9999
Spannstränge	999
Dynamische Eigenformen	999

### Einschränkungen bei der Studienversion

Knoten	1000
Elemente (FEM)	1000
Stäbe (ESW, RSW)	10
Flächenquerschnitte	1
Stabquerschnitte	1
Spannstränge	1
Dynamische Eigenformen	1

## Berechnungsergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten werden folgende Ergebnisse erläutert:

- Deformationen
- Schnittgrößen bei Stäben, Federelementen und Flächenelementen
- Spannungen und Dehnungen bei Stäben und Flächenelementen
- Spannungen bei Volumenelementen
- Bettungskräfte bei Stäben
- Bodenpressungen
- Auflagerreaktionen
- Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus Zeitschrittintegration
- Stationärer Response
- Eigenformen und Eigenwerte
- Knickeigenformen
- Einflusslinien und Einflussflächen

### Deformationen

Die Knotenverformungen sind auf das globale Koordinatensystem bezogen und folgendermaßen bezeichnet:

$u_x, u_y, u_z$  Knotenverschiebungen [m] in Richtung der globalen Achsen.

$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  Knotenverdrehungen [rad] um die globalen Achsen.

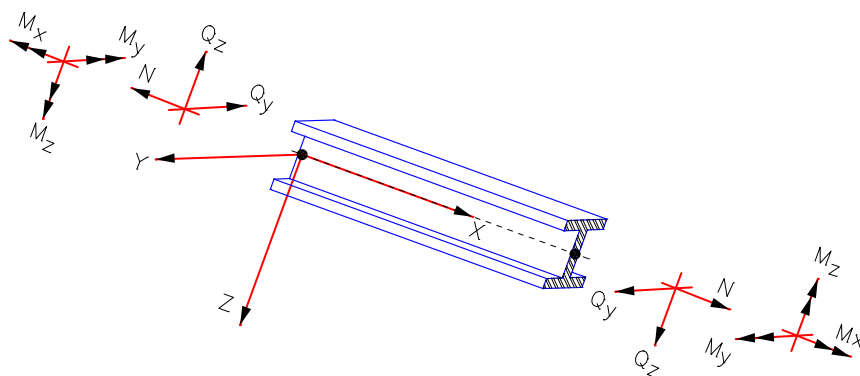
Bei gelagerten Knoten werden zusätzlich die Deformationen im Koordinatensystem der Festhaltungen ausgegeben. Für Stäbe wird außerdem die Biegelinie berechnet.

### Schnittgrößen bei Stäben

Die Biegemomente  $M_y$  und  $M_z$  sowie die Normalkraft  $N_x$  beziehen sich auf den Schwerpunkt des Querschnitts. Das Torsionsmoment  $M_x$  und die Querkräfte  $Q_y$  und  $Q_z$  sind dem Schubmittelpunkt zugeordnet. Im Programm wird davon ausgegangen, dass der Schubmittelpunkt und der Schwerpunkt zusammen fallen. Bei unsymmetrischen Querschnitten wird dadurch der Einfluss der Exzentrizität des Schubmittelpunkts auf die Festeinspannreaktionen nicht berücksichtigt. Die Stabschnittgrößen werden am Stabanfang und Stabende sowie an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Die Anzahl der Berechnungsorte kann eingestellt werden. Momente werden in [kNm] und Kräfte in [kN] ausgegeben.

Bei der Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie 2. Ordnung können die Stabkräfte wahlweise auf die verformte oder unverformte Stabsehne bezogen werden.

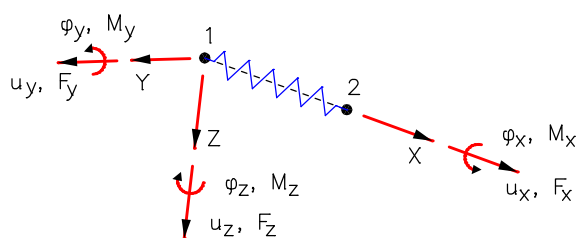




Stabsystem mit positiven Schnittgrößen

**Schnittgrößen bei Federelementen**

Die Kräfte und Momente von Federelementen ergeben sich mit den Federkennlinien aus folgenden lokalen Zusammenhängen:



$$F_x = F(\Delta u_x = u_{x,2} - u_{x,1})$$

$$F_y = F(\Delta u_y = u_{y,2} - u_{y,1})$$

$$F_z = F(\Delta u_z = u_{z,2} - u_{z,1})$$

$$M_x = F(\Delta \phi_x = \phi_{x,2} - \phi_{x,1})$$

$$M_y = F(\Delta \phi_y = \phi_{y,2} - \phi_{y,1})$$

$$M_z = F(\Delta \phi_z = \phi_{z,2} - \phi_{z,1})$$

Verformungen und Schnittgrößen im lokalen Koordinatensystem der Federelemente

**Schnittgrößen bei Flächenelementen**

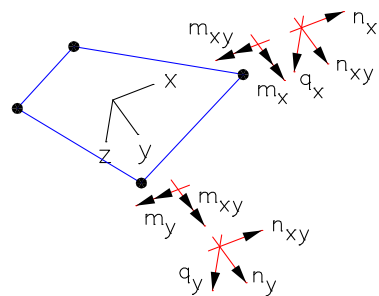
Je nach Auswahl werden die Schnittgrößen in den *Knoten*, im *Schwerpunkt* oder in den *Seitenmitten* berechnet. Im einzelnen werden folgende Schnittgrößen ermittelt:

- $n_x, n_y$  Normalkräfte [kN/m].
- $n_{xy}$  Schubkraft [kN/m].
- $m_x, m_y$  Biegemomente [kNm/m].
- $m_{xy}$  Drillmoment [kNm/m].
- $m_1, m_2$  Hauptmomente [kNm/m].
- $n_1, n_2$  Hauptnormalkräfte [kN/m].
- $q_x, q_y$  Querkräfte [kN/m].

$$q_r = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \quad \text{Resultierende Querkraft [kN/m].}$$

$$q_{xr} = q_x + \frac{\partial m_{xy}}{\partial y} \quad \text{Randquerkraft [kN/m].}$$

$$q_{yr} = q_y + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} \quad \text{Randquerkraft [kN/m].}$$



Schnittkraftsystem mit positiven Schnittgrößen

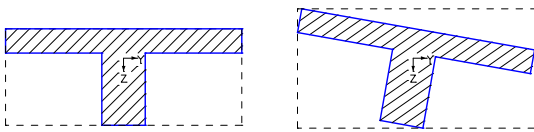
### Spannungen und Dehnungen bei Stäben

Die nachfolgenden Berechnungsergebnisse werden an den Berechnungsorten der Schnittgrößen ermittelt.

$\sigma_x, \sigma_{x.oben}, \sigma_{x.unten}$	Normalspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\tau_{xy}, \tau_{xz}$	Schubspannungen aus Querkräften und Torsion [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2 + 3 \cdot \tau_{xz}^2}$	Vergleichsspannung nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\epsilon_x$	Längsdehnung der Stabachse [%].
$\epsilon_{x.oben}, \epsilon_{x.unten}$	Randdehnungen [%].
$\kappa_y$	Krümmung um die y-Achse [1/km].

Die Schub- und Vergleichsspannungen werden im Rahmen der Spannungsnachweise oder einer nichtlinearen Systemanalyse ermittelt. Die Dehnungen und die Krümmung werden im Rahmen einer nichtlinearen Systemanalyse berechnet.

Die Randdehnungen und Normalspannungen  $\sigma_{x.oben}$  bzw.  $\sigma_{x.unten}$  beziehen sich auf die Querschnittspunkte, die auf der Ober- bzw. Unterkante des umschließenden Rechtecks liegen. Die übrigen Spannungen sind Extremwerte auf dem Querschnittsrand.



Querschnitte mit umschließenden Rechtecken

### Spannungen und Dehnungen bei Flächenelementen

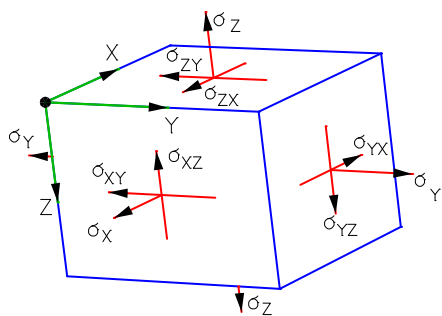
Die Spannungen [MN/m<sup>2</sup>] und Dehnungen [%] sind im Schnittkraftsystem definiert. Sie werden an den Berechnungsorten der Schnittgrößen am oberen und unteren Querschnittsrand ermittelt.

$\sigma_{x.oben,unten} = \frac{n_x}{d} \mp \frac{m_x}{d^2/6}$	Normalspannungen.
$\sigma_{y.oben,unten} = \frac{n_y}{d} \mp \frac{m_y}{d^2/6}$	Normalspannungen.
$\sigma_{xy.oben,unten} = \frac{n_{xy}}{d} \mp \frac{m_{xy}}{d^2/6}$	Schubspannungen.
$\sigma_{1.oben,unten}$	Maximale Hauptspannungen.
$\sigma_{2.oben,unten}$	Minimale Hauptspannungen.
$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \sigma_{xy}^2}$	Vergleichsspannung nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung.
$\epsilon_{1.oben,unten}$	Maximale Hauptdehnungen.
$\epsilon_{2.oben,unten}$	Minimale Hauptdehnungen.
$\varphi_{oben,unten}$	Hauptachsenwinkel der Dehnungen [rad].

### Spannungen bei Volumenelementen

Je nach Auswahl werden die Spannungen [MN/m<sup>2</sup>] in den Knoten oder im Schwerpunkt berechnet. Die Richtungen der Spannungen werden durch das Schnittkraftsystem festgelegt.

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen.
$\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$	Schubspannungen.
$\sigma_1$	Maximale Hauptspannung.
$\sigma_2$	Mittlere Hauptspannung.
$\sigma_3$	Minimale Hauptspannung.
$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_y \cdot \sigma_z) + 3 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}$	Vergleichsspannung nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung.



Schnittkraftsystem mit positiven Spannungen

**Normalkräfte und Spannungen bei Seilen**

Die Normalkräfte und Spannungen beziehen sich auf die Achsen der verformten Seile und werden an den Knoten und in der Seilmitte berechnet.

- $N_x$  Normalkraft [kN/m].
- $\sigma_x$  Normalspannung [MN/m<sup>2</sup>].

**Bettungskräfte bei Stäben**

Die Bettungskräfte  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  [kN/m] sind im Stabsystem definiert und auf die Bettungsbreite bezogene Bodenpressungen (z.B.  $B_z = \sigma_z \cdot d_y$ ). Zugkräfte im Boden haben ein positives Vorzeichen. Bei gebetteten Stäben werden Reaktionen nur in den Knoten berechnet, dazwischen wird der Reaktionsverlauf linear interpoliert.

**Bodenpressungen**

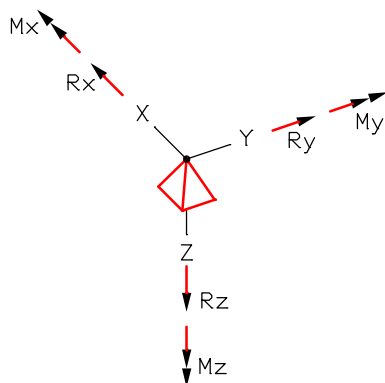
Die Bodenpressungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  [kN/m<sup>2</sup>] sind, außer bei dem Volumenelement VT10, im Elementsystem definiert. Im Volumenelement VT10 zeigt die z-Achse senkrecht zur gebetteten Oberfläche und die x-Achse verläuft horizontal auf der gebetteten Oberfläche und wenn möglich parallel zur globalen x-Achse. Zugspannungen im Boden haben ein positives Vorzeichen. Zusätzlich werden die Bodenreaktionen für jedes Element integriert und in folgenden Werten abgespeichert:

- $R_x, R_y, R_z$  Resultierende Bodenreaktion [kN].
- $d_x, d_y, d_z$  Koordinaten der resultierenden Bodenreaktion [m].

**Auflagerreaktionen**

Die Auflagerreaktionen werden im Koordinatensystem der Festhaltungen berechnet. Sie wirken auf die jeweilige Festhaltung. Ausgegeben werden die nachfolgenden Reaktionen:

- $R_x, R_y, R_z$  Auflagerkräfte [kN].
- $M_x, M_y, M_z$  Auflagermomente [kNm].



Festhaltungssystem mit positiven Auflagerreaktionen

**Geschwindigkeiten und Beschleunigungen**

Die Knotengeschwindigkeiten und -beschleunigungen werden bei einer dynamischen Zeitschrittintegration berechnet. Sie sind auf das globale Koordinatensystem bezogen und folgendermaßen bezeichnet:

- $v_x, v_y, v_z$  Knotengeschwindigkeiten [m/s] in Richtung der globalen Achsen.
- $a_x, a_y, a_z$  Knotenbeschleunigungen [m/s<sup>2</sup>] in Richtung der globalen Achsen.

**Stationärer Response**

Ein stationärer Response kann im Rahmen einer dynamischen Berechnung ermittelt werden. Die Ergebnisse sind auf das globale Koordinatensystem bezogen und folgendermaßen bezeichnet:

$U$	Absolute Knotenauslenkung.
$U_{real}$	Realteil der Knotenauslenkung.
$U_{imaginär}$	Imaginärteil der Knotenauslenkung.
$Phase$	Phasenverschiebung.
$DU$	Absolute Knotengeschwindigkeit (erste Ableitung).
$DDU$	Absolute Knotenbeschleunigung (zweite Ableitung).

**Eigenformen und Eigenwerte**

Dynamische Eigenformen mit ihren zugehörigen Eigenwerten können im Rahmen einer dynamischen Systemanalyse ermittelt werden. Die Eigenformen sind normiert.

$u_x, u_y, u_z$	Knotenverschiebungen in Richtung der globalen Achsen.
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Knotenverdrehungen um die globalen Achsen.
$\omega$	Eigenkreisfrequenz [rad/s].

**Knickeigenformen**

Knickeigenformen mit ihren zugehörigen Lastfaktoren werden im Rahmen einer Berechnung von Lastfällen mit der Lastart  $P_{ki}$  ermittelt. Die Knickeigenformen sind normiert.

$u_x, u_y, u_z$	Knotenverschiebungen in Richtung der globalen Achsen.
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Knotenverdrehungen um die globalen Achsen.

Im Protokoll *Finite Elemente*:

<b>Lastfaktoren</b>	Knicklastfaktoren der Knickeigenformen.
$sk.y, sk.z$	Knicklängen [m] der Biegestäbe der ersten Knickeigenform.
$P_{ki}$	Knicklast [kN] der Stäbe der ersten Knickeigenform.
$EI_y, EI_z$	Steifigkeit der Biegestäbe [kNm <sup>2</sup> ].

**Einflusslinien und Einflussflächen**

Einflusslinien bzw. Einflussflächen werden im Rahmen einer statischen Berechnung von Lastfällen mit der Lastart  $E_{fl}$  bzw.  $E_{ff}$  ermittelt. Die Ordinaten der resultierenden Einflussfläche ergeben sich als Verformung in Richtung der auszuwertenden Last.

$u_x, u_y, u_z$	Ordinatenwert [m] in Richtung der globalen Achsen.
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Ordinatenwert [rad] um die globalen Achsen.

## Strukturbeschreibung

Die Bearbeitung des Tragwerksmodells und die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgen mit den Funktionen des nachfolgend aufgeführten Menüs *Tragwerk*:

-  *Netzgenerierung*
-  *Stabzug*
-  *Elementeingabe*
-  *Elementeigenschaften...*
-  *Elementinformationen*
-  *Darstellung...*
-  *Netzprüfung*
-  *Elementsystem*
-  *Nummern sortieren*
-  *Festhaltungen*
-  *Belastung*
-  *Vorverformung*
-  *Knoten bewegen*
-  *Verdichten*
-  *Koppelungen*
-  *Federelemente*
-  *Liniengelenke*
-  *Vorspannung*
-  *Punktmassen*
-  *Bemessungsobjekte*
-  *Eingabedaten drucken...*
-  *Ergebnisse...*
-  *Bewehrung exportieren*
-  *Durchstanznachweis*

Die generelle Vorgehensweise bei der Eingabe eines Tragwerks, der Berechnung und der Ergebnisdarstellung ist in dem Dokument *Einführungsbeispiele.pdf* beschrieben, das im Programmverzeichnis installiert wird.

## Netzgenerierung

Der Menüpunkt *Netzgenerierung* dient der Erzeugung eines Finite-Element-Netzes. Bei den verfügbaren Methoden ist generell zwischen zwei Gruppen zu unterscheiden:

### Vernetzer unter Verwendung von Modell- oder NURBS-Objekten

Diese Methoden ermöglichen es, eine aus Modellobjekten (*Rand, Wand, Loch, Stütze, Fläche, Kegel, Volumen*) oder NURBS-Objekten konstruierte zwei- oder dreidimensionale Struktur zu vernetzen.

#### *Formtreu aus Modell*

Vernetzung von flächigen Strukturen affin zu den Zwangsbedingungen unter Berücksichtigung aller sichtbaren Modellobjekte.

#### *Rasterförmig aus Modell*

Vernetzung von flächigen Strukturen durch ein orthogonales Raster unter Berücksichtigung aller sichtbaren Modellobjekte.

#### *Stäbe aus markierten Rändern*

Diese Option generiert Stäbe, wenn die Ränder die Bedeutung *Freier Stab* oder *Pfahl-Stab* haben.

#### *Markierte Modellflächen und Kegel*

Vernetzung der markierten Modellflächen und Kegel entsprechend der formtreuen Vernetzung unter Berücksichtigung aller sichtbaren Modellobjekte innerhalb der Modellflächen.

#### *Markierte NURBS-Objekte*

Vernetzung der markierten NURBS-Objekte.

#### *Tetraeder aus Volumen*

Elementierung von Strukturen, welche mit dem Modellobjekt *Volumen* beschrieben sind. Dabei werden Tetraederelemente *VT10* erzeugt.

### Vernetzer mit direkter Beschreibung der Gebietsform

Bei diesen Vernetzern wird das Generierungsgebiet im Dialog interaktiv beschrieben. Die Elementeigenschaften und Lagebedingungen sind manuell zuzuordnen.

#### *Polygonales Gebiet*

Vernetzung eines polygonal berandeten Gebietes mit der Methode *Formtreu*.

#### *Kreis- oder Kegelform*

Erzeugung eines kreisförmigen, zylindrischen oder kegelförmigen Elementnetzes.

#### *Parabolisch berandetes Viereck*

Erzeugung eines Elementnetzes über vier Eckpunkte und vier Seitenpunkte.

#### *Dreieckiges Gebiet*

Vernetzung eines dreieckigen Gebietes mit wählbarer Einteilung auf allen Rändern.

#### *Viereck - Raster auf vier Seiten*

Vernetzung eines viereckigen Gebietes mit wählbarer Einteilung auf allen Rändern.

#### *Viereck - variables Raster auf zwei Seiten*

Vernetzung eines viereckigen Gebietes mit beliebigen Rasterweiten in den beiden Hauptrichtungen.

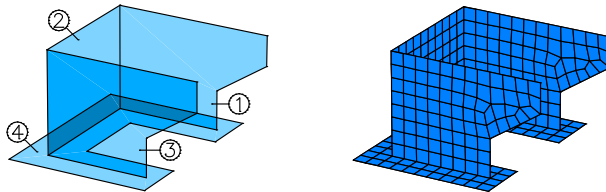
#### *Viereck oder Quader*

Vernetzung eines viereckigen Gebietes oder achteckigen Körpers mit identischer Elementanzahl auf den gegenüberliegenden Rändern.

## Formtreu oder Rasterförmig aus Modell

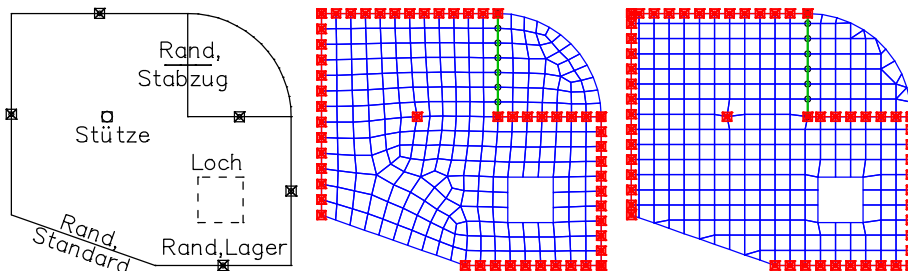
Die Generierer *Formtreu* und *Rasterförmig* vernetzen vollautomatisch eine mit Modellobjekten (*Rand*, *Wand*, *Loch*, *Stütze*, *Fläche*, *Kegel*) beschriebene Struktur. Dabei wird entweder ein orthogonales Raster oder ein zu den Zwangsbedingungen affines Netz erzeugt. Optional werden Stab-, Element- und Lagereigenschaften von den Modellobjekten übernommen. Bei einer erneuten Vernetzung werden zuerst alle Elemente mit ihren zugehörigen Knoten-, Stab- und Elementlasten sowohl im Inneren als auch auf den Außenrändern der zu vernetzenden Gebiete gelöscht. Bei der Vernetzung unterscheidet das Programm folgende Fälle:

1. Es sind Modellflächen oder Kegel vorhanden.  
In diesem Fall werden nur diese vernetzt. Dabei werden alle sichtbaren Modellobjekte im Inneren der Flächen berücksichtigt.



Räumliche Vernetzung einer mit 4 Modellflächen definierten Struktur

2. Es sind keine Modellflächen oder Kegel vorhanden.
  - A. Die Modellobjekte befinden sich in der xy-Ebene und werden im 2D-Modus dargestellt. Die Begrenzung des zu vernetzenden Gebietes wird automatisch erkannt. Bei der Vernetzung werden alle sichtbaren Modellobjekte im Inneren des gefundenen Gebietes berücksichtigt.



Ebene Vernetzung formtreu bzw. rasterförmig

- B. Die Modellobjekte befinden sich nicht in der xy-Ebene oder werden nicht im 2D-Modus dargestellt. Durch Auswahl von Modellobjekten ist eine Vernetzungsebene zu definieren. Dabei sind auch die im Vernetzungsgebiet zu berücksichtigenden Modellobjekte zu wählen. Dieser Vorgang ist für jede zu vernetzende Ebene getrennt durchzuführen.

### Eingabe

<i>Netzweite</i>	Rasterabstand bzw. mittlerer Knotenabstand für die Netzgenerierung.
<i>Art</i>	Auswahl der Elementart ( <i>Platte</i> , <i>Scheibe</i> oder <i>Schale</i> ).
<i>Stützenkopf</i>	Elementierung der Stützengeometrie ein- oder ausschalten.
<i>Richtung</i>	Für Fall 2 werden Nullpunkt und Richtung des Rasters festgelegt. Damit lässt sich das Netz auf einen Zwangspunkt zentrieren und parallel zu einer Zwangslinie ausrichten.
<i>Form</i>	Bevorzugte Elementform für das Raster wählen ( <i>Dreieck</i> oder <i>Viereck</i> ).

## Polygonales Gebiet

Automatische Vernetzung eines Gebietes, welches mit den nachfolgend aufgeführten Zwangsbedingungen beschrieben wird. Die Vernetzung entspricht dem Ergebnis des Netzgenerierers *Formtreu*. Für diesen Vernetzer sind keine Modellobjekte erforderlich.

### Eingabe

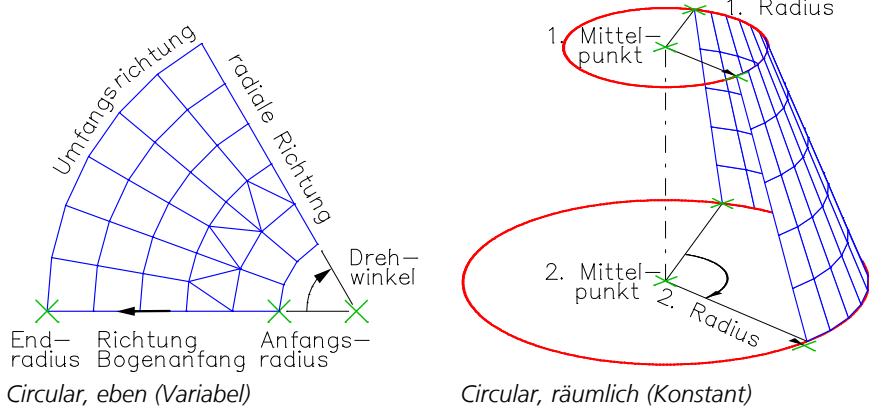
<i>Gebietsrand</i>	Der Außenrand des zu vernetzenden Gebietes ist immer anzugeben.
<i>Loch</i>	Aussparungen im Vernetzungsgebiet.
<i>Zwangslinie</i>	Linien innerhalb des beschriebenen Gebietes, welche bei der Vernetzung als Randbedingung berücksichtigt werden.
<i>Zwangspunkt</i>	Punkte innerhalb des beschriebenen Gebietes, welche bei der Vernetzung berücksichtigt werden sollen.

### Kreis- oder Kegelform

Generieren eines kreisförmigen, zylindrischen oder kegelförmigen Netzes.

**Eingabe**

- Eben**                      Generierung eines Kreisringes mit den Bestimmungsstücken Mittelpunkt, Bogenanfang, Öffnungswinkel, Anfangsradius (innen), Endradius (außen), Anzahl Elemente in Radial- und Umfangsrichtung.
- Räumlich**                Generierung eines Kegelstumpfes mit den Bestimmungsstücken 1. und 2. Mittelpunkt, 1. und 2. Radius, Sektor, Anzahl Elemente in Meridian- und Umfangsrichtung. Die Spezialfälle Zylinder oder Kegel erhält man durch entsprechende Bestimmungsstücke.
- Variabel/Konstant**      Die Elemententeilung in Umfangsrichtung ist variabel (veränderlich) bzw. konstant (gleichbleibend).

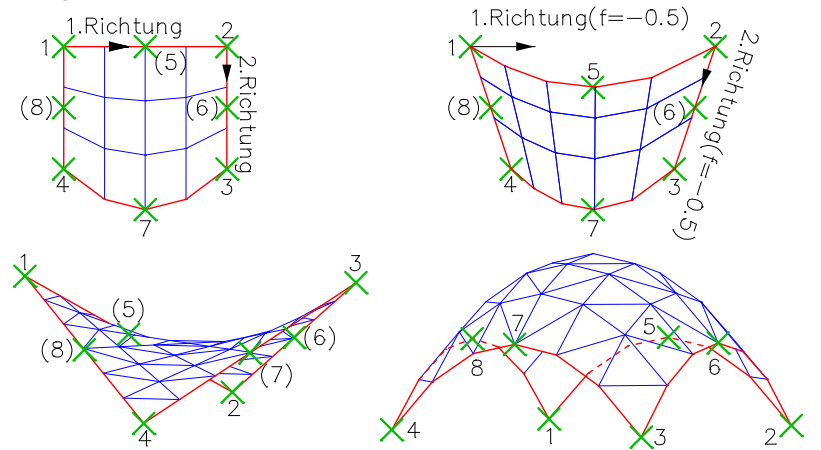


Circular, eben (Variabel)

Circular, räumlich (Konstant)

### Parabolisch berandetes Viereck

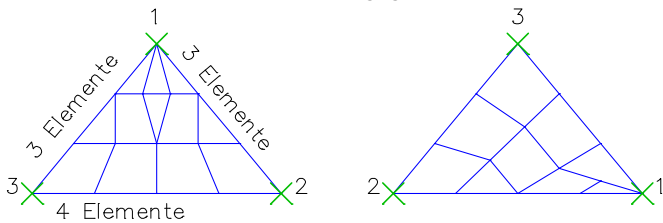
Vernetzung eines parabolisch berandeten Gebietes durch Eingabe der vier Eckpunkte sowie jeweils eines Seitenpunktes. Die Seitenpunkte legen die parabelförmige Ausrundung der Ränder fest. Gegenüberliegende Ränder werden mit der gleichen Knotenanzahl eingeteilt. Verdichtungsfaktoren im Wertebereich -1 bis +1 erlauben eine Konzentrierung des Elementnetzes zum Anfangspunkt (< 0) oder zum Endpunkt (> 0) des betreffenden Randes. Zur Vernetzung können Flächenelemente oder Seile gewählt werden.



Punkte in Klammern wurden auf den Seitenmitten vorgeschlagen und bestätigt.

### Dreieckiges Gebiet

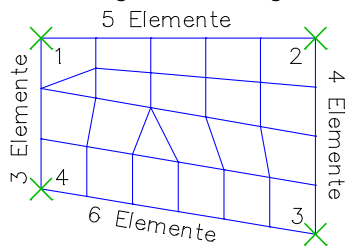
Vernetzung eines dreieckigen Gebietes mit unterschiedlichen Elementanzahlen auf allen drei Rändern. Das Elementnetz wird zum ersten Eckpunkt konzentriert. Bei einem spitzwinkligen Dreieck ergibt sich daher das beste Ergebnis, wenn der Punkt an der stumpfen Ecke als erster eingegeben wird.





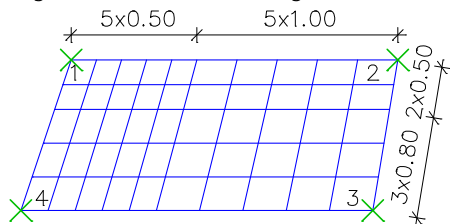
### Viereck - Raster auf vier Seiten

Vernetzung eines viereckigen Gebietes mit unterschiedlichen Elementanzahlen auf allen vier Rändern.



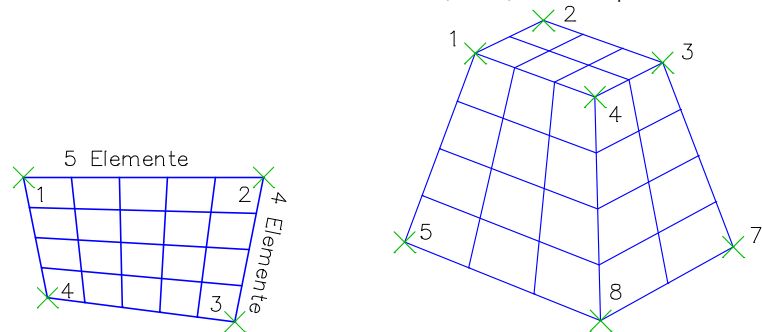
### Viereck - variables Raster auf zwei Seiten

Vernetzung eines viereckigen Gebietes mit vorgegebenen Rasterweiten in den beiden Hauptrichtungen. Gegenüberliegende Ränder haben die gleiche Knotenanzahl.



### Viereck oder Quader

Bei Flächenelementen und Seilen wird ein viereckiges Gebiet mit identischer Elementanzahl auf den gegenüberliegenden Rändern vernetzt. Bei Volumenelementen (VQ83) wird entsprechend ein achteckiger Körper vernetzt.

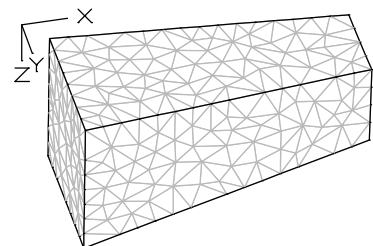


### Tetraeder aus Volumen

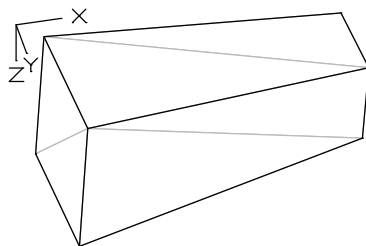
Der Generierer vernetzt vollautomatisch die mit dem Modellobjekt *Volumen* beschriebene Struktur mit dem Verfahren der Delaunay-Triangulation. Dabei werden alle sichtbaren Ränder im Inneren des Volumens berücksichtigt. Der Vernetzer erzeugt ein Elementnetz aus Tetraederelementen VT10. Die Eigenschaften (*Querschnitt*, *Layer* und *Farbe der Elemente*) der Volumenobjekte werden dabei übernommen. Zur Steuerung des Netzgenerierers sind folgende Kriterien einstellbar:

- *Gesamtvolumen / Elementvolumen*: Dieses Verhältnis (V) begrenzt die Größe der Elemente.
- *Umkugelradius / min. Kantenlänge*: Dieses Verhältnis (B) beschreibt die Qualität der Elementformen. Mit kleineren Werten wird die Qualität der Elemente verbessert, ihre Anzahl allerdings erhöht.

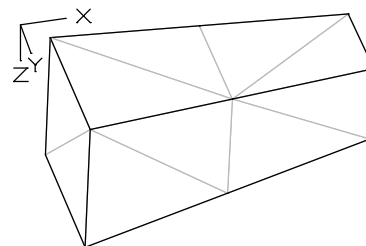
Für diese Kriterien können auch die Einstellungen in den Volumenobjekten verwendet werden.



Elementnetz:  $V = 1000; B = 3$



$V = 1; B = 1,5$



$V = 1; B = 3$

## Stabzug

Mit dieser Funktion werden automatisch Stabelemente erzeugt, die an vorhandene Netzknoten anschließen (z.B. Modellierung von Unterzügen).

### Eingabe

- Anfang*            Anfangspunkt des Stabzuges eingeben.
- Ende*              Endpunkt des Stabzuges eingeben.
- Eigenschaften*   Mit dieser Option wird der Dialog der Elementeigenschaften aufgerufen.

## Elementeingabe

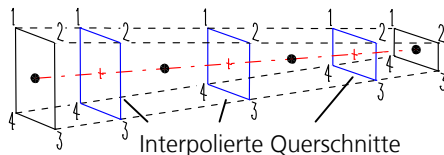
Mit diesem Menüpunkt können einzelne finite Elemente definiert werden. Die Elementarten sind im Abschnitt *Elementbibliothek* (Kapitel *Grundlagen*) ausführlich dokumentiert.

### Elemente

- RS*                Räumlicher Biegestab
- RF*                Räumlicher Fachwerkstab
- SEIL*             Räumliches Seilelement
- PV43*             Viereckiges Plattenelement
- PD33*             Dreieckiges Plattenelement
- SV43*             Viereckiges Scheibenelement
- SD33*             Dreieckiges Scheibenelement
- SD62*             Dreieckiges Scheibenelement mit Seitenmittenknoten
- SH46*             Viereckiges Schalenelement
- SH36*             Dreieckiges Schalenelement
- VQ83*             Volumenelement mit acht Eckknoten
- VT10*             Tetraederelement mit Seitenmittenknoten

### Eingabe

- Anfangspunkt*    Eingabe eines Stabes vom Anfangs- zum Endpunkt.
- Generier*        Die eingegebene Strecke wird in n gleich lange Stäbe unterteilt. In Verbindung mit den Querschnittsarten Polygon, Rechteck und Stab können unterschiedliche Anfangs- und Endquerschnitte vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann die gewählte Anzahl von Querschnitten. Dies ermöglicht die Modellierung einer Voute. Bei Polygonquerschnitten wird die Lage der Polygonpunkte interpoliert. Dafür müssen die Anzahl und die Anordnung der Polygonpunkte übereinstimmen.



- Stabzug*         Automatische Erzeugung von Stäben, die an vorhandene Netzknoten anschließen, z.B. zur Modellierung von Unterzügen.
- Eckpunkte*      Die einzelnen Knotenkoordinaten des Elements werden eingegeben.
- Eigenschaften*   Mit dieser Option wird der Dialog der Elementeigenschaften aufgerufen.

Bei der Eingabe von Stäben im 3D-Modus wird ein Punkt in der lokalen xz-Ebene abgefragt. Bei der 2D-Eingabe verwendet das Programm die Standardausrichtung.

Platten- und Scheibenelemente müssen im Uhrzeigersinn und parallel zur xy-Ebene eingegeben werden. Die Form der Flächenelemente kann bis zu einem Seitenverhältnis von 1/10 und einem Innenwinkel von 180° variieren.

## Elementeigenschaften

Mit diesem Dialog werden Eigenschaften *markierter Elemente* bearbeitet bzw. die Eigenschaften für neu zu erzeugende Elemente voreingestellt. Der Dialog ist aus den folgenden Seiten aufgebaut:

- *Allgemein*
- *Ersatzstablänge*
- *Querschnitt*

### Allgemein

Diese Dialogseite zeigt die allgemeinen Elementeigenschaften.

#### Elementart

Die Art der markierten Elemente wird angezeigt. Es können z.B. Biegestäbe in Fachwerkstäbe oder Platten in Schalenelemente umgewandelt werden. Bei der Änderung von Flächen in Volumenelemente (VQ83) werden neue Knoten im Abstand der Elementdicke  $dz$  erzeugt. Volumenelemente können nicht in andere Elementarten umgewandelt werden.

#### Länge, Winkel

Anzeige der Stab- bzw. Seillänge [m], Eingabewert für die Drehung des Stabquerschnitts um die Stabachse [°].

#### Fläche

Anzeige der Elementfläche [m<sup>2</sup>].

#### Volumen

Anzeige des Elementvolumens [m<sup>3</sup>].

#### Element-, Schnittkraft-, Bewehrungswinkel

Winkel der lokalen Koordinatensysteme in [°].

#### Seilvorspannung

Eingabewert der Seilvorspannung [kN].

#### Knoten

Anzeige der Knotenkoordinaten.

#### Gelenke

Die Gelenkeigenschaften von Biegestäben können für jeden Freiheitsgrad getrennt angegeben werden. Bei gesetzter Markierung ist der betreffende Freiheitsgrad gelenkig definiert. Der Pfeil zeigt das gewählte Ende des Biegestabes.

#### Gelenkfedern

Federsteifigkeit [MN/m, MNm] mit der das jeweilige Stabende (a = Anfang, b = Ende) elastisch am Knoten angeschlossen ist. Ist kein Wert definiert, gilt die entsprechende Gelenkeigenschaft.

## Ersatzstablänge

Für den Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren können bei Stäben aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 die Ersatzstablängen definiert werden.

#### y-Achse, z-Achse

Die Vorgabe einer unter Berücksichtigung von Lagerung und Belastung zutreffenden Ersatzstablänge liegt im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders. Bei Eingabe von 0 wird für die betreffende Richtung kein Nachweis geführt.

#### Hinweis

Wenn ein Bauteil mit konstantem Querschnitt in mehrere Stäbe geteilt ist, sollte allen Teilen die für das ganze Bauteil maßgebende Knicklänge zugeordnet werden. Eine rechnerische Ermittlung von Knicklängen und Knickeigenformen ist im FEM-Programm für ausgewählte Lastzusammenstellungen möglich (s. Beschreibung zur *Lastgruppe*).

## Querschnitt

Der Querschnitt beschreibt folgende Eigenschaften eines Elementes:

- Querschnittsform
- Vorgaben für die Schubspannungsberechnung
- Material
- Bettung
- Vorgaben für die Stahlbetonbemessung
- Vorgaben für die Thermische Berechnung
- Brandeinwirkung für den vereinfachten Nachweis nach EN 1995-1-2

Jeder Querschnitt wird eindeutig mit einer Nummer zwischen 1 und 9999 identifiziert. In der Regel ist ein Querschnitt nicht nur einem Element, sondern einer Gruppe von Elementen zugeordnet.

### Nummer

Auswahl des Querschnitts. Bei einem neu erzeugten Querschnitt kann die Nummer frei vergeben werden. Eine nachträgliche Umnummerierung von Querschnitten ist in der Datenbasis über das Kontextmenü des Unterpunktes *Strukturbeschreibung / Querschnittswerte* möglich.

### Querschnittsart

- Fläche
- Stab
- Polygon
- Stahlbauprofil mit Profilnummer.

*IFE*: Mittelbreite I-Träger nach DIN 1025 Teil 5 und Euronorm 19-57.

*HEA*: Breite I-Träger, leichte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPBI-Reihe nach DIN 1025 Teil 3.

*HEB*: Breite I-Träger nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPB-Reihe nach DIN 1025 Teil 2.

*HEM*: Breite I-Träger, verstärkte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPBv-Reihe nach DIN 1025 Teil 4.

*I*: Schmale I-Träger nach DIN 1025 Teil 1.

*U*: U-Stahl nach DIN 1026.

*T*: T-Stahl nach DIN 1024.

- *Parameter*: Parametrisiertes Stahlbauprofil mit I-, L-, T-, U-, rohr- oder kastenförmiger Querschnittsgeometrie.
- *Bibliothek*: Querschnittsbibliothek mit Stahlbauprofilen.
- *Datenbank*: Profil aus der Anwenderdatenbank (*Anwend.pro*).
- *Rechteck*
- *Zugstab*
- *Laminat*
- *Verbund*
- *Volumen*

**Materialart**

- *B25 bis B55*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045:1988, Tab.1.
- *C12/15 bis C100/115*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1 bzw. ENV 1992-1-1:1991 (ab *C55/67* nur zur Bemessung nach DIN 1045-1).
- *LC12/13 bis LC60/66*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1.
- *C12/15-EN bis C90/105-EN*: Betonfestigkeitsklassen nach EN 1992-1-1.
- *C12/15-EN-D bis C100/115-EN-D*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1.
- *ÖC16/20 bis ÖC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach ÖNORM B 4710-1.
- *ÖNB40*: Betonfestigkeitsklasse nach ÖNORM B 4200-10.
- *ÖNBeton*: Beton nach ÖNORM mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *SC12/15 bis SC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SLC12/13 bis SLC50/55*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SCX*: Beton nach SIA262 bzw. SN EN206-1 mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *S235, S275, S355, S450*: Baustahl gemäß DIN 18800 T1, Tab.1.
- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 10025-2.
- *NH1, NH2, NH3*: Nadelholz der Güteklassen I, II und III nach DIN 1052:1988.
- *BSH1, BSH2*: Brettschichtholz der Güteklassen I und II nach DIN 1052:1988.
- *C14 bis C50, D18 bis D70*: Vollholz nach EN 338.
- *GL20h bis GL32h, GL20c bis GL32c*: Brettschichtholz nach EN 14080.
- *Frei*: Anwenderdefiniertes Material.
- *Beton*: Anwenderdefinierter Beton.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

**Neu**

Einen neuen Querschnitt erzeugen.

**Kopie**

Den aktuellen Querschnitt kopieren.

**Löschen**

Den aktuellen Querschnitt löschen.

**Bezeichnung**

Der Querschnitt kann mit einem beliebigen Text bezeichnet werden.

Je nach Querschnitts- und Materialart stehen weitere Dialogseiten zur Verfügung:

- *Form*
- *Schubspannungen*
- *Material*
- *Bettung*
- *Betonstahl*
- *DIN 1045-1*
- *EN 1992-1-1*
- *DIN EN 1992-1-1*
- *ÖNORM EN 1992-1-1*
- *SS EN 1992-1-1*
- *ÖNORM B 4700*
- *SIA 262*
- *DIN FB 102*
- *EN 1992-2*
- *DIN EN 1992-2*
- *ÖNORM EN 1992-2*
- *Nachrechnungsrichtlinie*
- *EN 1995-1-2*
- *Thermische Berechnung*

## Flächenquerschnitt

### Dicke dz

Querschnittsdicke der Flächenelemente [m].

### Orthotropie dzy/dz

Der Orthotropiefaktor dient zur Abminderung der Elementdicke für die Berechnung der Steifigkeit in lokaler y-Richtung des Elementes.

### Drillweich

Bei gesetzter Markierung wird die Drillsteifigkeit in der Elementsteifigkeitsmatrix zu Null gesetzt. In der Differentialgleichung des Plattenanteils bleiben dann die gemischttermigen Glieder unberücksichtigt:

$$\frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} = 0$$

Die Drillmomente  $m_{xy}$  ergeben sich allerdings nur dann zu Null, wenn das Schnittkraftsystem und das für die Steifigkeit maßgebliche Elementsystem identisch sind.

### Beiwert für Plattensteifigkeit

Mit diesem Wert wird die normale Plattensteifigkeit multipliziert (gilt für Platten- und Schalenelemente).

## Polygonquerschnitt

### A

Anzeige der berechneten Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

### Ix

Torsionsträgheitsmoment [m<sup>4</sup>].

Vom Programm wird im Hinblick auf die Anwendung im Massivbau eine sehr kleine Steifigkeit vorgeschlagen. Bei dynamischen Berechnungen führt eine zu kleine Torsionssteifigkeit in der Regel zu unerwünschten Eigenformen (Torsionsschwingungen), so dass ein realistischer Wert anzusetzen ist.

### Ix berechnen

Die Torsionsträgheitsmoment des Polygons wird berechnet und in das Textfeld für  $I_x$  eingetragen.

### Iy, Iz, Iyz

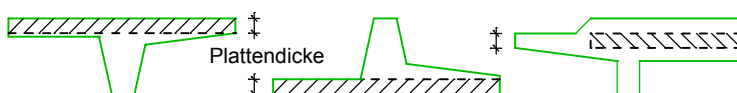
Anzeige der berechneten Trägheitsmomente [m<sup>4</sup>].

### Iyz in Stabsteifigkeit vernachlässigen

Bei der statischen und dynamischen Berechnung wird  $I_{yz}$  vernachlässigt.

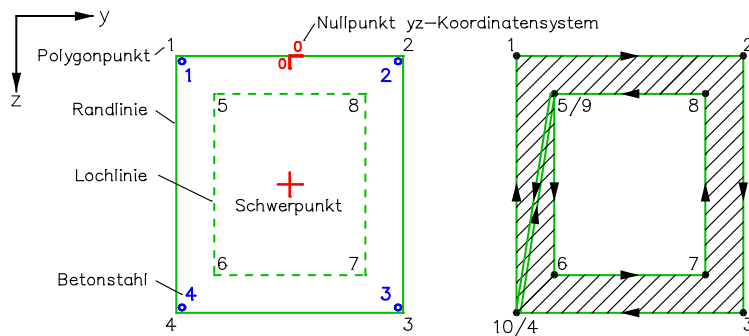
### EG vermindern

Hierdurch wird die Eigenlast um den Plattenanteil vermindert. Die mittragende Breite wird dabei aus den extremalen Abmessungen an der Ober- oder Unterseite in horizontaler Richtung (y-Achse) ermittelt. Die Plattendicke ergibt sich aus der kleineren der beiden Höhen des linken oder rechten Randes des Polygons. Diese Option ist nur für Querschnittspolygone in Form eines Platten- bzw. Randbalkens mit horizontaler Ober- bzw. Unterseite zulässig.



### Bearbeiten...

Die graphische Bearbeitung der Querschnittsgeometrie erfolgt in einem eigenen Fenster. Der Querschnitt wird mit Rand- und Lochlinien definiert.



Die interne Speicherung geschieht durch ein Polygon, das nach der Umfassungsmethode berechnet wird. Die Anzahl der Polygonpunkte ist auf 200 begrenzt.

Die Rand- und Lochpunkte werden automatisch so nummeriert, dass der am weitesten links liegende Punkt die Nummer 1 erhält. Kommen hierfür mehrere Punkte in Betracht, wird von diesen derjenige mit dem kleinsten z-Wert gewählt.

Wenn die Polygonpunkte in der Datenbasis eingegeben wurden, bleibt die dort festgelegte Punktfolge auch in der graphischen Darstellung erhalten, solange das Polygon nicht modifiziert wird.

### Betonstahl...

Eigenschaften jeder Betonstahllage der markierten Querschnitte.

## Datei-Menü des Bearbeitungsfensters

### Neu

Mit einem neuen Querschnittspolygon beginnen.

### Einfügen

Ein Querschnittspolygon, Stahlbau- oder Datenbankprofil in das aktuelle Polygon einfügen.

### In Datenbank speichern...

Das aktuelle Querschnittspolygon in der Anwenderdatenbank *Anwend.pro* speichern.

### Import

Eine Zeichnung einer Projektdatei oder eine DXF-Datei importieren.

### Export

Das Querschnittspolygon als DXF-Datei exportieren.

## Polygon-Menü des Bearbeitungsfensters

### Linie

Einzelne Rand- oder Lochlinie eingeben.

### Kreis Rohr Rechteck Unterzug Überzug

Diese Querschnittsformen werden nach Eingabe der maßgeblichen Parameter automatisch erzeugt. Wahlweise lässt sich gleichzeitig Betonstahl im vorgegebenen Randabstand definieren.

### Betonstahl

Der Betonstahl für die Biegebemessung kann frei im Querschnitt positioniert werden. Zur Unterstützung wird eine Hilfslinie mit dem eingestellten Randabstand dargestellt. Die angezeigte Betonstahlnummer dient zur Identifizierung der Stahllagen bei der Ergebnisausgabe. Die Stahleigenschaften (z.B. Streckgrenze  $f_{yk}$ , Grundbewehrung) sind voreingestellt. Für markierten Betonstahl lassen sich die Eigenschaften über das Kontextmenü bearbeiten.

### Beschriften

Beschriftung des Polygons ein- oder ausschalten.

 **Erneuern**

Angezeigte Beschriftung des Polygons erneuern.

 **Einstellen**

Art und Umfang der Beschriftung sowie den Randabstand für die Eingabe des Betonstahls einstellen.

 **Rand Loch übernehmen**

Rand- bzw. Lochlinien aus anderen Linien übernehmen, z.B. nach dem DXF-Import einer Querschnittszeichnung.

 **Querschnittswerte**

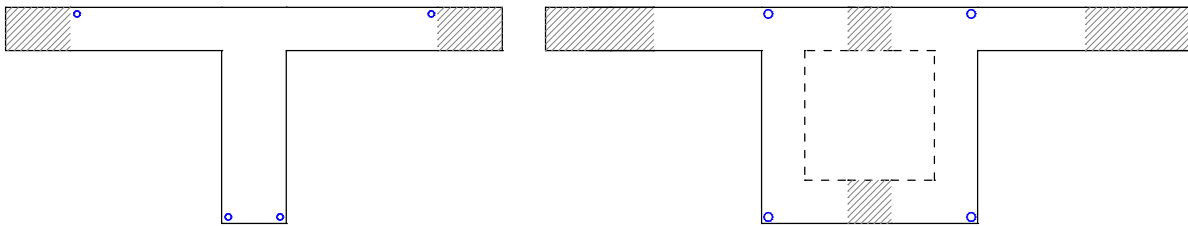
Ausführliche Querschnittswerte anzeigen (z.B.: Schubmittelpunkt, Widerstandsmomente, Einheitsverwölbung  $\omega$ ).

### Mitwirkende Breite

Definition der mitwirkenden Plattenbreite durch Markieren der Flächen außerhalb der mitwirkenden Breite. Dazu wird der Querschnitt automatisch in Dreiecke eingeteilt. Die markierten Flächen werden bei der Berechnung der Schwerpunktskoordinaten und der Biegeträgheitsmomente nicht berücksichtigt.

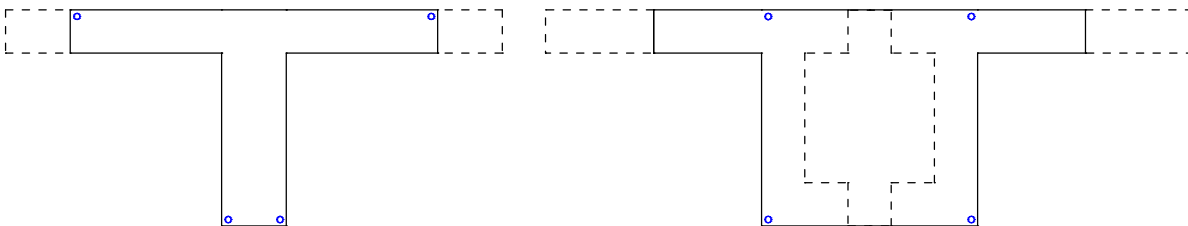
Bei Stahlbetonquerschnitten wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Eingabe des Vollpolygons mit Polygonpunkten an den Grenzen der mitwirkenden Breite
- Markierung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Flächen
- Positionierung der Betonstahllagen innerhalb der mitwirkenden Breite



*Schraffierte Darstellung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Querschnittsteile*

Alternativ kann das Querschnittspolygon mit den auf die mitwirkende Breite reduzierten Querschnittsabmessungen eingegeben werden. In den Brückennachweisen nach DIN FB 102 und EN 1992-2 lässt sich optional die für die Längskraft wirksame Fläche des Vollquerschnitts festlegen. Für den Nachweis von Haupt- oder Schubspannungen an Hohlkästen ist die erste Methode zu bevorzugen, da hier der Schubfluss nicht unterbrochen wird.



*Auf die mitwirkende Plattenbreite reduzierte Querschnittspolygone*

## Betonstahl - Eigenschaften

### Streckgrenze $f_{yk}$

Streckgrenze des Betonstahls [MN/m<sup>2</sup>].

### Grundbewehrung

Die Grundbewehrung ist die Ausgangsbewehrung für die Bemessung. Sie wird in keinem Fall vom Programm verringert. Durch Eingabe unterschiedlicher Grundbewehrungen kann ein Verhältnis der zu ermittelnden Stahlquerschnitte untereinander festgelegt werden.

### Grundbewehrung fixieren

Eine fixierte Stahllage erfährt bei der Bemessung keine Erhöhung.



**Zv0**

Diese Kraft dient zur Berücksichtigung einer Vordehnung  $\varepsilon_0 = Z_{v0} / (E \cdot A)$  bei der Berechnung der Spannungen des Betonstahls.

**Rechteckquerschnitt**

Für diese Querschnittsart kann kein Stahlbetonnachweis durchgeführt werden.

**Breite dy, Höhe dz**

Ausdehnung des Rechtecks in lokaler y- bzw. z-Richtung der Stäbe [m].

**Stabquerschnitt**

Für diese Querschnittsart können keine Nachweise geführt werden.

**A**

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

**Ix, Iy, Iz, Iyz**

Trägheitsmomente [m<sup>4</sup>].

**Längstragwirkung**

- *Standard*: Die Stäbe übertragen Druck- und Zugkräfte.
- *Nur Druckkraft*: Die Stäbe übertragen nur Druckkräfte.
- *Nur Zugkraft*: Die Stäbe übertragen nur Zugkräfte.

Die Verwendung von Druck- oder Zugstäben führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Dabei ist das Superpositionsprinzip nicht mehr gültig.

**Zugstab**

Diese Querschnittsart beschreibt Elemente ohne Druckfestigkeit und sollte nur Fachwerkstäben oder Seilen zugeordnet werden. Die Verwendung dieser Querschnittsart führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Das Superpositionsprinzip ist dabei nicht mehr gültig. Für Zugstäbe können keine Nachweise geführt werden.

**A**

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

**Laminat**

Diese Querschnittsart kann für Schalenelemente verwendet werden. Sie ermöglicht die Berechnung von Flächentragwerken aus Laminaten und deren Spannungen. Ein Laminatquerschnitt besteht aus beliebig vielen, von oben nach unten aufgelisteten, Schichten mit jeweils folgenden Materialeigenschaften:

- E-Modul E1 [MN/m<sup>2</sup>]
- E-Modul E2 [MN/m<sup>2</sup>]
- G-Modul G12 [MN/m<sup>2</sup>]
- G-Modul G13 [MN/m<sup>2</sup>]
- G-Modul G23 [MN/m<sup>2</sup>]
- Querdehnzahl mue21
- Winkel phi.x1 [°]
- Wärmeausdehnungskoeffizient alpha.t [1/K]
- Gamma [kN/m<sup>3</sup>]

Die benutzerdefinierten Materialeigenschaften können in der Systemdatei (lgraph.dat) abgespeichert werden. Optional kann ohne Schubverbund zwischen den Laminatschichten gerechnet werden.

## Verbundquerschnitt

Diese Querschnittsart kann für Bemessungsobjekte und Einzelbemessungen verwendet werden.

Die Querschnittswerte des Verbundquerschnitts berechnen sich über folgende Formeln:

$A_v = 1/E_{\min} \cdot \sum E_i \cdot A_i$	Verbundquerschnittsfläche
$z_{s,v} = 1/(A_v \cdot E_{\min}) \cdot \sum E_i \cdot z_{s,i} \cdot A_i$	Z-Ordinate des Schwerpunkts
$y_{s,v} = 1/(A_v \cdot E_{\min}) \cdot \sum E_i \cdot y_{s,i} \cdot A_i$	Y-Ordinate des Schwerpunkts
$I_{y,v} = 1/E_{\min} \cdot \sum E_i \cdot [I_{y,i} + (z_{s,v} - z_{s,i})^2 \cdot A_i]$	Flächenmoment 2. Grades um y
$I_{z,v} = 1/E_{\min} \cdot \sum E_i \cdot [I_{z,i} + (y_{s,v} - y_{s,i})^2 \cdot A_i]$	Flächenmoment 2. Grades um z
$I_{yz,v} = 1/E_{\min} \cdot \sum E_i \cdot [I_{yz,i} + (y_{s,v} - y_{s,i}) \cdot (z_{s,v} - z_{s,i}) \cdot A_i]$	Deviationsmoment

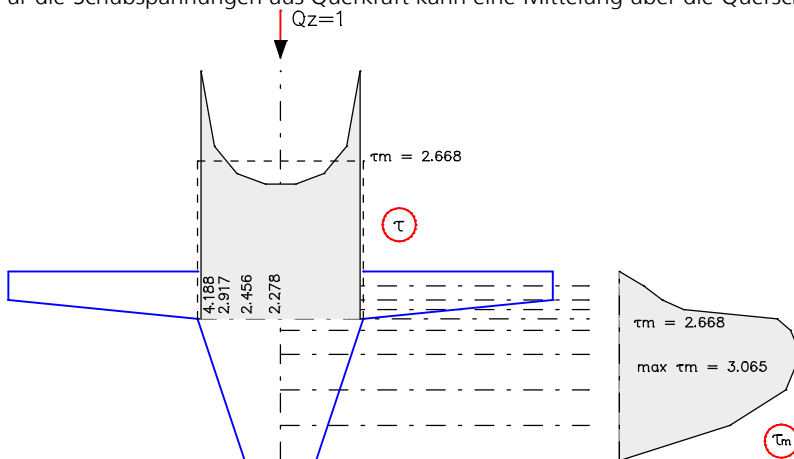
## Schubspannungen

Die linear-elastischen Schubspannungen werden standardmäßig nach der Theorie dickwandiger Profile berechnet.

Im Ausrundungsbereich von Walzprofilen oder in stumpfen Ecken von geschweißten Profilen ergeben sich danach größere Spannungen als nach der Theorie dünnwandiger Profile.

Mit der Angabe der maximalen Blechdicke (offene Profile) oder des Torsionswiderstandsmomentes (Kastenprofile) lassen sich die Torsions-Schubspannungen auf den Maximalwert nach der Theorie dünnwandiger Profile begrenzen.

Für die Schubspannungen aus Querkraft kann eine Mittelung über die Querschnittsbreite gewählt werden.



Schnittführung und Schubspannungsverteilung aus Querkraft am Querschnittspolygon nach der Theorie dickwandiger Profile ( $\tau$ ) und nach Mittelung ( $\tau_m$ )

## Material

### E-Modul

Elastizitätsmodul [MN/m<sup>2</sup>].

### G-Modul

Schubmodul für Stäbe [MN/m<sup>2</sup>].

### Querdehnzahl

Querdehnzahl für Flächen- und Volumenelemente.

### Gamma

Spezifisches Gewicht des Materials [kN/m<sup>3</sup>]. Dieses wird bei der Lastart *Eigenlast* sowie bei der dynamischen Tragwerksanalyse zur Ermittlung der Massenmatrix verwendet.

**Alpha.t**

Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K].

**fyk**

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze einzugeben [MN/m<sup>2</sup>].

**Rohdichte**

Rohdichte für Leichtbeton und Holz [kg/m<sup>3</sup>].

**ke für E-Modul**

Faktor zur Berechnung des Elastizitätsmoduls nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.3.3.

**Nutzungsklasse**

Bei Querschnitten aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 ist für die Holznachweise eine Nutzungsklasse auszuwählen.

Bei der Materialart *ÖNBeton* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend ÖNORM B 4700, Tabelle 4 definiert.

**fcwk**

Charakteristische Würfeldruckfestigkeit, Nennfestigkeit der Festigkeitsklasse [MN/m<sup>2</sup>].

**fctm**

Mittlere Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fctk**

Charakteristische Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**taud**

Rechenwert der Schubspannung [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *SCX* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend SIA 262, Tabelle 3 definiert.

**fck**

Charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fck,cube**

Charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fctm**

Mittelwert der Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *Frei* sind für eine nichtlineare Systemanalyse zusätzlich deren Festigkeitsgrenzen anzugeben.

**Druckfestigkeit**

Streckgrenze bei Druckspannungen  $f_{y,Druck}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

**Zugfestigkeit**

Streckgrenze bei Zugspannungen  $f_{y,Zug}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

**Fließbedingung**

Bei Volumen- und Flächenquerschnitten mit der Materialart *Frei* kann die *Raghava*- oder die *Rankine*-Fließbedingung gewählt werden.

**Material linear**

Der Schalter bewirkt auch in der nichtlinearen Systemanalyse ein linear-elastisches Materialverhalten dieses Querschnitts. Grundsätzlich können nur Flächen-, Volumen-, Polygon-, Datenbankquerschnitte und Stahlbauprofile einer nichtlinearen

Analyse unterworfen werden. Bei allen übrigen Querschnittsarten und bei den Materialarten *Beton* sowie *Bauholz* wird elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

### Hinweis

Der Elastizitätsmodul geht unter anderem in die Spannungs-Dehnungsfunktion nach EN 1992-1-1, Gleichung (3.14), und SIA 262, Gleichung (28), ein. Die Funktion besitzt eine Polstelle, die sich bei Abminderung des vorgegebenen Elastizitätsmoduls in den maßgebenden Dehnungsbereich verschieben kann. Daraus resultierende Ergebnisse der nichtlinearen Systemanalyse sowie der Stahlbeton- und Spannbetonnachweise können dann beeinträchtigt werden.

## Kriechbeiwerte

Auf die zeitabhängigen Materialkennwerte für das Kriech- und Schwindverhalten wird bei der Berechnung der Lastart *Kriechen und Schwinden* ( $K_s$ ) zurückgegriffen. Die sich dabei ergebenden Betondehnungen werden mit dem angezeigten Elastizitätsmodul berechnet.

### Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$

Kriechzahl  $\varphi(t, t_0)$

### Relaxationskennwert $\rho$

Relaxationskennwert nach Trost ( i.d.R.  $\rho=0,80$  ).

### Schwindmaß $\epsilon_{cs}(t, t_0) \cdot 10^5$ .

Das mit  $1 \cdot 10^5$  multiplizierte Schwindmaß  $\epsilon_{cs}(t, t_0)$ .

### Beiwerte berechnen

Der Schalter bewirkt, dass die Beiwerte  $\varphi(t, t_0)$  und  $\epsilon_{cs}(t, t_0)$  aus den Angaben  $t_0$ ,  $t_s$ ,  $t$ , *Zementhärtung*, *Luftfeuchtigkeit RH* und *Wirksame Dicke  $h_0$*  entsprechend der zur gewählten Materialart passenden Norm berechnet werden. Die Kriechzahl  $\varphi(t, t_0)$  berechnet sich für DIN 1045-1 nach Heft 525, Gl. (H.9-6), für ÖNORM B 4750 nach Gl. (7) und für EN 1992-1-1 nach Anhang B, Gl. (B.1). Die Gesamtschwinddehnung  $\epsilon_{cs}(t, t_0)$  ergibt sich für DIN 1045-1 nach Heft 525, Gl. (H.9-20), für ÖNORM B 4750 nach Gl. (10) und für EN 1992-1-1 nach Gl. (3.8).

### Belastungsbeginn $t_0$

Alter des Betons bei der ersten Lastbeanspruchung in Tagen.

### Austrocknungsbeginn $t_s$

Alter des Betons zu Beginn des Trocknungsschwindens in Tagen.

### Betonalter zum Zeitpunkt $t$

Das Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen.

### Zementerhärtung

Geschwindigkeit der Zementerhärtung für die Zuordnung in die passende Zementklasse.

### Luftfeuchte RH

Relative Luftfeuchte der Umgebung in %.

### Wirksame Dicke $h_0$

Wirksame Querschnittsdicke mit  $h_0 = 2 \cdot A_c / u$  in m, wobei  $A_c$  die Betonquerschnittsfläche und  $u$  die Umfangslänge der dem Trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche sind.

### Hinweis:

Die hier genannten Formeln aus den Normen erlauben es nicht, die Kriechzahl für einen beliebigen Zeitraum  $t_1$  bis  $t_2$  nach dem Belastungsbeginn zu bestimmen. Näherungsweise kann dieser Wert wie folgt ermittelt werden:

$$\varphi(t_2, t_1) = \varphi(t_2, t_0) - \varphi(t_1, t_0)$$

Für das Schwindmaß kann analog vorgegangen werden.

## Bettung

### Bettungsmodul $x, y, z$

Bettungsmoduln für die Elementrichtungen [MN/m<sup>3</sup>]. Bei Stäben können die Bettungsmoduln zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Elementes linear veränderlich sein.

### Bettungsbreite

Bei Stabquerschnitten ist für jeden Bettungsmodul die gebettete Breite [m] anzugeben.

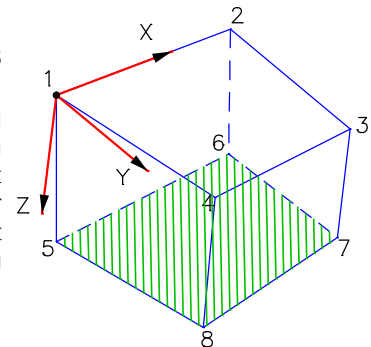
### Druck- bzw. Zugfestigkeit (Nichtlineare Systemanalyse)

Die hier definierten Festigkeiten [MN/m<sup>2</sup>] des Bodens gelten ausschließlich für eine nichtlineare Systemanalyse. Hiermit kann eine bilineare Bettungskennlinie im Druck- und Zugbereich der Elemente realisiert werden (siehe auch "Baugrundmodelle"). Bei Stäben können die Festigkeiten zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Elementes linear veränderlich sein.

Hinweis:

Bei Volumenelementen VQ83 wird die gebettete Fläche durch die Knoten 5 bis 8 beschrieben.

Beim Tetraederelement VT10 sind die gebetteten Flächen explizit zu wählen. Dabei zeigen die lokalen Richtungen für das Bettungsmodul  $z$  immer senkrecht zu den gewählten Oberflächen. Die Bettungsrichtung  $x$  der Fläche 1 des Tetraeders zeigt vom Knoten 1 zum Knoten 2. In den anderen drei Oberflächen verläuft Sie parallel zur Fläche 1. Da für das Tetraederelement die Richtungen vom Benutzer nicht geändert werden können ist es dringend anzuraten die Bettungsmoduln in  $x$ - und  $y$ -Richtung gleich zu setzen.



## Betonstahl eines Flächenquerschnitts

### Auswahl der Lage

Markieren von Stahllagen durch Anklicken in der Graphik.

### Neue Lage

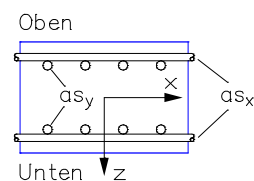
Hinzufügen neuer Stahllagen.

### Lage löschen

Löschen markierter Stahllagen.

### Randabstand $x$ - bzw. $y$ -Richtung

Achsabstand der Stahllage vom Querschnittsrand in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung [m].



### Grundbewehrung

Mindestquerschnitt der Bewehrung für die Biegebemessung. Hierdurch kann außerdem ein Verhältnis der zu ermittelnden Stahllagen untereinander festgelegt werden [cm<sup>2</sup>/m].

### Grundbewehrung fixieren

Die Grundbewehrung wird bei der Bemessung nicht erhöht.

### Güte

- 420S: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- 500S: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- 500M: Betonstahlmatten nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- Allgemein: Frei definierbare Stahlgüte.

**Streckgrenze**

Streckgrenze  $f_{yk}$  [MN/m<sup>2</sup>].

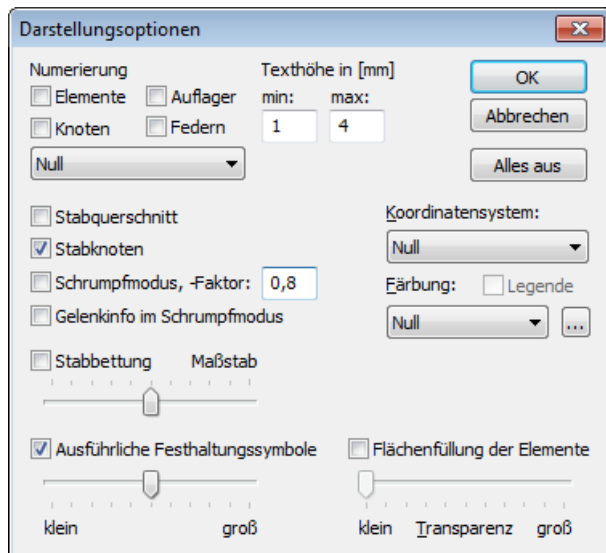
**Elementinformationen**

Diese Funktion zeigt am Element und in der Statusleiste folgende Eigenschaften eines Elementes an:

- Elementnummer
- Elementart
- Knotennummern
- Elementsystem
- Querschnitt
- Material
- Gelenke

**Darstellung**

Dieser Menüpunkt dient zur Darstellung und Kontrolle der Tragwerkseigenschaften.

**Numerierung**

Elemente, Knoten, Lager und Federn können mit Ihren Nummern beschriftet werden. Zusätzlich lassen sich Elemente und Bemessungsobjekte mit Material- oder Querschnittsnummern versehen. Die Anzeige der Nummern lässt sich auf Werte > 1 beschränken. Für Stabquerschnitte kann alternativ der Querschnittsname angeschrieben werden.

**Texthöhe**

Minimale und maximale Texthöhe einstellen [mm].

**Stabquerschnitt**

Der Stabquerschnitt wird an der Stabmitte eingezeichnet.

**Stabknoten**

Die Stabknoten werden gekennzeichnet.

**Schrumpfmodus**

Verkleinerte Darstellung der Elemente ein- oder ausschalten. Die meisten Eingabefunktionen sind in diesem Modus inaktiv.

**Schrumpffaktor**

Verkleinerungsfaktor für den Schrumpfmodus definieren.

### Gelenkinfo im Schrumpfmodus

Bei Stäben werden im Schrumpfmodus vorhandene Stabendgelenke beschriftet. Gelenkfedern werden mit „\*“ gekennzeichnet.

### Stabbettung

Die Bettungsmoduln werden entlang der Stabachsen mit gewähltem Maßstab aufgetragen.

### Flächenfüllung der Elemente

Die Oberflächen der Flächen- und Volumenelemente werden mit der gewählten Farbe gefüllt. Die Elementkanten werden schwarz dargestellt.

### Transparenz

Der Grad der Transparenz von Flächen- und Volumenelementen kann eingestellt werden.

### Ausführliche Festhaltungssymbole

Die Eigenschaften der Festhaltungen werden ausführlich dargestellt. Der Schieberegler verändert die Größe der verwendeten Symbole.

Symbole	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	Frei	Frei
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>
	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>
	Frei	Frei	<b>Fest</b>	Frei	Frei	<b>Fest</b>
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>

### Koordinatensystem

Koordinatensystem für Bewehrung, Elemente, Festhaltungen oder Schnittgrößen einschalten.

### Färbung

Die Elemente werden in der Farbe gezeichnet, die ihrer Materialart oder Querschnittsnummer entspricht. Die Farbzuordnung kann bei Bedarf modifiziert werden.

### Legende

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

### Alles aus

Schaltet alle Darstellungsoptionen aus.

## Netzprüfung

Mit diesem Menüpunkt kann das Elementnetz überprüft werden.

### Knotenabstand

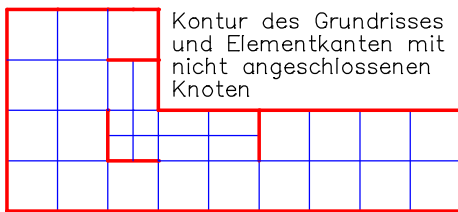
Die Funktion prüft, ob in der Nachbarschaft eines Knotens innerhalb der angegebenen Toleranz weitere Knoten liegen. Diese sogenannten doppelten Knoten werden mit einem roten Pfeil markiert und nach Abfrage verschmolzen. Dabei werden ihre Koordinaten gemittelt.

### Elementabstand

Es wird geprüft, ob Elemente aufeinander liegen, z.B. aufgrund zweifacher Elementeingabe. Die gefundenen Elemente werden mit einem roten Pfeil markiert.

### Kontur

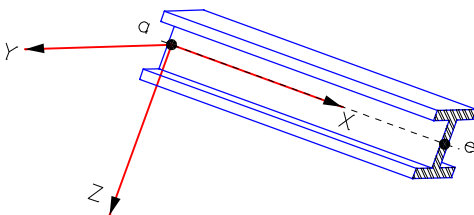
Alle freien Elementkanten werden rot markiert. Damit lassen sich nicht zusammenhängende Netzbereiche wie z.B. Schlitzte erkennen. Die Kontur kann auf Wunsch in einen Linienzug umgewandelt werden.



## Elementsystem

Die lokalen Koordinatensysteme markierter Elemente sind mit diesem Menüpunkt änderbar.

### Stäbe



- +x, -x      Durch Vertauschung des Anfangs- und Endknotens des Stabes wird erreicht, dass die positive bzw. negative x-Achse zum angegebenen Punkt zeigt.
- +z, -z      Die Orientierung des Querschnitts im Raum wird durch einen Punkt in der lokalen xz-Ebene definiert. Der Punkt legt die Richtung der positiven bzw. negativen z-Achse fest. Optional kann die Orientierung auf die Standardausrichtung zurückgesetzt werden.
- y, z        Durch die Angabe zweier Punkte wird die Richtung der gewählten Achse festgelegt.
- Winkel      Der Stab wird um die Stabachse (lokale x-Achse) gedreht.

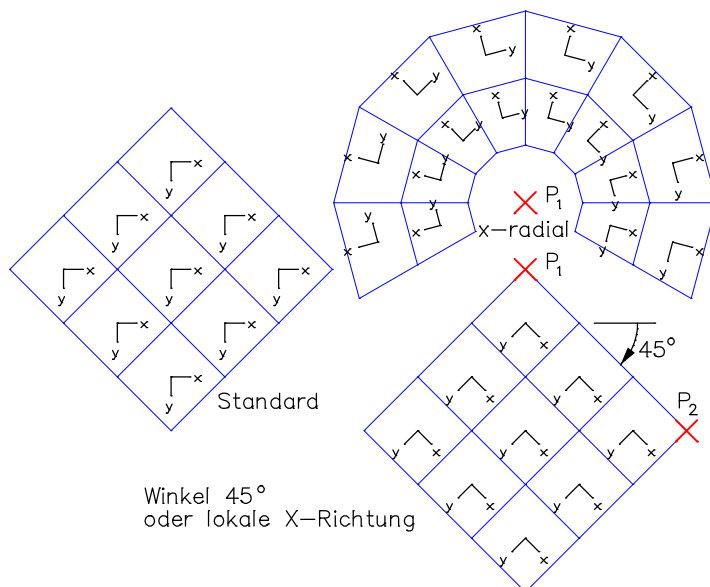
### Flächen- oder Volumenelemente

- Elemente*      Verdrehung des Elementsystems für Flächen- und Volumenelemente. Für Schalenelemente kann zusätzlich die Richtung der lokalen z-Achse umgekehrt werden. Eine Änderung des Elementsystems beeinflusst die Wirkung orthotroper Materialeigenschaften, elastischer Bettung und lokaler Elementlasten.
- Schnittkräfte*      Schnittkraftsystem für Flächen- und Volumenelemente ändern. Die Änderung der Schnittgrößenausrichtung ist erst nach Neuberechnung der Lastfälle wirksam.
- Bewehrung*      Winkelabweichung der Bewehrungsschar  $\alpha_{sy}$  von der 90°-Richtung bei Flächenelementen. Die x-Richtung des Bewehrungssystems ist immer identisch mit der x-Richtung des Schnittkraftsystems. Die Eingabe einer Winkelabweichung ist nur bei schiefwinkliger Bewehrung erforderlich. Die Änderung der Bewehrungsrichtung ist erst nach Neubemessung wirksam.

Optionen zur Änderung der Koordinatensysteme:

- x, y            Durch die Angabe zweier Punkte wird die Richtung der gewählten Achse festgelegt.
- x- bzw. y-radial      Angabe eines Mittelpunkts zur radialen Ausrichtung (z.B. für Kreisplatten).
- x und y, x und z      Durch die Angabe dreier Punkte werden die x-Richtung sowie die xy-Ebene bzw. xz-Ebene definiert.
- Radial        Angabe einer Drehachse zur radialen Ausrichtung (z.B. für zylindrische Volumen).
- Winkel        Der Drehwinkel definiert die Abweichung von der Standardausrichtung in Grad. Die Drehung erfolgt um die z-Achse des Flächen- bzw. Volumenelements.
- Standard      Zurücksetzen auf die Standardausrichtung.
- +z, z        Die positive bzw. negative z-Achse wird zum angegebenen Punkt ausgerichtet.





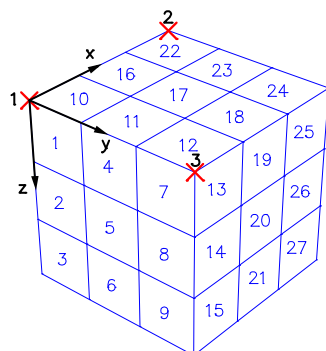
Ausrichtung lokaler Systeme (hier Schnittkraftsysteme)

## Nummern sortieren

Mit Hilfe dieses Menüpunktes können die Element- und Knotennummern geändert werden.

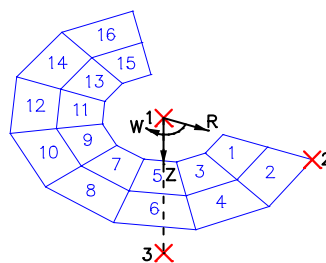
### Eingabe

- Sortieren Knoten- oder Elementnummern geometrisch sortieren.
- Definieren Definition neuer Startwerte und Inkremente für Knoten- und Elementnummern.
- Ändern Knoten- und Elementnummern ändern.



Sortierung der Elementnummern im rechtwinkligen Koordinatensystem:

1. Sortiermittelpunkt
  2. Sortierrichtung, lokale x-Achse
  3. Sortierrichtung, Punkt in lokaler x-y-Ebene
- Rangfolge: X-Y-Z



Sortierung der Elementnummern im polaren Koordinatensystem:

1. Sortiermittelpunkt
  2. Sortierrichtung, lokale x-Achse
  3. Sortierrichtung, Punkt in lokaler x-z-Ebene
- Rangfolge: Winkel-Z-Radius

## Festhaltungen

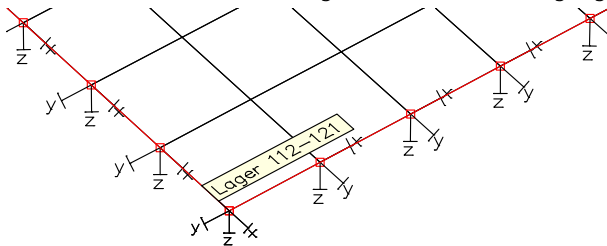
Mit dieser Funktion werden Festhaltungen eingegeben. Eine Festhaltung beschreibt die Lagerungsbedingungen eines Systemknotens. Die festgehaltenen Knoten sind durch einfache oder ausführliche rote Symbole gekennzeichnet (siehe Darstellung). Die Richtung der Freiheitsgrade kann vom globalen Koordinatensystem abweichen.

Die einzelnen Freiheitsgrade können starr oder federnd gelagert werden. Zusätzlich kann der Ausfall des Lagers für Zugkräfte (Zugausfall) für die Richtungen  $x$ ,  $y$  oder  $z$  mit folgenden Optionen definiert werden:

- *Lastfallgesteuert*: Der Zugausfall ist nur in den Lastfällen wirksam, in denen mit der Lastart *TH* oder *Lastgruppe* die Option *Ausfall Zuglager* gewählt wird.
- *Immer*: Der Zugausfall ist immer wirksam.
- *Nie*: Der Zugausfall ist nie wirksam.

### Linienlager

Mit dieser Schaltfläche wird die Eingabe von Linienlagern gestartet. Ein Linienlager wird geometrisch durch Anfangs- und Endpunkt beschrieben. Für alle zwischen diesen Punkten liegenden und Elementkanten bildenden Knoten werden einzelne Festhaltungen erzeugt. Schon vorhandene Punktlager werden dabei nicht berücksichtigt. Die lokale  $x$ -Achse der Lagerlinie zeigt vom Anfangs- zum Endpunkt, die lokale  $z$ -Achse entspricht in der Regel dem globalen Koordinatensystem. Die Orientierung des Linienlagers kann anhand der Koordinatensysteme ihrer Festhaltungen visualisiert werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Festhaltung zu mehreren Linienlagern gehören kann (z.B. an einer Plattenecke).



Linienlager können nur als Ganzes mit den Kontextmenüfunktionen

- Eigenschaften
- Regenerieren
- Auflösen (Umwandlung in Punktlager)

bearbeitet werden. Für die Tragwerksberechnung sind die Eigenschaften der einzelnen, das Linienlager bildenden Festhaltungen maßgebend. Dazu werden intern gegebenenfalls die eingegebenen Federsteifigkeiten durch Multiplikation mit der jeweiligen Einzugsbreite in Einzelfedern umgerechnet. Diese lassen sich zu Kontrollzwecken tabellarisch einsehen.

### Punktlager

Startet die Eingabe von Festhaltungen durch die Auswahl von Knoten. Die nachträgliche Bearbeitung geschieht mit den Kontextmenüfunktionen:

- Festhaltung
- Orientierung

### Wand

Startet die Eingabe von Linienlagern durch die Auswahl von Wänden.

### Info












Zeigt das Festhaltungssystem mit den gebundenen Freiheitsgraden für ein gewähltes Punkt- oder Linienlager.

Hinweis: Bei aktiver Funktion können nur Punkt- und Linienlager markiert werden. Das erleichtert die Bearbeitung dieser Objekte.

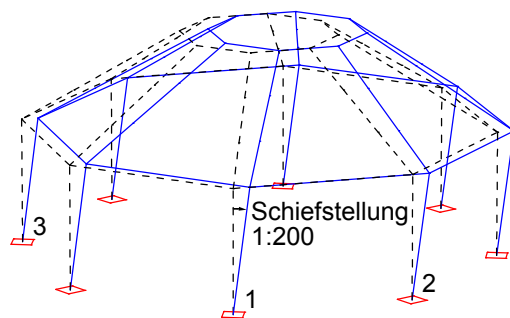
## Vorverformung

Mit dieser Funktion werden spannungsfreie Knotenverschiebungen für ein Tragwerk eingegeben und bearbeitet (nur für Stabwerke). Diese Knotenverschiebungen werden bei der Berechnung zu den ursprünglichen Systemkoordinaten addiert und dienen z.B. als Imperfektion für eine Berechnung nach Th. 2. Ordnung. Bei vorverformten Tragwerken sollten aus diesen Gründen als Lastarten nur Stab- oder Knotenlasten verwendet werden. Im Rahmen einer *Lastgruppe* wird die Vorverformung für die Berechnung aktiviert.

Mit den folgenden Optionen können Vorverformungen definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

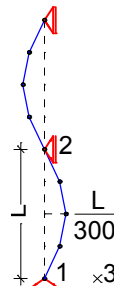
-  Erstellt eine Kopie der aktuellen Vorverformung.
-  Addiert eine ausgewählte Vorverformung oder Knickeigenform zur aktuellen Vorverformung hinzu.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Vorverformungsdarstellung.
-  Erstellt eine neue Vorverformung.
-  Zeigt eine bestehende Vorverformung.
-  Ändert die Nummer der aktuellen Vorverformung.
-  Vorverformung löschen.
-  Vorverformung bearbeiten.
-  Startet die Eingabe einer Vorkrümmung.
-  Startet die Eingabe einer Schiefstellung.

Eine Absoluteingabe der Vorverformung bezieht sich auf das ursprüngliche System, eine Relativeingabe auf das bereits verformte System.



Schiefstellung einer Hallenkonstruktion

1: 1. Punkt Basislinie, 2: 2. Punkt Basislinie, 3: Punkt in Basisebene



Vorkrümmung einer Stütze

## Knoten bewegen

Mit dieser Funktion kann die Lage von ausgewählten Knoten verändert werden. Bei einem einzelnen Elementknoten wird dessen neue Position abgefragt. Sollen mehrere Elementknoten bewegt werden, ist die Option *Gruppe* oder *Elemente* zu wählen.

### Gruppe

Elementknoten wählen, welche bewegt werden sollen.

### Elemente

Elemente wählen, deren Knoten bewegt werden sollen.

### Verschiebungsvektor

Bewegen durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert.

### Rotieren

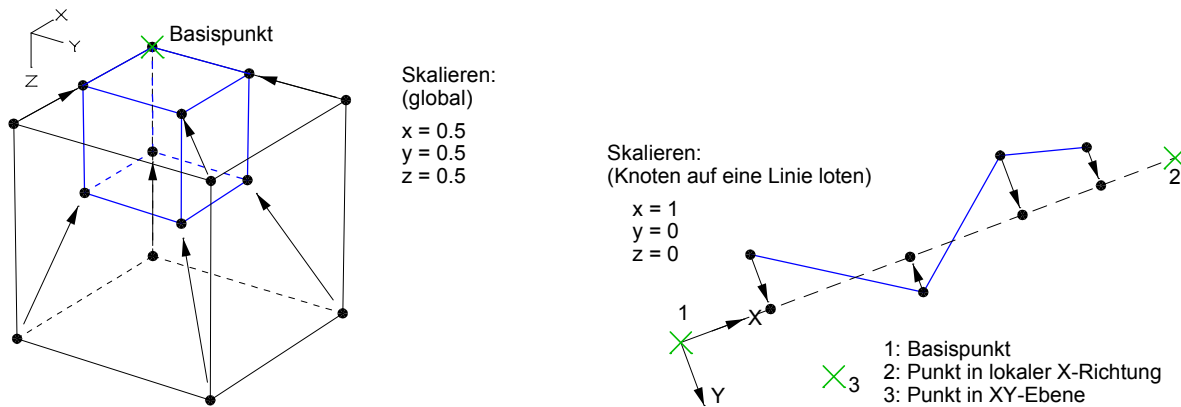
Bewegen durch Rotation. Im 2D-Modus wird ein Drehpunkt, im 3D-Modus eine Drehachse definiert.

### Spiegeln

Bewegen durch Spiegelung. Im 2D-Modus wird eine Spiegelachse, im 3D-Modus eine Spiegelebene definiert.

### Skalieren

Bewegen durch Skalierung im globalen oder einem lokalen Bezugssystem. Mit einem Skalierungsfaktor von Null können Knoten auf eine Achse oder Ebene ausgerichtet werden.



Das Programm prüft, ob durch die Knotenverschiebung die Formen der angrenzenden Elemente zulässig bleiben. Auf Wunsch werden verschobene Knoten, die mit nicht markierten Knoten zusammenfallen, mit diesen zusammengeführt.

## Knoten oder Elemente suchen

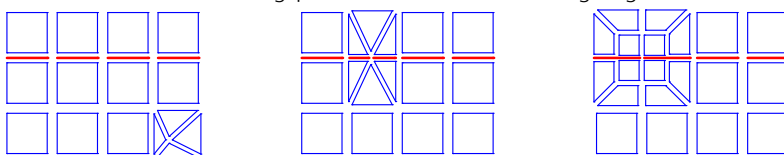
Wird ein Knoten mit einer bestimmten Nummer gesucht, sind die Funktionen *Knoten markieren* und *Knoten bewegen* hilfreich. Innerhalb dieser Funktion kann die gesuchte Knotennummer angegeben werden. Wird ein Element mit einer bestimmten Nummer gesucht, können die Funktionen *Elementinformationen* oder *Markieren* Verwendung finden. In beiden Funktionen kann die Elementnummer angegeben werden. Ist das Element trotz Markierens nicht erkennbar, können mit Hilfe der Funktion *Elementeigenschaften* weitere Informationen abgefragt werden. Die Farbe und der Layer der markierten Objekte werden in der Symbolleiste angezeigt.

## Verdichten

Der Menüpunkt *Verdichten* ermöglicht es, ein vorhandenes Elementnetz zu verändern.

### Punkt

In der Umgebung des eingegebenen Punktes wird das Elementnetz verdichtet. Die Art der Verdichtung hängt davon ab, ob der Punkt innerhalb eines Elements, auf Elementoberflächen oder -rändern, auf Stäben oder vorhandenen Knoten liegt. Bei Bedarf wird am Verdichtungspunkt ein neuer Knoten eingefügt.



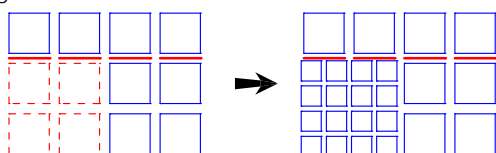
Punktverdichtungen an Elementnetzen mit Stäben (Darstellung im Schrumpfmodus)

### Halbieren

Markierte Flächen- und Volumenelemente (VQ83) werden halbiert. Die gewünschte Halbierungsrichtung wird abgefragt.

### Viertel

Markierte Flächenelemente werden geviertelt. Bei markierten Volumenelementen (VQ83) werden deren Oberflächen geviertelt.



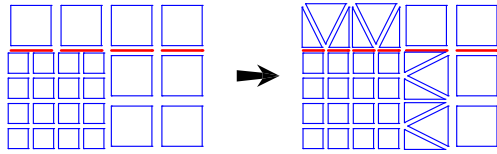
Elementnetz mit geviertelten Flächenelementen (Darstellung im Schrumpfmodus)

**Teilen**

Markierte Stäbe werden geteilt. Die gewünschte Anzahl der Teile wird abgefragt.

**Anpassen**

An den markierten Elementen wird geprüft, ob Knoten an deren Oberflächen oder Kanten bzw. Stabachsen stoßen. Bei Bedarf werden die betroffenen Elemente in diesen Knoten verdichtet.



Angepasstes Elementnetz mit Stäben (Darstellung im Schrumpfmodus)

**Verschmelzen**

Alle markierten Dreieckselemente werden, wenn möglich, zu Viereckselementen verschmolzen.

**Triangulieren**

Alle markierten Viereckselemente werden in zwei Dreieckselemente geteilt.

**Koppelungen**

Mit der Funktion *Koppelungen* lassen sich kinematische Abhängigkeiten zwischen den globalen Freiheitsgraden zweier Elementknoten festlegen, indem die Knotenfreiheitsgrade eines abhängigen Knotens über eine Bedingungsgleichung durch die Freiheitsgrade des bezogenen Knotens ausgedrückt werden.

$$\text{z.B. } u_{z,\text{abh.}} = f_1 \cdot u_{x,\text{bez.}} + f_2 \cdot u_{y,\text{bez.}} + f_3 \cdot u_{z,\text{bez.}} + f_4 \cdot \varphi_{x,\text{bez.}} + f_5 \cdot \varphi_{y,\text{bez.}} + f_6 \cdot \varphi_{z,\text{bez.}}$$

mit

$f_1, f_2, f_3$  Faktoren für die Verschiebungen,

$f_4, f_5, f_6$  Faktoren für die Verdrehungen.

An einen bezogenen Knoten dürfen beliebig viele abhängige Knoten gekoppelt werden. Knoten mit Festhaltungen dürfen nicht als abhängige Knoten definiert werden. Die Koppelungen werden gestrichelt dargestellt. Zusätzlich zeigt ein Pfeil auf den bezogenen Knoten. Es gibt folgende Arten von Koppelbedingungen:

- *Starr*: Starre Koppelung (Kürzel: SS).
- *Gelenkig*: Einseitig gelenkige Koppelung mit Kugelgelenk am abhängigen Knoten (Kürzel: GS).
- $u_x, \dots, \varphi_z$ : Abhängiger Freiheitsgrad der benutzerdefinierten Bedingungsgleichung. Die Faktoren für die Verschiebungen und Verdrehung der Bedingungsgleichung sind festzulegen.

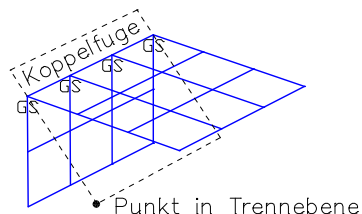
**Punkt-koppelung**

Nach Auswahl der abhängigen Knoten und des bezogenen Knotens ist die Koppelungsart festzulegen.

**Fugenkoppelung**

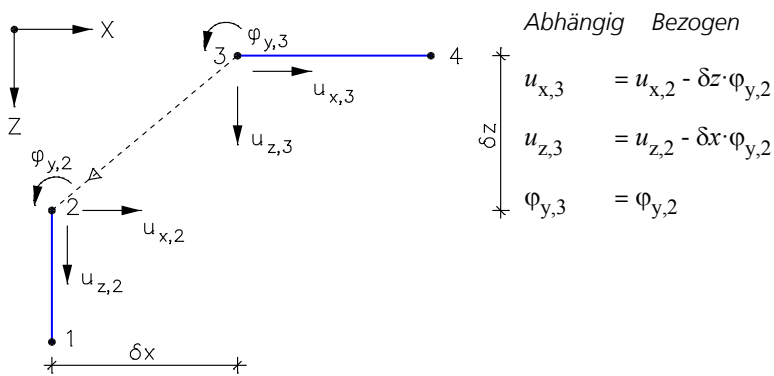
Diese Option trennt Flächenelemente entlang einer vorzugebenden gemeinsamen Elementkante auseinander und erzeugt Koppelungen zwischen den ursprünglichen (bezogenen) und den neu entstandenen (abhängigen) Knoten.

In der 3D-Darstellung ist neben der Fuge ein Punkt in der Trennebene anzugeben. Die Koppelungen werden dabei zwischen den Knoten der Elemente auf der einen und denen auf der anderen Seite der Trennebene erzeugt.



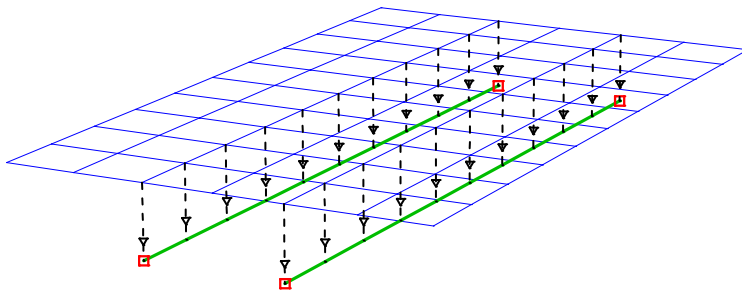
## Beispiele

### Bedingungsgleichungen für eine starre Koppelung in der xz-Ebene

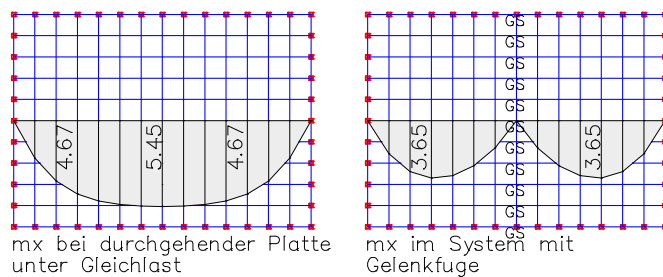
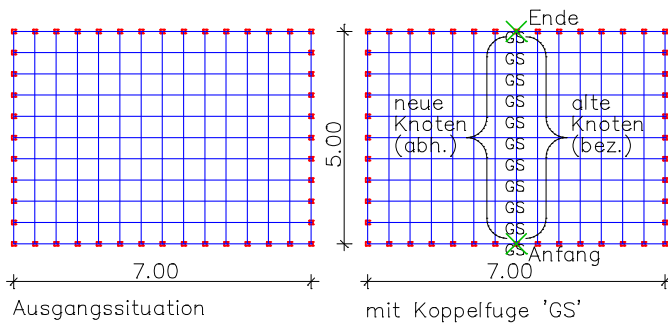


### Exzentrisch angeschlossene Träger

Auch zur Erfassung der Exzentrizitäten von Trägern können Koppelbedingungen eingesetzt werden. Die folgende Abbildung zeigt die Verbindung von Schalenelementen mit räumlichen Stäben als eine Möglichkeit der Modellierung eines zweistufigen Plattenbalkens.



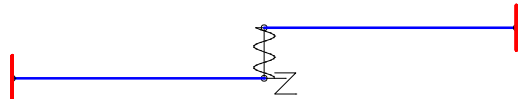
### Fugenkoppelung



Modellierung einer Gelenkfuge in einer Deckenplatte mit Hilfe von Koppelbedingungen

## Federelemente

Dieses Element beschreibt eine Feder zwischen zwei Knoten. Seine x-Richtung zeigt vom ersten zum zweiten Knoten. Die z-Richtung wird vom Benutzer definiert. Befinden sich die beiden Knoten am gleichen Ort, muss auch die x-Richtung festgelegt werden. In dem sich damit ergebenden kartesischen Koordinatensystem sind die sechs Komponenten der Feder definiert. Für jede der Komponenten kann eine lineare oder nichtlineare Federkennlinie festgelegt werden. Anders als bei Stäben geht der Abstand der Knoten nicht in die Steifigkeit der Federn ein. Federelemente können sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Berechnungen (direkten Zeitschrittintegration) verwendet werden. Die bei der dynamischen Analyse ggf. auftretende Hysterese wird z.Z. nicht berücksichtigt. Bei nichtlinearen Federkennlinien ist auf eine realistische Lastzusammenstellung (siehe *Lastgruppe*) zu achten, da eine nachfolgende Lastfallsuperposition hierfür nicht zulässig ist. Für die direkte Zeitschrittintegration kann eine viskose Dämpfung in lokaler x-Richtung der Feder definiert werden.



Tragwerk mit Federelement

**Federelement**

Nummer: 1    Bezeichnung: Beispielfeder

Kennlinien:

Komp.	Bezeichnung	Linear	Steifigkeit
ux	Kontakt	Nein	100
uy		Ja	0
uz		Ja	0
phi.x		Ja	0
phi.y		Ja	0
phi.z		Ja	0

Geometrie

	x	y	z
Knoten 51	-0,3	1	0
Knoten 77	3,5	2,5	0
x-Richtung	0,930155	0,367167	0

Viskose Dämpfung (ux): 0 [kNs/m]

**Federkennlinie**

Werte:

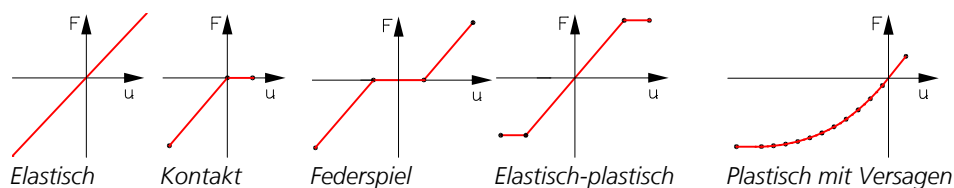
	ux [m]	Fx [MN]
1	-0,1	-6
2	-0,05	-1
3	0	0
4	0,05	0
*		

Bezeichnung: Kontakt

OK    Abbrechen

Eine nichtlineare Federkennlinie kann aus horizontalen und ansteigenden Abschnitten bestehen. Ergibt sich eine Verformung ausserhalb der Definitionsgrenzen der Kennlinie, wird für diese Komponente von einem Versagen der Feder ausgegangen und daher mit einer Reaktion von 0 gerechnet. Zur Verwendung in anderen Tragwerken können die Kennlinien eines Federelementes in der Datenbank *Igraph.dat* abgespeichert werden.

Nachfolgend sind einige mögliche Kraft-Verschiebungs-Kurven aufgezeigt:



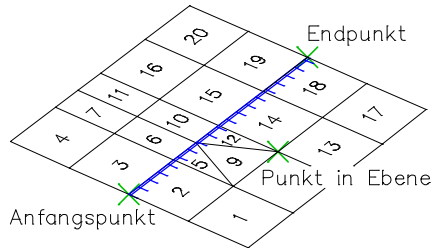
## Liniengelenke

Mit der Funktion *Liniengelenke* lassen sich Momentengelenke an Flächenelementen definieren. Das Liniengelenk ist geometrisch durch seinen Anfangs- und Endpunkt sowie einen Punkt in der Ebene der betroffenen Elemente beschrieben. Während der FEM-Berechnung werden die einem Liniengelenk zugeordneten Elemente ermittelt und intern mit entsprechenden Mechanismen versehen.

Es werden nur Elemente zugeordnet, die sich innerhalb der markierten Elementebene befinden und deren Knoten auf dem Liniengelenk liegen.

Schneidet ein Liniengelenk ein Element, wird dieses nicht berücksichtigt.

Die durch ein Liniengelenk betroffenen Elemente werden im Protokoll *Finite Elemente* zusammen mit der Elementliste aufgeführt.

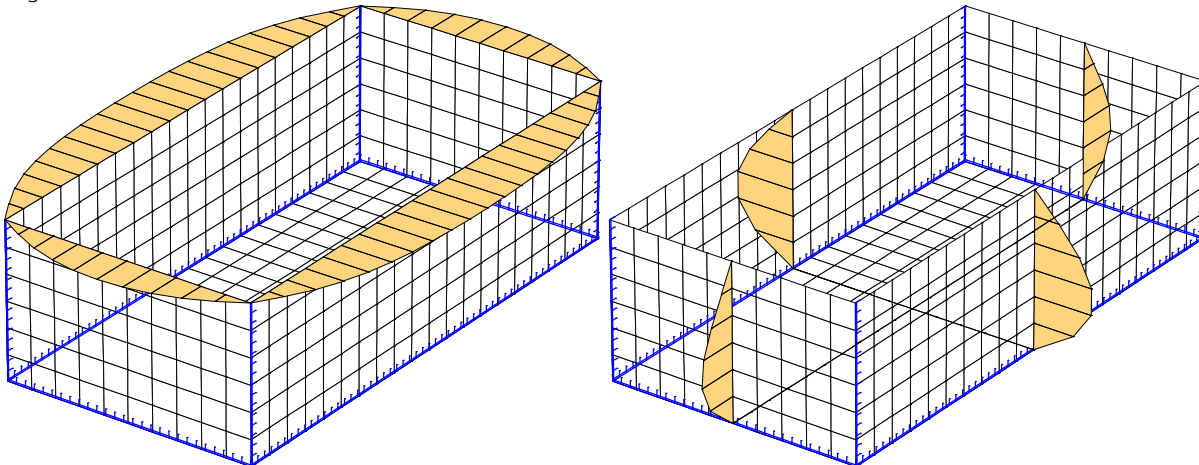


### Liniengelenke

```
Nr. 1
Anfangspunkt: 0,000 / -1,000 / 0,000 [m]
Endpunkt:    2,000 / -1,000 / 0,000 [m]
Punkt in Ebene: 1,000 / -0,500 / 0,000 [m]
Betroffene Elemente mit Mechanismen
2 5 9 12 14 18
```

Das Orientierungssymbol des Liniengelenks zeigt in Richtung der gelenkig angeschlossenen Elemente.

Das nachfolgende Beispiel zeigt einen elastisch gebetteten Behälter unter Flüssigkeitsdruck, dessen Kanten alle gelenkig angeschlossen sind.

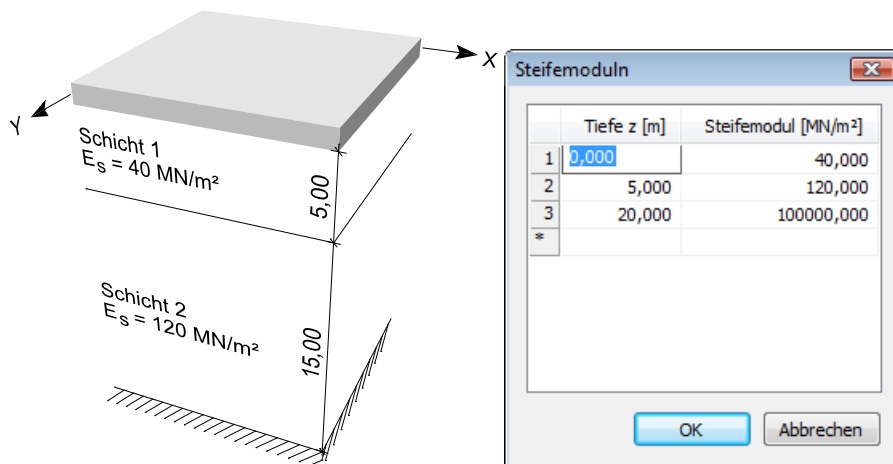


Schnittgrößen  $m_x$  und  $m_y$  infolge Flüssigkeitsdruck



## Steifemodul

Für das Modell des geschichteten elastischen Halbraums (Steifemodulverfahren) sind die Schichtdicken sowie deren Steifemodul erforderlich. Die Tiefe  $z$  der Bodenschichten zählt ab der Gründungssohle (Bodenplatte) des Bauwerkes. Die erste Bodenschicht beginnt somit bei  $z = 0$ , die letzte Schicht erstreckt sich bis  $z = \infty$ . Die Grenztiefe des Halbraums kann in der letzten Bodenschicht mit einem sehr hohen Steifemodul definiert werden. Die Eingabe kann über die Berechnungseinstellungen oder im Ordner *Strukturbeschreibung* der Datenbasis erfolgen.



Beispiel für die Schichtung des Halbraums unter einer Bodenplatte

Voraussetzungen für die Berechnung nach dem Steifemodulverfahren:

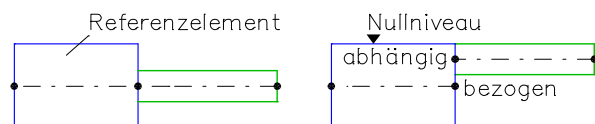
- Eine Berechnung ist nur für Flächen- und Volumenelemente möglich.
- Alle gebetteten Flächen müssen die gleiche globale z-Komponente aufweisen.
- Den betreffenden Elementen muss ein Material mit einem Bettungsmodul in z-Richtung zugeordnet sein. Er wird als Startwert für die Berechnung benötigt.

## Elemente ausrichten

Mit dieser Funktion werden markierte Elemente auf ein Referenzelement ausgerichtet. Die lokalen z-Achsen der Elemente müssen in die gleiche Richtung zeigen. Die Ausrichtung erfolgt durch eine Verschiebung in lokaler z-Richtung, so dass die Nullniveaus dem des Referenzelementes entsprechen. In der Standardeinstellung liegt das Nullniveau für Stäbe bei  $z = 0$  im Querschnittspolygon und für Flächenelemente an deren Oberseite. Darüber hinaus kann es folgendermaßen festgelegt werden:

- Stäbe:  $z=0$ , Flächenelemente: Oben (Standard)
- Stäbe:  $z=0$ , Flächenelemente: Unten
- Oberseite
- Unterseite

Zusätzlich werden zwischen den alten und den neuen Knoten starre Koppelungen erzeugt. Der obere Knoten der Koppelung wird abhängiger Knoten, sofern an diesem keine Festhaltung definiert ist. Bereits vorhandene Koppelungen bleiben erhalten.

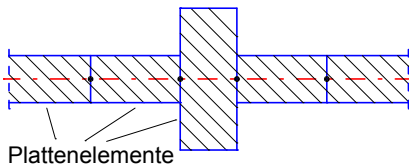


Elemente vor und nach dem Ausrichten (Standardfall)

## Modelle für den Unterzug

Unterzüge können durch unterschiedliche Modelle nachgebildet werden. Um deren Auswirkungen auf eine Plattenberechnung zu verdeutlichen, werden nachfolgend einige dieser Modelle vorgestellt.

1. Modellierung des Unterzuges durch stärkere Plattenelemente:



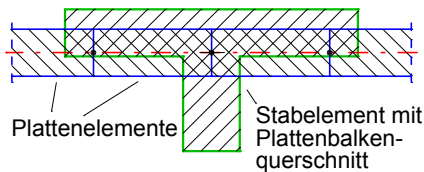
Vorteile

- einfaches Modell
- automatische Bemessung

Nachteile

- Exzentrizität wird nicht berücksichtigt

2. Modellierung des Unterzuges durch einen Stabzug mit Plattenbalkenquerschnitt:



Vorteile

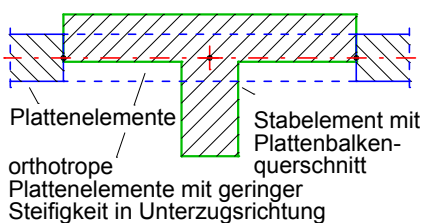
- leichte Eingabe
- automatische Bemessung

Nachteile

- Steifigkeit der Platte im Bereich der mitwirkenden Breite doppelt

Die resultierenden Schnittgrößen verteilen sich entsprechend dem Verhältnis der Steifigkeiten in Platte und Unterzug. Demzufolge wird bei der automatischen Bemessung Bewehrung sowohl für den Unterzug als auch für die Platte ermittelt. Bei großen Steifigkeitsunterschieden zwischen Plattenbalken und Platte ist der Fehler unbedeutend.

3. Modellierung des Unterzuges durch einen Stabzug mit Plattenbalkenquerschnitt und orthotropen Plattenelementen im Bereich der mitwirkenden Breite:



Vorteile

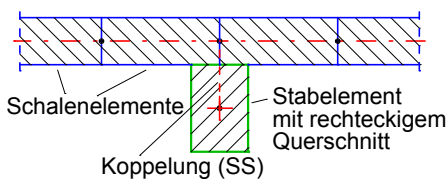
- exakte Verteilung der Steifigkeiten und resultierenden Schnittgrößen
- automatische Bemessung

Nachteile

- aufwendigere Modellierung

Durch Reduzierung der Plattensteifigkeit in Unterzugsrichtung (Orthotropie) lagern sich die Schnittgrößen und damit die Bewehrung entsprechend um. Das Tragverhalten der Platte in Querrichtung bleibt unberührt.

4. Modellierung des Unterzuges mit Schalenelementen und gekoppelten Stäben:



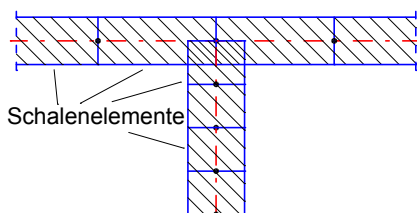
Vorteile

- mitwirkende Breite ergibt sich automatisch
- korrektes statisches Modell im Rahmen der FEM-Analyse

Nachteile

- Bemessung des Plattenbalkenquerschnitts ist nur mit Hilfe eines Bemessungsobjekts möglich
- Schalen- und Koppelemente erforderlich

5. Modellierung des Unterzuges mit Schalenelementen:



Vorteile

- mitwirkende Breite ergibt sich automatisch
- korrektes statisches Modell im Rahmen der FEM-Analyse

Nachteile

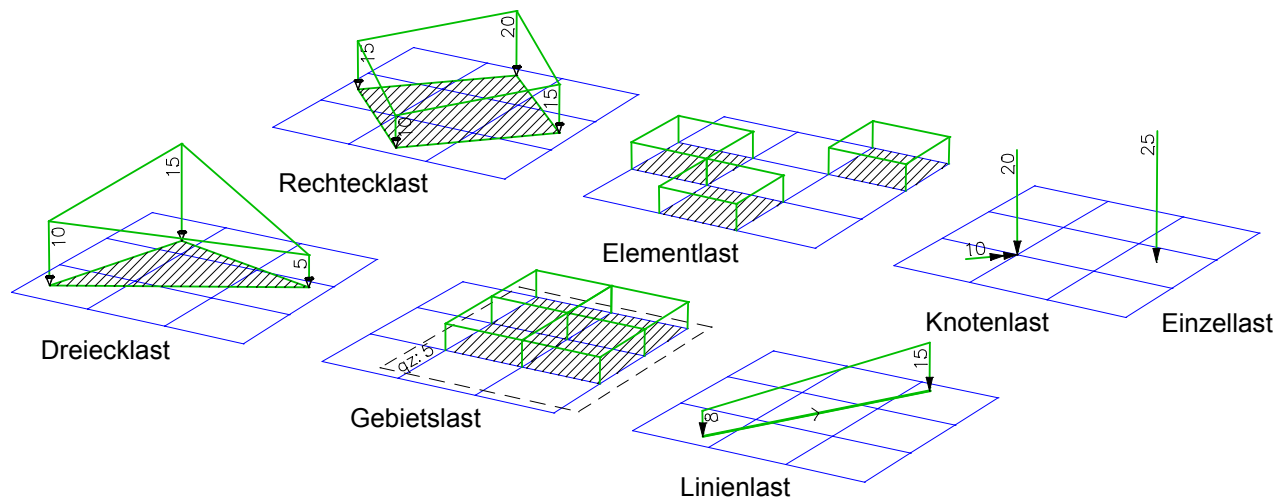
- Bemessung des Plattenbalkenquerschnitts ist nur mit Hilfe eines Bemessungsobjekts möglich
- Schalenelemente erforderlich

## Belastung

Das folgende Kapitel beschreibt die Lasteingabe sowie die verschiedenen Lastarten.










Die eingegebenen Lasten werden durch Symbole dargestellt. Im 3D-Modus werden Einzel-, Linien- und Flächenlasten nach ihren Lastordinaten skaliert. Bei Einzellasten wird die resultierende Belastungsrichtung gezeichnet. Linienlasten und Linienmomente erhalten zur Orientierung einen Pfeil.

Stablasten wirken generell auf die Schwereachse der Stäbe. Bei unsymmetrischen Querschnitten wird der Einfluss der Exzentrizität des Schubmittelpunkts auf die Festeinspannreaktionen nicht berücksichtigt.



Lastarten von Flächenelementen

Ein Lastfall besteht aus einer oder mehreren Lasten. Mit den folgenden Optionen können Lastfälle definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

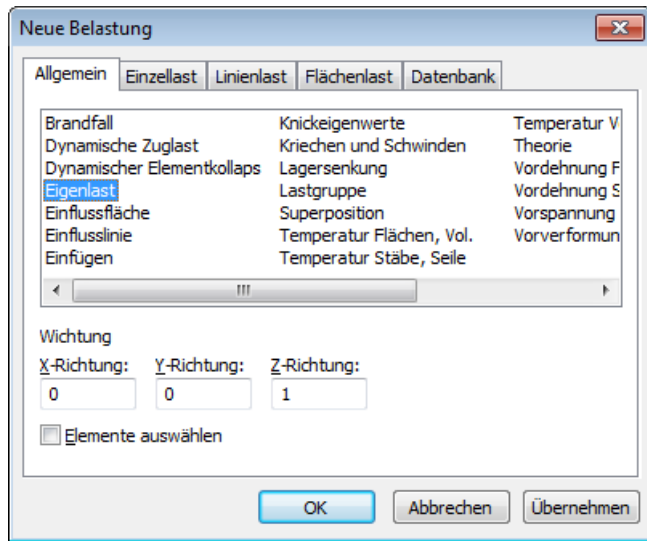
-  Erstellt eine Kopie des aktuellen Lastfalls.
-  Generiert Lastfälle nach den Vorschriften der Funktion *Generieren*. Dabei werden entweder alle oder nur die markierten Lasten vervielfältigt.
-  Importiert Lastdaten, statische Ersatzlasten einer Erdbebenberechnung nach dem Antwortspektrumverfahren oder Auflagerreaktionen (nur Kräfte als Knotenlast oder Einzellast auf Flächenelemente).
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Belastungsdarstellung.
-  Erstellt einen neuen Lastfall.
-  Zeigt einen bestehenden Lastfall.
-  **Nr.** Ändert die Nummer und die Bezeichnung des aktuellen Lastfalls.
-  Startet die Belastungseingabe.

Im Datenbaum können Lastfälle gruppenweise umnummeriert werden.

Mit der Kontextfunktion *Belastung skalieren* können die Ordinatenwerte von mehreren markierten Lasten mit einem Faktor skaliert werden.

## Eingabe

Dieser Dialog dient zur Eingabe von Belastungen innerhalb eines Lastfalls.



Die Lastarten werden auf den nachfolgenden Seiten erläutert. Zur eindeutigen Identifizierung sind sie mit Lastkürzeln versehen.

## Allgemein

### Eigenlast

Das gesamte Tragwerk wird mit seiner Eigenlast beansprucht (Lastkürzel: *EG*).

#### Eingabe

*Wichtung X, Y, Z-Richtung* Die Wichtungsfaktoren erlauben die Festlegung der Wirkungsrichtung sowie eine Skalierung der Eigenlast. Sie beziehen sich auf das globale Koordinatensystem.

### Eigenlast einer Elementauswahl

Ausgewählte Elemente werden mit ihrer Eigenlast beansprucht (Lastkürzel: *EGEL*).

#### Eingabe

*Wichtung X, Y, Z-Richtung* Die Wichtungsfaktoren erlauben die Festlegung der Wirkungsrichtung sowie eine Skalierung der Eigenlast. Sie beziehen sich auf das globale Koordinatensystem.

### Einflussfläche

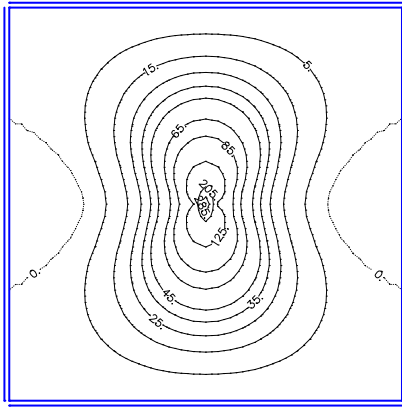
Mit dieser Lastart können Einflussflächen für Schnittgrößen von Flächenelementen ermittelt werden (Lastkürzel: *EFF*).

#### Eingabe

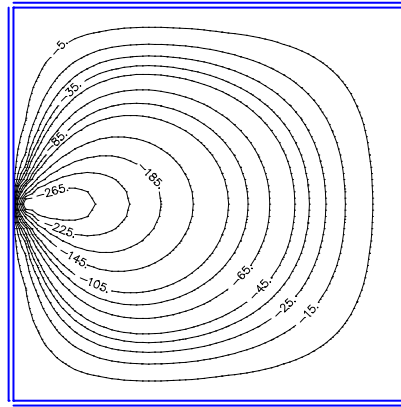
*Aufpunkt* Koordinate x, y, z [m].  
*Einflussfläche* "nx", "ny", "nxy", "mx", "my", "mxy"

Die Ordinaten der resultierenden Einflussfläche ergeben sich als Verformung in Richtung der auszuwertenden Last.

Beispiel: Quadratische Platte mit vier eingespannten Rändern



Einflussfläche "mx"  
Aufpunkt: Feldmitte



Einflussfläche "mx"  
Aufpunkt: Mitte des linken Randes

## Einflusslinie

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *SEFL*) können Einflusslinien für Schnittgrößen von Stäben ermittelt werden.

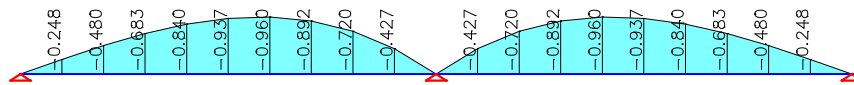
### Eingabe

Auswahl des gewünschten Stabes.

*Aufpunkt* Aufpunkt im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang.

*Einflusslinie* "Nx", "Qy", "Qz", "Mx", "My", "Mz".

Die Ordinaten der resultierenden Einflusslinie ergeben sich als Verformung in Richtung der auszuwertenden Last.



Einflusslinie "My" für einen Durchlaufträger

## Einfügen von Lastfalldaten

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *EINF*) können Lastdaten anderer Lastfälle in den aktuellen Lastfall gewichtet eingefügt werden. In eingefügten Lastfällen dürfen die Lastarten Superposition und Einfügen nicht enthalten sein.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der eingefügt wird.

*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der eingefügt wird.

*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Lastdaten multipliziert werden.

## Knickeigenwerte

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *PKI*) werden die Knickeigenwerte, Knickeigenformen sowie die Knicklängen für den betreffenden Lastfall ermittelt. Sie kann nicht in Verbindung mit dem iterativen Gleichungslöser verwendet werden.

### Eingabe

*Anzahl* Anzahl der gewünschten Knickeigenwerte bzw. Knickeigenformen (maximal 9).

## Kriechen und Schwinden

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *KS*) wird der Lastfall Kriechen und Schwinden berechnet. Dabei werden die in den Materialeigenschaften definierten Kriech- und Schwindwerte berücksichtigt.

### Dauerlastfall

Lastfall der kriecherzeugenden Dauerlast. In diesem werden die Lastfälle der Eigenlasten, Ausbaulasten und Vorspannung mit Hilfe der Lastart *Superposition* zusammengefasst. Da die Lastfälle in aufsteigender Reihenfolge berechnet werden und die Schnittgrößen des Dauerlastfalls für *KS* benötigt werden, sollte die Lastfallnummer des Dauerlastfalls kleiner sein als die Nummer des aktuellen Kriech- und Schwindlastfalls.

Optional kann für Spannglieder im Verbund die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden.

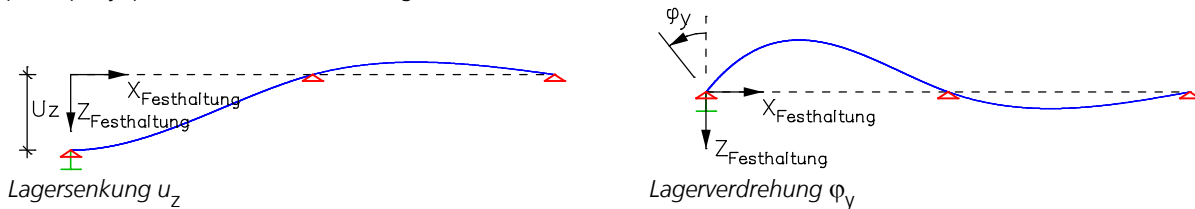
## Lagersenkung

Die Lagersenkung wirkt auf festgehaltene Knoten in Richtung der gebundenen Freiheitsgrade (Lastkürzel: *DS*).

### Eingabe

Auswahl der betroffenen Festhaltungen.

$u_x, u_y, u_z$  Verschiebungen [mm].  
 $\phi_i.x, \phi_i.y, \phi_i.z$  Verdrehungen [rad/1000].



## Superposition von Lastfällen

Durch Superposition (Lastkürzel: *SUP*) werden die vorhandenen Ergebnisse anderer Lastfälle addiert und gewichtet. Andere Lastarten sind in dem betreffenden Lastfall nicht zugelassen. Da die Lastfälle in aufsteigender Reihenfolge berechnet werden, sollte die Lastfallnummer der zu superponierenden Lastfälle kleiner sein als die Nummer des aktuellen Lastfalls.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der superponiert wird.  
*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der superponiert wird.  
*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Ergebnisse multipliziert werden.

## Theorie

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *TH*) wird die Berechnungstheorie für den betreffenden Lastfall festgelegt.

### Eingabe

*Theorie 2. Ordnung* Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung.  
*Anzahl Iterationen* Maximale Anzahl der Iterationen ohne Einhaltung der Fehlerschranke. Bei der Anzahl „1“ erfolgt der Abbruch programmgesteuert.  
*Fehler* Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%].  
 Es sind nur Werte  $\leq 1\%$  zulässig.  
*Ausfall Zugbettung* Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.  
*Ausfall Zuglager* Ausschluss von Zugkräften in den Festhaltungen.  
 Bei Anwendung dieser Lastart sind die Hinweise im Abschnitt *Lastgruppe* sinngemäß zu beachten.

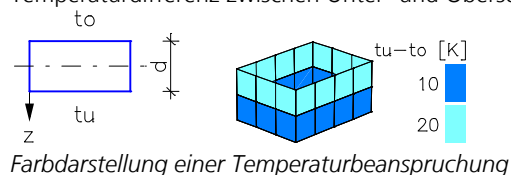
## Temperatur auf Flächen- und Volumenelemente

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente (Lastkürzel: *TMPF*).

*tm* Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

*tu - to* Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts (nur für Flächenelemente) [K].



## Temperatur auf Stäbe und Seile

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe und Seile (Lastkürzel: *TMPs*).

*tm* Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

*tu - to* Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts [K].

*tr - tl* Temperaturdifferenz zwischen rechter und linker Seite des Querschnitts [K].

Für die Berechnung gelten folgende Zusammenhänge:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot t_m$$

$$\kappa_{T,y} = \alpha_T \cdot (t_u - t_o)/dz$$

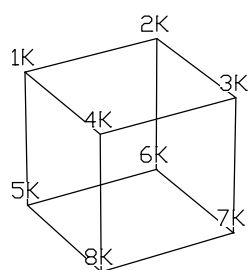
$$\kappa_{T,z} = \alpha_T \cdot (t_r - t_l)/dy$$

Bei der Querschnittsart *Stab* ist diese Lastart unzulässig, da die Abmessungen  $d_y$  und  $d_z$  undefiniert sind. Alternativ kann die Lastart *Vordehnung* verwendet werden.

## Freie Temperatur auf Volumenelemente

Diese Lastart (Lastkürzel: *TMPV*) beschreibt ein achteckiges räumliches Temperaturfeld mit einem linearen Temperaturverlauf entlang seiner Ränder. Die Temperatur der Elemente wird im Verlauf der FEM-Berechnung zwischen den Eckwerten des Temperaturfelds interpoliert. Das Volumenelement *VQ83* erhält dabei die Temperatur, die sich an seinem Schwerpunkt ergibt. Das Volumenelement *VT10* (Tetraeder) erhält, wenn sich alle Elementknoten innerhalb des Temperaturfelds befinden, einen linear veränderlichen Temperaturverlauf zwischen seinen vier Eckknoten. Alle Temperaturen sind als Differenz gegen die Einbautemperatur in [K] definiert.

### Lastdaten Lastfall 1: Temperaturfeld



Temperatur Volumen (TMPV)					
LfdNr	Pkt.	t [K]	x [m]	y [m]	z [m]
1	1	1	0,000	0,000	0,000
	2	2	10,000	0,000	0,000
	3	3	10,000	10,000	0,000
	4	4	0,000	10,000	0,000
	5	5	0,000	0,000	10,000
	6	6	10,000	0,000	10,000
	7	7	10,000	10,000	10,000
	8	8	0,000	10,000	10,000

## Vordehnung

### Vordehnung Flächen- und Volumenelemente

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *VORD*) lassen sich Sonderfälle von Temperaturbeanspruchungen auf Flächen- und Volumenelemente behandeln. Die Definition erfolgt über allgemeine auf den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  bezogene Dehnungs- und Krümmungsparameter.

#### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente.

$Eps.x$ ,  $Eps.y$ ,  $Eps.xy$  Auf  $\alpha_T$  bezogene Dehnung bzw. Scherung [K].

$Kap.x$ ,  $Kap.y$ ,  $Kap.xy$  Auf  $\alpha_T$  bezogene Krümmung bzw. Drillung [K/m].

mit

$$Eps = \varepsilon_0 / \alpha_T$$

$$Kap = \kappa_0 / \alpha_T$$

In Plattentragwerken können nur Krümmungen, in Scheibentragwerken nur Dehnungen eingegeben werden.

#### Gleichmäßige Temperaturbelastung auf Flächenelemente:

$$Eps.x = Eps.y = t_m$$

$$Eps.xy = 0$$

mit

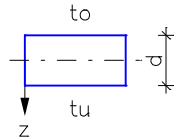
$$t_m = \text{Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur.}$$

#### Ungleichmäßige Temperaturbelastung auf Flächenelemente:

$$Kap.x = Kap.y = (t_u - t_o)/d$$

$$Kap.xy = 0$$

mit



$$t_u - t_o = \text{Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts.}$$

$$d = \text{Querschnittsdicke.}$$

#### Gleichmäßige Temperaturbelastung auf Volumenelemente:

$$Eps.x = Eps.y = Eps.z = t_m$$

$$Kap.x = Kap.y = Kap.z = 0$$

mit

$$t_m = \text{Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur.}$$

## Vordehnung Stäbe und Seile

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *VORD*) lassen sich Sonderfälle von Temperaturbeanspruchungen auf Stäbe und Seile behandeln. Die Definition erfolgt über allgemeine auf den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  bezogene Dehnungs- und Krümmungsparameter.

#### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe und Seile.

$Eps.x$  Auf  $\alpha_T$  bezogene Dehnung [K].

$Kap.x$ ,  $Kap.y$ ,  $Kap.z$  Auf  $\alpha_T$  bezogene Drillung bzw. Krümmung [K/m].

mit

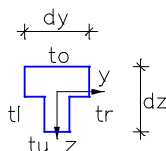
$$Eps = \varepsilon_0 / \alpha_T$$

$$Kap = \kappa_0 / \alpha_T$$



Für die Temperaturbeanspruchung sind die Parameter wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} Eps.x &= t_m \\ Kap.y &= (t_u - t_o)/dz \\ Kap.z &= (t_r - t_l)/dy \end{aligned}$$



mit

$t_m$	Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur,
$t_u - t_o$	Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts,
$t_r - t_l$	Temperaturdifferenz zwischen rechter und linker Seite des Querschnitts,
$dy, dz$	Querschnittsabmessungen.

## Vorspannung

Die Lastart Vorspannung (Lastkürzel: *VSPG*) aktiviert die eingegebenen Spannstränge innerhalb des betreffenden Lastfalls. Der Lastfall sollte keine weiteren Lastdaten enthalten, damit der Einfluss der Vorspannung eindeutig von den übrigen Beanspruchungen unterschieden werden kann.

## Dynamische Zuglast

Diese Lastart (Lastkürzel: *ZUG*) beschreibt eine Zugüberfahrt. Bei einer dynamischen Berechnung (Zeitschrittintegration) werden die über die Zeit veränderlichen Orte der Achslasten erfasst. Es können gleichzeitig mehrere Züge berücksichtigt werden, so dass z.B. die gegenseitige Beeinflussung entgegenkommender Züge untersucht werden kann. Die Achslasten der Züge wirken immer in globaler z-Richtung.

### Eingabe

<i>Fahrweg</i>	Der Fahrweg eines Zuges wird durch ein Polygon auf dem Tragwerk beschrieben. Dieser muss innerhalb der Querschnittsabmessungen der Elemente liegen. Dabei werden Flächen- und Volumenelemente sowie Stäbe mit Polygonquerschnitten berücksichtigt.
<i>Bezeichnung</i>	Frei wählbar.
<i>Nr.</i>	Frei wählbar.
<i>Zug</i>	Die Last eines Zuges wird durch Achslasten [kN] und zugehörige Abstände [m] vom Zuanfang definiert: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>ICE 1, ICE 2, ...</i>: Standardzüge mit festgelegten Achslasten und Abständen.</li> <li>• <i>Benutzerdefiniert</i>: Frei definierbarer Zug.</li> </ul>
<i>v</i>	Geschwindigkeit des Zuges [km/h].
<i>Startzeit</i>	Zeit bis zur Abfahrt des Zuges auf dem Fahrweg [s]. Hiermit kann ein zeitlicher Versatz mehrerer Züge gesteuert werden.

## Dynamischer Elementkollaps

Diese Lastart (Lastkürzel: *KOLL*) beschreibt den Ausfall von Elementen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Bei einer direkten Zeitschrittintegration werden ab dem Kollapszeitpunkt die effektiven Steifigkeiten der gewählten Elemente um den *Faktor für eff. Steifigkeit* reduziert. Das Elementeigengewicht wird in entsprechender Form vermindert. Es können für unterschiedliche Elemente verschiedene Kollapszeitpunkte berücksichtigt werden.

## Vorverformung

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *VV*) wird das Tragwerk vorverformt. Dazu ist die Nummer der Vorverformung einzugeben. Diese Lastart steht nur bei reinen Stabwerken zur Verfügung. Sie sollte nur in Verbindung mit Stab- oder Knotenlasten verwendet werden.

## Brandfall

Diese Lastart (Lastkürzel: *FIRE*) gibt an, dass der Lastfall unter Berücksichtigung des gewählten Brandfalls berechnet werden soll. Sie wird nur bei einer nichtlinearen Systemanalyse (Brandfall) berücksichtigt.

## Thermische Einwirkung

Diese Lastart (Lastkürzel: *TRMO*) gibt an, dass ein Volumentragwerk unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung infolge einer thermische Einwirkung berechnet werden soll. Wurde eine instationäre thermische Einwirkung ausgewählt, ist zusätzlich der gewünschte Zeitschritt zu wählen. Die thermischen Dehnungen ergeben sich mit Hilfe der Aufstelltemperatur und dem Temperatureausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  aus den Materialeigenschaften.

## Lastgruppe

Diese Lastart (Lastkürzel: *GRL*) eignet sich insbesondere zum Aufbereiten von Lastfällen für eine nichtlineare Berechnung. Hiermit können Belastungen aus bestehenden Lastfällen mit den erforderlichen Lastfaktoren zusammengestellt und die gewünschte Berechnungstheorie aktiviert werden.

Mit der Lastgruppe werden die bestehenden Lastarten *Einfügen*, *Theorie*, *Vorverformung* und *Knickeigenwerte* innerhalb einer Lastart zusammengefasst.

### Allgemein

<i>Berechnungstheorie</i>	<i>Theorie 1./2. Ordnung</i> : Berechnung nach geometrischer Theorie 1./2. Ordnung. <i>Knickeigenwerte</i> : Berechnung von Knickeigenwerten und Knickeigenformen.
<i>Fehlerschranke</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1\%$ zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.
<i>Ausfall Zuglager</i>	Ausschluss von Zugkräften in den Festhaltungen.
<i>Zus. globaler Lastfaktor</i>	Zusätzlicher Faktor für alle Lasten.
<i>Anzahl Eigenwerte</i>	Anzahl der gewünschten Knickeigenwerte bzw. Knickeigenformen (maximal 9).
<i>Vorverformung</i>	Nummer der Vorverformung.
<i>Lastfälle</i>	Lastfälle markieren, um sie der Auswahlliste hinzuzufügen.
<i>Lastfaktor</i>	Die einzelnen Lastfälle werden mit einem Faktor gewichtet.
<i>Übernehmen</i>	Der Wichtungsfaktor markierter Lastfälle wird geändert.

### Betonkriechen

Für die nichtlinearen Systemanalyse ist eine lastfallbezogene Definition der Kriechbeiwerte für die Betonquerschnitte möglich. Eine Beschreibung der zugrundeliegenden Berechnungsmethode kann den Grundlagen zur geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnung entnommen werden.

#### *Betonkriechen bei der nichtlinearen Systemanalyse berücksichtigen*

Aktiviert das Betonkriechen für die in der Tabelle aufgeführten Querschnitte. Bei erstmaliger Aktivierung werden vorhandene Querschnitte automatisch in die Tabelle eingefügt. Bereits definierte Kriechbeiwerte werden hierbei übernommen.

<i>Aktualisieren</i>	Berechnet die Kriechbeiwerte in allen dafür aktivierten Zeilen.
<i>Alle Qu. gleich</i>	Übernimmt die Eingabewerte der 1. Tabellenzeile für die weiteren Querschnitte.
<i>phi</i>	Kriechbeiwert.
<i>Berechnet</i>	<i>Ja</i> : Der Kriechbeiwert wird aus den weiteren Parametern ermittelt.
<i>t0, t</i>	Belastungsbeginn und Betonalter.
<i>Faktor</i>	Optionaler Faktor für den berechneten Kriechbeiwert. Dieser dient z.B. zur Ermittlung von $\phi_{ef}$ gemäß EN 1992-1-1:2004 aus dem berechneten Beiwert.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die folgenden Hinweise zu beachten.

### Berechnung nach Theorie 2. Ordnung

Vor einer Berechnung nach Theorie 2. Ordnung ist sicherzustellen, dass das System nach Theorie 1. Ordnung kinematisch stabil ist. Ein Stabilitätsversagen aufgrund Stabknickens oder Schalenbeulens wird im Berechnungslauf nach 2. Ordnung durch eine Singularität des Gleichungssystems oder einer Elementsteifigkeitsmatrix erkannt. Dieser Zustand wird dann mit

einem Abbruch der Berechnung unter Angabe des Ortes und des versagten Freiheitsgrades gemeldet. In Grenzfällen kann es notwendig sein, die Fehlerschranke auf „0“ zu setzen, um den Versagenszustand feststellen zu können. Bei Verwendung des iterativen Gleichungslösers kann ein Versagen nicht unmittelbar festgestellt werden.

### **Fehlerschranke des Residuums**

Die Lösung aller nichtlinearen Problemstellungen erfolgt iterativ. Als Maß für die Steuerung der Iteration gilt die Länge des Fehlervektors, das Residuum. Es wird für jeden Iterationsschritt in der Ausgabeleiste angezeigt. Die Iteration wird beendet, wenn das verbleibende Residuum in Bezug auf das Anfangsresiduum die vorgegebene Fehlerschranke erreicht hat. Die Berechnungsergebnisse sind dann durchschnittlich mit einem relativen Fehler in gleicher Höhe behaftet. Falls die Fehlerschranke nicht erreicht werden kann, gibt das Rechenprogramm eine Meldung aus.

### **Ausfall von Zuglagern oder Zugbettung**

Bei unrealistischer Lastzusammenstellung (z.B. Fehlen der Eigenlast) kann es zum Ausfall aller Lager oder Ausfall aller Bettungen kommen (siehe auch "Baugrundmodelle"). Wenn dadurch das System verschieblich wird, erfolgt ein Abbruch der Berechnung wegen singulären Gleichungssystems mit Angabe des verschieblichen Freiheitsgrades, sofern nicht der iterative Gleichungslöser gewählt wurde.

### **Berechnung nach dem Steifemodulverfahren**

Bei Wahl des Steifemodulverfahrens erfolgt die iterative Berechnung der Setzungsmulde automatisch mit einer Fehlerschranke von 1%. Im Lastfall kann ein kleinerer Wert vorgegeben und zusätzlich der Ausfall der Zugbettung gewählt werden.

### **Berechnung von Seiltragwerken**

Wenn ein Tragwerk Seilelemente enthält, werden diese automatisch nach der Theorie großer Verformungen mit einer Fehlerschranke von 1% berechnet. Alle anderen Elemente werden nach der Theorie 1. Ordnung berechnet, wenn nicht im Lastfall explizit die Theorie 2. Ordnung gewählt wird. Die dafür eingegebene Fehlerschranke gilt dann auch für die Seilelemente. Wenn durch Ausfall eines Seils das System instabil wird, erfolgt aufgrund des singulären Gleichungssystems ein Programmabbruch, sofern nicht der iterative Gleichungslöser gewählt wurde.

### **Berücksichtigung von Zug- und Druckstäben**

Bei Tragwerken mit Zug- und Druckstäben erfolgt die iterative Ermittlung des Gleichgewichtszustands automatisch mit einer Fehlerschranke von 1%. Im Lastfall kann ein kleinerer Wert vorgegeben werden. Instabilitäten durch Ausfall von Stäben bewirken ein singuläres Gleichungssystem mit Abbruch der Berechnung, sofern nicht der iterative Gleichungslöser gewählt wurde.

### **Lastzusammenstellung**

Zur Zusammenstellung der maßgeblichen Einwirkungen für Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung, unter Ausschluss der Zugbettung oder unter Ausfall der Zuglager werden die betreffenden Lastfälle in die Auswahlliste übertragen und mit Lastfaktoren versehen.

Bei Berechnungen nach DIN 18800, Teil 2, oder EN 1993-1-1 sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- a) Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit linearem Materialgesetz nach der Elastizitätstheorie und anschließendem Nachweis Elastisch-Elastisch oder Elastisch-Plastisch. Die Schnittgrößen sind gemäß Norm mit den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungswerten der Einwirkungen zu ermitteln. Die Lastfälle der Auswahlliste sind dazu mit dem Faktor  $\gamma_F$  zu wichten. Zusätzlich ist  $\gamma_M$  als globaler Lastfaktor anzugeben.
- b) Durchführung eines Tragfähigkeitsnachweises nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit nichtlinearem Materialgesetz nach der Plastizitätstheorie. Hierbei wird  $\gamma_M$  gemäß Norm auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Die Schnittgrößenermittlung hat mit den Bemessungswerten der Einwirkungen zu erfolgen. Als Wichtungsfaktor ist also lediglich  $\gamma_F$  anzugeben.

### **Superpositionsverbot**

Berechnungen mit Seilelementen oder Zug- und Druckstäben, nach der Theorie 2. Ordnung, unter Ausschluss der Zugbettung oder unter Ausfall der Zuglager liefern ihre Ergebnisse nach nichtlinearer Iteration. Für diese gilt folglich nicht mehr das Superpositionsprinzip, d.h. sie dürfen nicht mit anderen Ergebnissen additiv überlagert werden. Eine Weiterverarbeitung in Lastfallkombinationen ist nur zulässig, wenn diese keine anderen als sich gegenseitig ausschließende (exklusive) Einwirkungen enthalten.

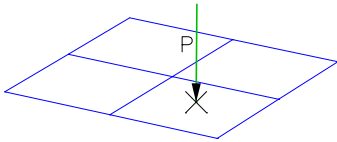
## Einzellasten

### Freie Einzellast

Die Last wird im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Bei Stäben und Flächenelementen muss die Last innerhalb des Querschnitts liegen, bei Volumenelementen ist sie innerhalb des Elements zulässig.

#### Eingabe

<i>Global orientiert</i>	Einzellast im Globalsystem (Lastkürzel: <i>PKO+PG</i> ).
<i>Lokal orientiert</i>	Einzellast im Elementsystem (Lastkürzel: <i>PKO+PL</i> ).
<i>Lastort</i>	Koordinaten $x, y, z$ [m].
$P_x, P_y, P_z$	Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN].

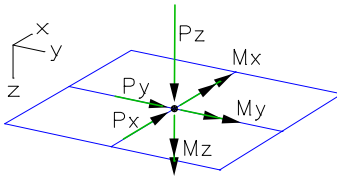


### Knotenlast

Knotenlasten wirken im Globalsystem (Lastkürzel: *KNL*).

#### Eingabe

Auswahl der belasteten Elementknoten.	
$P_x, P_y, P_z$	Kräfte [kN].
$M_x, M_y, M_z$	Momente [kNm].



### Einzellast auf Stäbe

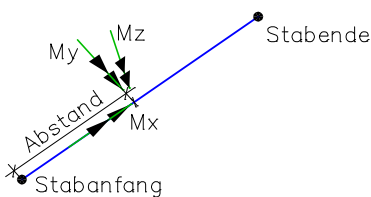
#### Eingabe

<i>Global orientiert</i>	Einzellast im Globalsystem (Lastkürzel: <i>SFG</i> ).
<i>Lokal orientiert</i>	Einzellast im Stabsystem (Lastkürzel: <i>SFL</i> ).
<i>Lastort</i>	Lastort im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang.
$P_x, P_y, P_z$	Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN].

### Einzelmoment auf Stäbe

#### Eingabe

<i>Lastort</i>	Lastort im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang (Lastkürzel: <i>SML</i> ).
$M_x, M_y, M_z$	Lastkomponenten im Stabsystem [kNm].



## Volleinspannkkräfte von Stäben

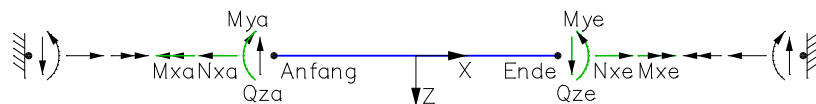
Die Volleinspannkkräfte an Stabanfang (Lastkürzel: *SOA*) bzw. Stabende (Lastkürzel: *SOE*) sind getrennt einzugeben.

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

$N_x, Q_y, Q_z$  Normal- und Querkraft [kN].

$M_x, M_y, M_z$  Momente [kNm].

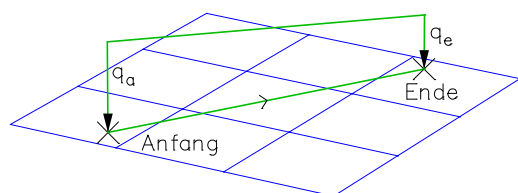


Volleinspannkkräfte am Stabanfang und -ende.

## Linienlasten

### Freie Linienlast - global

Die Last wird im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Bei Stäben muss die Last auf der Stabachse und bei Flächenelementen in der Elementebene liegen. Bei Volumenelementen ist sie auch innerhalb des Elements zulässig (Lastkürzel: *LKO+LG*).



### Eingabe

Anfangspunkt Koordinate  $x, y, z$  [m].

Endpunkt Koordinate  $x, y, z$  [m].

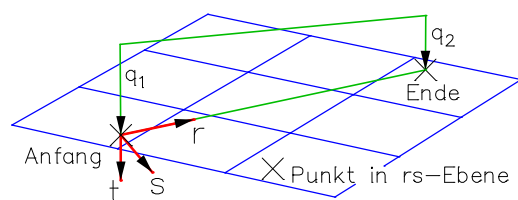
$q_{xa}, q_{xe}$  Lastordinaten in  $x$ -Richtung [kN/m].

$q_{ya}, q_{ye}$  Lastordinaten in  $y$ -Richtung [kN/m].

$q_{za}, q_{ze}$  Lastordinaten in  $z$ -Richtung [kN/m].

### Freie Linienlast - lokal

Die Last wird im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Bei Stäben muss die Last auf der Stabachse und bei Flächenelementen in der Elementebene liegen. Bei Volumenelementen ist sie auch innerhalb des Elements zulässig (Lastkürzel: *LKO+LL*).



### Eingabe

Anfangspunkt Koordinate  $x, y, z$  [m].

Endpunkt Koordinate  $x, y, z$  [m].

Punkt in  $rs$ -Ebene Koordinate  $x, y, z$  [m].

Lastrichtung  $r, s, t$  (siehe Abbildung).

$q_1$  Lastordinaten am Anfang in gewählter Richtung [kN/m].

$q_2$  Lastordinaten am Ende in gewählter Richtung [kN/m].

## Lokale Linienlast auf Flächen- und Volumenelemente in Elementrichtung

Diese Lastart (Lastkürzel: *LKO+LLA*) unterscheidet sich von der lokalen freien Linienlast dadurch dass sie in Richtung der Koordinatensysteme der betroffenen Elemente wirkt. Sie kann nicht graphisch eingegeben werden. Ihre Eingabewerte entsprechen der globalen freien Linienlast.

## Linienlast auf Stäbe und Seile

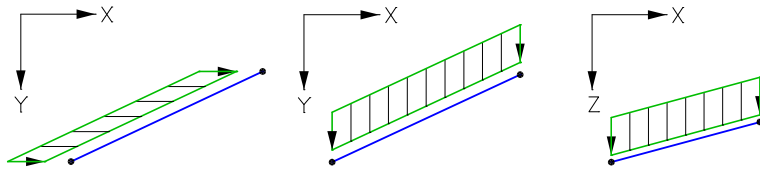
### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe und Seile.

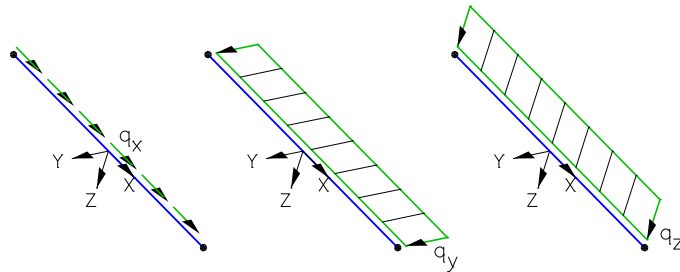
*Global orientiert* Linienlast im Globalsystem (Lastkürzel: *SLG*).

*Lokal orientiert* Linienlast im Stabsystem (Lastkürzel: *SLL*).

$q_x, q_y, q_z$  Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].



Globale Linienlast auf Stäbe oder Seile ( $q_x, q_y, q_z$ )



Lokale Linienlast auf Stäbe

## Trapezlast auf Stäbe

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

*Anfang* Lastanfang.

*Ende* Lastende.

*Global x, y, z* Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: *STA + GX, GY, GZ*).

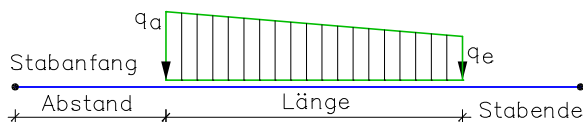
*Lokal x, y, z* Trapezlast im Stabsystem (Lastkürzel: *STA + LX, LY, LZ*).

*Projektiv x, y, z* Projektion der Trapezlast in globaler Richtung (Lastkürzel: *STA + PX, PY, PZ*).

*Startordinate* Lastordinate am Lastanfang in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

*Endordinate* Lastordinate am Lastende in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

Bei einer Trapezlast über mehrere Stäbe wird die Last automatisch geteilt. Die Abstände von den Stabanfängen, die Lastlängen und die interpolierten Lastordinaten werden für die gewählten Stäbe automatisch ermittelt. Dadurch kann ein ganzer Stabzug mit einer Eingabe trapezförmig belastet werden.



## Freies Linienmoment auf Stäbe und Flächenelemente

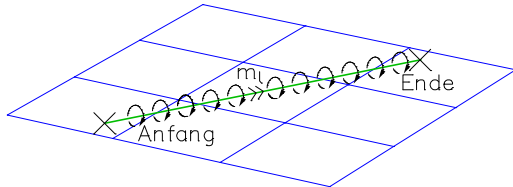
Die Last wird im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Der Drehsinn des Linienmoments (Lastkürzel: *LKO+LM*) wird durch den Anfangs- und Endpunkt festgelegt. Die Last muss exakt auf der Stabachse bzw. in der Elementebene liegen.

### Eingabe

*Startpunkt* Anfangskoordinate  $x_a, y_a, z_a$  [m].

*Endpunkt* Endkoordinate  $x_e, y_e, z_e$  [m].

*ml* Linienmoment [kNm/m].

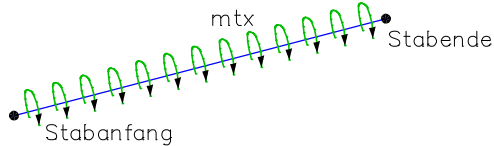


## Linientorsionsmoment auf Stäbe

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *SMT*).

*mtx* Linientorsionsmoment [kNm/m].



Linientorsionsmoment um die Stabachse

## Flächenlasten

### Flächenelement-Last

#### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente.

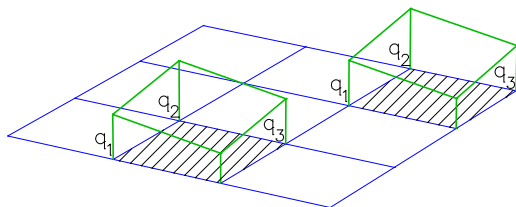
*Global orientiert* Flächenlast im Globalsystem (Lastkürzel: *FGX, FGY, FGZ*).

*Lokal orientiert* Flächenlast im Elementsystem (Lastkürzel: *FLX, FLY, FLZ*).

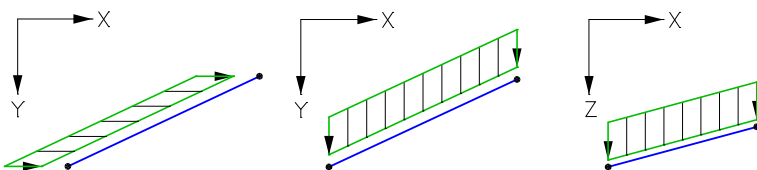
*Projektion orientiert* Projizierte Flächenlast (Lastkürzel: *FPX, FPY, FPZ*).

$x, y, z$  Wirkungsrichtung der Last des gewählten Koordinatensystems.

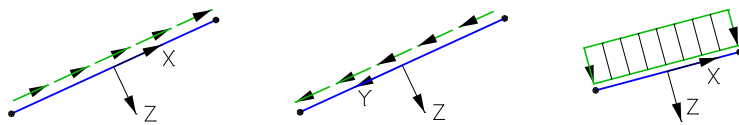
$q_1, q_2, q_3$  Lastordinaten an den ersten drei Elementknoten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m<sup>2</sup>].



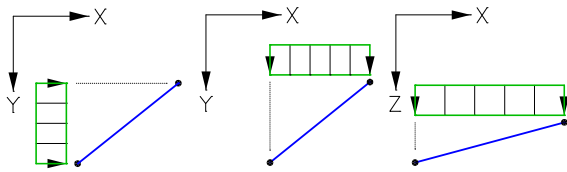
Globale Flächenlast in 3D-Darstellung



Flächenlast im Globalsystem ( $x, y, z$ )



Flächenlast im Elementsystem  $(x, y, z)$



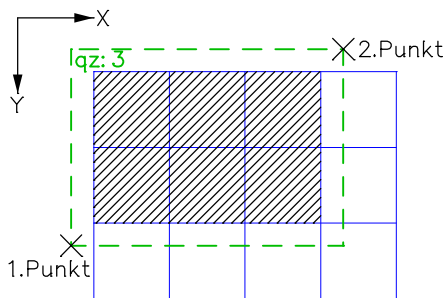
Projizierte Flächenlast  $(x, y, z)$

### Gebietslast auf Flächenelemente

Die Gebietslast (Lastkürzel: *GKO+GG*) wirkt in globaler Richtung auf Flächenelemente. Die Lastgeometrie wird über die Eckpunkte des umschließenden Fensters beschrieben. Das Gebiet muss parallel zur *xy*-Ebene sein. Alle vollständig innerhalb der Lastfläche liegenden Flächenelemente werden belastet.

#### Eingabe

- 1. Punkt            Koordinaten der ersten Ecke  $x, y, z$  [m].
- 2. Punkt            Koordinaten der zweiten Ecke  $x, y, z$  [m].
- $qx, qy, qz$         Globale Gleichlast [kN/m<sup>2</sup>].





## Freie Flächenlast - Rechteck

Diese Lastart kann als konstante oder veränderliche Last definiert werden. Die Lastfläche wird im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Die Zuordnung geschieht auf zwei unterschiedliche Arten:

- Bei der Lastrichtung *lokal t projiziert* wird auf die Elemente in Lastrichtung  $t$  projiziert. Daher ist die Last über den Elementen anzuordnen. Bei dieser Lastart werden nur Elemente belastet, die in Projektionsrichtung nicht durch darüberliegende Elemente verdeckt werden. Dies gilt auch für eine teilweise Überdeckung. Die Bezugsfläche ist stets die definierte Lastfläche.
- Die anderen Lastrichtungen wirken auf direkt betroffene Elemente. Daher darf bei Flächenelementen der Abstand der Last zur Elementebene nicht größer als die halbe Elementdicke sein. Die Lastfläche sollte parallel zur Elementebene verlaufen. Bei Volumenelementen ist die Last beliebig innerhalb des Elements zulässig.

### Eingabe

1. Eckpunkt 1. Koordinate  $x, y, z$  [m].  
 2. Eckpunkt 2. Koordinate  $x, y, z$  [m].  
 3. Punkt 3. Koordinate  $x, y, z$  [m].

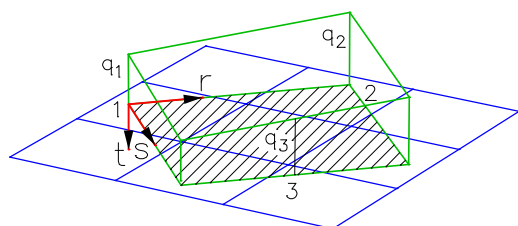
### Gleichlast

$q_x, q_y, q_z$  Globale Lastordinaten [kN/m<sup>2</sup>]  
 (Lastkürzel: GR1+GR2).

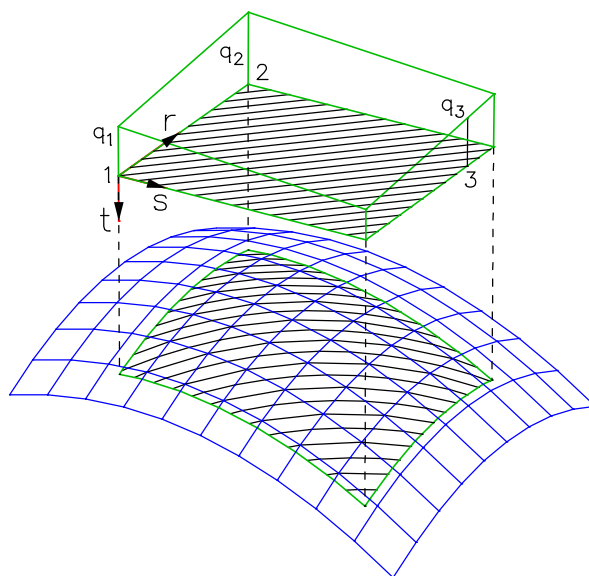
### Veränderlich

**Lastrichtung** Die Lastrichtung der Trapezlast ist global, projiziert oder lokal zur Lastaufstandsfläche ( $r, s, t$ ) und damit unabhängig vom Elementsystem.

$q_1, q_2, q_3$  Lastordinaten der drei Punkte [kN/m<sup>2</sup>]  
 (Lastkürzel: GR1+GRT).



Lastrichtung "lokal t"



Lastrichtung "lokal t projiziert"

## Freie Flächenlast - n-Eck

Diese Lastart kann als konstante oder veränderliche Last definiert werden. Die Lastfläche wird während der Eingabe in Dreiecke zerlegt und im Verlauf der FEM-Berechnung abschnittsweise Elementen zugeordnet. Die Zuordnung geschieht auf zwei unterschiedliche Arten:

- Bei der Lastrichtung *lokal t projiziert* wird auf die Elemente in Lastrichtung  $t$  projiziert. Daher ist die Last über den Elementen anzuordnen. Bei dieser Lastart werden nur Elemente belastet, die in Projektionsrichtung nicht durch darüberliegende Elemente verdeckt werden. Dies gilt auch für eine teilweise Überdeckung. Die Bezugsfläche ist stets die definierte Lastfläche.
- Die anderen Lastrichtungen wirken auf direkt betroffene Elemente. Daher darf bei Flächenelementen der Abstand der Last zur Elementebene nicht größer als die halbe Elementdicke sein. Die Lastfläche sollte parallel zur Elementebene verlaufen. Bei Volumenelementen ist die Last beliebig innerhalb des Elements zulässig.

### Eingabe

**Lastfläche** Eckpunkte der Lastfläche [m].

### Gleichlast

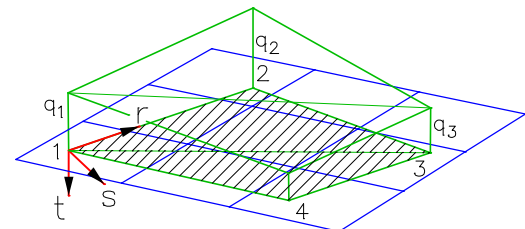
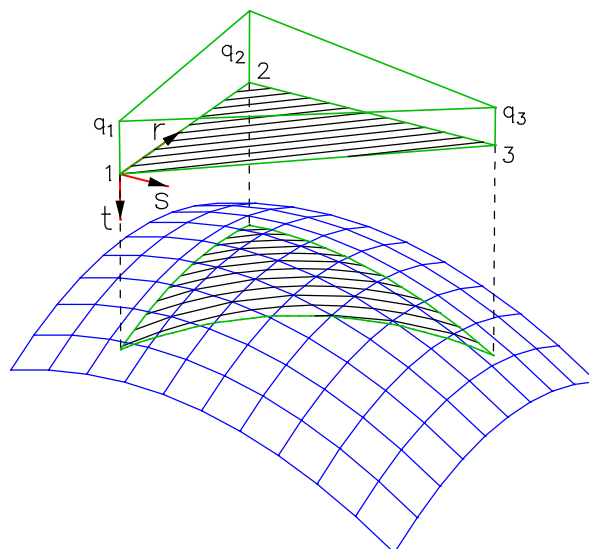
$q_x, q_y, q_z$  Globale Lastordinaten [kN/m<sup>2</sup>] (Lastkürzel: GD1+GD2).

### Veränderlich

**Lastrichtung** Die Lastrichtung der Trapezlast ist global, projiziert oder lokal zur Lastaufstandsfläche ( $r, s, t$ ) und damit unabhängig vom Elementsystem.

$q_1, q_2, q_3$  Lastordinaten der drei Punkte [kN/m<sup>2</sup>] (Lastkürzel: GD1+GDT).

- Anfang** Es wird mit der Eingabe eines neuen Gebietes mit anderen Lastordinaten begonnen. Die Eingabe des aktuellen Gebietes wird abgebrochen.
- Schließen** Das aktuelle Gebiet wird geschlossen. Der fortgesetzte Dialog ermöglicht die Eingabe weiterer Gebiete mit gleichartigen Lastordinaten innerhalb einer gemeinsamen Ebene.
- Zurück** Die letzte Punkteingabe wird zurückgenommen.



Lastrichtung "lokal t"

Lastrichtung "lokal t projiziert"

### Gleichlast auf Modellflächen

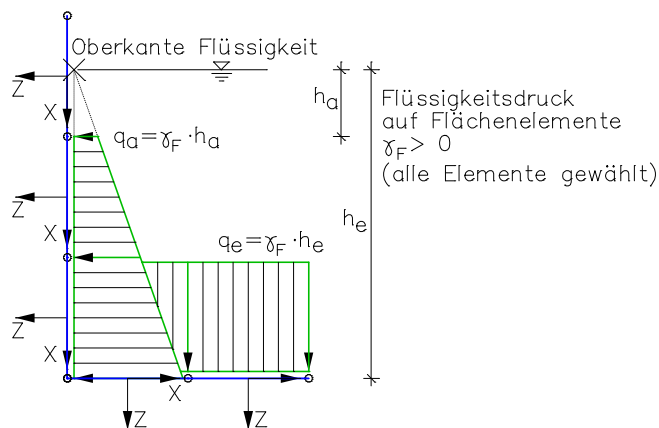
Nach der Auswahl von Modellflächen werden die Flächen in Dreiecke zerlegt und entsprechende Flächenlasten erzeugt. Die Lasten (Lastkürzel: *GD1+GDT*) sind unabhängig von den Modellflächen und den Elementen. Die Lastrichtung kann global, projektiv oder senkrecht zur Modellfläche (*lokal t*) sein.

### Flüssigkeitsdruck auf Flächenelemente

Der Flüssigkeitsdruck (Lastkürzel: *FD*) belastet alle gewählten Flächenelemente, die vollständig unterhalb des Flüssigkeitsspiegels liegen. Er wirkt in lokaler z-Richtung der Elemente.

#### Eingabe

- Oberkante Flüssigkeit* Z-Koordinate des Flüssigkeitsspiegels [m].
- Spezifisches Gewicht* Spezifisches Gewicht  $\gamma_F$  der Flüssigkeit [kN/m<sup>3</sup>].



## Flächenlast auf Stäbe

Diese Lastart dient dazu, eine Flächenlast auf ausgewählte Stäbe zu verteilen. Die Lastfläche kann eine beliebige polygonal berandete ebene Fläche sein. Ausgewählte Stäbe, die sich nicht in der Lastebene befinden, werden in diese Ebene projiziert, bevor die Stäblasten berechnet werden. Dabei werden nur die Stäbe belastet, die dann innerhalb der Lastfläche liegen. Die Ermittlung der Lastezugsflächen erfolgt unter Verwendung von Voronoi-Diagrammen.

Nach der Lasteingabe können nur noch die resultierenden Stäblasten bearbeitet werden.

### Eingabe

*Auswahl der belasteten Stäbe.*

*Lastfläche* Eckpunkte der Lastfläche eingeben [m].

*Lastorientierung* Die Last kann in Richtung des globalen Koordinatensystems bezogen auf die wirkliche Lastfläche (Global  $x,y,z$ ) oder die projizierte Lastfläche (Projektiv  $x,y,z$ ) wirken oder senkrecht zur Lastfläche.

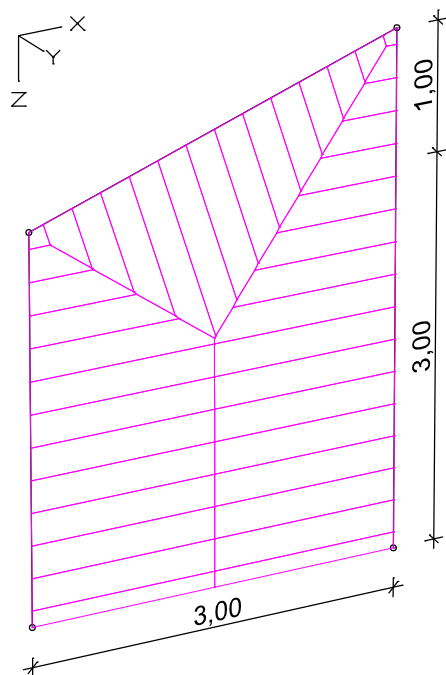
*Lastverteilung* Bei der variablen Lastverteilung wird die Last gemäß der Lastezugsfläche auf die einzelnen Stäbe verteilt. Alternativ kann die Last als konstante Linienlast auf alle Stäbe verteilt werden.

*Lastgröße* Die Flächenlast [ $\text{kN/m}^2$ ] kann konstant oder veränderlich sein. Bei der veränderlichen Flächenlast sind die Lastordinaten an den ersten drei Punkten der Lastfläche anzugeben.

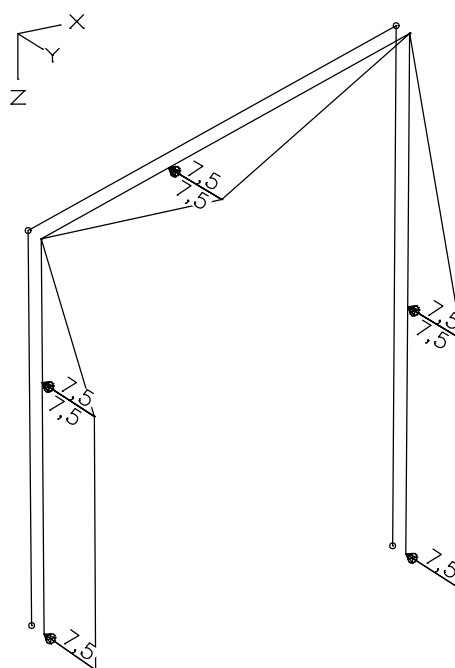
*Eigenschaften* Nachdem die Lasten auf den Stäben erzeugt wurden, ist es über diese Funktion möglich, die Eigenschaften der Flächenlast nochmals zu ändern. Zudem werden die Lastsummen der Flächenlast denen der Stäbe gegenübergestellt.

*Weiter* Weitere Lasten können eingegeben werden.

### Beispiel



*Lastfläche und Lastverteilung (Voronoi-Diagramm) bei  $5 \text{ kN/m}^2$  konstanter Flächenlast*



*Resultierende Stäblasten [ $\text{kN/m}$ ]*

## Datenbank

Die Dialogseite *Datenbank* erlaubt die Erzeugung und das Einfügen benutzerdefinierter Lastzusammenstellungen. Dazu können knoten- und elementunabhängige Einzel-, Linien- und Flächenlasten verwendet werden. Die Speicherung erfolgt in der Datei *Igraph.dat*.

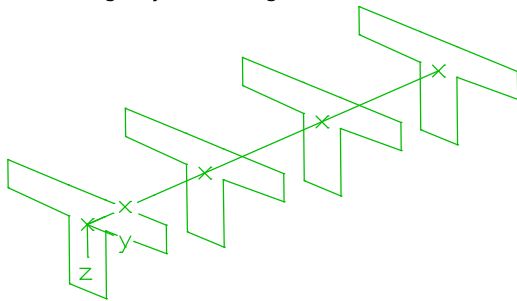
## Bemessungsobjekte

### Zweck

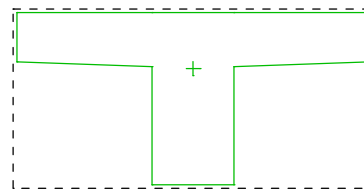
Im Massivbau werden Berechnungsmodelle verwendet, die aus einer Kombination von Stab- und Flächenelementen oder seltener, Volumenelementen aufgebaut sind. Diese Modelle erlauben z.B. die Abbildung von Bauzuständen und liefern ein detailliertes Bild der Beanspruchung des Tragwerkes. Sie können jedoch nicht direkt für Stahl- bzw. Spannbetonnachweise benutzt werden. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Nachweise in aller Regel querschnittsbezogen sind. Zum Beispiel müssten für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit mehrere Elemente bezüglich ihrer Geometrie und Spannungen zu einer Einheit zusammengefasst werden. Dies ermöglichen die sogenannten *Bemessungsobjekte* (ausgenommen Bemessungsprogramm für DIN 1045:1988).

### Definition

Ein Bemessungsobjekt ist ein lineares Element mit einem Anfangs- und Endpunkt. Die Verbindung zwischen Anfangs- und Endpunkt bildet die Elementachse und gleichzeitig die lokale x-Achse. Die lokale z-Achse stimmt normalerweise mit der globalen z-Achse überein, kann aber auch mit einem Drehwinkel anderweitig festgelegt werden. Längs der Elementachse können an beliebiger Stelle Querschnitte definiert werden. Die Querschnitte stehen senkrecht zur Achse. Am Ort eines jeden Querschnittes werden vom FE-Programm die Spannungen und Schnittgrößen der Elemente integriert, die in dem umschließenden Rechteck des Querschnitts liegen. Für die Orientierung der Schnittgrößen ist das Koordinatensystem des Bemessungsobjektes maßgebend.



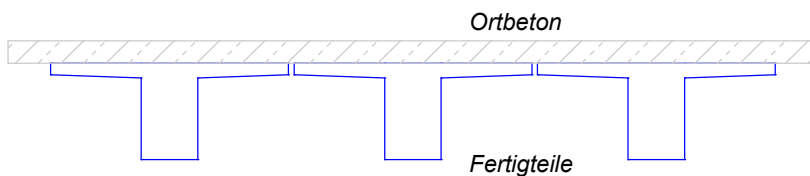
*Bemessungsobjekt*



*Umschließendes Rechteck*

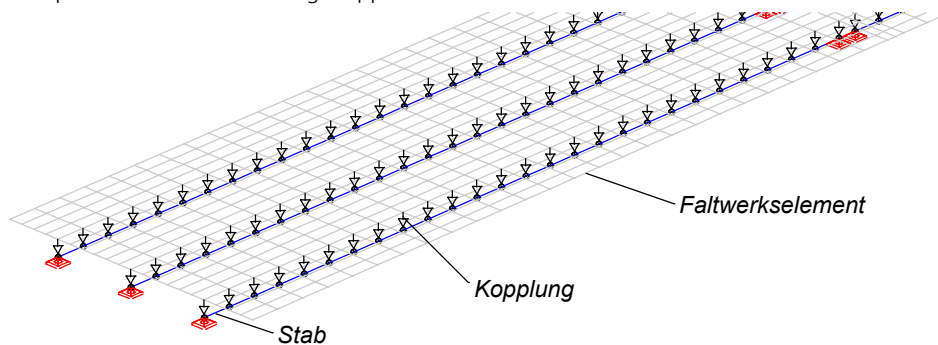
### Beispiel

Die folgende Abbildung zeigt den Querschnitt einer einfachen 2-feldrigen Brücke, aufgebaut mit Fertigteilen und nachträglich aufgebrachtener Ortbetonplatte.



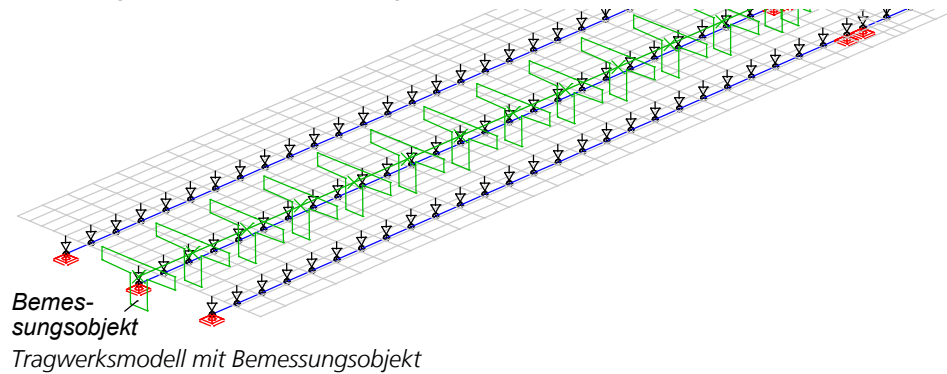
*Brückenquerschnitt*

Ein mögliches Tragwerksmodell zeigt die nächste Abbildung. Die Fertigteile werden durch Stabelemente und die Fahrbahnplatte durch exzentrisch gekoppelte Falterwerkelemente modelliert.

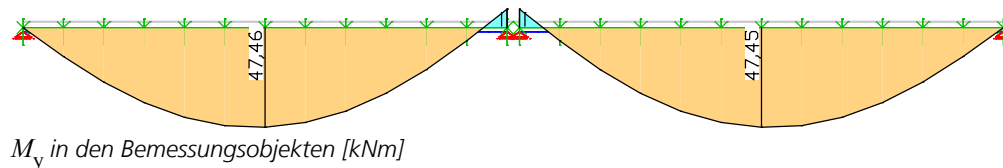
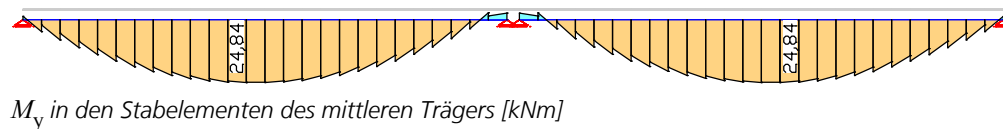
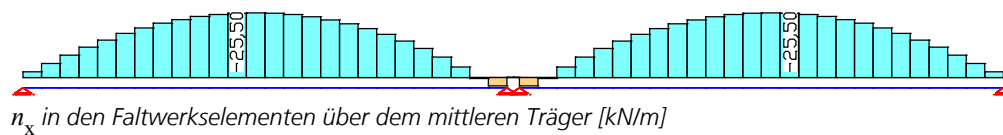


*Tragwerksmodell*

Dieses System liefert die Schnittgrößen in den Fertigteilen und der Ortbetonplatte. Es sollen nun die Schnittgrößen zur Bemessung des mittleren Verbundträgers ermittelt werden. In diesem Bereich wird dazu ein Bemessungsobjekt definiert.



Die folgenden Abbildungen zeigen einige Schnittgrößen im Bereich des mittleren Trägers.



## Eingabe

Die Eingabefunktion wird aus dem Tragwerksmenü (*Bemessungsobjekte*) gestartet. Nach der Festlegung von Anfangs- und Endpunkt erscheint folgendes Dialogfeld zur Eingabe der zusätzlichen Objekteigenschaften. Der Drehwinkel bedeutet eine zusätzliche Verdrehung des Objektes um seine Längsachse gegenüber der Standardausrichtung. In der Standardausrichtung verläuft die lokale y-Achse parallel zur globalen XY-Ebene.

**Neues Bemessungsobjekt** ✕

Nummer:     Bezeichnung:

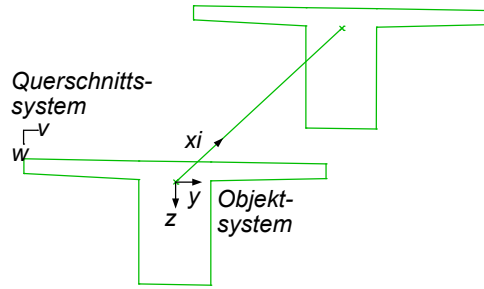
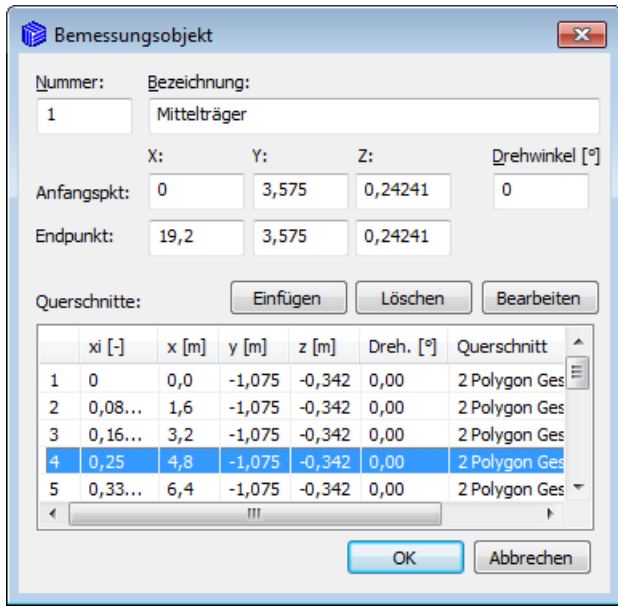
Anzahl Querschn.:     Drehwinkel [°]:

Querschnitt am Anfang:  ...

Querschnitt am Ende:  ...

## Bearbeitung

Zur Bearbeitung wird ein Bemessungsobjekt markiert und über das Kontextmenü das folgende Dialogfeld gestartet.

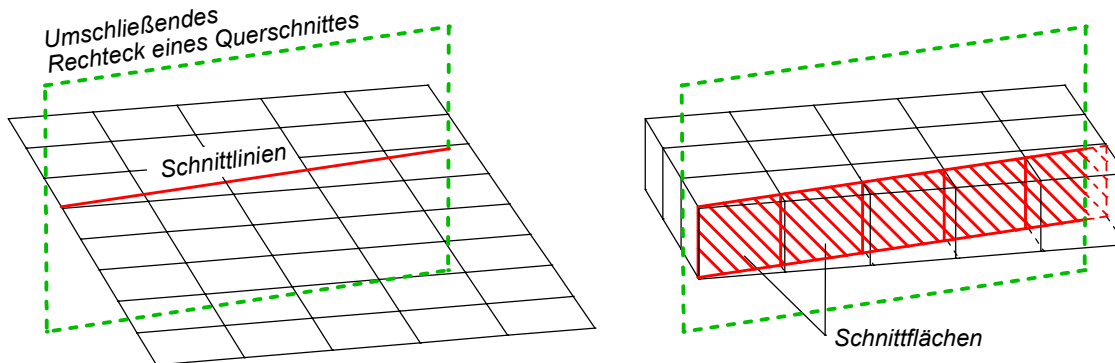


Die Lage der Querschnitte wird mit dem Einfügepunkt, beschrieben durch  $x_i$  (0 bis 1) bzw.  $x, y, z$  sowie einer optionalen anschließenden Drehung um die Objektachse festgelegt. Eine graphische Funktion zur Manipulation der Querschnittslage ist über „Tragwerk.Bemessungsobjekte.Querschnitt bewegen“ erreichbar.

## Integration

Bei der Integration der Schnittgrößen bzw. Spannungen am Ort eines Querschnitts werden folgende Elemente berücksichtigt:

- a) Stäbe, deren Achsen das umschließende Rechteck durchstoßen.
- b) Flächenelemente, deren Schnittlinien mit der Querschnittsebene innerhalb des umschließenden Rechtecks liegen. Auch die Teilstücke angeschnittener Elemente werden hierbei berücksichtigt.
- c) Volumenelemente, deren Schnittflächen mit der Querschnittsebene innerhalb des umschließenden Rechtecks liegen. Auch Teilflächen werden hierbei berücksichtigt.



Behandlung der Flächen- und Volumenelemente bei der Integration.

Bei der Berechnung des statisch bestimmten und unbestimmten Anteils der Vorspannung werden die Spannstränge berücksichtigt, die am Schnittpunkt mit dem umschließenden Rechteck einen Winkel kleiner als  $45^\circ$  zur Achse des Bemessungsobjektes aufweisen.

## Berechnung

Im Berechnungs-Menü werden programmspezifische Einstellungen vorgenommen und die Rechenprogramme gestartet.



*Einstellungen...*



*Stapel...*



*Statik*

*Dynamik*

*Thermische Berechnung*

*Querschnittstemperaturen*

*Lastfallkombination*

*DIN 1045-1 Bemessung*

*DIN EN 1992-1-1 Bemessung*

*EN 1992-1-1 Bemessung*

*ÖNORM B 4700 Bemessung*

*ÖNORM EN 1992-1-1 Bemessung*

*SIA 262 Bemessung*

*SS EN 1992-1-1 Bemessung*

*Einzelbemessung*

*DIN Fachbericht Brückennachweise*

*EN 1992-2 Brückennachweise*

*DIN EN 1992-2 Brückennachweise*

*ÖNORM EN 1992-2 Brückennachweise*

*Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise*

*DIN 18800 Stahlnachweise*

*EN 1993-1-1 Stahlnachweise*

*DIN 1052 Holznachweise*

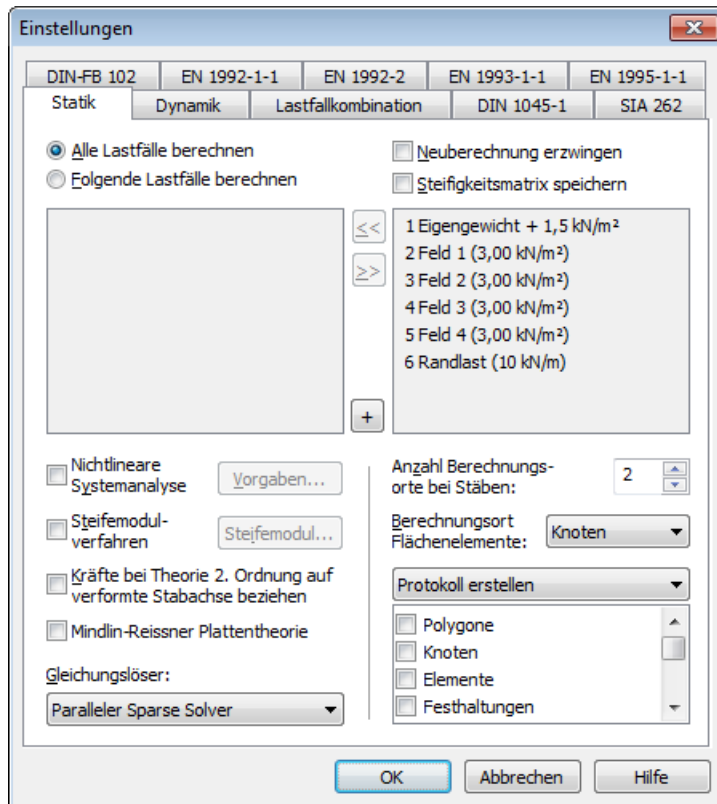
*EN 1995-1-1 Holznachweise*

*Markierte Elemente*

*Stop Berechnung*

Während der Berechnung wird in der Ausgabeleiste der Programmfortschritt mit eventuellen Fehlermeldungen und Warnungen angezeigt.

## Einstellungen Statik



### Alle Lastfälle berechnen

Alle Lastfälle werden berechnet (Standard).

### Folgende Lastfälle berechnen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

### Neuberechnung erzwingen

Ist dieser Schalter aktiviert, werden alle gewählten Lastfälle neu berechnet. Anderenfalls untersucht das Berechnungsprogramm, ob eine Neuberechnung erforderlich ist.

### Steifigkeitsmatrix speichern

Bei Wahl der Gleichungslöser *Standard* und *Substrukturtechnik Standard* wird die Gesamtsteifigkeitsmatrix für eine spätere Wiederverwendung gespeichert. In der 64-Bit Edition ist die Funktion inaktiv.

### Nichtlineare Systemanalyse

Eine nichtlineare Systemanalyse wird durchgeführt. Die Schaltfläche *Vorgaben* öffnet den Einstellungsdialog für den Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis sowie für den Nachweis im Brandfall. Dort werden die Lastfälle ausgewählt, die statt der hier getroffenen Auswahl berechnet werden.

### Steifemodulverfahren

Als Baugrundmodell wird das *Steifemodulverfahren* benutzt. Die Schaltfläche *Steifemodul* öffnet den Dialog zur Eingabe der Steifemoduln. Bei dynamischen Berechnungen wird immer das Bettungsmodulverfahren verwendet.

### Kräfte auf verformte Stabachse beziehen (Theorie 2.Ordnung)

Bei der Berechnung nach Theorie 2. Ordnung beziehen sich die Schnittgrößen und Spannungen auf die Stabsehne des verformten Systems.

### Mindlin-Reissner Plattentheorie

Im Allgemeinen werden die Flächenelemente mit einem Elementansatz nach der „discrete Kirchhoff theory“ (DKT) verwendet. Alternativ kann ein Elementansatz nach „Mindlin-Reissner“ (MR) verwendet werden.



### Gleichungslöser

- *Standard*: Das Gleichungssystem wird direkt gelöst.
- *Iterativ*: Das Gleichungssystem wird iterativ gelöst.
- *Substrukturtechnik Standard*: Das Gleichungssystem wird mit Hilfe der Substrukturtechnik gelöst. Die Elemente werden über ihre Layerzugehörigkeit den Substrukturen zugeteilt. Die Layernummer entspricht der Nummer der Substruktur. Die Elemente einer Substruktur müssen nicht in einem zusammenhängenden Gebiet angeordnet sein.
- *Substrukturtechnik Info*: Das Berechnungsprogramm erzeugt ein Informationsprotokoll, welches eine sinnvolle Einteilung in Substrukturen unterstützt.
- *Paralleler Sparse Solver*: Direkte Lösung des Gleichungssystems mit zusätzlicher Speicheroptimierung und Parallelisierung.

### Anzahl Berechnungsorte bei Stäben

Die Schnittgrößen werden an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Standardmäßig werden zwei Berechnungsorte benutzt (Anfangs- und Endknoten). Bei gebetteten Stäben werden Reaktionen nur in den Knoten berechnet.

### Berechnungsort Flächenelemente

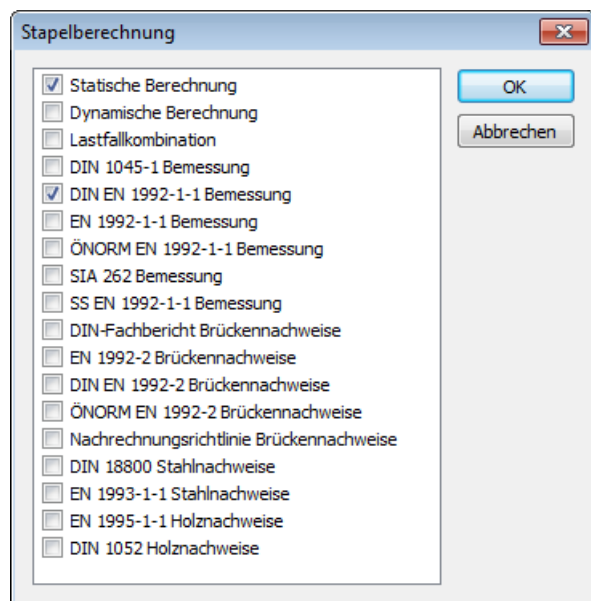
- *Knoten*: Schnittgrößenermittlung in den Elementknoten (Standard).
- *Schwerpunkt*: Schnittgrößenermittlung in den Schwerpunkten der Elemente.
- *Seitenmitten*: Schnittgrößenermittlung in den Seitenmitten der Elemente.

### Protokoll

- *Kein Protokoll*: Vom Berechnungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Protokoll erstellen*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll gemäß Auswahlliste erstellt.

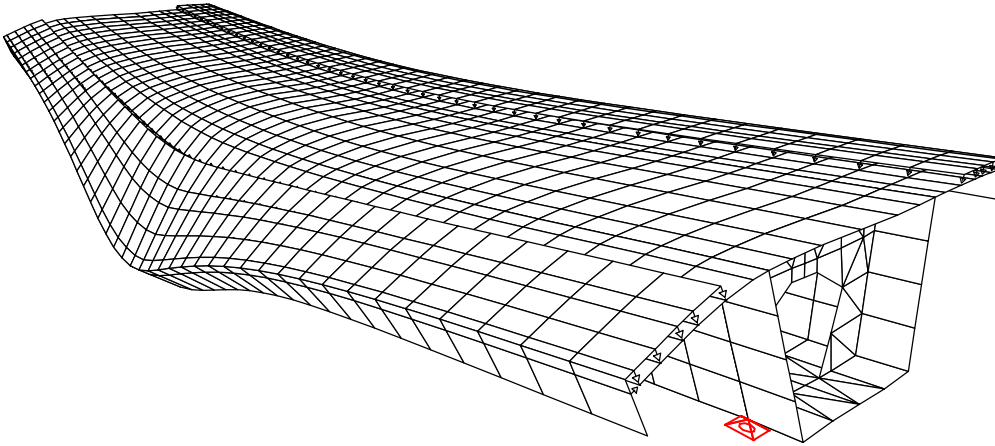
## Stapelberechnung

Mit diesem Menüpunkt werden ausgewählte Berechnungen nacheinander gestartet.



## Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird die Darstellung der Berechnungsergebnisse beschrieben. Ergebnisse können sowohl graphisch als auch tabellarisch angezeigt werden. Deren Auswahl erfolgt in der Datenbasis oder mit der Funktion *Ergebnisse* des Menüs *Tragwerk*.



Überhöhte Darstellung der Deformationen einer Hohlkastenbrücke

### Summe der aufgebrachtten Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	Eigenlast	0,000	0,000	15172,098
	Auflagerreaktionen	-0,000	-0,000	15172,098
11	Kappenlast Ort 1	0,000	-0,000	295,201
	Auflagerreaktionen	-0,000	-0,000	295,201
12	Kappenlast Ort 2	0,000	0,000	295,200
	Auflagerreaktionen	-0,000	0,000	295,200

Tabellarische Ausgabe der Lastsummen

## Ergebnisleiste

Die Ergebnisleiste enthält folgende Schaltflächen zur Ergebnisdarstellung:



Startet den Dialog für die Ergebnisdarstellung.



Ergebnisdarstellung abschalten.



Ordinatenauswahl für die manuelle Beschriftung.



Ergebnisdarstellung für markierte Elemente auswählen.



Ergebnisdarstellung für markierte Elemente abwählen.



Schnitt eingeben.



Schnitt löschen.



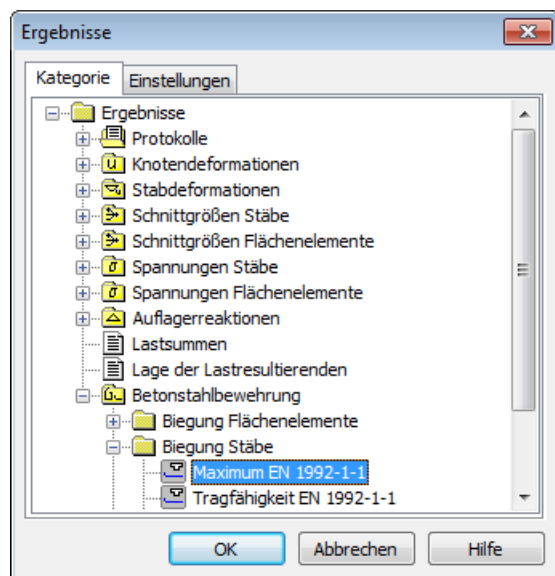
Ergebnismarker für Spannungen im Brandfall einfügen. An diesen Orten werden bei der Berechnung die Spannungsverteilungen über den Querschnitt für jeden Zeitpunkt gespeichert. Diese Ergebnisse können mit einem Doppelklick auf den entsprechenden Marker angezeigt werden.



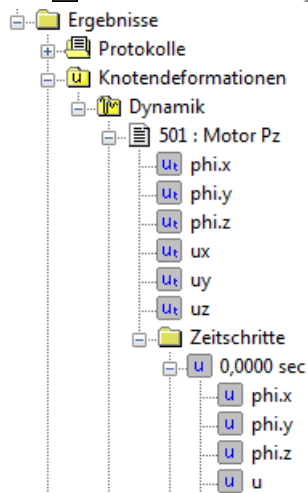
Ordinatenwert am Markierungsort in der Statusleiste ausgeben. Sind Schnittgrößen oder Bewehrung an Schnitten dargestellt, wird zusätzlich deren Integral über die Schnittlänge angegeben.

## Ergebniskategorien

Die nachfolgende Dialogseite zeigt mögliche Ergebniskategorien.



In den Unterpunkten zu der jeweiligen Kategorie sind die berechneten Lastfälle und Kombinationen sowie alle darstellbaren Ergebniskomponenten aufgeführt. Nach getroffener Auswahl bietet die Registerkarte *Einstellungen* die nachfolgend erläuterten Darstellungsformen mit weiteren Optionen an. Das vorangestellte Symbol kennzeichnet die Art der Darstellung (z.B. : Tabellendarstellung, : graphische Schnittkraftdarstellung).



Ergebnisse einer Zeitschrittberechnung oder Brandanalyse werden nach Auswahl eines Zeitschritts wie die Ergebnisse eines Lastfalls angezeigt. Bei Wahl einer übergeordneten Komponente lässt sich der Ergebnisverlauf entweder für einen gewählten Ort als Diagramm darstellen oder am Gesamtsystem animieren (*Farbig*, *Verformungsfigur*, *Zustandslinie*).

## Verformungsfigur

### Maßstab

Der Maßstab kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden. Die Knotenverschiebungen werden mit dem Verzerrungsfaktor multipliziert und zu den Knotenkoordinaten addiert. Bei Lastfällen wird zusätzlich die Biegelinie von Stäben dargestellt.

### Originalsystem gestrichelt darstellen

Ein- oder Ausschalten des gestrichelten undeformierten Systems während der Verformungsdarstellung.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung der Knoten mit der Länge des Verschiebungsvektors [mm].
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.

### Grenzwert für Beschriftung

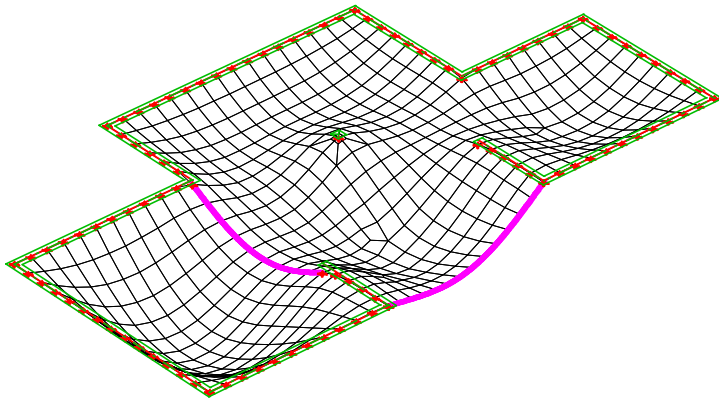
Nur betragsmäßig größere Verschiebungen werden beschriftet.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



Überhöhte Verformungsfigur

## Farbig, Isoflächen

Mit der Darstellungsart *Farbig* werden die Flächen- und Volumenelemente entsprechend ihren Ergebnissen eingefärbt. Bei der Darstellungsart *Isoflächen* werden Ergebnisse von Volumenelementen durch einfarbige Flächen gleicher Werte dargestellt.

### Anzahl Farben

Festlegen der Farbanzahl für die automatische Farbabstufung.


### Farbverschiebung

Verzerrung der automatischen Farbabstufung.

### Abstufung

Ein- oder Ausschalten der manuellen Farbabstufung. Farben und Zahlenwerte sind änderbar. Die Abstufung kann mit der rechten Maustaste als Voreinstellung für andere Projekte gespeichert werden. Die Kontextfunktion *Datenbank* erlaubt es, unterschiedliche Abstufungen in der Datei *lgraph.dat* zu verwalten.

Das Symbol  fügt oberhalb der markierten Farbstufe eine weitere hinzu.

Das Symbol  löscht die markierte Farbstufe.

### Elementnetz

Ein- oder Ausschalten des Elementnetzes während der farbigen Ergebnisdarstellung.

### Legende

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

### Werte mitteln

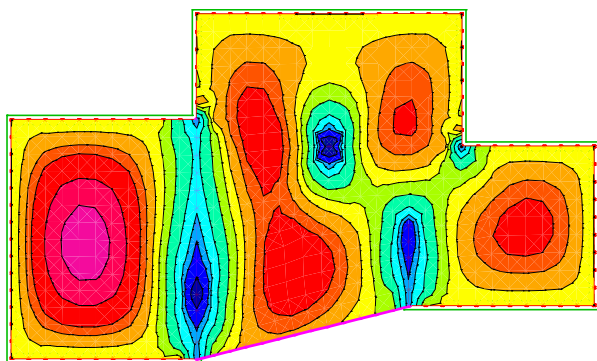
Die angezeigten Ergebnisse werden am Berechnungsort gemittelt, wenn alle anschließenden Elemente gleiche Eigenschaften besitzen.

### Trennlinie

Ein- oder Ausschalten von Trennlinien an den Farbübergängen.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.



Farbdarstellung der Schnittgrößen  $m_x$

## Höhenlinien

In den Flächenelementen werden entsprechend ihren Ergebnissen Höhenlinien dargestellt.

### Anzahl Linien

Festlegen der Höhenlinienanzahl für die automatische Abstufung.


### Texthöhe

Festlegen der Texthöhen für die Beschriftung.

### Abstufung

Ein- oder Ausschalten der manuellen Höhenlinienabstufung. Farben und Zahlenwerte sind änderbar. Die Abstufung der Flächenbewehrung kann mit der rechten Maustaste als Voreinstellung für andere Projekte gespeichert werden.

Das Symbol  fügt oberhalb der markierten Höhenlinie eine weitere hinzu.

Das Symbol  löscht die markierte Höhenlinie.

### Bunt

Ein- oder Ausschalten der Farbausgabe der manuellen Höhenlinienabstufung.

### Elementnetz

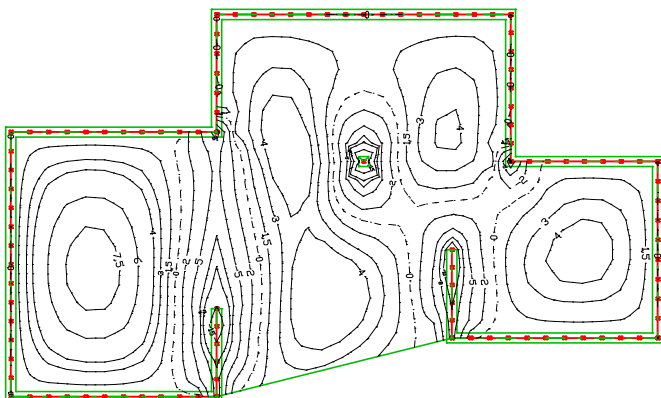
Ein- oder Ausschalten des Elementnetzes während der Höhenliniendarstellung.

### Extremwerte

Ein- oder Ausschalten der lokalen Extremwerte.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.



Höhenliniendarstellung der Schnittgrößen  $m_x$

Die Höhenlinien werden über lineare Interpolation aus Knotenwerten erzeugt. Falls die Berechnung in den Seitenmitten

bzw. in den Schwerpunkten der Elemente erfolgte, werden die Ergebnisse auf die Elementknoten extrapoliert. Die Knotenwerte werden gemittelt, wenn alle anschließenden Elemente gleiche Eigenschaften haben.

## Numerisch

Mit dieser Funktion werden Ergebnisse am Berechnungsort numerisch dargestellt.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.

### Bewehrungsabzug [cm<sup>2</sup>/m] x-Richtung bzw.y-Richtung

Die eingestellten Werte werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert. Nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben. Die angebotene Liste von Bewehrungsabzügen kann über eine zusätzliche Schaltfläche modifiziert werden.

### Unterer Grenzwert für Darstellung

Nur betragsmäßig größere Ergebnisse werden ausgegeben.

### Werte mitteln

Die angezeigten Ergebnisse werden am Berechnungsort gemittelt, wenn alle anschließenden Elemente gleiche Eigenschaften haben.

### Texthöhe [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Koordinatensystem in den Elementen abschalten

Bei Bewehrungsergebnissen wird kein Koordinatensystem dargestellt.



1.00	0.96	0.85	0.70
1.00	1.09	1.02	0.95
	1.04	0.98	0.92
0.97	1.10	1.06	0.98
	1.06	1.01	1.01

Numerische Darstellung der Hauptspannungen  $\sigma_1$  bei eingeschalteter Mittelung in einem Bereich mit unterschiedlichen Elementeigenschaften

2.76	2.72	2.22	1.60
2.61	2.45	2.13	1.80
	$\nabla^x$	$\nabla^x$	$\nabla^x$
2.77	3.32	2.86	2.10
2.58	3.00	2.76	2.26
	$\nabla^x$	$\nabla^x$	$\nabla^x$
2.65	3.28	3.14	2.54
2.17	2.57	2.63	2.37

Numerische Darstellung der unteren Bewehrungslage in x-Richtung (obere Zahl) und y-Richtung (untere Zahl). Das Bewehrungssystem wird zusätzlich zu den numerischen Ergebnissen im Element ausgegeben, wenn es sich vom globalen Koordinatensystem unterscheidet.

## Schnittdarstellung

In Flächen- und Volumenelementen werden die Ergebnisse über benutzerdefinierte Schnittlinien aufgetragen. Nach Auswahl der Darstellungsart *Schnitt* können mit den Symbolen  bzw.  der Ergebnisliste Schnittlinien (3D: Schnittebenen) eingegeben bzw. gelöscht werden.

### Schnitt

Auswahl einer gespeicherten Gruppe von Schnittlinien. Mit der Taste *Entf* wird die ausgewählte Gruppe gelöscht.

### Speichern...

Speichern der vorhandenen Schnittlinien unter einer Nummer. Änderungen einer geladenen Gruppe werden durch einen Stern markiert.

### Maßstab

Der Maßstab der Ordinatendarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung überall.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisliste wählen.

### Grenzwert für Beschriftung

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

### Integral zeigen

Für jeden Schnitt das Integral der Ergebnisse zeigen.

### Dezimalstellen

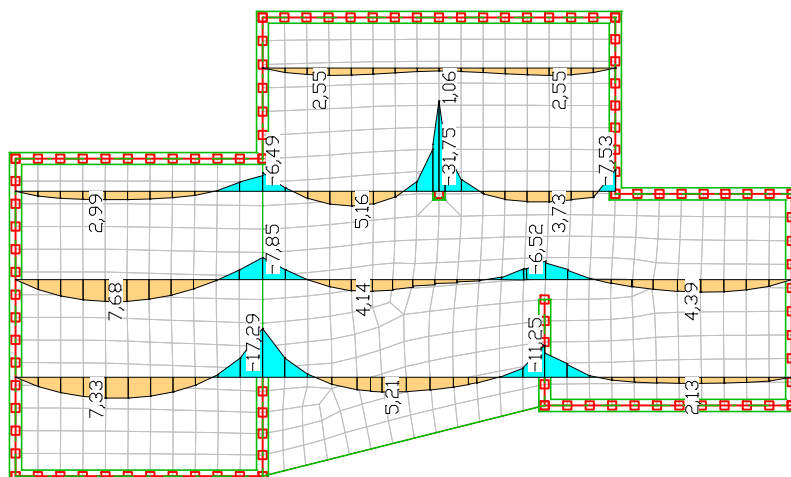
- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.



Schnittdarstellung der Schnittgrößen  $m_x$

## Vektoriell

Bei Flächen- und Volumenelementen werden im Schwerpunkt die extremalen Hauptspannungen oder -schnittgrößen vektoriell dargestellt.

### Farbig

Positive Werte werden rot und negative Werte blau gezeichnet. In der s/w-Darstellung werden die Werte der 1. Richtung durchgezogen und die der 2. Richtung gestrichelt gezeichnet.

### Maßstab

Der Maßstab der Vektoren kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.

### Grenzwert für Beschriftung

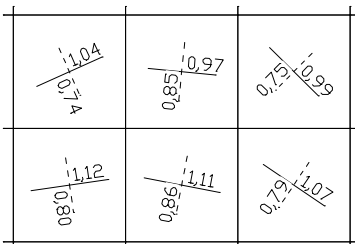
Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.



Vektordarstellung der extremalen Hauptspannungen

## Volumenschnitt

In Volumenelementen werden die Ergebnisse über benutzerdefinierte Schnittflächen aufgetragen. Nach Auswahl der Darstellungsart *Volumenschnitt* können mit den Symbolen  bzw.  der Ergebnisliste Schnittflächen eingegeben bzw. gelöscht werden.

### Schnitt

Auswahl einer gespeicherten Gruppe von Schnitte. Mit der Taste *Entf* wird die ausgewählte Gruppe gelöscht.

### Speichern...

Speichern der vorhandenen Schnitte unter einer Nummer. Änderungen einer geladenen Gruppe werden durch einen Stern markiert.

### Anzahl Farben

Festlegen der Farbanzahl für die automatische Farbabstufung.

### Farbverschiebung

Verzerrung der automatischen Farbabstufung.

### Abstufung

Ein- oder Ausschalten der manuellen Farbabstufung. Farben und Zahlenwerte sind änderbar. Die Abstufung kann mit der rechten Maustaste als Voreinstellung für andere Projekte gespeichert werden. Die Kontextfunktion *Datenbank* erlaubt es, unterschiedliche Abstufungen in der Datei *lgraph.dat* zu verwalten.

Das Symbol  fügt oberhalb der markierten Farbstufe eine weitere hinzu.

Das Symbol  löscht die markierte Farbstufe.



**Legende**

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

**Werte mitteln**

Die angezeigten Ergebnisse werden am Berechnungsort gemittelt, wenn alle anschließenden Elemente gleiche Eigenschaften besitzen.

**Trennlinie**

Ein- oder Ausschalten von Trennlinien an den Farbübergängen.

## Lagerlinien

Grundlage aller Darstellungen sind die in den festgehaltenen Knoten ermittelten Auflagerreaktionen [kN bzw. kNm]. Diese sind jeweils im Festhaltungssystem definiert. Bei der linienförmigen Darstellung der Auflagerreaktionen werden Lagerlinien gebildet. Die Lagerlinien setzen sich aus aufeinanderfolgenden festgehaltenen Elementkanten zusammen. Die Auflagerreaktionen werden in das Koordinatensystem der Lagerlinien transformiert und auf die jeweilige Einzugsbreite verteilt.

Das Koordinatensystem der Lagerlinien ist wie folgt definiert:

- Die x-Achse zeigt in Richtung der Lagerlinien.
- Die z-Achse hängt von der Orientierung der Festhaltungen ab.

**Mittelung**

Alternativ können die Ordinaten der linienförmigen Darstellung auf folgende Arten gemittelt werden:

- *Linear*: Die Kräfte und Momente stehen im Gleichgewicht zur Darstellung ohne Mittelung (trapezförmiger Verlauf).
- *Konstant*: Die Kräfte stehen im Gleichgewicht zur Darstellung ohne Mittelung (rechteckförmiger Verlauf).

Da bei Lastfallkombinationen häufig unterschiedliche Lastfälle an den extremalen Reaktionen der einzelnen Auflager beteiligt sind, führt die Mittelung unter Umständen zu einer unrealistischen Summe der Lagerkräfte.

**Maßstab**

Der Maßstab der Ordinatendarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

**Beschriftung**

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung aller Ordinaten.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisleiste wählen.

**Grenzwert für Beschriftung**

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

**Integral zeigen**

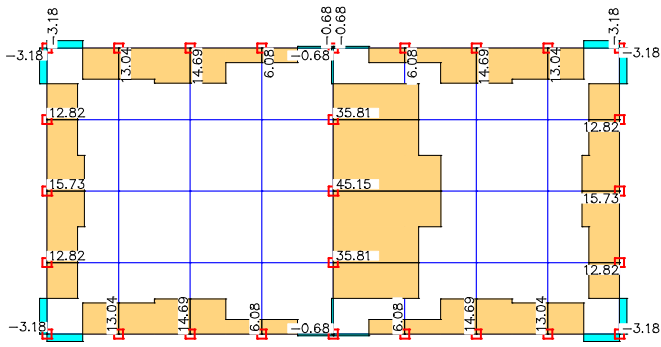
Für jede Lagerlinie das Integral der Ergebnisse zeigen.

**Dezimalstellen**

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

**Texthöhe in [mm]**

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.



Linienförmige Darstellung von Auflagerreaktionen

## Zustandslinien

Die Ergebnisse werden bei Stäben und Bemessungsobjekten entlang der Objektachse, bei Spannsträngen über den Sekanten des Splines aufgetragen. Zwischen den Berechnungsorten wird von einem linearen Verlauf der Ergebnisse ausgegangen.

### Maßstab

Der Maßstab der Ordinatendarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung aller Ordinaten.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisleiste wählen.

### Grenzwert für Beschriftung

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Texthöhe in [mm]

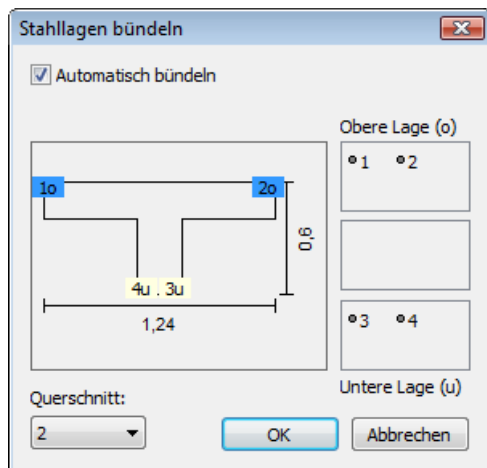
Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Ordinaten in globaler Z-Richtung abtragen

Diese Auswahl bezieht sich auf Ergebnisse für Spannstränge, die standardmäßig in der Hauptkrümmungsebene der Splines dargestellt werden.

### Stahllagen bündeln...

Mit dieser Funktion wird die Darstellung der Stahllagen festgelegt.



Bei der automatischen Bündelung werden alle Stahllagen, deren z-Komponente kleiner ist als die z-Komponente des Schwerpunkts, auf der Oberseite der Elemente dargestellt, alle anderen Lagen auf der Unterseite.

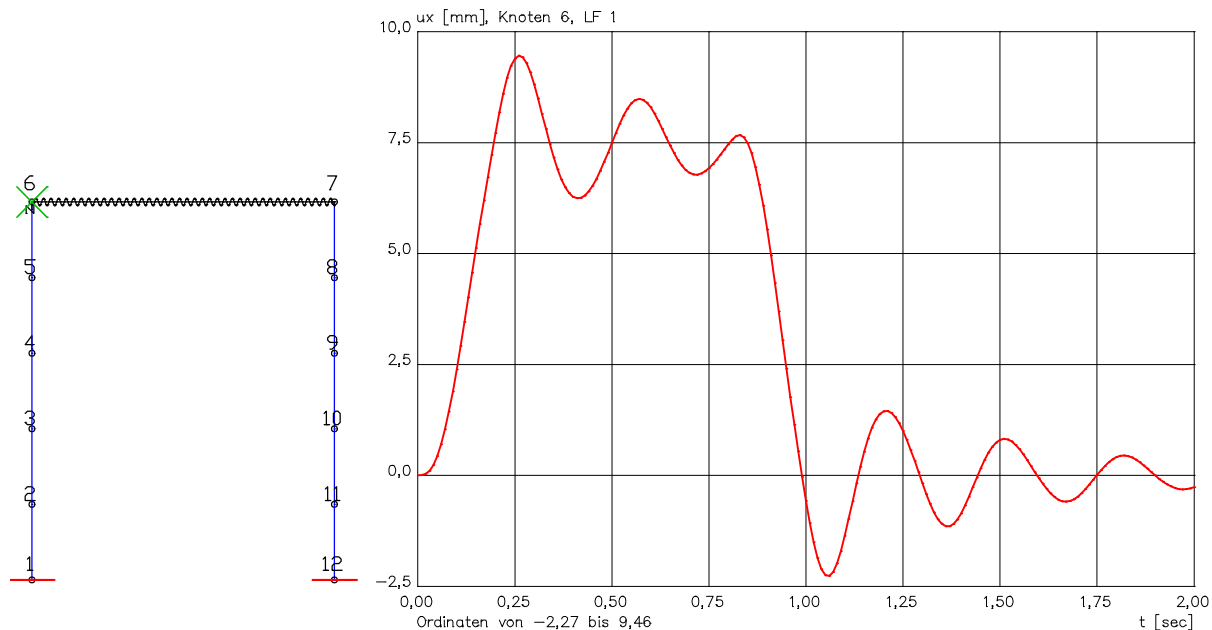
Bei der manuellen Bündelung können die Stahllagen mit der Maus zwischen den Listenfeldern verschoben werden. Die Stahllagen des mittleren Listenfeldes sind von der Darstellung ausgenommen.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.

## Ergebnisdiagramm

Die Resultate dynamischer Berechnungen oder einer Brandanalyse werden in einem Diagramm angezeigt. Bei Ergebnissen einer Zeitschrittintegration ist der gewünschte Berechnungsort im Tragwerk zu markieren.



Systemantwort  $u_x$  auf eine instationäre Erregung

Mit der Kontextfunktion *Wertepaare kopieren* des Diagramms können die dargestellten Wertepaare in die Zwischenablage kopiert werden.

## Querschnittsspannungen

Der Spannungsverlauf wird an einem Stabquerschnitt in einem Dialogfenster dargestellt. Dieses ist über das Kontextmenü der Stäbe erreichbar, wenn Zustandslinien von Spannungen oder Schnittgrößen angezeigt werden.

### Lastfall

Auswahl der berechneten Lastfälle und Kombinationen.

### Satz

Auswahl des Schnittkraftsatzes für die Spannungsermittlung. Bei *Extremum* werden die betragsmäßigen Extremwerte der Spannungen aus allen Schnittkraftsätzen dargestellt.

### Stab

Nummer des ausgewählten Stabes.

### Ort

Auswahl des Berechnungsortes im Stab.

### Querschnitt

Bezeichnung des dargestellten Querschnitts.

**Nx, Qy, Qz, Mx, My, Mz**

Schnittgrößen am gewählten Berechnungsort, aus welchen sich der dargestellte Spannungsverlauf ergibt.

**Spannung**

Die Spannungen werden im allgemeinen unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens berechnet. Bei Ergebnissen aus einer nichtlinearen Systemanalyse werden an Polygonquerschnitten und Stahlbauprofilen aus Baustahl (S235 bis S450 oder S235-EN bis S450-EN) oder *Stahl* die Spannungen des plastischen Zustands dargestellt.

- *Sigma.x*: Längsspannungen aus Biegemomenten und Längskraft.
- *Sigma.v*: Vergleichsspannungen nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung.
- *Sigma.1,2*: Hauptspannungen aus Biegemomenten, Längskraft, Querkräften und Torsion.
- *Tau.r*: Schubspannungen aus Querkräften und Torsion parallel zum Rand.
- *Tau.xy*: Schubspannungen aus Querkräften und Torsion in y-Richtung.
- *Tau.xz*: Schubspannungen aus Querkräften und Torsion in z-Richtung.

**Beschriftung**

Beschriftung der Extremwerte. Optional kann mit der rechten Maustaste die Beschriftung ausgewählte Ordinatenwerte ein- bzw. ausgeschaltet werden.

**Drucken**

Drucken der Querschnittsspannungen.

**->Druckliste**

Einfügen der aktuellen Ansicht in die Druckliste.

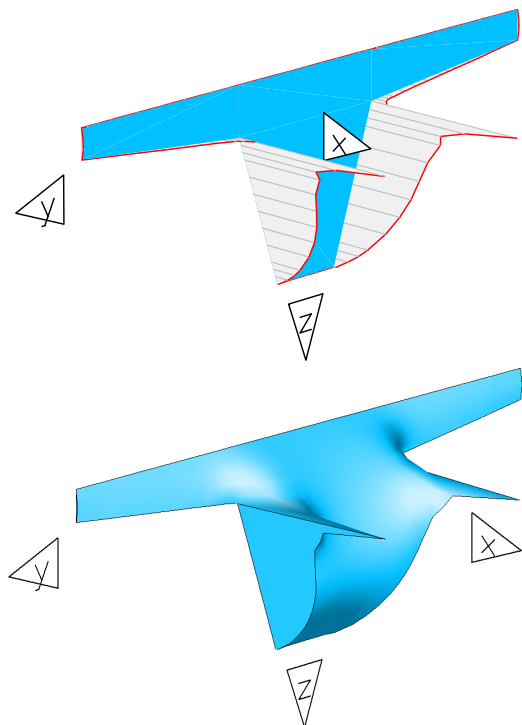
**Darstellung**

Die Spannungen können entweder linienförmig entlang des Randes oder flächig dargestellt werden.

Die Ansicht kann mit Hilfe der Maus gedreht werden. In Verbindung mit der Hochtaste wird der Bildausschnitt verschoben. In Verbindung mit der Strg-Taste wird die Größe des Zoomausschnitts verändert. Verbleibt der Mauszeiger für einen Moment an einer Ordinate, wird die dort vorhandene Spannung dargestellt.

**Querschnittsspannungen Tau.xz (Elastisch)**

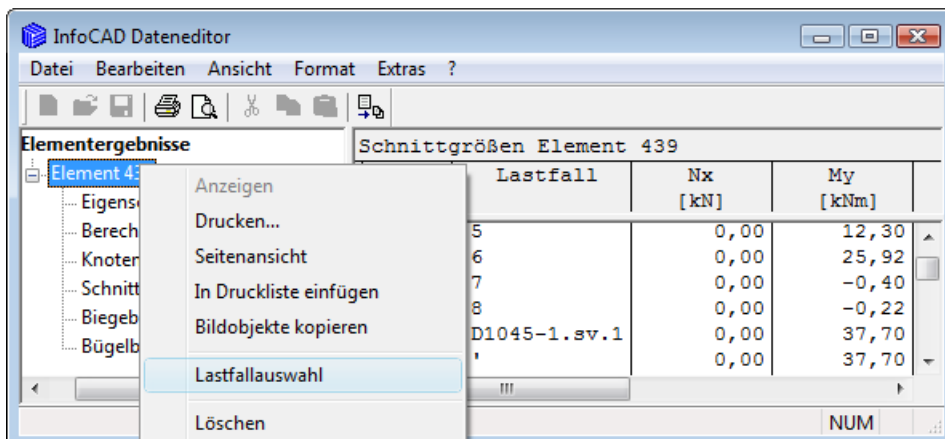
Stab 1, Punkt 1, Querschnitt Polygon - C20/25  
 Lastfall 1  
 Nx / Qy / Qz = 0,00 / -0,00 / 5865,00 kN; Mx / My / Mz = -0,00 / -58650,00 / 0,00 kNm  
 Wertebereich der Spannungen: -0,00157631 bis 4,18786 MN/m².



Schubspannungsverteilung  $\tau_{xz}$  entlang des Randes bzw. flächig

## Ergebnisliste

Die Ergebnisliste wird für markierte Elemente im Dateneditor ausgegeben. Sie ist über das Kontextmenü der Elemente erreichbar.



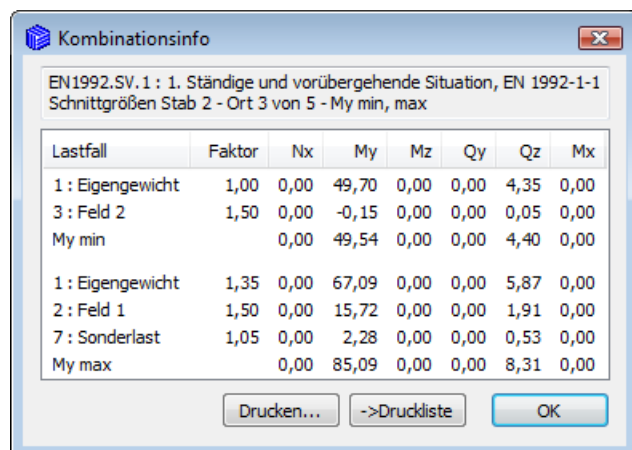
Mit der Kontextfunktion *Lastfallauswahl* kann die Ausgabe auf bestimmte Lastfälle beschränkt werden.

## Kombinationsinfo

Mit der *Kombinationsinfo* können die an einem Kombinationsergebnis beteiligten Lastfälle mit Ihren jeweiligen Wichtungen bestimmt werden. Diese Funktion steht während der Ergebnisdarstellung einer Kombination zur Verfügung. Nach der Auswahl des gewünschte Ergebnisortes mit der rechten Maustaste erscheint im Kontextmenü die Funktion *Kombinationsinfo*.

Über das Kontextmenü des Dialoges können folgende Funktionen aufgerufen werden:

- *Kopieren* (Zwischenablage)
- *Lastgruppe erzeugen...*
- *Superpositions-Lastfall erzeugen*
- *Zugehörige Deformationen...*
- *Zugehörige Auflagerkräfte...*



### Letzte Kombination

Zeigt die zum letzten *Kombinationsinfo* zugehörigen Zustandsgrößen.

## Bewehrung exportieren

Die dargestellte Biegebewehrung der Flächenelemente (1. und 2. Lage für beide Richtungen) wird in eine Übergabedatei für Konstruktionsprogramme geschrieben.

Folgende Formate können gewählt werden:

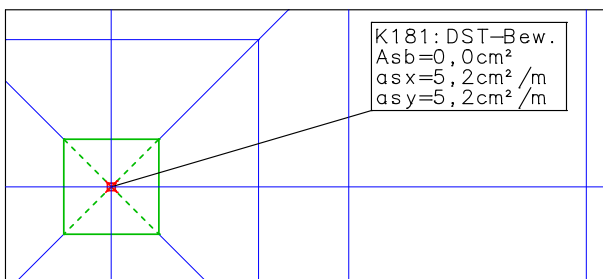
- ALLPLOT Austauschdateien (\*.asf)
- STRAKON Austauschdateien (\*.cfe)
- ISBCAD Austauschdateien (\*.fem)
- ZEICON Austauschdateien (fax\*)

Diese Formate setzen ein ebenes Flächentragwerk voraus. Bei abweichenden Tragwerken ist es daher sinnvoll, die Bewehrung ebenelementweise zu übertragen. Liegen die ausgewählten Elemente nicht in einer Ebene, muss eine Projektionsebene definiert werden. Gegebenenfalls muss auch ein lokales Koordinatensystem festgelegt werden.

Bei Berechnung an den Knoten oder Seitenmitten werden gemittelte Werte übertragen.

## Durchstanznachweis

Der Durchstanznachweis wird aus dem Tragwerksmenü aufgerufen und für ausgewählte Elementknoten interaktiv durchgeführt. Das nachfolgende Bild zeigt ein Durchstanzobjekt an einer Stütze. Die erforderliche Biege- und Schubbewehrung wird angeschrieben.



Durchstanzobjekt

### Eingabe

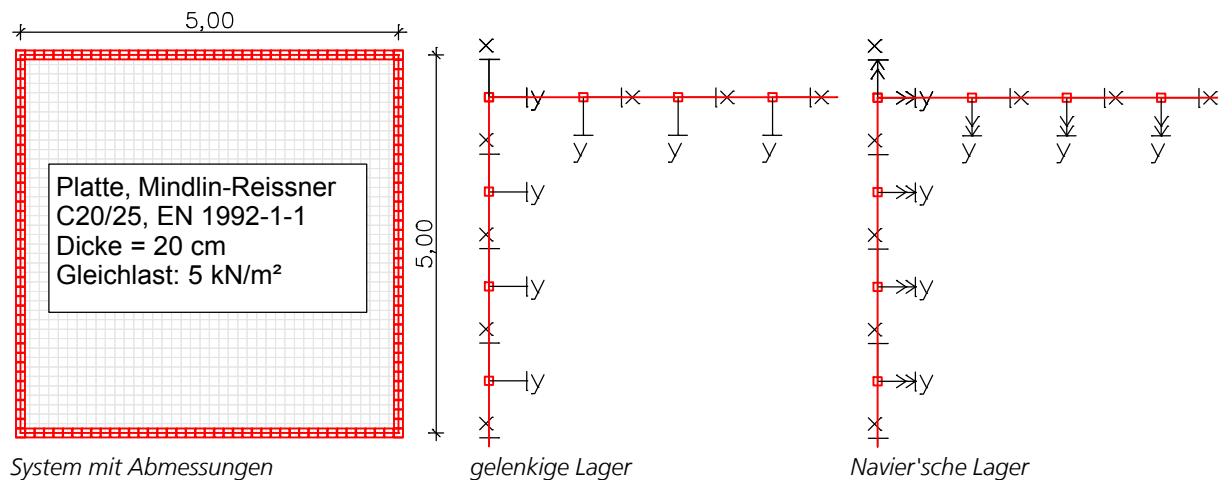
- Aus* Darstellung der Durchstanzobjekte ausschalten.
- Protokoll* Durchstanznachweis von allen Durchstanzobjekten protokollieren und anzeigen. Das Protokoll wird in der Datenbasis gespeichert.
- Eingeben* Durchstanzobjekt am markierten Knoten erzeugen und Durchstanznachweis durchführen.

Die im Nachweis angewendete Norm wird entsprechend der benutzten Betonklasse gewählt. Falls diese nicht eindeutig festzulegen ist, wird ein Auswahldialog angeboten. Nähere Erläuterungen sind in den jeweiligen Kapiteln zur Stahlbetonbemessung zu finden.

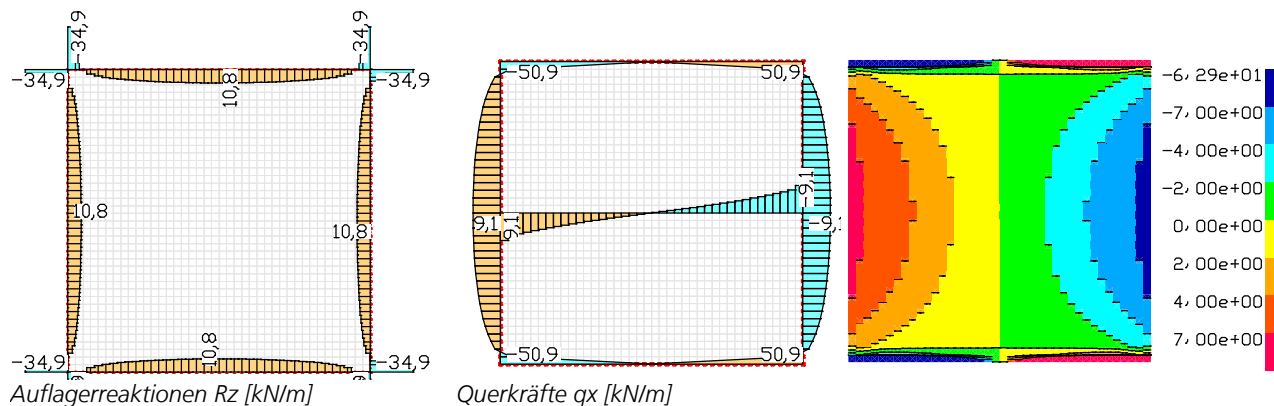
# Beispiele

## Platte mit Mindlin-Reissner Elementen

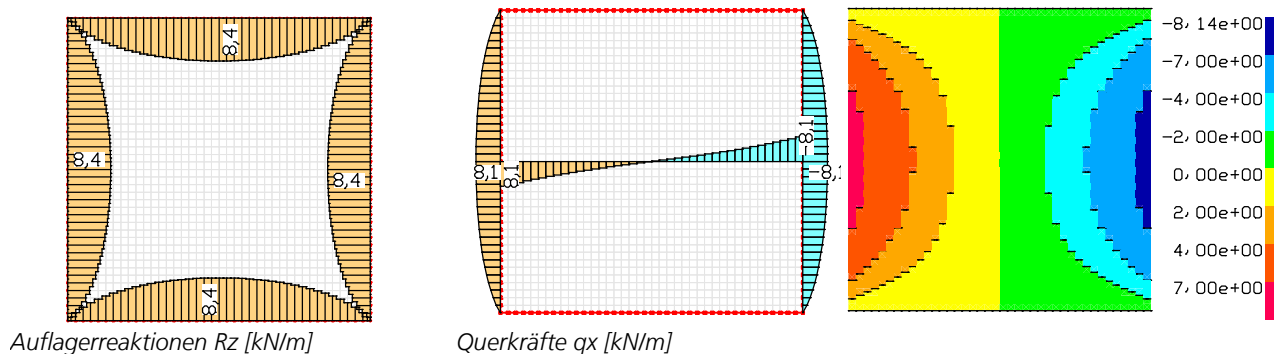
Dieses Beispiel soll das Querkraftverhalten der Mindlin-Reissner-Elemente verdeutlichen. Die Art der Lagerung hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Querkräfte. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse einer gelenkigen und einer Navier'schen Lagerung gegenübergestellt.



### Gelenkige Lager

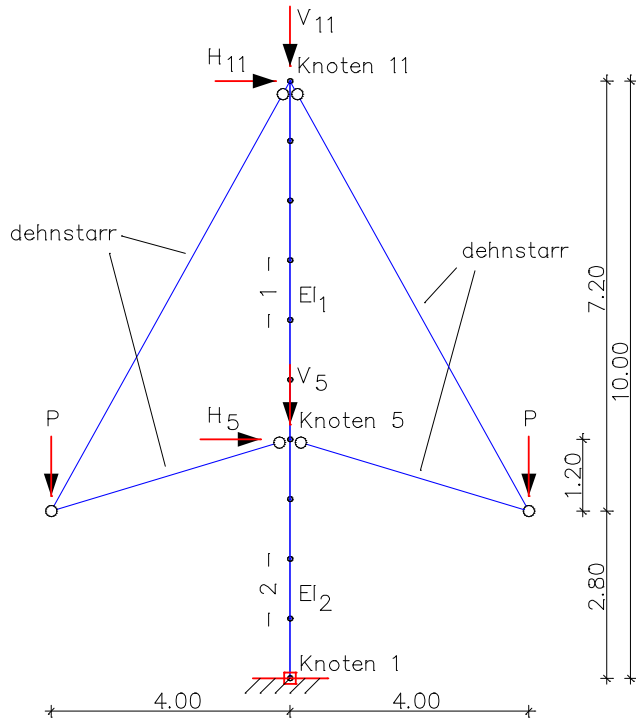


### Navier'sche Lager



## Knickeigenformen einer Stütze

Das abgebildete Tragwerk wurde von Rubin und Aminbaghai (1997) untersucht. Um Knickeigenformen von Tragwerken zu ermitteln, ist in den betreffenden Lastfall die Lastart  $P_{ki}$  aufzunehmen.



Fall 1:

$$EI_1 = 15000 \text{ kNm}^2, \quad EI_2 = 20000 \text{ kNm}^2$$

$$H_{11} = 3 \text{ kN}, \quad V_{11} = 200 \text{ kN}, \quad H_5 = 2 \text{ kN}, \quad V_5 = 300 \text{ kN}, \quad P = 400 \text{ kN}$$

Fall 2:

$$EI_1 = EI_2 = 15000 \text{ kNm}^2$$

$$H_{11} = 3 \text{ kN}, \quad V_{11} = 0 \text{ kN}, \quad H_5 = 2 \text{ kN}, \quad V_5 = 0 \text{ kN}, \quad P = 400 \text{ kN}$$

### Materialkennwerte

Nr.	Mat.-Art	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	G-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	Quer-dehn.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m <sup>3</sup> ]
1	S235	210000	81000	0,30	1,200e-05	78,500
2	S235	210000	81000	0,30	1,200e-05	78,500
3	S235	210000	81000	0,30	1,200e-05	78,500

### Querschnittswerte

Nr. 1	Stab	A = 1,000e+00 [m <sup>2</sup> ] Ix = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ], Iy = 7,140e-05 [m <sup>4</sup> ], Iz = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ]
Nr. 2	Stab	A = 1,000e+00 [m <sup>2</sup> ] Fall 1: Ix = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ], Iy = 9,520e-05 [m <sup>4</sup> ], Iz = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ] Fall 2: Ix = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ], Iy = 7,140e-05 [m <sup>4</sup> ], Iz = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ]
Nr. 3	Stab	A = 1,000e+00 [m <sup>2</sup> ] Ix = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ], Iy = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ], Iz = 1,000e+00 [m <sup>4</sup> ]



**Knotenbeschreibung**

Nr.	x [m]	y [m]	z [m]
1	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	-1,000
3	0,000	0,000	-2,000
4	0,000	0,000	-3,000
5	0,000	0,000	-4,000
6	0,000	0,000	-5,000
7	0,000	0,000	-6,000
8	0,000	0,000	-7,000
9	0,000	0,000	-8,000
10	0,000	0,000	-9,000
11	0,000	0,000	-10,000
12	4,000	0,000	-2,800
13	-4,000	0,000	-2,800

**Stabelemente**

Nr.	Element- art	Anf.- Knoten	End.- Knoten	Winkel [°]	Qsw	Mat	Gelenke				Länge [m]	Layer
							Q	M	Q	M		
							xyzxyz	xyzxyz				
1	RS	1	2	0,00	2	2	0	0	1,000	2		
2	RS	2	3	0,00	2	2	0	0	1,000	2		
3	RS	3	4	0,00	2	2	0	0	1,000	2		
4	RS	4	5	0,00	2	2	0	0	1,000	2		
5	RS	5	6	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
6	RS	6	7	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
7	RS	7	8	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
8	RS	8	9	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
9	RS	9	10	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
10	RS	10	11	0,00	1	1	0	0	1,000	2		
11	RF	5	12	0,00	3	3	0	0	4,176	2		
12	RF	12	11	0,00	3	3	0	0	8,237	2		
13	RF	5	13	0,00	3	3	0	0	4,176	2		
14	RF	13	11	0,00	3	3	0	0	8,237	2		

**Festhaltungen**

Knoten- Nr.	Winkel [°]			"F"=Fest, "-"=Frei, Federsteifigkeit [MN/m bzw. MNm]			Zug- ausfall			
	x	y	z	ux	uy	uz	phi.x	phi.y	phi.z	
1	0,0	0,0	0,0	F	F	F	F	F	F	L:x-y-z
2	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
3	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
4	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
5	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
6	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
7	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
8	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
9	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
10	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
11	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
12	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z
13	0,0	0,0	0,0	-	F	-	F	-	F	L:x-y-z

**Lastdaten Lastfall 1 (Fall 1)**

KNL : Knotenlast

Knoten von	bis	Px	Py [kN]	Pz	Mx	My [kNm]	Mz
5	5	2,00	0,00	300,00	0,00	0,00	0,00
11	11	3,00	0,00	200,00	0,00	0,00	0,00
12	13	0,00	0,00	400,00	0,00	0,00	0,00

PKI : Knickeigenwerte und -eigenformen  
Anzahl Eigenwerte 4

**Lastdaten Lastfall 2 (Fall 2)**

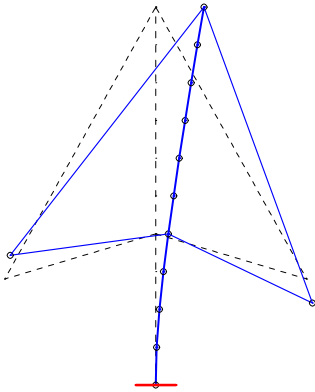
KNL : Knotenlast

Knoten von	bis	Px	Py [kN]	Pz	Mx	My [kNm]	Mz
5	5	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	13	0,00	0,00	400,00	0,00	0,00	0,00

PKI : Knickeigenwerte und -eigenformen  
Anzahl Eigenwerte 4

Die Stabilitätsuntersuchung liefert in völliger Übereinstimmung mit der o.g. Veröffentlichung folgende Knickeigenformen und Ergebnisse.

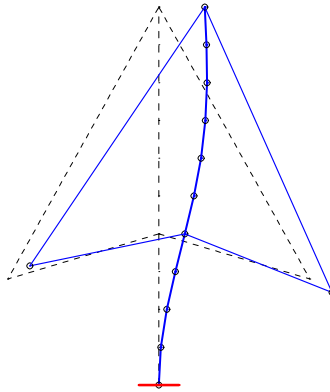
Fall 1



Knicklastfaktor = 2,14

Knicklängen:  $sk_{\text{Gruppe 1}} = 7,724 \text{ m}$   
 $sk_{\text{Gruppe 2}} = 8,425 \text{ m}$

Fall 2



Knicklastfaktor = 3,58

Knicklängen:  $sk_{\text{Gruppe 1}} = 6,559 \text{ m}$   
 $sk_{\text{Gruppe 2}} = 7,185 \text{ m}$

**Auszug des Finite-Elemente-Protokolls**

**Lastfaktoren der Knickeigenformen Lastfall 2**

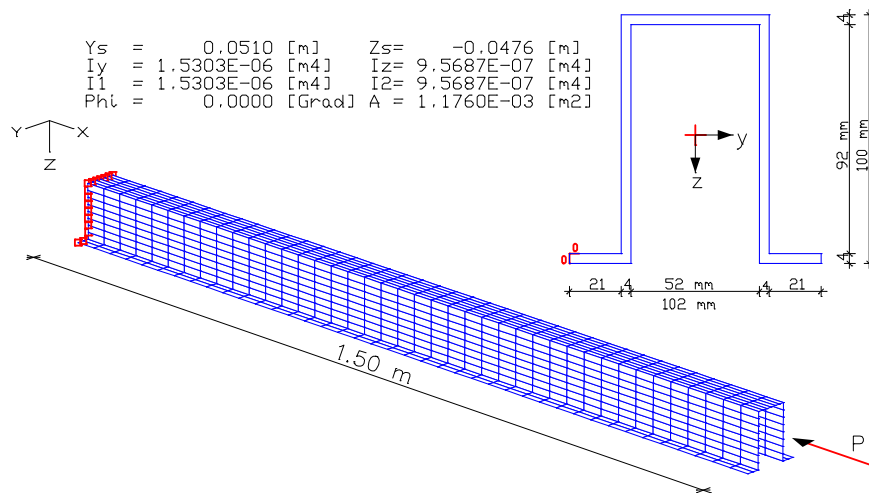
Nr.	Lastfaktor	rel. Tol.
1	3,5836e+00	6,2365e-07
2	7,0151e+00	4,7765e-06
3	1,9320e+01	2,6547e-05
4	3,2523e+01	5,5676e-05

**Knicklängen der Biegestäbe Lastfall 2**

Stab	Pki [kN]	EIy [kNm <sup>2</sup> ]	sk.y [m]	EIz [kNm <sup>2</sup> ]	sk.z [m]
1	-2866,85	1,4994e+04	7,185	2,1000e+08	850,270
2	-2866,85	1,4994e+04	7,185	2,1000e+08	850,270
3	-2866,85	1,4994e+04	7,185	2,1000e+08	850,270
4	-2866,85	1,4994e+04	7,185	2,1000e+08	850,270
5	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187
6	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187
7	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187
8	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187
9	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187
10	-3440,22	1,4994e+04	6,559	2,1000e+08	776,187

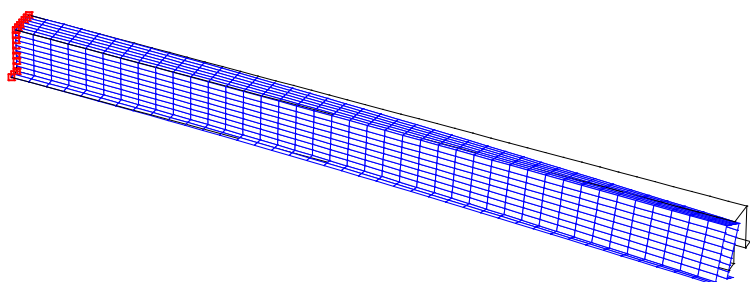
**Biegedrillknicken eines Schalenmodells**

Das nachfolgende Schalenmodell eines Druckstabes ist gemäß Euler-Fall 1 einseitig eingespannt gelagert. Profil und Systemabmessungen gehen aus den Abbildungen hervor. Das System ist aus Baustahl S235.

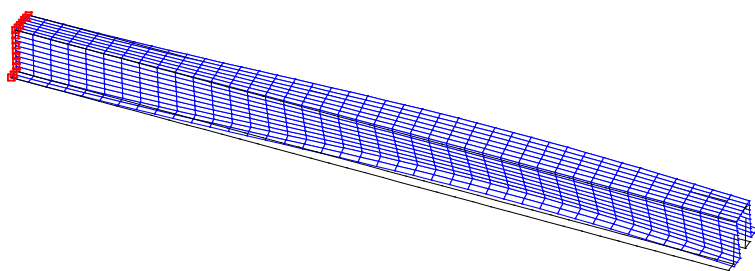


Die ideale Knicklast beträgt nach Petersen (1980, Formel nach Steinbach)  $P_{Ki} = 56,4 \text{ kN}$ . Die Last P ist durch eine Linienlast entlang der Elementkanten auf der Stirnfläche beschrieben. Ihre Lastsumme entspricht 1 kN.

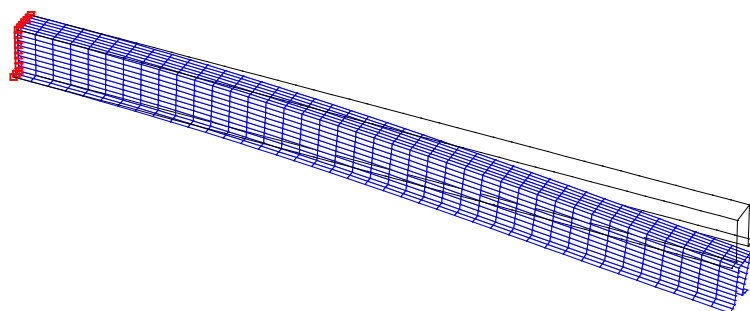
Bei obiger Systemeinteilung liefert die FEM-Berechnung die folgenden Ergebnisse für die ersten 4 Knickeigenformen. Einflüsse wie Schubverformungen und Verwölbungen sind hierbei erfasst.



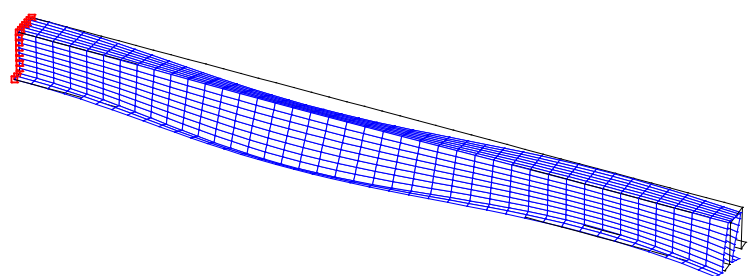
*Knickeigenform 1, Lastfaktor = 54,12 (Drillknicken)*



*Knickeigenform 2, Lastfaktor = 190,52 (Knicken um die z-Achse des Querschnitts)*



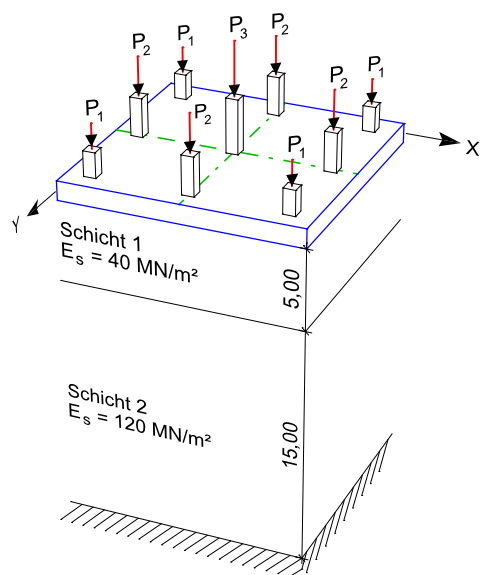
*Knickeigenform 3, Lastfaktor = 345,88 (Knicken um die y-Achse des Querschnitts)*



*Knickeigenform 4, Lastfaktor = 422,60 (Knicken um die z-Achse 2. Eigenform)*

## Silogründung nach Steifemodulverfahren

Die Anwendung des Verfahrens bei Plattenberechnungen wird für die Flachgründung eines Silos gezeigt (H.Ahrens und Winselmann, 1984). Die vier Silozellen werden über neun konstante Flächenlasten in die 0,8 m dicke, 10 x 10 m große Gründungsplatte eingeleitet, die auf dem geschichteten Baugrund aufliegt. Die Plattenabmessungen und die Lastaufstandsflächen können den Abbildungen entnommen werden.



- $P_1 = 520 \text{ kN}$
- $P_2 = 800 \text{ kN}$
- $P_3 = 1120 \text{ kN}$

Platte: C 20/25, EN 1992-1-1  
Elementdicke  $d = 0,8 \text{ m}$

### Bodenplatte mit Belastung

Den Plattenelementen muss ein Material mit einem Bettungsmodul in z-Richtung ( $k_{bz}$ ) zugeordnet sein. Er wird als Startwert für die Berechnung benötigt. Die Grenztiefe (Fels) des Halbraums kann in der letzten Bodenschicht mit einem sehr hohen Steifemodul (z.B. 100000 MN/m²) definiert werden.

### Materialkennwerte

Nr.	Material-Art	E-Modul [MN/m²]	G-Modul [MN/m²]	Quer-dehn.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m³]
1	C20/25-EN	30000	12500	0,20	1,000e-05	25,000

### Bettung

Qu.-Nr.	k <sub>bx</sub>	k <sub>by</sub> [MN/m³]	k <sub>bz</sub>	b <sub>x</sub>	b <sub>y</sub> [m]	b <sub>z</sub>
1	0	0	10	1,00	1,00	1,00

### Bodenkennwerte für das Steifemodulverfahren

Schicht-Nr.	ab z [m]	Steifemodul Es [MN/m²]
1	0,00	40,00
2	5,00	120,00
3	20,00	100000,00

Die letzte Bodenschicht erstreckt sich bis z=unendlich.

### Querschnittswerte

Nr. 1 Fläche  $d=0,8$

**Lastdaten Lastfall 1 (Silolast)**

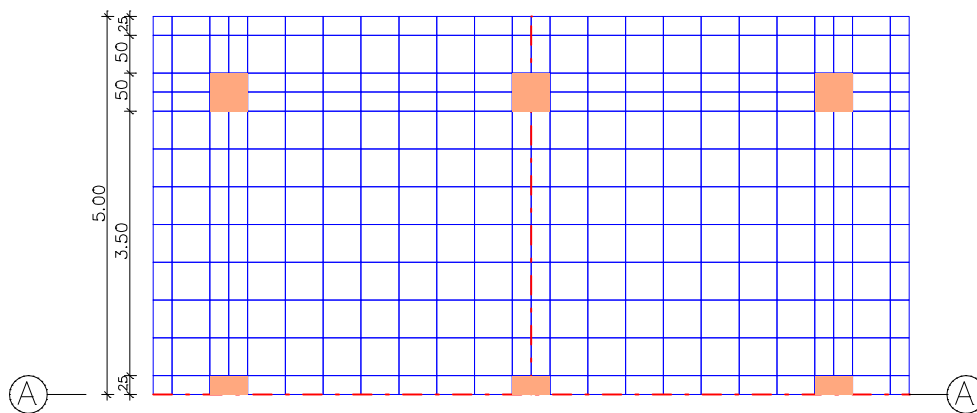
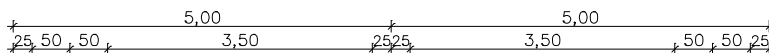
GR2 : Gleichlast-Rechteck (global)

	x [m]	y	z	qx [kN/m <sup>2</sup> ]	qy	qz
1. Punkt:	0,750	0,750	0,000	0,00	0,00	2080,00
2. Punkt:	1,250	0,750	0,000			
3. Punkt:	1,250	1,250	0,000			
1. Punkt:	4,750	0,750	0,000	0,00	0,00	3200,00
2. Punkt:	5,250	0,750	0,000			
3. Punkt:	5,250	1,250	0,000			
1. Punkt:	8,750	0,750	0,000	0,00	0,00	2080,00
2. Punkt:	9,250	0,750	0,000			
3. Punkt:	9,250	1,250	0,000			
1. Punkt:	0,750	4,750	0,000	0,00	0,00	3200,00
2. Punkt:	1,250	4,750	0,000			
3. Punkt:	1,250	5,250	0,000			
1. Punkt:	4,750	4,750	0,000	0,00	0,00	4480,00
2. Punkt:	5,250	4,750	0,000			
3. Punkt:	5,250	5,250	0,000			
1. Punkt:	8,750	4,750	0,000	0,00	0,00	3200,00
2. Punkt:	9,250	4,750	0,000			
3. Punkt:	9,250	5,250	0,000			
1. Punkt:	0,750	8,750	0,000	0,00	0,00	2080,00
2. Punkt:	1,250	8,750	0,000			
3. Punkt:	1,250	9,250	0,000			
1. Punkt:	4,750	8,750	0,000	0,00	0,00	3200,00
2. Punkt:	5,250	8,750	0,000			
3. Punkt:	5,250	9,250	0,000			
1. Punkt:	8,750	8,750	0,000	0,00	0,00	2080,00
2. Punkt:	9,250	8,750	0,000			
3. Punkt:	9,250	9,250	0,000			

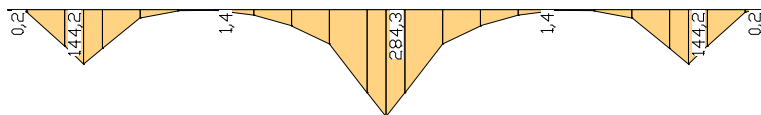
TH : Berechnungstheorie 1. Ordnung

**Globale Gleichgewichtskontrolle Lastfall 1**

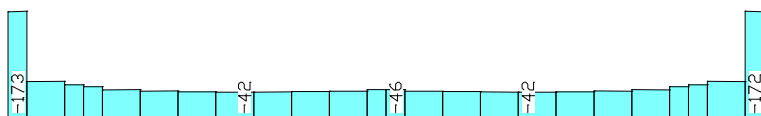
	Rx [kN]	Ry	Rz
Belastung :	0,00	0,00	6400,00
Auflagerkräfte :	0,00	0,00	0,00
Bettungskräfte :	0,00	0,00	6400,00
Summe :	0,00	0,00	0,00



Elementnetz und Abmessungen (Darstellung beschränkt auf das halbe System)



Momentenverlauf  $m_x$  [kNm/m] im Schnitt AA



Bodenpressung  $\sigma_z$  [kN/m<sup>2</sup>] im Schnitt AA

## Bauzustände, Kriechumlagerungen

Nachfolgend werden die Erzeugung und die Behandlung von Bauzuständen beschrieben. Hierbei wird für jeden Bauzustand eine eigene Projektdatei erzeugt, für die wiederum alle Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

An einem einfachen Beispiel wird anschließend die Berechnung der Kriechumlagerungen infolge einer Systemänderung mit Hilfe von Bauzuständen erläutert.

### Bauzustände

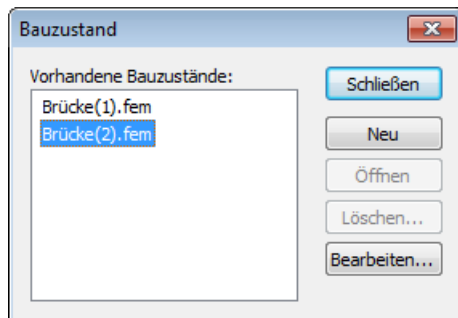
Das System wird mit allen Eigenschaften von einem Bauzustand zum nächsten 'vererbt'. Im Nachfolger werden dabei Informationen über seine Vorgänger abgelegt. Bei der Weiterverarbeitung des Nachfolgers wird dadurch die Mehrfachverwendung von Lastfällen, Elementen etc. unterbunden.

Der Zusammenhang der Projektdateien wird durch ein von Programm vergebenes Merkmal sichergestellt. Es ist daher nicht sinnvoll, unter Umgehung des Programms Bauzustände einzufügen oder zu löschen.

Bei der Berechnung eines Bauzustandes werden zunächst die Ergebnisse vom Vorgänger kopiert und so aufbereitet, dass sie mit Ergebnissen aus der aktuellen Datei kombiniert oder überlagert werden können.

Vorgehensweise:

1. Zunächst ist das Ausgangssystem für den 1. Bauzustand vollständig einzugeben.
2. Beim Speichern der Datei ist ein Dateinamen, auf (1) endet zu verwenden. Also z.B. Brücke(1).FEM (damit wird die Funktion *Bauzustand...* aktiv).
3. Die erforderlichen Berechnungen und Nachweise für dieses Projekt sind durchzuführen bevor der nächste Bauzustand bearbeitet wird.
4. Mit der Funktion *Bauzustand...* und deren Dialogoption *Neu* wird automatisch der 2. Bauzustand (hier: Brücke(2).fem) erzeugt und aktiviert.
5. Jetzt sind die gewünschten Systemveränderungen oder -ergänzungen vorzunehmen.
6. Sobald die Berechnung der Statik gestartet wird, werden die Ergebnisse aus dem Vorgängersystem kopiert und stehen für die Lastfallkombinationen und Überlagerungen zur Verfügung als wären Sie am aktuellen Bauzustand berechnet worden.
7. Auf diese Weise können immer weitere Bauzustände erzeugt werden.



Durch Doppelklicken auf den Bauzustand kann zwischen einzelnen Bauzuständen gewechselt werden.

Mit *Neu* wird hinter dem aktiven und markierten Bauzustand ein Nachfolger angehängt bzw. eingefügt.

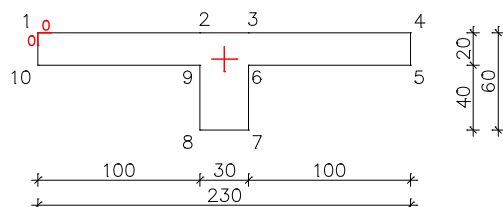
Ein Bauzustand sollte immer erst dann erzeugt werden, wenn der Vorgänger vollständig abgearbeitet ist. Spätere Änderungen an einem Bauzustand, die an den Nachfolger vererbte Informationen betreffen, müssen manuell mit der Option *Bearbeiten...* im Nachfolger nachgetragen werden.

Ausnahmen:

1. Änderungen innerhalb eines Lastfalls. Um die Ergebnisse zu aktualisieren, ist der Bauzustand und die Nachfolger der Reihe nach neu zu berechnen.
2. Änderungen der Elementeigenschaften.

### Kriechumlagerung infolge einer Systemänderung

Das Ausgangssystem, Bauzustand 1, besteht aus 2 Einfeldträgern mit Längen von 4 m und 6 m. Material: C20/25 nach EN 1992-1-1, Querschnitt: Plattenbalken.



Für das Ausgangssystem wird berechnet (Ergebnisse s. unten):

**Lastfall 1:** Eigenlast

**Lastfall 2:** Kriechen  $t_0 = 10$  bis  $t_1 = 30$  Tage; mit  $\varphi(t_1, t_0) = \varphi(30, 10) = 0,87$ ; kriecherzeugende Dauerlast: LF 1

Jetzt wird der Bauzustand 2 erzeugt und an diesem die Systemänderung vorgenommen. Durch Entfernen eines Gelenkes entsteht ein Durchlaufsystem. Hierauf wird die Ausbaulast aufgebracht und berechnet:

**Lastfall 3:** Ausbaulast 10 kN/m

Die Schnittgrößen und Verformungen nach 30 Tagen ergeben sich aus Eigengewicht + Kriechen + Ausbaulast:

**Lastfall 4:** Überlagerung LF 1, 2 und 3 (Superposition der Ergebnisse)

Die Kriechumlagerung bis zum Endzustand wird berechnet durch:

**Lastfall 5:** Kriechen  $t_1 = 30$  bis zum Endzustand;  $\Delta\varphi(\infty, 30) = \varphi(\infty, 10) - \varphi(30, 10) = 2,51 - 0,87 = 1,64$ ;  
kriecherzeugende Dauerlast: LF 4

Der Endzustand ergibt sich dann aus Lastfall 4 und 5:

**Lastfall 6:** Endzustand (Überlagerung der Ergebnisse LF 4 + LF 5)

Zur Addition der Ergebnisse verschiedener Lastfälle (auch aus unterschiedlichen Bauzuständen) eignet sich die Lastart *Superposition*.

	Bauzustand	Schnittgrößen $M_y$	Verformung (1000-fach überhöht)
Lastfall 1: Eigenlast	Brücke(1).fem		
Lastfall 2: Kriechen $\varphi(30, 10)$			
Lastfall 3: Ausbaulast	Brücke(2).fem		
Lastfall 4: LF 1+2+3			
Lastfall 5: Kriechen $\Delta\varphi(\infty, 30)$			
Lastfall 6: Endzustand			

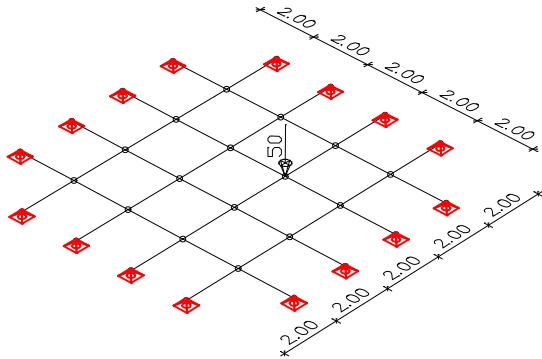
Zum Vergleich:

Einguss- system			
--------------------	--	--	--

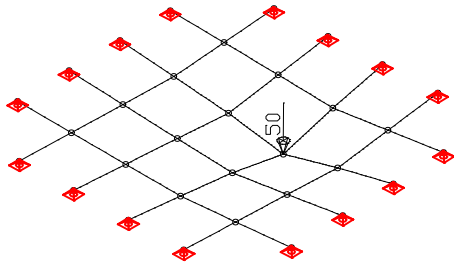
## Seilnetz

Dieses Beispiel behandelt ein ebenes Seilnetz. Wie in den nachfolgenden Abbildungen erkennbar, ergeben sich auf Grund der senkrecht zum Netz wirkenden Einzellast Normalkräfte in den Seilen.

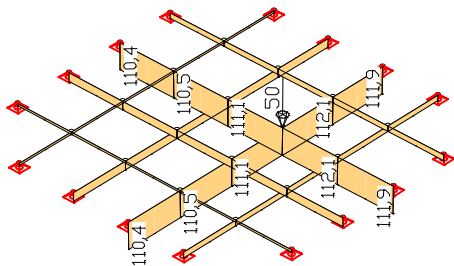
Seilquerschnitt: 1,625 cm<sup>2</sup>  
 E-Modul: 150000 MN/m<sup>2</sup>  
 Vorspannung: 0,0 kN



Systemabmessungen mit Belastung [kN]



Mit dem Faktor 2 überhöhte Verformungsfigur



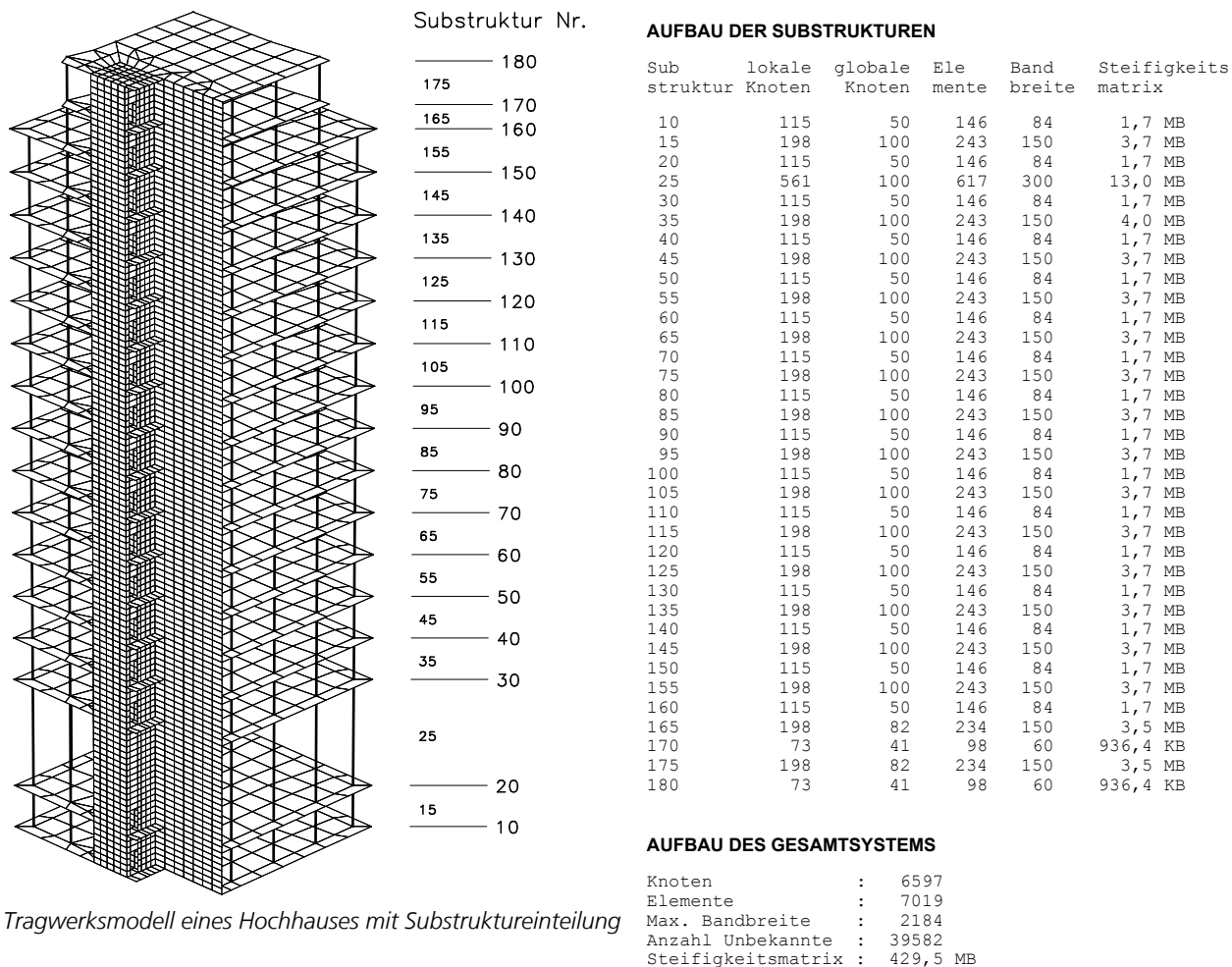
Schnittgrößen Nx [kN]



## Hochhaus nach Substrukturtechnik

Das nachfolgende Beispiel zeigt ein 17-geschossiges Hochhaus, das für eine dynamische Analyse als Gesamtsystem zu berechnen war. Aus diesem Grund wurden die Deckenplatten relativ grob diskretisiert. Eine deutlich feinere Einteilung für eine statische Analyse wäre ohne nennenswerte Erhöhung der Berechnungszeiten möglich, da hierdurch die Anzahl der globalen Knoten nicht zugenommen hätte.

Die Substruktureinteilung erfolgte so, dass jeweils eine Geschossdecke bzw. die vertikalen Bauteile eines Geschosses einer Substruktur zugeordnet wurden. Die Nummerierung ist aus der Abbildung ersichtlich.



Tragwerksmodell eines Hochhauses mit Substruktureinteilung

### Informationsprotokoll

Das Informationsprotokoll zur Substrukturierung zeigt, daß bis auf Substruktur 25 kleine Berechnungseinheiten zu kondensieren sind. Die Angaben zum Gesamtsystem lassen die Vorteile der Substrukturierung erkennen. Der Speicherplatzbedarf bei Berechnung eines Lastfalls beträgt hierfür 130 MB.

## Literaturhinweise

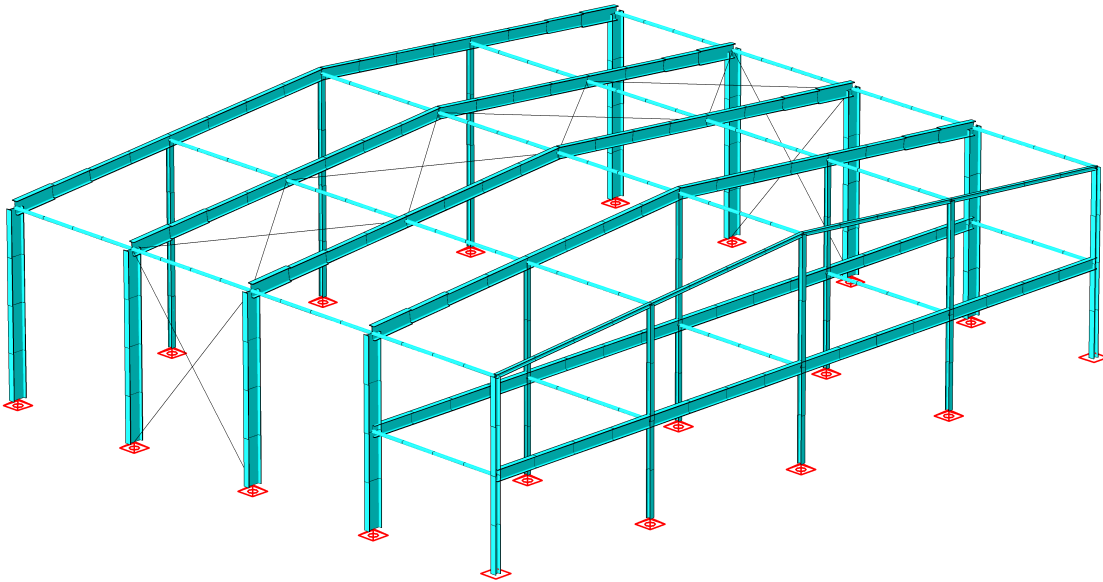
- Ahrens, H.; Winselmann, D.  
Finite Elemente, Anwendungen in der Baupraxis; FEM '84'.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1984.
- Bathe, K. J.  
Finite-Elemente-Methoden.  
Springer Verlag, Berlin 1986.
- Bathe, K. J.; N. Dvorkin E.  
A four-node plate bending element based on Mindlin/Reissner plate theory and a mixed interpolation.  
International journal for numerical methods in engineering, Vol. 21, S. 367-383  
John Wiley & Sons, New York 1985.
- Crisfield, M.A.  
Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures.  
Wiley Verlag, Chichester 1997.
- Duddeck, H.; Ahrens, H.  
Statik der Stabwerke, Betonkalender 1985.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1985.
- Ernst, G.C.; Smith, G.M.; Riveland, A.R.; Pierce, D.N.  
Basic reinforced concrete frame performance under vertical and lateral loads.  
ACI Material Journal 70(28), S. 261-269.  
American Concrete Institute, Farmington Hills 1973.
- Hampe, E.  
Statik rotationssymmetrischer Flächentragwerke.  
Band 2, Kreiszyinderschale.  
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1968.
- Hirschfeld, K.  
Baustatik Theorie und Beispiele  
Springer Verlag, Berlin 1969.
- Jofriet, J.C.; M. McNeice  
Finite element analysis of reinforced concrete slabs.  
Journal of the Structural Division (ASCE) 97(ST3), S.785-806.  
American Society of Civil Engineers, New York 1971.
- Katili, I.  
A new discrete Kirchhoff-Mindlin element based on Mindlin-Reissner plate theory and assumed shear strain fields  
Part I: An extended DKT element for thick-plate bending analysis.  
International journal for numerical methods in engineering, Vol. 36, S. 1859-1883  
John Wiley & Sons, New York 1993.
- Kindmann, R.  
Traglastermittlung ebener Stabwerke mit räumlicher Beanspruchung.  
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau,  
Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr. 813, Bochum 1981.
- König, G.; Weigler, H.  
Schub und Torsion bei elastischen prismatischen Balken.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1980.
- Krätzig, W.B.; Meschke, G.  
Modelle zur Berechnung des Stahlbetonverhaltens und von Verbundphänomenen unter Schädigungsaspekten.  
Ruhr-Universität Bochum, SFB 398, Bochum 2001.
- Link, M.  
Finite Elemente in der Statik und Dynamik.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
- Petersen, Ch.  
Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.  
Vieweg Verlag, Braunschweig 1980.
- Quast, U.  
Nichtlineare Stabwerksstatik mit dem Weggrößenverfahren.  
Beton- und Stahlbetonbau 100.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.

- 
- Rubin, H.; Aminbaghai, M.  
Ein Stabilitätsproblem mit Überraschungen.  
Stahlbau 66, Heft 5.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1997.
- Schwarz, H. R.  
Methode der finiten Elemente.  
Teubner Studienbücher.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
- Stempniewski, L.; Eibl, J.  
Finite Elemente im Stahlbetonbau, Betonkalender 1993.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1993.
- Wriggers, P.  
Nichtlineare Finite-Element-Methoden.  
Springer Verlag, Berlin 2001.
- Zienkiewicz, O. C.  
Methode der finiten Elemente, Studienausgabe.  
Hanser Verlag, München 1984.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.  
Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics.  
Butterworth-Heinemann Verlag, Oxford 2006.
- Zhi-Hua Zhong  
Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems.  
Oxford University Press, Oxford 1993.

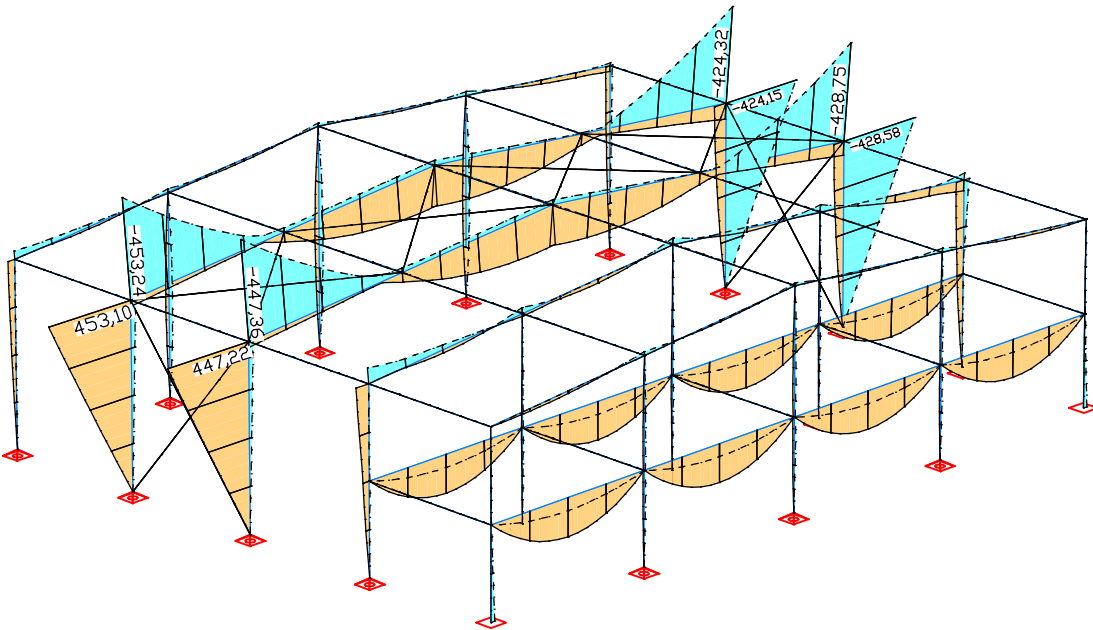
# Räumliches Stabwerk

## Grundlagen

Das Programmsystem *Räumliches Stabwerk* ist für die Berechnung ebener und räumlicher Stab- und Fachwerkstrukturen konzipiert. Als Anwendungsbeispiel wird im nachfolgenden Bild das Stabmodell einer Hallenkonstruktion gezeigt.



Statisches System in Querschnittsdarstellung



Biegemomente min,max  $M_y$  [kNm]

Anmerkungen zu den Berechnungsgrundlagen befinden sich im Kapitel „Finite Elemente / Grundlagen“.

## Strukturbeschreibung

Die Bearbeitung des Tragwerksmodells und die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgen mit den Funktionen des nachfolgend aufgeführten Menüs *Tragwerk*:

-  *Elementeingabe*
-  *Elementeigenschaften...*
-  *Elementinformationen*
-  *Darstellung...*
-  *Netzprüfung*
-  *Elementsystem*
-  *Nummern sortieren*
-  *Festhaltungen*
-  *Belastung*
-  *Vorverformung*
-  *Knoten bewegen*
-  *Verdichten*
-  *Koppelungen*
-  *Eingabedaten drucken...*
-  *Ergebnisse...*

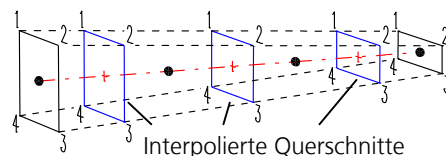
Die generelle Vorgehensweise bei der Eingabe eines Tragwerks, der Berechnung und der Ergebnisdarstellung ist in dem Dokument *Einführungsbeispiele.pdf* beschrieben, das im Programmverzeichnis installiert wird.

## Elementeingabe

Mit diesem Menüpunkt werden Stäbe eingegeben.

### Eingabe

- Anfangspunkt* Eingabe eines Stabes vom Anfangs- zum Endpunkt.
- Eigenschaften* Mit dieser Option wird der Dialog der Stabeigenschaften aufgerufen.
- Generier* Die eingegebene Strecke wird in  $n$  gleich lange Stäbe unterteilt. In Verbindung mit den Querschnittsarten Polygon, Rechteck und Stab können unterschiedliche Anfangs- und Endquerschnitte vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann die gewählte Anzahl von Querschnitten. Dies ermöglicht die Modellierung einer Voute. Bei Polygonquerschnitten wird die Lage der Polygonpunkte interpoliert. Dafür müssen die Anzahl und die Anordnung der Polygonpunkte übereinstimmen.



Bei der Stabeingabe im 3D-Modus wird ein Punkt in der lokalen xz-Ebene abgefragt. Bei der 2D-Eingabe verwendet das Programm die Standardausrichtung.

## Elementeigenschaften

Mit diesem Dialog werden Eigenschaften markierter Stäbe bearbeitet bzw. die Eigenschaften für neu zu erzeugende Stäbe voreingestellt. Der Dialog ist aus den folgenden Seiten aufgebaut:

- *Allgemein*
- *Ersatzstablänge*
- *Querschnitt*

### Allgemein

Diese Dialogseite zeigt die allgemeinen Stabeigenschaften.

#### Knoten

Anzeige der Knotenkoordinaten.

#### Länge

Anzeige der Stablänge [m].

#### Winkel

Verdrehung des lokalen Koordinatensystems um die x-Achse bezüglich der Standardausrichtung in [°].

#### Gelenke

Die Gelenkeigenschaften können für jeden Freiheitsgrad getrennt angegeben werden. Bei gesetzter Markierung ist der betreffende Freiheitsgrad gelenkig definiert. Der Pfeil zeigt das gewählte Ende des Stabes. Ein Stab mit zwei Kugelgelenken wird wie ein Fachwerkstab behandelt.

#### Gelenkfedern

Federsteifigkeit [MN/m, MNm] mit der das jeweilige Stabende (a = Anfang, b = Ende) elastisch am Knoten angeschlossen ist. Ist kein Wert definiert, gilt die entsprechende Gelenkeigenschaft.

### Ersatzstablänge

Für den Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren können bei Stäben aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 die Ersatzstablängen definiert werden.

#### y-Achse, z-Achse

Die Vorgabe einer unter Berücksichtigung von Lagerung und Belastung zutreffenden Ersatzstablänge liegt im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders. Bei Eingabe von 0 wird für die betreffende Richtung kein Nachweis geführt.

#### Hinweis

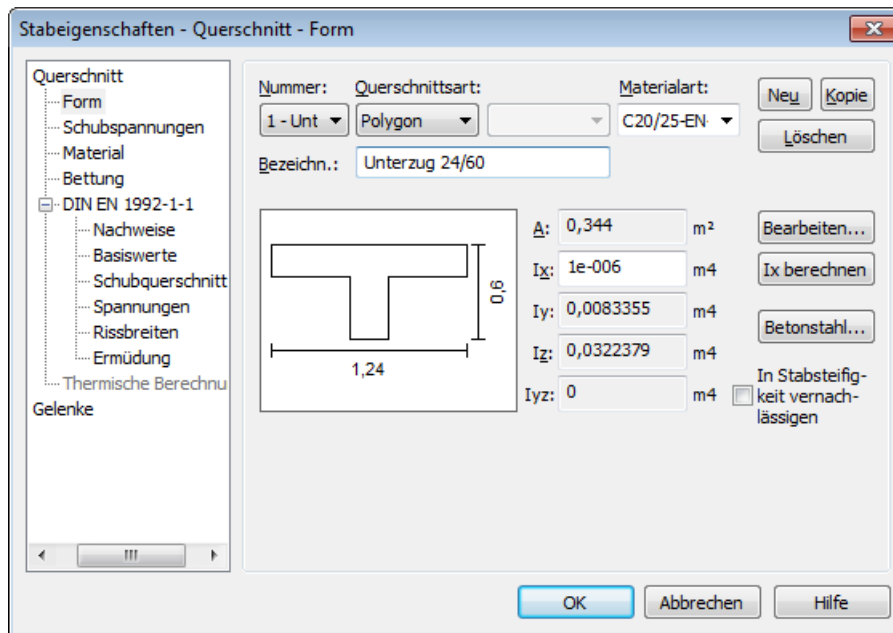
Wenn ein Bauteil mit konstantem Querschnitt in mehrere Stäbe geteilt ist, sollte allen Teilen die für das ganze Bauteil maßgebende Knicklänge zugeordnet werden. Eine rechnerische Ermittlung von Knicklängen und Knickeigenformen ist im FEM-Programm für ausgewählte Lastzusammenstellungen möglich (s. Beschreibung zur *Lastgruppe*).

### Querschnitt

Der Querschnitt beschreibt folgende Eigenschaften eines Stabes:

- Querschnittsform
- Vorgaben für die Schubspannungsberechnung
- Material
- Bettung
- Vorgaben für die Stahlbetonbemessung
- Vorgaben für die Thermische Berechnung
- Brandeinwirkung für den vereinfachten Nachweis nach EN 1995-1-2

Jeder Querschnitt wird eindeutig mit einer Nummer zwischen 1 und 9999 identifiziert. In der Regel ist ein Querschnitt nicht nur einem Stab, sondern einer Gruppe von Stäben zugeordnet.



### Nummer

Auswahl des Querschnitts. Bei einem neu erzeugten Querschnitt kann die Nummer frei vergeben werden. Eine nachträgliche Umnummerierung von Querschnitten ist in der Datenbasis über das Kontextmenü des Unterpunktes *Strukturbeschreibung / Querschnittswerte* möglich.

### Querschnittsart

- *Stab*
- *Polygon*
- Stahlbauprofil mit Profilnummer.
  - IPe*: Mittelbreite I-Träger nach DIN 1025 Teil 5 und Euronorm 19-57.
  - HEA*: Breite I-Träger, leichte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPBl-Reihe nach DIN 1025 Teil 3.
  - HEB*: Breite I-Träger nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPB-Reihe nach DIN 1025 Teil 2.
  - HEM*: Breite I-Träger, verstärkte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPbv-Reihe nach DIN 1025 Teil 4.
  - I*: Schmale I-Träger nach DIN 1025 Teil 1.
  - U*: U-Stahl nach DIN 1026.
  - T*: T-Stahl nach DIN 1024.
- *Parameter*: Parametrisiertes Stahlbauprofil mit I-, L-, T-, U-, rohr- oder kastenförmiger Querschnittsgeometrie.
- *Bibliothek*: Querschnittsbibliothek mit Stahlbauprofilen.
- *Datenbank*: Profil aus der Anwenderdatenbank (*Anwend.pro*).
- *Rechteck*
- *Zugstab*

### Materialart

- *B25 bis B55*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045:1988, Tab.1.
- *C12/15 bis C100/115*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1 bzw. ENV 1992-1-1:1991 (ab *C55/67* nur zur Bemessung nach DIN 1045-1).
- *LC12/13 bis LC60/66*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1.
- *C12/15-EN bis C90/105-EN*: Betonfestigkeitsklassen nach EN 1992-1-1.
- *C12/15-EN-D bis C100/115-EN-D*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1.
- *ÖC16/20 bis ÖC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach ÖNORM B 4710-1.
- *ÖNB40*: Betonfestigkeitsklasse nach ÖNORM B 4200-10.
- *ÖNBeton*: Beton nach ÖNORM mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *SC12/15 bis SC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SLC12/13 bis SLC50/55*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SCX*: Beton nach SIA262 bzw. SN EN206-1 mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *S235, S275, S355, S450*: Baustahl gemäß DIN 18800 T1, Tab.1.
- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 10025-2.
- *NH1, NH2, NH3*: Nadelholz der Güteklassen I, II und III nach DIN 1052:1988.

- *BSH1* , *BSH2*: Brettschichtholz der Güteklassen I und II nach DIN 1052:1988.
- *C14* bis *C50*, *D18* bis *D70*: Vollholz nach EN 338.
- *GL20h* bis *GL32h*, *GL20c* bis *GL32c*: Brettschichtholz nach EN 14080.
- *Frei*: Anwenderdefiniertes Material.
- *Beton*: Anwenderdefinierter Beton.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

### Neu

Einen neuen Querschnitt erzeugen.

### Kopie

Den aktuellen Querschnitt kopieren.

### Löschen

Den aktuellen Querschnitt löschen.

### Bezeichnung

Der Querschnitt kann mit einem beliebigen Text bezeichnet werden.

Je nach Querschnitts- und Materialart stehen weitere Dialogseiten zur Verfügung:

- *Form*
- *Schubspannungen*
- *Material*
- *Bettung*
- *DIN 1045-1*
- *DIN EN 1992-1-1*
- *EN 1992-1-1*
- *ÖNORM B 4700*
- *ÖNORM EN 1992-1-1*
- *SIA 262*
- *SS EN 1992-1-1*
- *EN 1995-1-2*
- *Thermische Berechnung*

## Polygonquerschnitt

### A

Anzeige der berechneten Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

### I<sub>x</sub>

Torsionsträgheitsmoment [m<sup>4</sup>].

Vom Programm wird im Hinblick auf die Anwendung im Massivbau eine sehr kleine Steifigkeit vorgeschlagen. Bei dynamischen Berechnungen führt eine zu kleine Torsionssteifigkeit in der Regel zu unerwünschten Eigenformen (Torsionsschwingungen), so dass ein realistischer Wert anzusetzen ist.

### I<sub>x</sub> berechnen

Die Torsionsträgheitsmoment des Polygons wird berechnet und in das Textfeld für  $I_x$  eingetragen.

### I<sub>y</sub>, I<sub>z</sub>, I<sub>yz</sub>

Anzeige der berechneten Trägheitsmomente [m<sup>4</sup>].

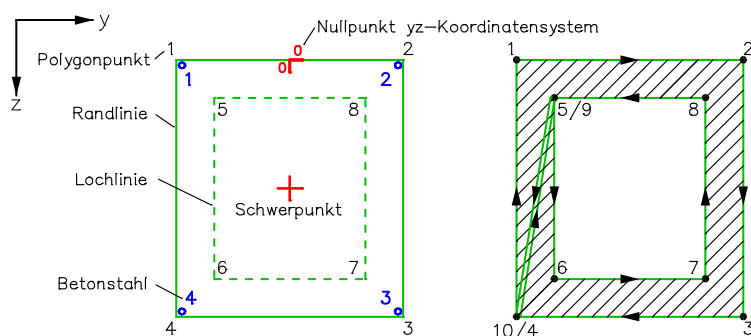
### I<sub>yz</sub> in Stabsteifigkeit vernachlässigen

Bei der statischen und dynamischen Berechnung wird  $I_{yz}$  vernachlässigt.

### Bearbeiten...

Die graphische Bearbeitung der Querschnittsgeometrie erfolgt in einem eigenen Fenster. Der Querschnitt wird mit Rand- und Lochlinien definiert.





Die interne Speicherung geschieht durch ein Polygon, das nach der Umfassungsmethode berechnet wird. Die Anzahl der Polygonpunkte ist auf 200 begrenzt.

Die Rand- und Lochpunkte werden automatisch so nummeriert, dass der am weitesten links liegende Punkt die Nummer 1 erhält. Kommen hierfür mehrere Punkte in Betracht, wird von diesen derjenige mit dem kleinsten z-Wert gewählt.

Wenn die Polygonpunkte in der Datenbasis eingegeben wurden, bleibt die dort festgelegte Punktfolge auch in der graphischen Darstellung erhalten, solange das Polygon nicht modifiziert wird.

### Betonstahl...

Eigenschaften jeder Betonstahllage der markierten Querschnitte.

## Datei-Menü des Bearbeitungsfensters

### Neu

Mit einem neuen Querschnittspolygon beginnen.

### Einfügen

Ein Querschnittspolygon, Stahlbau- oder Datenbankprofil in das aktuelle Polygon einfügen.

### In Datenbank speichern...

Das aktuelle Querschnittspolygon in der Anwenderdatenbank *Anwend.pro* speichern.

### Import

Eine Zeichnung einer Projektdatei oder eine DXF-Datei importieren.

### Export

Das Querschnittspolygon als DXF-Datei exportieren.

## Polygon-Menü des Bearbeitungsfensters

### Linie

Einzelne Rand- oder Lochlinie eingeben.

### Kreis Rohr Rechteck Unterzug Überzug

Diese Querschnittsformen werden nach Eingabe der maßgeblichen Parameter automatisch erzeugt. Wahlweise lässt sich gleichzeitig Betonstahl im vorgegebenen Randabstand definieren.

### Betonstahl

Der Betonstahl für die Biegebemessung kann frei im Querschnitt positioniert werden. Zur Unterstützung wird eine Hilfslinie mit dem eingestellten Randabstand dargestellt. Die angezeigte Betonstahlnummer dient zur Identifizierung der Stahllagen bei der Ergebnisausgabe. Die Stahleigenschaften (z.B. Streckgrenze  $f_{yk}$ , Grundbewehrung) sind voreingestellt. Für markierten Betonstahl lassen sich die Eigenschaften über das Kontextmenü bearbeiten.

### Beschriften

Beschriftung des Polygons ein- oder ausschalten.

 **Erneuern**

Angezeigte Beschriftung des Polygons erneuern.

 **Einstellen**

Art und Umfang der Beschriftung sowie den Randabstand für die Eingabe des Betonstahls einstellen.

 **Rand Loch übernehmen**

Rand- bzw. Lochlinien aus anderen Linien übernehmen, z.B. nach dem DXF-Import einer Querschnittszeichnung.

 **Querschnittswerte**

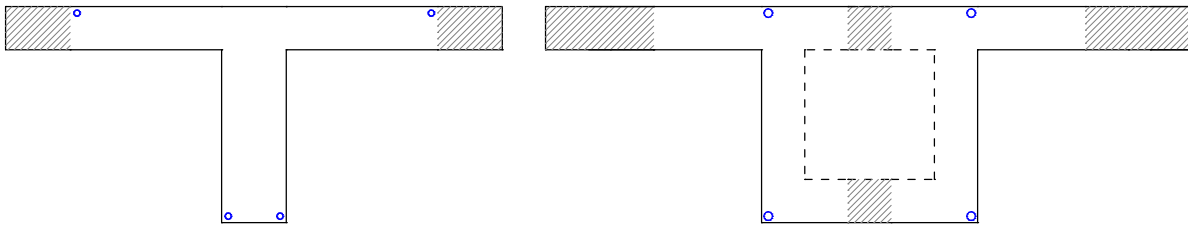
Ausführliche Querschnittswerte anzeigen (z.B.: Schubmittelpunkt, Widerstandsmomente, Einheitsverwölbung  $\omega$ ).

**Mitwirkende Breite**

Definition der mitwirkenden Plattenbreite durch Markieren der Flächen außerhalb der mitwirkenden Breite. Dazu wird der Querschnitt automatisch in Dreiecke eingeteilt. Die markierten Flächen werden bei der Berechnung der Schwerpunktskoordinaten und der Biegeträgheitsmomente nicht berücksichtigt.

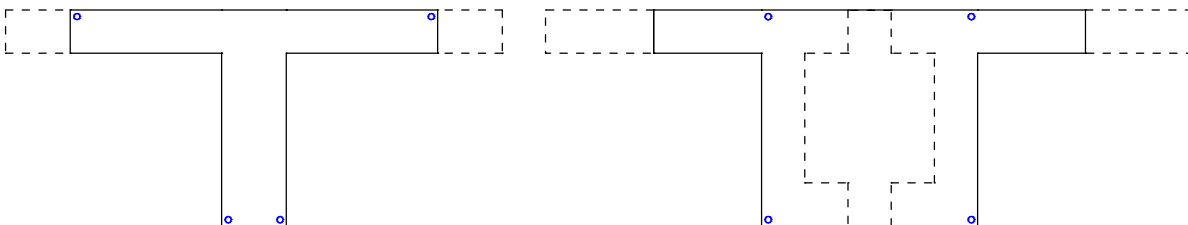
Bei Stahlbetonquerschnitten wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Eingabe des Vollpolygons mit Polygonpunkten an den Grenzen der mitwirkenden Breite
- Markierung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Flächen
- Positionierung der Betonstahllagen innerhalb der mitwirkenden Breite



Schraffierte Darstellung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Querschnittsteile

Alternativ kann das Querschnittspolygon mit den auf die mitwirkende Breite reduzierten Querschnittsabmessungen eingegeben werden.



Auf die mitwirkende Plattenbreite reduzierte Querschnittspolygone

**Betonstahl - Eigenschaften**

**Streckgrenze  $f_{yk}$**

Streckgrenze des Betonstahls [MN/m<sup>2</sup>].

**Grundbewehrung**

Die Grundbewehrung ist die Ausgangsbewehrung für die Bemessung. Sie wird in keinem Fall vom Programm verringert. Durch Eingabe unterschiedlicher Grundbewehrungen kann ein Verhältnis der zu ermittelnden Stahlquerschnitte untereinander festgelegt werden.

**Grundbewehrung fixieren**

Eine fixierte Stahllage erfährt bei der Bemessung keine Erhöhung.

**Zv0**

Diese Kraft dient zur Berücksichtigung einer Vordehnung  $\epsilon_0 = Z_{v0} / E \cdot A$  bei der Berechnung der Spannungen des Betonstahls.

## Rechteckquerschnitt

Für diese Querschnittsart kann kein Stahlbetonnachweis durchgeführt werden.

### Breite $d_y$ , Höhe $d_z$

Ausdehnung des Rechtecks in lokaler y- bzw. z-Richtung der Stäbe [m].

## Stabquerschnitt

Für diese Querschnittsart können keine Nachweise geführt werden.

### A

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

### $I_x$ , $I_y$ , $I_z$ , $I_{yz}$

Trägheitsmomente [m<sup>4</sup>].

### Längstragwirkung

- *Standard*: Die Stäbe übertragen Druck- und Zugkräfte.
- *Nur Druckkraft*: Die Stäbe übertragen nur Druckkräfte.
- *Nur Zugkraft*: Die Stäbe übertragen nur Zugkräfte.

Die Verwendung von Druck- oder Zugstäben führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Dabei ist das Superpositionsprinzip nicht mehr gültig.

## Zugstab

Diese Querschnittsart beschreibt Stäbe ohne Druckfestigkeit. Diese sollten nach Möglichkeit gelenkig angeschlossen sein. Die Verwendung dieser Querschnittsart führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Das Superpositionsprinzip ist dabei nicht mehr gültig. Für Zugstäbe können keine Nachweise geführt werden.

### A

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

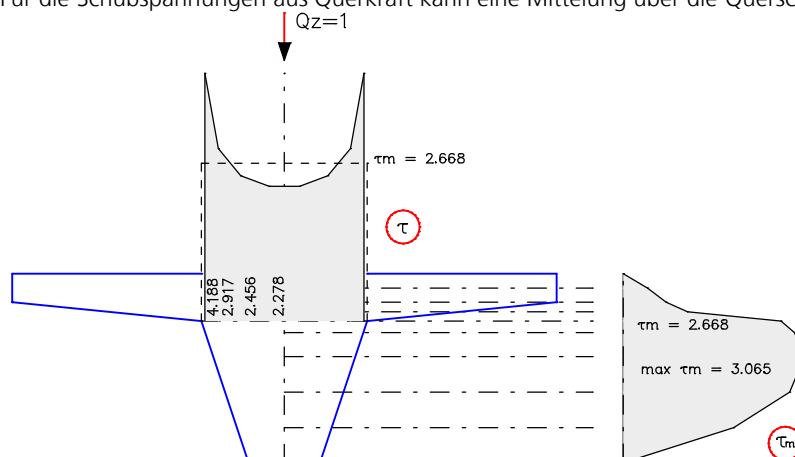
## Schubspannungen

Die linear-elastischen Schubspannungen werden standardmäßig nach der Theorie dickwandiger Profile berechnet.

Im Ausrundungsbereich von Walzprofilen oder in stumpfen Ecken von geschweißten Profilen ergeben sich danach größere Spannungen als nach der Theorie dünnwandiger Profile.

Mit der Angabe der maximalen Blechdicke (offene Profile) oder des Torsionswiderstandsmomentes (Kastenprofile) lassen sich die Torsions-Schubspannungen auf den Maximalwert nach der Theorie dünnwandiger Profile begrenzen.

Für die Schubspannungen aus Querkraft kann eine Mittelung über die Querschnittsbreite gewählt werden.



Schnittführung und Schubspannungsverteilung aus Querkraft am Querschnittspolygon nach der Theorie dickwandiger Profile ( $\tau$ ) und nach Mittelung ( $\tau_m$ )

## Material

### E-Modul

Elastizitätsmodul [MN/m<sup>2</sup>].

### G-Modul

Schubmodul [MN/m<sup>2</sup>].

### Gamma

Spezifisches Gewicht des Materials [kN/m<sup>3</sup>]. Dieses wird bei der Lastart *Eigenlast* verwendet.

### Alpha.t

Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K].

### fyk

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze einzugeben [MN/m<sup>2</sup>].

### Rohdichte

Rohdichte für Leichtbeton und Holz [kg/m<sup>3</sup>].

### ke für E-Modul

Faktor zur Berechnung des Elastizitätsmoduls nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.3.3.

### Nutzungsklasse

Bei Querschnitten aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 ist für die Holznachweise eine Nutzungsklasse auszuwählen.

Bei der Materialart *ÖNBeton* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend ÖNORM B 4700, Tabelle 4 definiert.

### fcwk

Charakteristische Würfeldruckfestigkeit, Nennfestigkeit der Festigkeitsklasse [MN/m<sup>2</sup>].

### fctm

Mittlere Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fctk

Charakteristische Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### taud

Rechenwert der Schubspannung [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *SCX* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend SIA 262, Tabelle 3 definiert.

### fck

Charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fck,cube

Charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fctm

Mittelwert der Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *Frei* sind für eine nichtlineare Systemanalyse zusätzlich deren Festigkeitsgrenzen anzugeben.

### Druckfestigkeit

Streckgrenze bei Druckspannungen  $f_{y,Druck}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

## Zugfestigkeit

Streckgrenze bei Zugspannungen  $f_{y,Zug}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

## Material linear

Der Schalter bewirkt auch in der nichtlinearen Systemanalyse ein linear-elastisches Materialverhalten dieses Querschnitts. Grundsätzlich können nur Polygonquerschnitte, Datenbankquerschnitte und Stahlbauprofile einer nichtlinearen Analyse unterworfen werden. Bei allen übrigen Querschnittsarten und bei den Materialarten *Beton* sowie *Bauholz* wird elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

## Hinweis

Der Elastizitätsmodul geht unter anderem in die Spannungs-Dehnungsfunktion nach EN 1992-1-1, Gleichung (3.14), und SIA 262, Gleichung (28), ein. Die Funktion besitzt eine Polstelle, die sich bei Abminderung des vorgegebenen Elastizitätsmoduls in den maßgebenden Dehnungsbereich verschieben kann. Daraus resultierende Ergebnisse der nichtlinearen Systemanalyse sowie der Stahlbetonnachweise können dann beeinträchtigt werden.

## Bettung

### Bettungsmodul x, y, z

Bettungsmoduln für die Stabrichtungen [MN/m<sup>3</sup>]. Die Bettungsmoduln können zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Stabes linear veränderlich sein.

### Bettungsbreite

Für jeden Bettungsmodul ist die gebettete Breite [m] anzugeben.

### Druck- bzw. Zugfestigkeit (Nichtlineare Systemanalyse)

Die hier definierten Festigkeiten [MN/m<sup>2</sup>] des Bodens gelten ausschließlich für eine nichtlineare Systemanalyse. Hiermit kann eine bilineare Bettungskennlinie im Druck- und Zugbereich realisiert werden (siehe auch "Baugrundmodelle"). Die Festigkeiten können zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Stabes linear veränderlich sein.

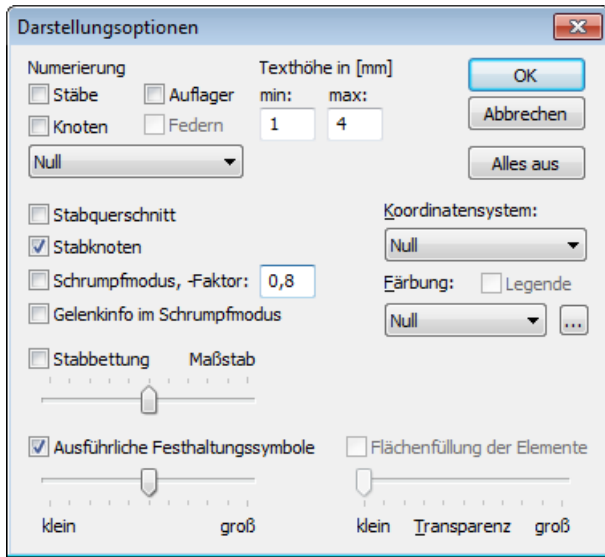
## Elementinformationen

Diese Funktion zeigt am Element und in der Statusleiste folgende Eigenschaften eines Stabes an:

- Stabnummer
- Knotennummern
- Stabsystem
- Querschnitt
- Material
- Gelenke

## Darstellung

Dieser Menüpunkt dient zur Darstellung und Kontrolle der Tragwerkseigenschaften.



### Numerierung

Stäbe, Knoten und Lager können mit Ihren Nummern beschriftet werden. Zusätzlich lassen sich Stäbe mit Material- oder Querschnittsnummern versehen. Die Anzeige der Nummern lässt sich auf Werte > 1 beschränken. Alternativ kann der Querschnittsname angeschrieben werden.

### Texthöhe

Minimale und maximale Texthöhe einstellen [mm].

### Stabquerschnitt

Der Stabquerschnitt wird an der Stabmitte eingezeichnet.

### Stabknoten

Die Stabknoten werden gekennzeichnet.

### Schrumpfmodus

Verkleinerte Darstellung der Stäbe ein- oder ausschalten. Die meisten Eingabefunktionen sind in diesem Modus inaktiv.

### Schrumpffaktor

Verkleinerungsfaktor für den Schrumpfmodus definieren.

### Gelenkinfo im Schrumpfmodus

Im Schrumpfmodus werden vorhandene Stabendgelenke beschriftet. Gelenkfedern werden mit „\*“ gekennzeichnet.

### Stabbettung

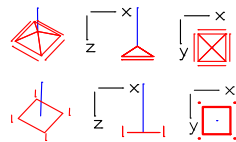
Die Bettungsmoduln werden entlang der Stabachsen mit gewähltem Maßstab aufgetragen.

### Ausführliche Festhaltungssymbole

Die Eigenschaften der Festhaltungen werden ausführlich dargestellt. Der Schieberegler verändert die Größe der verwendeten Symbole.

Symbole	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	Frei	Frei
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>
	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>

**Symbole**



$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
Frei	Frei	<b>Fest</b>	Frei	Frei	<b>Fest</b>
<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>

**Koordinatensystem**

Koordinatensystem für Stäbe oder Festhaltungen einschalten.

**Färbung**

Die Stäbe werden in der Farbe gezeichnet, die ihrer Material- oder Querschnittsnummer entspricht. Die Farbuordnung kann bei Bedarf modifiziert werden.

**Legende**

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

**Alles aus**

Schaltet alle Darstellungsoptionen aus.

**Netzprüfung**

Mit diesem Menüpunkt können Stäbe und Knoten überprüft werden.

**Knotenabstand**

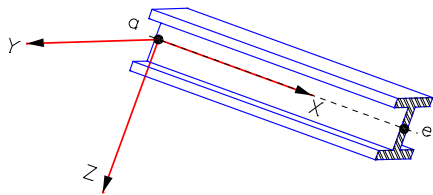
Die Funktion prüft, ob in der Nachbarschaft eines Knotens innerhalb der angegebenen Toleranz weitere Knoten liegen. Diese sogenannten doppelten Knoten werden mit einem roten Pfeil markiert und nach Abfrage verschmolzen. Dabei werden ihre Koordinaten gemittelt.

**Stababstand**

Es wird geprüft, ob Stäbe aufeinander liegen, z.B. aufgrund zweifacher Stabeingabe. Die gefundenen Stäbe werden mit einem roten Pfeil markiert.

**Elementsystem**

Mit diesem Menüpunkt kann das Koordinatensystem von markierten Stäben geändert werden.



- +x, -x      Durch Vertauschung des Anfangs- und Endknotens des Stabes wird erreicht, dass die positive bzw. negative x-Achse zum angegebenen Punkt zeigt.
- +z, -z      Die Orientierung des Querschnitts im Raum wird durch einen Punkt definiert. Der Punkt legt die Richtung der positiven bzw. negativen z-Achse fest. Optional kann die Orientierung auf die Standardausrichtung zurückgesetzt werden.
- y, z        Durch die Angabe zweier Punkte wird die Richtung der gewählten Achse festgelegt.
- Winkel      Der Stab wird um die Stabachse (lokale x-Achse) gedreht.

**Nummern sortieren**

Mit diesem Menüpunkt können Stab- und Knotennummern geändert werden.

**Eingabe**

- Sortieren      Knoten- oder Stabnummern geometrisch sortieren.
- Definieren     Definition neuer Startwerte und Inkremente für Knoten- und Stabnummern.
- Ändern        Knoten- und Stabnummern ändern.

## Festhaltungen

Mit dieser Funktion werden Festhaltungen eingegeben. Eine Festhaltung beschreibt die Lagerungsbedingungen eines Systemknotens. Die einzelnen Freiheitsgrade können dabei starr oder federnd gelagert werden. Die Richtung der Freiheitsgrade kann vom globalen Koordinatensystem abweichen. Die festgehaltenen Knoten sind durch einfache oder ausführliche rote Symbole gekennzeichnet (siehe *Darstellung*).

### Eingeben

Startet die Eingabe von Festhaltungen durch die Auswahl von Knoten. Die nachträgliche Bearbeitung geschieht mit den Kontextmenüfunktionen:

- Festhaltung
- Orientierung

### Info












Zeigt das Festhaltungssystem mit den gebundenen Freiheitsgraden für eine gewählte Festhaltung.

Hinweis: Bei aktiver Funktion können nur Festhaltungen markiert werden. Das erleichtert die Bearbeitung dieser Objekte.

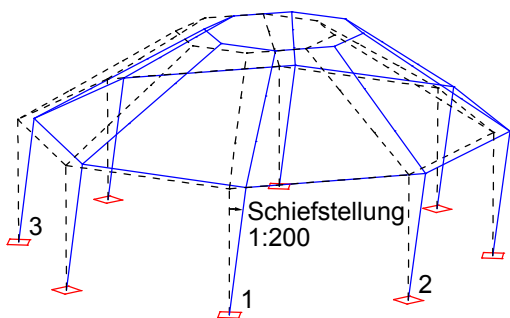
## Vorverformung

Mit dieser Funktion werden spannungsfreie Knotenverschiebungen für ein Tragwerk eingegeben und bearbeitet. Diese Knotenverschiebungen werden bei der Berechnung zu den ursprünglichen Systemkoordinaten addiert und dienen z.B. als Imperfektion für eine Berechnung nach Th. 2. Ordnung. Im Rahmen einer *Lastgruppe* wird die Vorverformung für die Berechnung aktiviert.

Mit den folgenden Optionen können Vorverformungen definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

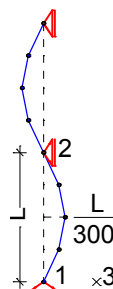
-  Erstellt eine Kopie der aktuellen Vorverformung.
-  Addiert eine ausgewählte Vorverformung oder Knickeigenform zur aktuellen Vorverformung hinzu.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Vorverformungsdarstellung.
-  Erstellt eine neue Vorverformung.
-  Zeigt eine bestehende Vorverformung.
-  Ändert die Nummer der aktuellen Vorverformung.
-  Vorverformung löschen.
-  Vorverformung bearbeiten.
-  Startet die Eingabe einer Vorkrümmung.
-  Startet die Eingabe einer Schiefstellung.

Eine Absoluteingabe der Vorverformung bezieht sich auf das ursprüngliche System, eine Relativeingabe auf das bereits verformte System.



Schiefstellung einer Hallenkonstruktion

1: 1. Punkt Basislinie, 2: 2. Punkt Basislinie, 3: Punkt in Basisebene



Vorkrümmung einer Stütze



## Knoten bewegen

Mit dieser Funktion kann die Lage von ausgewählten Knoten verändert werden. Bei einem einzelnen Stabknoten wird dessen neue Position abgefragt. Sollen mehrere Stabknoten bewegt werden, ist die Option *Gruppe* oder *Stäbe* zu wählen.

### Gruppe

Stabknoten wählen, welche bewegt werden sollen.

### Stäbe

Stäbe wählen, deren Knoten bewegt werden sollen.

### Verschiebungsvektor

Bewegen durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert.

### Rotieren

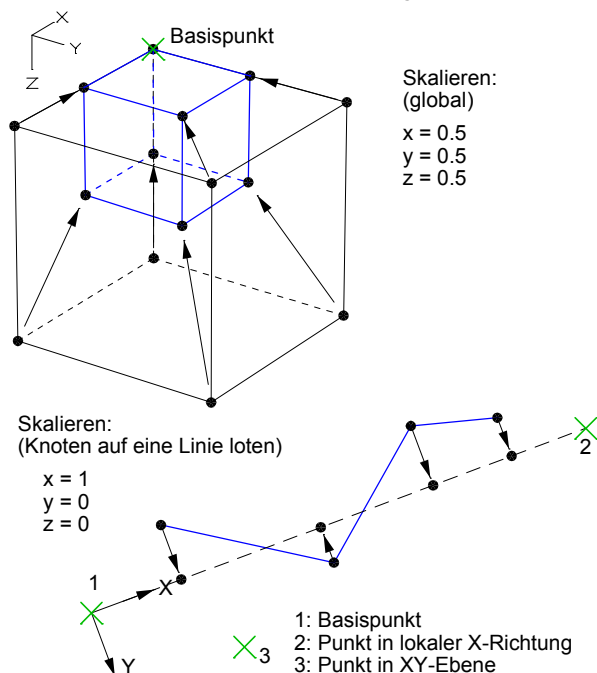
Bewegen durch Rotation. Im 2D-Modus wird ein Drehpunkt, im 3D-Modus eine Drehachse definiert.

### Spiegeln

Bewegen durch Spiegelung. Im 2D-Modus wird eine Spiegelachse, im 3D-Modus eine Spiegelebene definiert.

### Skalieren

Bewegen durch Skalierung im globalen oder einem lokalen Bezugssystem. Mit einem Skalierungsfaktor von Null können Knoten auf eine Achse oder Ebene ausgerichtet werden.



Auf Wunsch werden verschobene Knoten, die mit nicht markierten Knoten zusammenfallen, mit diesen zusammengeführt.

## Knoten oder Stäbe suchen

Wird ein Knoten mit einer bestimmten Nummer gesucht, sind die Funktionen *Knoten markieren* und *Knoten bewegen* hilfreich. Innerhalb dieser Funktion kann die gesuchte Knotennummer angegeben werden.

Wird ein Stab mit einer bestimmten Nummer gesucht, können die Funktionen *Elementinformationen* oder *Markieren* Verwendung finden. In beiden Funktionen kann die Stabnummer angegeben werden. Ist der Stab trotz Markierens nicht erkennbar, können mit Hilfe der Funktion *Elementeigenschaften* weitere Informationen abgefragt werden. Die Farbe und der Layer der markierten Objekte werden in der Symbolleiste angezeigt.

## Verdichten

Mit dieser Funktion können vorhandene Stäbe verdichtet werden.

### Punkt

Am eingegebenen Punkt wird auf der Stabachse ein Knoten eingefügt.

### Teilen

Markierte Stäbe werden geteilt. Die gewünschte Anzahl der Teile wird abgefragt.

### Anpassen

An den markierten Stäben wird geprüft, ob Knoten an deren Achsen stoßen. Bei Bedarf werden die betroffenen Stäbe an diesen Knoten geteilt.

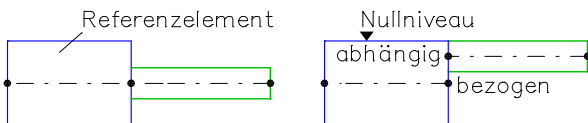
## Stäbe ausrichten

Mit dieser Funktion werden markierte Stäbe auf einen Referenzstab ausgerichtet.

Die lokalen z-Achsen der Stäbe müssen in die gleiche Richtung zeigen. Die Ausrichtung erfolgt durch eine Verschiebung in lokaler z-Richtung, so dass die Nullniveaus dem des Referenzstabes entsprechen. In der Standardeinstellung liegt das Nullniveau bei  $z = 0$  im Querschnittspolygon. Darüber hinaus kann es folgendermaßen festgelegt werden:

- $z=0$  (Standard)
- Oberseite
- Unterseite

Zusätzlich werden zwischen den alten und den neuen Knoten starre Koppelungen erzeugt. Der obere Knoten der Koppelung wird abhängiger Knoten, sofern an diesem keine Festhaltung definiert ist. Bereits vorhandene Koppelungen bleiben erhalten.



Stäbe vor und nach dem Ausrichten (Standardfall)

## Koppelungen

Mit der Funktion *Koppelungen* lassen sich kinematische Abhängigkeiten zwischen den globalen Freiheitsgraden zweier Stabknoten festlegen, indem die Knotenfreiheitsgrade eines abhängigen Knotens über eine Bedingungsgleichung durch die Freiheitsgrade des bezogenen Knotens ausgedrückt werden.

$$\text{z.B. } u_{z,\text{abh.}} = f_1 \cdot u_{x,\text{bez.}} + f_2 \cdot u_{y,\text{bez.}} + f_3 \cdot u_{z,\text{bez.}} + f_4 \cdot \varphi_{x,\text{bez.}} + f_5 \cdot \varphi_{y,\text{bez.}} + f_6 \cdot \varphi_{z,\text{bez.}}$$

mit

$f_1, f_2, f_3$  Faktoren für die Verschiebungen,

$f_4, f_5, f_6$  Faktoren für die Verdrehungen.

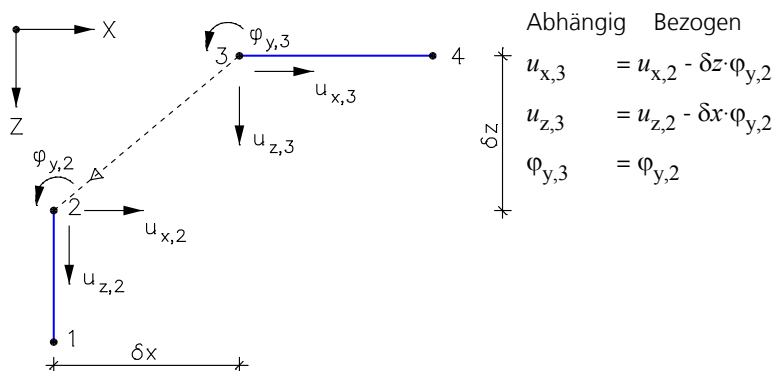
An einen bezogenen Knoten dürfen beliebig viele abhängige Knoten gekoppelt werden. Knoten mit Festhaltungen dürfen nicht als abhängige Knoten definiert werden. Die Koppelungen werden gestrichelt dargestellt. Zusätzlich zeigt ein Pfeil auf den bezogenen Knoten.

Nach Auswahl der abhängigen Knoten und des bezogenen Knotens ist die Koppelungsart festzulegen.

### Art

- *Starr*: Starre Koppelung (Kürzel: SS).
- *Gelenkig*: Einseitig gelenkige Koppelung mit Kugelgelenk am abhängigen Knoten (Kürzel: GS).
- *ux, ... phi.z*: Abhängiger Freiheitsgrad der benutzerdefinierten Bedingungsgleichung. Die Faktoren für die Verschiebungen und Verdrehung der Bedingungsgleichung sind festzulegen.

### Bedingungsgleichungen für eine starre Koppelung in der xz-Ebene












## Belastung

Das folgende Kapitel beschreibt die Lasteingabe sowie die verschiedenen Lastarten.

Die eingegebenen Lasten werden durch Symbole dargestellt. Im 3D-Modus werden Einzel- und Linienlasten nach ihren Lastordinaten skaliert. Bei Einzellasten wird die resultierende Belastungsrichtung gezeichnet. Linienlasten und Linienmomente erhalten zur Orientierung einen Pfeil.

Stablasten wirken generell auf die Schwereachse der Stäbe. Bei unsymmetrischen Querschnitten wird der Einfluss der Exzentrizität des Schubmittelpunkts auf die Festeinspannreaktionen nicht berücksichtigt.

Ein Lastfall besteht aus einer oder mehreren Lasten. Mit den folgenden Optionen können Lastfälle definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

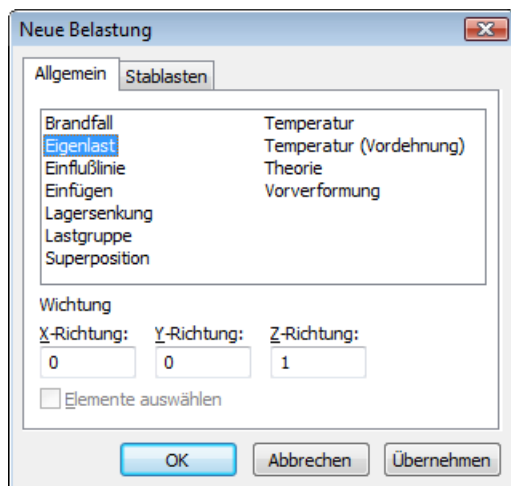
-  Erstellt eine Kopie des aktuellen Lastfalls.
-  Generiert Lastfälle nach den Vorschriften der Funktion *Generieren*. Dabei werden entweder alle oder nur die markierten Lasten vervielfältigt.
-  Importiert Lastdaten.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Belastungsdarstellung.
-  Erstellt einen neuen Lastfall.
-  Zeigt einen bestehenden Lastfall.
-  **Nr.** Ändert die Nummer und die Bezeichnung des aktuellen Lastfalls.
-  Startet die Belastungseingabe.

Im Datenbaum können Lastfälle gruppenweise unnummeriert werden.

Mit der Kontextfunktion *Belastung skalieren* können die Ordinatenwerte von mehreren markierten Lasten mit einem Faktor skaliert werden.

## Eingabe

Dieser Dialog dient zur Eingabe von Belastungen innerhalb eines Lastfalls.



Die Lastarten werden auf den nachfolgenden Seiten erläutert. Zur eindeutigen Identifizierung sind sie mit Lastkürzeln versehen.

## Eigenlast

Das gesamte Tragwerk wird mit seiner Eigenlast beansprucht (Lastkürzel: *EG*).

### Eingabe

Wichtung *X*, *Y*,  
*Z-Richtung*

Die Wichtungsfaktoren erlauben die Festlegung der Wirkungsrichtung sowie eine Skalierung der Eigenlast. Sie beziehen sich auf das globale Koordinatensystem.

## Einflusslinie

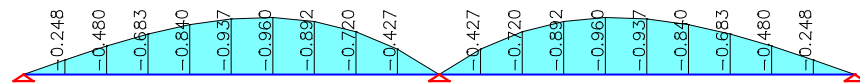
### Eingabe

Auswahl des gewünschten Stabes (Lastkürzel: *EFL*).

*Aufpunkt* Aufpunkt im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang.

*Einflusslinie* "Nx", "Qy", "Qz", "Mx", "My", "Mz".

Die Ordinaten der resultierenden Einflusslinie ergeben sich als Verformung in Richtung der auszuwertenden Last.



Einflusslinie "My" für einen Durchlaufträger

## Einfügen von Lastfalldaten

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *EINF*) können Lastdaten anderer Lastfälle in den aktuellen Lastfall gewichtet eingefügt werden. In eingefügten Lastfällen dürfen die Lastarten *Superposition* und *Einfügen* nicht enthalten sein.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der eingefügt wird.

*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der eingefügt wird.

*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Lastdaten multipliziert werden.

## Lagersenkung

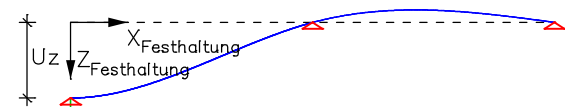
Die Lagersenkung wirkt auf festgehaltene Knoten in Richtung der gebunden Freiheitsgrade (Lastkürzel: *DS*).

### Eingabe

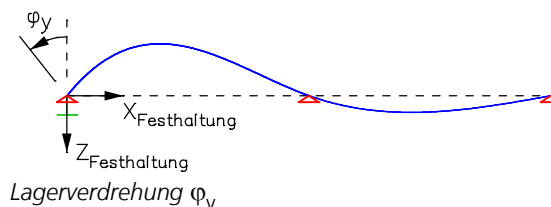
Auswahl der betroffenen Festhaltungen.

*ux, uy, uz* Verschiebungen [mm].

*phi.x, phi.y, phi.z* Verdrehungen [rad/1000].



Lagersenkung  $u_z$



Lagerverdrehung  $\phi_y$

## Superposition von Lastfällen

Durch Superposition (Lastkürzel: *SUP*) werden die vorhandenen Ergebnisse anderer Lastfälle addiert und gewichtet. Andere Lastarten sind in dem betreffenden Lastfall nicht zugelassen. Da die Lastfälle in aufsteigender Reihenfolge berechnet werden, sollte die Lastfallnummer der zu superponierenden Lastfälle kleiner sein als die Nummer des aktuellen Lastfalls.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der superponiert wird.

*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der superponiert wird.

*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Ergebnisse multipliziert werden.

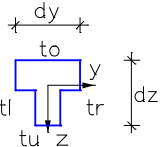
## Temperatur

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *TEMP*).

$tm$	Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].
$tu - to$	Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts [K].
$tr - tl$	Temperaturdifferenz zwischen rechter und linker Seite des Querschnitts [K].

Für die Berechnung gelten folgende Zusammenhänge:



The diagram shows a cross-section with width  $dy$  and height  $dz$ . The top surface is at temperature  $t_o$ , the bottom surface at  $t_u$ , the left side at  $t_l$ , and the right side at  $t_r$ . A coordinate system with  $y$  and  $z$  axes is shown.

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot t_m$$

$$\kappa_{T,y} = \alpha_T \cdot (t_u - t_o)/dz$$

$$\kappa_{T,z} = \alpha_T \cdot (t_r - t_l)/dy$$

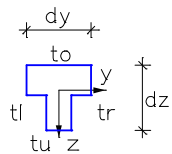
Bei der Querschnittsart *Stab* ist diese Lastart unzulässig, da die Abmessungen  $d_y$  und  $d_z$  undefiniert sind. Alternativ kann die Lastart *Vordehnung* verwendet werden.

## Temperatur, Vordehnung

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *TMPA*).

$tm$	Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].
$(tu - to)/dz$	Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts bezogen auf die Querschnittshöhe [K/m].
$(tr - tl)/dy$	Temperaturdifferenz zwischen rechter und linker Seite des Querschnitts bezogen auf die Querschnittsbreite [K/m].



Querschnitt mit Temperaturbeanspruchung

## Theorie

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *TH*) wird die Berechnungstheorie für den betreffenden Lastfall festgelegt.

### Eingabe

<i>Theorie 2. Ordnung</i>	Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung.
<i>Anzahl Iterationen</i>	Dieser Wert wird z.Z. nicht genutzt.
<i>Fehler</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1$ % zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die Hinweise im Abschnitt *Lastgruppe* sinngemäß zu beachten.

## Vorverformung

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *VV*) wird das Tragwerk vorverformt. Dazu ist die Nummer der Vorverformung einzugeben.

## Brandfall

Diese Lastart (Lastkürzel: *FIRE*) gibt an, dass der Lastfall unter Berücksichtigung des gewählten Brandfalls berechnet werden soll. Sie wird nur bei einer nichtlinearen Systemanalyse (Brandfall) berücksichtigt.

## Lastgruppe

Diese Lastart (Lastkürzel: *GRL*) eignet sich insbesondere zum Aufbereiten von Lastfällen für eine nichtlineare Berechnung. Hiermit können Belastungen aus bestehenden Lastfällen mit den erforderlichen Lastfaktoren zusammengestellt und die gewünschte Berechnungstheorie aktiviert werden.

Mit der Lastgruppe werden die bestehenden Lastarten *Einfügen*, *Theorie* und *Vorverformung* innerhalb einer Lastart zusammengefasst.

### Allgemein

<i>Berechnungstheorie</i>	<i>Theorie 1./2. Ordnung</i> : Berechnung nach geometrischer Theorie 1./2. Ordnung.
<i>Fehlerschranke</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1\%$ zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.
<i>Zus. globaler Lastfaktor</i>	Zusätzlicher Faktor für alle Lasten.
<i>Vorverformung</i>	Nummer der Vorverformung.
<i>Lastfälle</i>	Lastfälle markieren, um sie der Auswahlliste hinzuzufügen.
<i>Lastfaktor</i>	Die einzelnen Lastfälle werden mit einem Faktor gewichtet.
<i>Übernehmen</i>	Der Wichtungsfaktor markierter Lastfälle wird geändert.

### Betonkriechen

Für die nichtlineare Systemanalyse ist eine lastfallbezogene Definition der Kriechbeiwerte für die Betonquerschnitte möglich. Eine Beschreibung der zugrundeliegenden Berechnungsmethode kann den Grundlagen zur geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnung entnommen werden.

#### *Betonkriechen bei der nichtlinearen Systemanalyse berücksichtigen*

Aktiviert das Betonkriechen für die in der Tabelle aufgeführten Querschnitte. Bei erstmaliger Aktivierung werden vorhandene Querschnitte automatisch in die Tabelle eingefügt.

<i>Aktualisieren</i>	Aktualisiert die vorhandenen Querschnittseinträge.
<i>Alle Qu. gleich</i>	Übernimmt die Eingabewerte der 1. Tabellenzeile für die weiteren Querschnitte.
<i>phi</i>	Kriechbeiwert.
<i>Berechnet</i>	<i>Ja</i> : Der Kriechbeiwert wird aus den weiteren Parametern ermittelt.
<i>t0, t</i>	Belastungsbeginn und Betonalter.
<i>Faktor</i>	Optionaler Faktor für den berechneten Kriechbeiwert. Dieser dient z.B. zur Ermittlung von $\varphi_{ef}$ gemäß EN 1992-1-1:2004 aus dem berechneten Beiwert.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die folgenden Hinweise zu beachten.

### Berechnung nach Theorie 2. Ordnung

Vor einer Berechnung nach Theorie 2. Ordnung ist sicherzustellen, dass das System nach Theorie 1. Ordnung kinematisch stabil ist. Ein Stabilitätsversagen aufgrund Stabknickens wird im Berechnungslauf nach 2. Ordnung durch eine Singularität des Gleichungssystems oder einer Stabsteifigkeitsmatrix erkannt. Dieser Zustand wird dann mit einem Abbruch der Berechnung unter Angabe des Ortes und des versagten Freiheitsgrades gemeldet. In Grenzfällen kann es notwendig sein, die Fehlerschranke auf „0“ zu setzen, um den Versagenszustand feststellen zu können.

### Fehlerschranke des Residuums

Die Lösung aller nichtlinearen Problemstellungen erfolgt iterativ. Als Maß für die Steuerung der Iteration gilt die Länge des Fehlervektors, das Residuum. Es wird für jeden Iterationsschritt in der Ausgabeleiste angezeigt. Die Iteration wird beendet, wenn das verbleibende Residuum in Bezug auf das Anfangsresiduum die vorgegebene Fehlerschranke erreicht hat. Die Berechnungsergebnisse sind dann durchschnittlich mit einem relativen Fehler in gleicher Höhe behaftet. Falls die Fehlerschranke nicht erreicht werden kann, gibt das Rechenprogramm eine Meldung aus.

### Ausfall der Zugbettung

Bei unrealistischer Lastzusammenstellung (z.B. Fehlen der Eigenlast) kann es zum Ausfall aller Bettungen kommen (siehe

auch "Baugrundmodelle"). Wenn dadurch das System verschieblich wird, erfolgt ein Abbruch der Berechnung wegen singulären Gleichungssystem mit Angabe des verschieblichen Freiheitsgrades.

**Berücksichtigung von Zug- und Druckstäben**

Bei Tragwerken mit Zug- und Druckstäben erfolgt die iterative Ermittlung des Gleichgewichtszustands automatisch mit einer Fehlerschranke von 1%. Im Lastfall kann ein kleinerer Wert vorgegeben werden. Instabilitäten durch Ausfall von Stäben bewirken ein singuläres Gleichungssystem mit Abbruch der Berechnung.

**Lastzusammenstellung**

Zur Zusammenstellung der maßgeblichen Einwirkungen für Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung oder mit Ausfall der Zugbettung werden die betreffenden Lastfälle in die Auswahlliste übertragen und mit Lastfaktoren versehen.

Bei Berechnungen nach DIN 18800, Teil 2, oder EN 1993-1-1 sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- a) Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit linearem Materialgesetz nach der Elastizitätstheorie und anschließendem Nachweis Elastisch-Elastisch oder Elastisch-Plastisch. Die Schnittgrößen sind gemäß Norm mit den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungswerten der Einwirkungen zu ermitteln. Die Lastfälle der Auswahlliste sind dazu mit dem Faktor  $\gamma_F$  zu wichten. Zusätzlich ist  $\gamma_M$  als globaler Lastfaktor anzugeben.
- b) Durchführung eines Tragfähigkeitsnachweises nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit nichtlinearem Materialgesetz nach der Plastizitätstheorie. Hierbei wird  $\gamma_M$  gemäß Norm auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Die Schnittgrößenermittlung hat mit den Bemessungswerten der Einwirkungen zu erfolgen. Als Wichtungsfaktor ist also lediglich  $\gamma_F$  anzugeben.

**Superpositionsverbot**

Berechnungen mit Zug- und Druckstäben, nach der Theorie 2. Ordnung oder unter Ausschluss der Zugbettung liefern ihre Ergebnisse nach nichtlinearer Iteration. Für diese gilt folglich nicht mehr das Superpositionsprinzip, d.h. sie dürfen nicht mit anderen Ergebnissen additiv überlagert werden. Eine Weiterverarbeitung in Lastfallkombinationen ist nur zulässig, wenn diese keine anderen als sich gegenseitig ausschließende (exklusive) Einwirkungen enthalten.

**Einzellast**

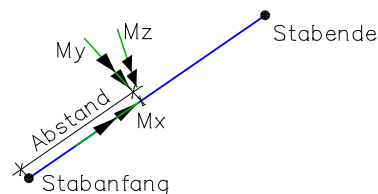
**Eingabe**

- Global orientiert*                      Einzellast im Globalsystem (Lastkürzel: *FG*).
- Lokal orientiert*                      Einzellast im Stabsystem (Lastkürzel: *FL*).
- Lastort*                                    Lastort im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang.
- Px, Py, Pz*                                Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN].

**Einzelmoment**

**Eingabe**

- Lastort*                                    Lastort im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang (Lastkürzel: *ML*).
- Mx, My, Mz*                              Lastkomponenten im Stabsystem [kNm].



*Einzelmoment auf Stab*



## Knotenlast

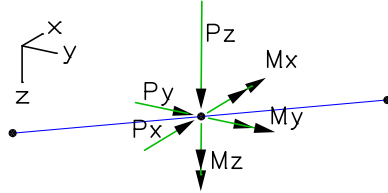
Knotenlasten wirken im Globalsystem (Lastkürzel: *KNL*).

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stabknoten.

$P_x, P_y, P_z$  Kräfte [kN].

$M_x, M_y, M_z$  Momente [kNm].



## Linienlast

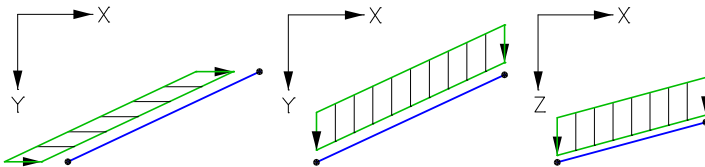
### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

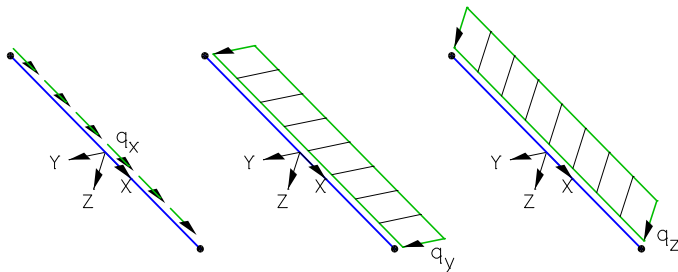
*Global orientiert* Linienlast im Globalsystem (Lastkürzel: *LG*).

*Lokal orientiert* Linienlast im Stabsystem (Lastkürzel: *LL*).

$q_x, q_y, q_z$  Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].



Globale Linienlast ( $q_x, q_y, q_z$ )



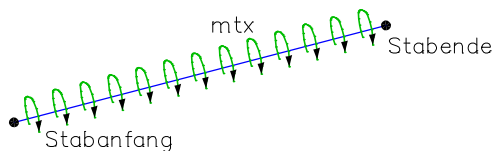
Lokale Linienlast

## Linientorsionsmoment

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *MT*).

$mt_x$  Linientorsionsmoment [kNm/m].



Linientorsionsmoment um die Stabachse

## Trapezlast

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

Anfang Lastanfang.

Ende Lastende.

Global  $x, y, z$  Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel:  $TA + GX, GY, GZ$ ).

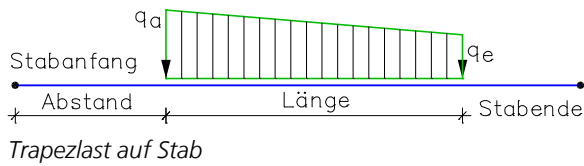
Lokal  $x, y, z$  Trapezlast im Stabsystem (Lastkürzel:  $TA + LX, LY, LZ$ ).

Projektiv  $x, y, z$  Projektion der Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel:  $TA + PX, PY, PZ$ ).

Startordinate Lastordinate am Lastanfang in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

Endordinate Lastordinate am Lastende in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

Bei einer Trapezlast über mehrere Stäbe wird die Last automatisch geteilt. Die Abstände von den Stabanfängen, die Lastlängen und die interpolierten Lastordinaten werden für die gewählten Stäbe automatisch ermittelt. Dadurch kann ein ganzer Stabzug mit einer Eingabe trapezförmig belastet werden.



## Volleinspannkkräfte

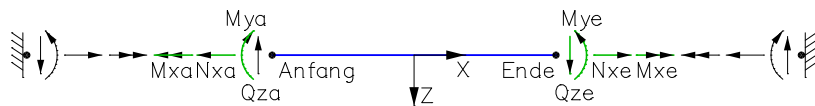
Die Volleinspannkkräfte an Stabanfang (Lastkürzel:  $SOA$ ) bzw. Stabende (Lastkürzel:  $SOE$ ) sind getrennt einzugeben.

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

$N_x, Q_y, Q_z$  Normal- und Querkraft [kN].

$M_x, M_y, M_z$  Momente [kNm].



Volleinspannkkräfte am Stabanfang und -ende.

## Berechnung

Im Berechnungs-Menü werden programmspezifische Einstellungen vorgenommen und die Rechenprogramme gestartet.



*Einstellungen...*



*Stapel...*



*Statik*

*Querschnittstemperaturen*

*Lastfallkombination*

*DIN 1045-1 Bemessung*

*DIN EN 1992-1-1 Bemessung*

*EN 1992-1-1 Bemessung*

*ÖNORM B 4700 Bemessung*

*ÖNORM EN 1992-1-1 Bemessung*

*SIA 262 Bemessung*

*SS EN 1992-1-1 Bemessung*

*Einzelbemessung*

*DIN 18800 Stahlnachweise*

*EN 1993-1-1 Stahlnachweise*

*DIN 1052 Holznachweise*

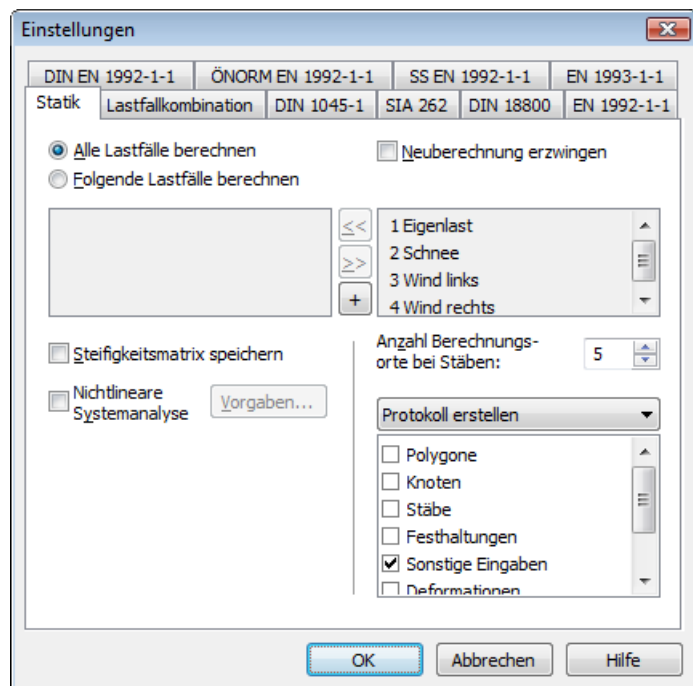
*EN 1995-1-1 Holznachweise*

*Markierte Elemente*

*Stop Berechnung*

Während der Berechnung wird in der Ausgabeleiste der Programmfortschritt mit eventuellen Fehlermeldungen und Warnungen angezeigt.

## Einstellungen Statik



### Alle Lastfälle berechnen

Alle Lastfälle werden berechnet (Standard).

### Folgende Lastfälle berechnen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

### Neuberechnung erzwingen

Ist dieser Schalter aktiviert, werden alle gewählten Lastfälle neu berechnet. Anderenfalls untersucht das Berechnungsprogramm, ob eine Neuberechnung erforderlich ist.

### Steifigkeitsmatrix speichern

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix wird für eine spätere Wiederverwendung gespeichert. In der 64-Bit Edition ist die Funktion inaktiv.

### Nichtlineare Systemanalyse

Eine nichtlineare Systemanalyse wird durchgeführt. Die Schaltfläche *Vorgaben* öffnet den Einstellungsdialog für den Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis sowie für den Nachweis im Brandfall. Dort werden die Lastfälle ausgewählt, die statt der hier getroffenen Auswahl berechnet werden.

### Anzahl Berechnungsorte bei Stäben

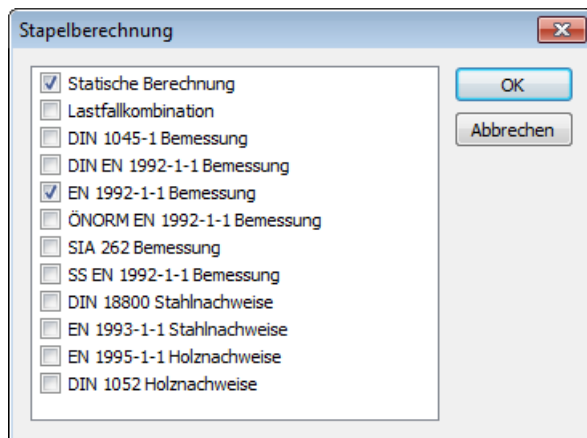
Die Schnittgrößen werden an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Standardmäßig werden fünf Berechnungsorte benutzt. Bei gebetteten Stäben werden Reaktionen nur in den Knoten berechnet.

### Protokoll

- *Kein Protokoll*: Vom Berechnungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Protokoll erstellen*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll gemäß Auswahlliste erstellt.

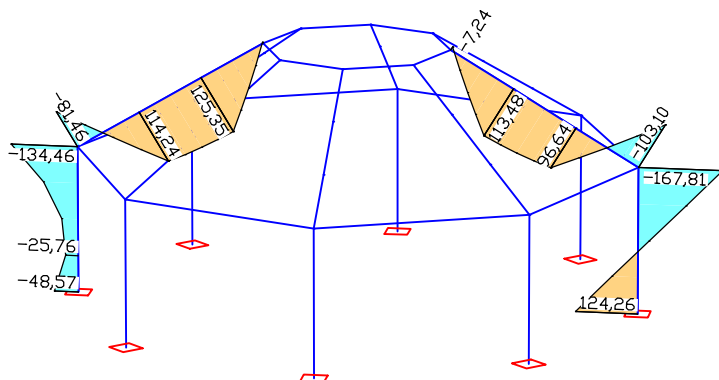
## Stapelberechnung

Mit diesem Menüpunkt werden ausgewählte Berechnungen nacheinander gestartet.



## Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird die Darstellung der Berechnungsergebnisse beschrieben. Ergebnisse können sowohl graphisch als auch tabellarisch angezeigt werden. Deren Auswahl erfolgt in der Datenbasis oder mit der Funktion *Ergebnisse* des Tragwerksmenüs.



Selektierte Schnittgrößendarstellung  $M_y$  einer Hallenkonstruktion

### Summe der aufgetragenen Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	ständige Lasten	-0,000	-0,000	1224,149
	Auflagerreaktionen	-0,000	-0,000	1224,149
2	Windlast	82,426	34,142	0,000
	Auflagerreaktionen	82,426	34,142	0,000
3	Theorie 2.Ordnung	136,003	56,334	1818,845
	Auflagerreaktionen	136,003	56,334	1818,845

Tabellarische Ausgabe der Lastsummen

## Ergebnisleiste

Die Ergebnisleiste enthält folgende Schaltflächen zur Ergebnisdarstellung:



Startet den Dialog für die Ergebnisdarstellung.



Ergebnisdarstellung abschalten.



Ordinatenauswahl für die manuelle Beschriftung.



Ergebnisdarstellung für markierte Stäbe auswählen.



Ergebnisdarstellung für markierte Stäbe abwählen.



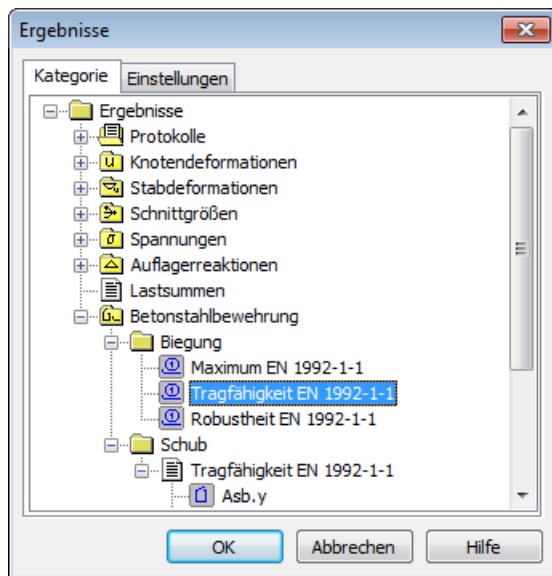
Ergebnismarker für Spannungen im Brandfall einfügen. An diesen Orten werden bei der Berechnung die Spannungsverteilungen über den Querschnitt für jeden Zeitpunkt gespeichert. Diese Ergebnisse können mit einem Doppelklick auf den entsprechenden Marker angezeigt werden.





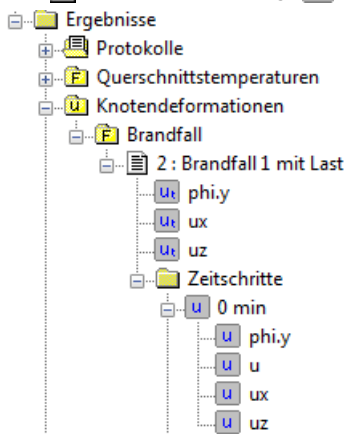
Ordinatenwert am Markierungsort in der Statusleiste ausgegeben.

## Ergebniskategorien

Die nachfolgende Dialogseite zeigt mögliche Ergebniskategorien.



In den Unterpunkten zu der jeweiligen Kategorie sind die berechneten Lastfälle und Kombinationen sowie alle darstellbaren Ergebniskomponenten aufgeführt. Nach getroffener Auswahl bietet die Registerkarte *Einstellungen* die nachfolgend erläuterten Darstellungsformen mit weiteren Optionen an. Das vorangestellte Symbol kennzeichnet die Art der Darstellung (z.B. : Tabellarische Darstellung, : graphische Schnittkraftdarstellung).



Ergebnisse einer Brandanalyse werden nach Auswahl eines Zeitschritts wie die Ergebnisse eines Lastfalls angezeigt. Bei Wahl einer übergeordneten Komponente lässt sich der Ergebnisverlauf entweder für einen gewählten Ort als Diagramm darstellen oder am Gesamtsystem animieren (*Verformungsfigur, Zustandslinie*).

## Verformungsfigur

### Maßstab

Der Maßstab kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden. Die Knotenverschiebungen werden mit dem Verzerrungsfaktor multipliziert und zu den Knotenkoordinaten addiert. Bei Lastfällen wird zusätzlich die Biegelinie dargestellt.

### Originalsystem gestrichelt darstellen

Ein- oder Ausschalten des gestrichelten undeformierten Systems während der Verformungsdarstellung.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung der Knoten mit der Länge des Verschiebungsvektors [mm].
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.

### Grenzwert für Beschriftung

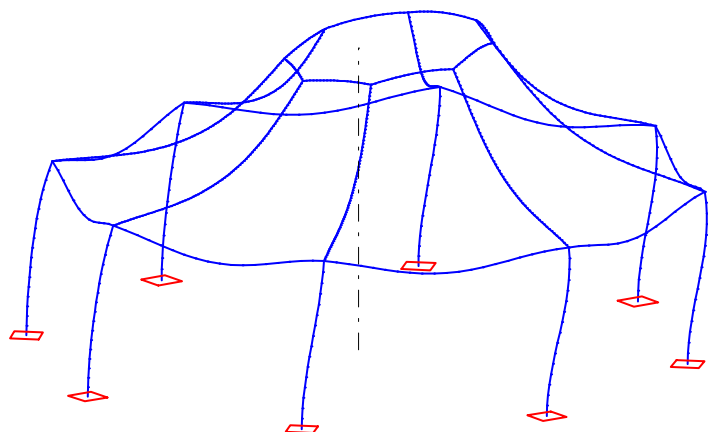
Nur betragsmäßig größere Verschiebungen werden beschriftet.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

**Dezimalstellen**

- *Standard:* Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



Überhöhte Verformungsfigur

**Numerisch**

In dieser Darstellungsform werden Auflagerreaktionen oder Deformationen numerisch dargestellt.

**Unterer Grenzwert für Darstellung**

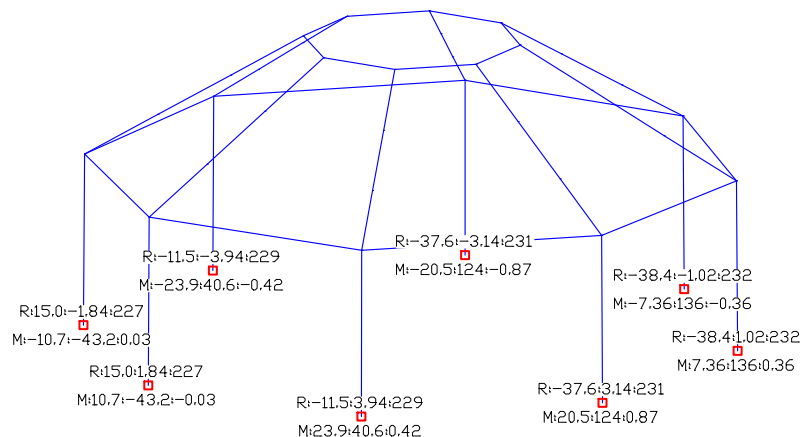
Nur betragsmäßig größere Ergebnisse werden ausgegeben.

**Texthöhe [mm]**

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

**Dezimalstellen**

- *Standard:* Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



Darstellung der Auflagerreaktionen mit den Komponenten  $R_x, R_y, R_z$  [kN] und  $M_x, M_y, M_z$  [kNm]

**Zustandslinien**

Die Ergebnisse werden entlang der Stabachse aufgetragen. Zwischen den Berechnungsorten wird von einem linearen Verlauf der Ergebnisse ausgegangen.

**Maßstab**

Der Maßstab der Ordinatendarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung aller Ordinaten.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisleiste wählen.

### Grenzwert für Beschriftung

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

### Dezimalstellen

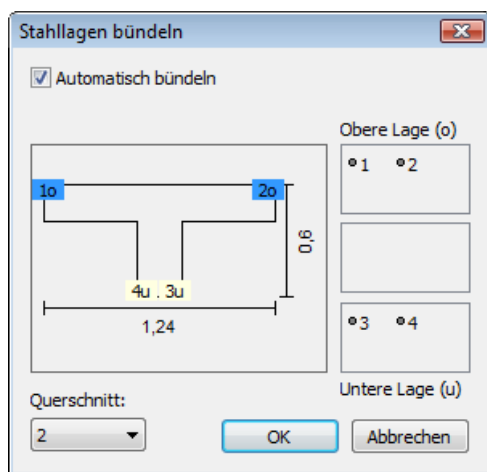
- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Stahllagen bündeln...

Mit dieser Funktion wird die Darstellung der Stahllagen festgelegt.



Bei der automatischen Bündelung werden alle Stahllagen, deren z-Komponente kleiner ist als die z-Komponente des Schwerpunkts, auf der Oberseite der Elemente dargestellt, alle anderen Lagen auf der Unterseite.

Bei der manuellen Bündelung können die Stahllagen mit der Maus zwischen den Listenfeldern verschoben werden. Die Stahllagen des mittleren Listenfeldes sind von der Darstellung ausgenommen.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.

## Querschnittsspannungen

Der Spannungsverlauf wird an einem Stabquerschnitt in einem Dialogfenster dargestellt. Dieses ist über das Kontextmenü der Stäbe erreichbar, wenn Zustandslinien von Spannungen oder Schnittgrößen angezeigt werden.

### Lastfall

Auswahl der berechneten Lastfälle und Kombinationen.

### Satz

Auswahl des Schnittkraftsatzes für die Spannungsermittlung. Bei *Extremum* werden die betragsmäßigen Extremwerte der Spannungen aus allen Schnittkraftsätzen dargestellt.

### Stab

Nummer des ausgewählten Stabes.

### Ort

Auswahl des Berechnungsortes im Stab.



**Querschnitt**

Bezeichnung des dargestellten Querschnitts.

**Nx, Qy, Qz, Mx, My, Mz**

Schnittgrößen am gewählten Berechnungsort, aus welchen sich der dargestellte Spannungsverlauf ergibt.

**Spannung**

Die Spannungen werden im allgemeinen unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens berechnet. Bei Ergebnissen aus einer nichtlinearen Systemanalyse werden an Polygonquerschnitten und Stahlbauprofilen aus Baustahl (S235 bis S450 oder S235-EN bis S450-EN) oder *Stahl* die Spannungen des plastischen Zustands dargestellt.

- $\sigma_{x,x}$ : Längsspannungen aus Biegemomenten und Längskraft.
- $\sigma_{v}$ : Vergleichsspannungen nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung.
- $\sigma_{1,2}$ : Hauptspannungen aus Biegemomenten, Längskraft, Querkräften und Torsion.
- $\tau_{r}$ : Schubspannungen aus Querkräften und Torsion parallel zum Rand.
- $\tau_{xy}$ : Schubspannungen aus Querkräften und Torsion in y-Richtung.
- $\tau_{xz}$ : Schubspannungen aus Querkräften und Torsion in z-Richtung.

**Beschriftung**

Beschriftung der Extremwerte. Optional kann mit der rechten Maustaste die Beschriftung ausgewählte Ordinatenwerte ein- bzw. ausgeschaltet werden.

**Drucken**

Drucken der Querschnittsspannungen.

**->Druckliste**

Einfügen der aktuellen Ansicht in die Druckliste.

**Darstellung**

Die Spannungen können entweder linienförmig entlang des Randes oder flächig dargestellt werden.

Die Ansicht kann mit Hilfe der Maus gedreht werden. In Verbindung mit der Hochtaste wird der Bildausschnitt verschoben. In Verbindung mit der Strg-Taste wird die Größe des Zoomausschnitts verändert. Verbleibt der Mauszeiger für einen Moment an einer Ordinate, wird die dort vorhandene Spannung dargestellt.

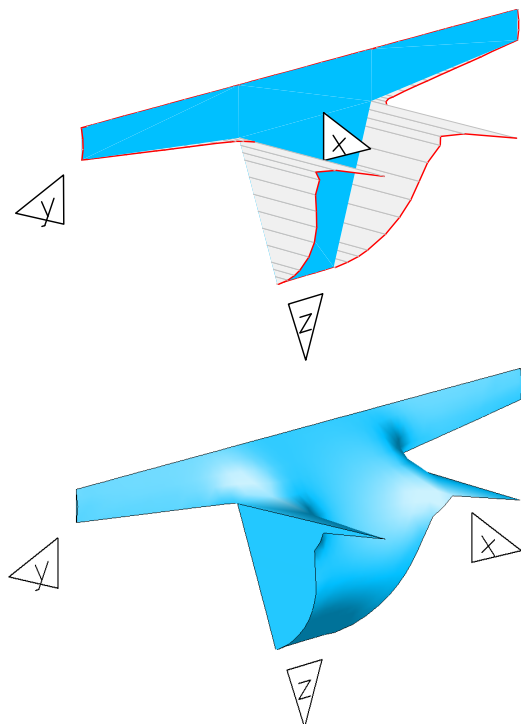
**Querschnittsspannungen  $\tau_{xz}$  (Elastisch)**

Stab 1, Punkt 1, Querschnitt Polygon - C20/25

Lastfall 1

$N_x / Q_y / Q_z = 0,00 / -0,00 / 5865,00 \text{ kN}$ ;  $M_x / M_y / M_z = -0,00 / -58650,00 / 0,00 \text{ kNm}$

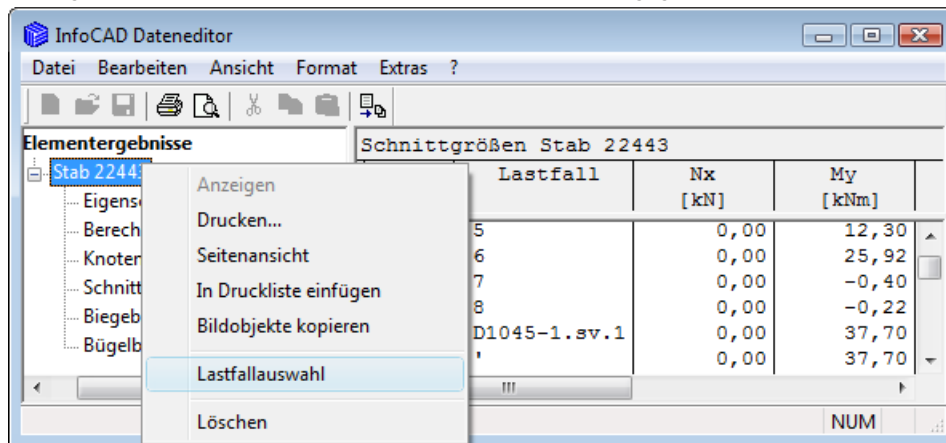
Wertebereich der Spannungen:  $-0,00157631$  bis  $4,18786 \text{ MN/m}^2$ .



Schubspannungsverteilung  $\tau_{xz}$  entlang des Randes bzw. flächig

## Ergebnisliste

Die Ergebnisliste wird für markierte Stäbe im Dateneditor ausgegeben. Sie ist über das Kontextmenü der Stäbe erreichbar.



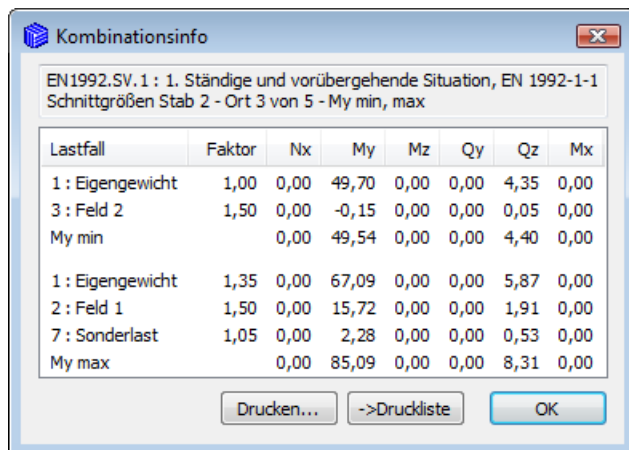
Mit der Kontextfunktion *Lastfallauswahl* kann die Ausgabe auf bestimmte Lastfälle beschränkt werden.

## Kombinationsinfo

Mit der *Kombinationsinfo* können die an einem Kombinationsergebnis beteiligten Lastfälle mit Ihren jeweiligen Wichtungen bestimmt werden. Diese Funktion steht während der Ergebnisdarstellung einer Kombination zur Verfügung. Nach der Auswahl des gewünschte Ergebnisortes mit der rechten Maustaste erscheint im Kontextmenü die Funktion *Kombinationsinfo*.

Über das Kontextmenü des Dialoges können folgende Funktionen aufgerufen werden:

- *Kopieren* (Zwischenablage)
- *Lastgruppe erzeugen...*
- *Superpositions-Lastfall erzeugen*
- *Zugehörige Deformationen...*
- *Zugehörige Auflagerkräfte...*

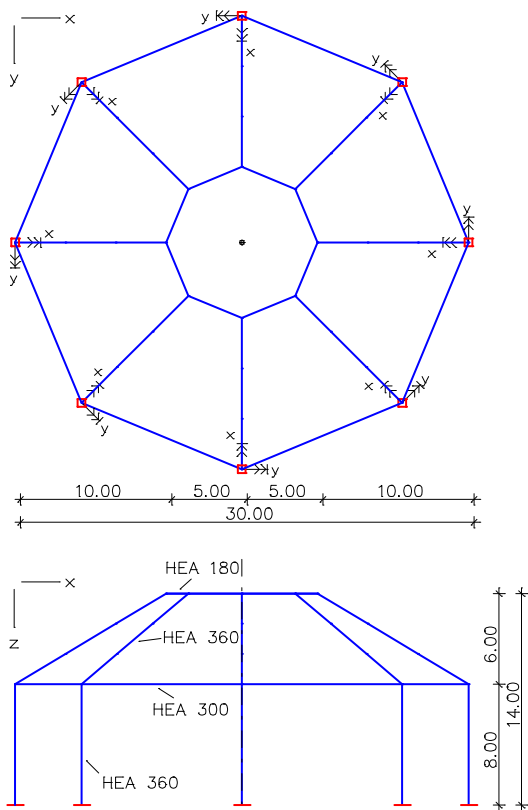


### Letzte Kombination

Zeigt die zum letzten *Kombinationsinfo* zugehörigen Zustandsgrößen.

# Beispiel Stahlhalle nach Theorie 2. Ordnung

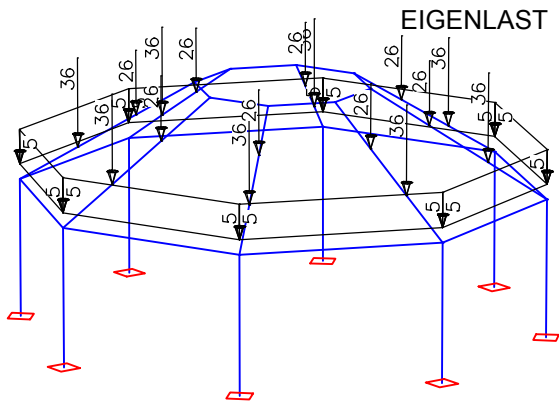
Im folgenden Beispiel wird eine räumliche Stahlhalle (S235, EN 10025-2) nach Theorie 2. Ordnung berechnet.



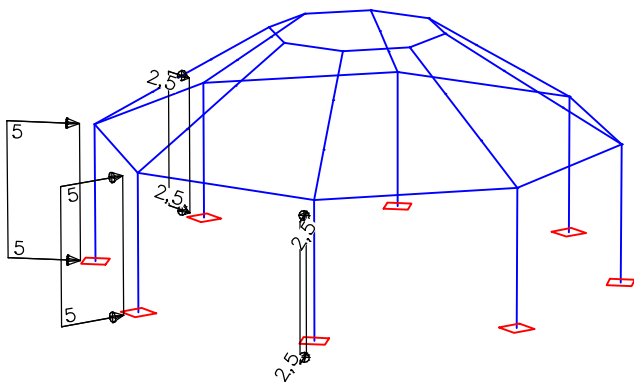
## Querschnittswerte

1	HEA 360 	Schwerpunkt [m] Fläche [m <sup>2</sup> ] Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] Hauptachsenwinkel [Grad]	$y_s = 0,000$ $A = 1,4300e-02$ $I_x = 1,4900e-06$ $I_y = 3,3090e-04$ $I_z = 7,8900e-05$ $\Phi = 0,000$	$z_s = 0,000$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_1 = 3,3090e-04$ $I_2 = 7,8900e-05$
2	HEA 300 	Schwerpunkt [m] Fläche [m <sup>2</sup> ] Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] Hauptachsenwinkel [Grad]	$y_s = 0,000$ $A = 1,1300e-02$ $I_x = 8,5600e-07$ $I_y = 1,8260e-04$ $I_z = 6,3100e-05$ $\Phi = 0,000$	$z_s = 0,000$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_1 = 1,8260e-04$ $I_2 = 6,3100e-05$
3	HEA 180 	Schwerpunkt [m] Fläche [m <sup>2</sup> ] Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] Hauptachsenwinkel [Grad]	$y_s = 0,000$ $A = 4,5300e-03$ $I_x = 1,4900e-07$ $I_y = 2,5100e-05$ $I_z = 9,2500e-06$ $\Phi = 0,000$	$z_s = 0,000$ $I_{yz} = 0,0000e+00$ $I_1 = 2,5100e-05$ $I_2 = 9,2500e-06$

**Lastfall 1 ständige Lasten**

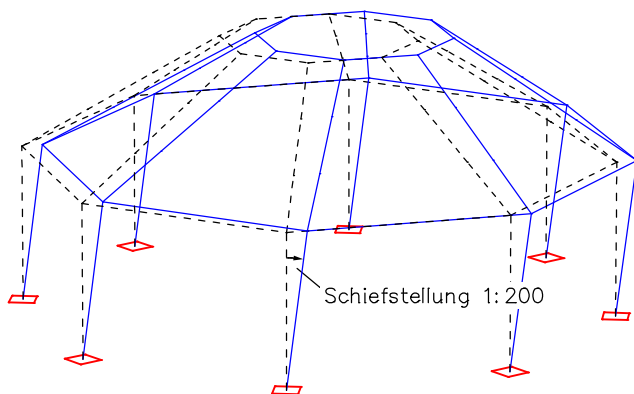


**Lastdaten Lastfall 2 (Windlast)**



**Lastdaten Lastfall 3 (Theorie 2.Ordnung)**

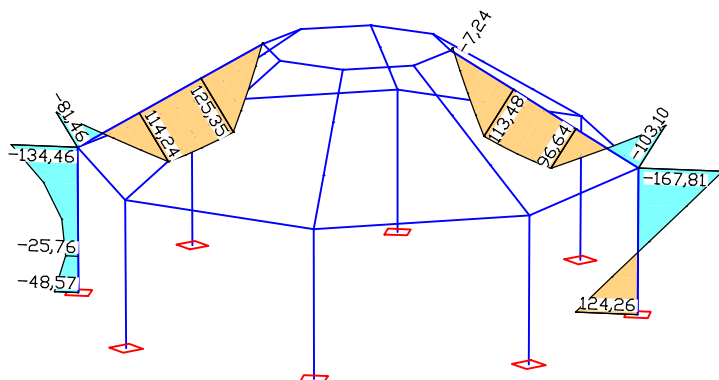
Die abgebildete Vorverformung wird bei der Berechnung nach Theorie 2. Ordnung berücksichtigt.



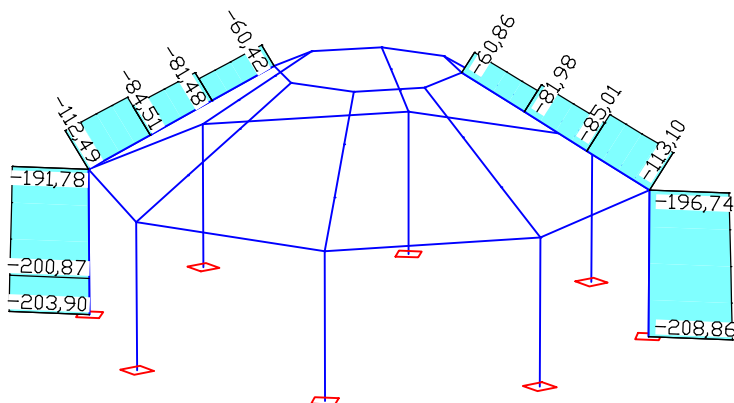
**Lastdaten Lastfall 3: Theorie 2.Ordnung**

Lastgruppe (GRL)  
 Berechnungstheorie: Theorie 2. Ordnung  
 Ausfall Zugbettung: Nein; Ausfall Zuglager: Nein; Fehlerschranke: 1,00 [%]  
 Zusätzlicher globaler Lastfaktor: 1,00; Vorverformung: 1  
 Betonkriechen bei der nichtlinearen Systemanalyse berücksichtigen: Nein

Gewählte Lastfälle		
Nr.	Bezeichnung	Faktor
1	ständige Lasten	1,35
2	Windlast	1,5



Selektierte Schnittgrößen  $M_y$  [kNm] aus Lastfall 3



Selektierte Schnittgrößen  $N_x$  [kN] aus Lastfall 3

**Nachweise nach EN 1993-1-1:2005/AC:2009**

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1, 2, 3 und 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen.

Für Querschnitte der Klasse 4 erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten gemäß EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.

Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach EN 1990:2010 kombiniert.

**Der Nachweis erfolgt für die Extremwerte der Einwirkungen.**

**Bezeichnungen im Ausdruck**

Sigma.x, Sigma.v: Längsspannungen, Vergleichsspannungen gemäß Gl. (6.1).  
 Tau.xy, Tau.xz : Schubspannungen aus Querkräften  $Q_y$ ,  $Q_z$  und Torsionsmoment  $M_x$ .  
 A : Querschnittsfläche.  
 $I_x, I_y, I_z, I_{yz}$  : Trägheitsmomente.

**Spannungsermittlung**

Die Längs- und Schubspannungen werden für polygonal berandete, homogene Querschnitte infolge Längskraft, Biegemomenten, Querkräften und Torsion berechnet. Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode. Die Berechnungspunkte für alle Spannungen sind Randpunkte des Querschnitts.

**Querschnittsklassifizierung**

Die Klassifizierung erfolgt für Listenprofile nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2. T-Profile werden wie einseitig gestützte Flansche behandelt. Benutzerdefinierte Querschnitte werden generell in Klasse 3 eingestuft.

**Teilsicherheitsbeiwerte für Baustahl**

	gamma.M0
Ständige und vorüberg. Komb.	1,00
Außergew. Kombination	1,00

**Charakteristische Materialkennwerte**

Streckgrenzen für Baustahl nach EN 1993-1-1, Tab. 3.1, für  $t \leq 40$  mm [MN/m<sup>2</sup>].  
 Grenzspannungen gemäß Gl. (6.19) und Gl. (6.42).

Material	fyk	Ständige K.		Außergew. K.	
		Sigma.Rd	Tau.Rd	Sigma.Rd	Tau.Rd
S235-EN	235	235,00	135,68	235,00	135,68

**Querschnittswerte**

Querschnitt	Material	A [mm <sup>2</sup> ]	Iy [m <sup>4</sup> ]		Ix [m <sup>4</sup> ]	
			Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]
1 HEA 360	S235-EN	14300	3,3090e-04	1,4900e-06	7,8900e-05	0,0000e+00
2 HEA 300	S235-EN	11300	1,8260e-04	8,5600e-07	6,3100e-05	0,0000e+00
3 HEA 180	S235-EN	4530	2,5100e-05	1,4900e-07	9,2500e-06	0,0000e+00

**EN 1993-1-1 Einwirkungen**

**Standard Bemessungsgruppe**

**G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lastfälle

1 ständige Lasten

**QW - Windlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Windlasten  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

2 Windlast

**Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen**

Lastfälle

3 Theorie 2.Ordnung

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

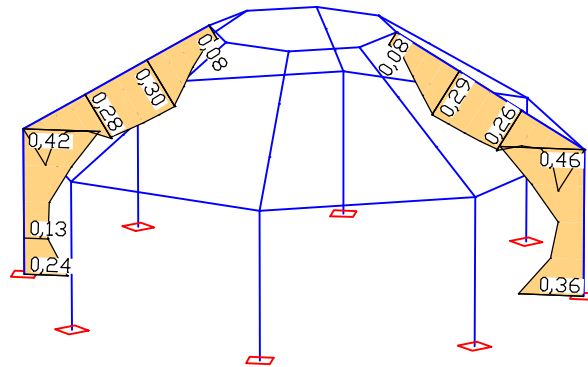
Endzustand

G - Eigenlast  
 QW - Windlast

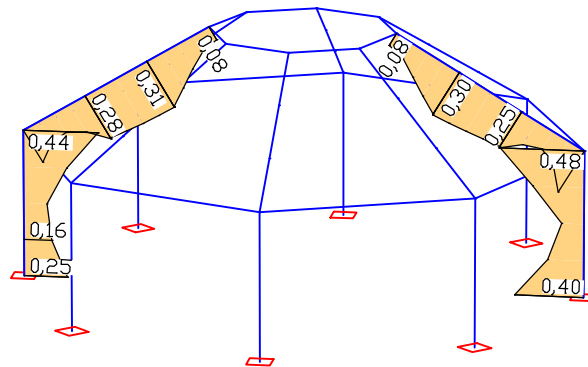
**2. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen



Ausnutzung; 1. Ständige und vorübergehende Situation

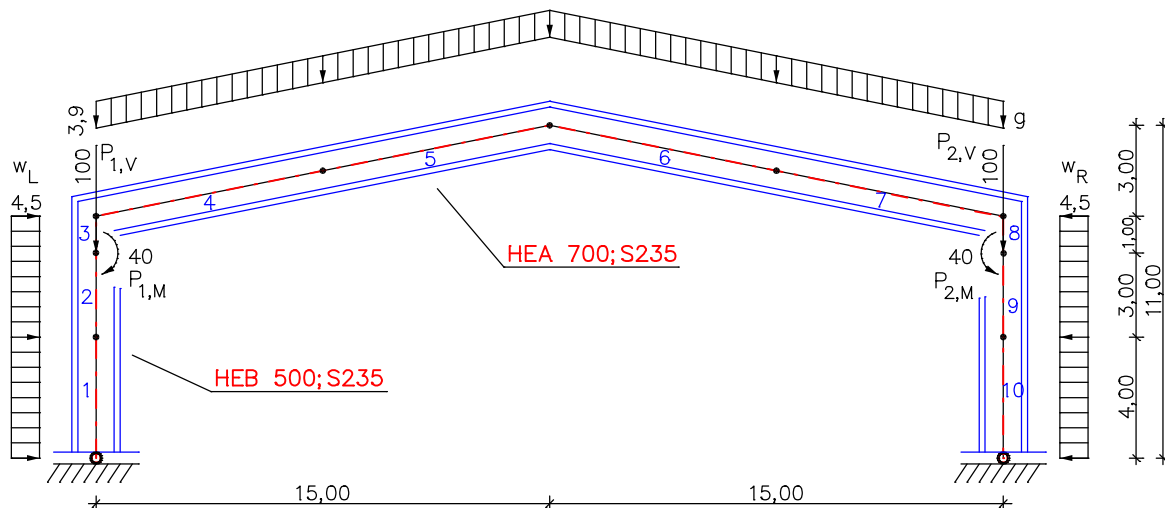


Ausnutzung; 2. Ständige und vorübergehende Situation

# Ebenes Stabwerk

## Grundlagen

Das Programmsystem *Ebenes Stabwerk* ist für die Berechnung ebener Stabkonstruktionen konzipiert. Als Anwendungsbeispiel wird im nachfolgenden Bild das Stabmodell eines Hallenrahmens gezeigt.



Statisches System eines Hallenrahmens

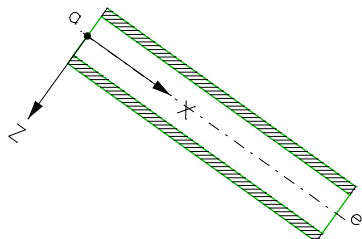
Anmerkungen zu den Berechnungsgrundlagen befinden sich im Kapitel „Finite Elemente / Grundlagen“.

## Koordinatensysteme

Ein Stabwerksmodell besteht aus den nachfolgenden Tragwerksobjekten mit jeweils eigenen (lokalen) Koordinatensystemen. Alle Koordinatensysteme sind Rechtssysteme.

### Stäbe

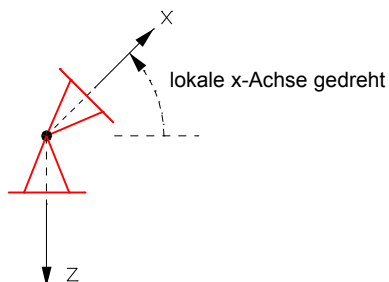
In der folgenden Abbildung ist das lokale Koordinatensystem eines Stabes dargestellt.



Die lokalen Stabkoordinaten haben ihren Ursprung im Stabanfangsknoten (a). Die lokale x-Achse verläuft von (a) nach (e), dem Stabendknoten.

### Festhaltungen

Normalerweise entspricht das Festhaltungssystem dem globalen Koordinatensystem. Das Festhaltungssystem kann durch Drehung der lokalen Achsen verändert werden.



Festhaltungssystem mit gedrehter x-Achse

## Strukturbeschreibung

Die Bearbeitung des Tragwerksmodells und die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgen mit den Funktionen des nachfolgend aufgeführten Menüs *Tragwerk*:

-  *Elementeingabe*
-  *Elementeigenschaften...*
-  *Elementinformationen*
-  *Darstellung...*
-  *Netzprüfung*
-  *Elementsystem*
-  *Nummern sortieren*
-  *Festhaltungen*
-  *Belastung*
-  *Vorverformung*
-  *Knoten bewegen*
-  *Verdichten*
-  *Koppelungen*
-  *Eingabedaten drucken...*
-  *Ergebnisse...*

Die generelle Vorgehensweise bei der Eingabe eines Tragwerks, der Berechnung und der Ergebnisdarstellung ist in dem Dokument *Einführungsbeispiele.pdf* beschrieben, das im Programmverzeichnis installiert wird.

## Elementeingabe

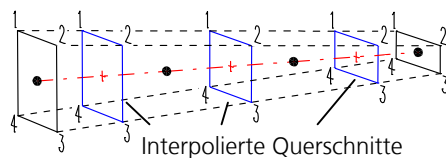
Mit diesem Menüpunkt werden Stäbe eingegeben.

### Eingabe

*Anfangspunkt* Eingabe eines Stabes vom Anfangs- zum Endpunkt.

*Eigenschaften* Mit dieser Option wird der Dialog der Stabeigenschaften aufgerufen.

*Generier* Die eingegebene Strecke wird in  $n$  gleich lange Stäbe unterteilt. In Verbindung mit den Querschnittsarten Polygon, Rechteck und Stab können unterschiedliche Anfangs- und Endquerschnitte vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann die gewählte Anzahl von Querschnitten. Dies ermöglicht die Modellierung einer Voute. Bei Polygonquerschnitten wird die Lage der Polygonpunkte interpoliert. Dafür müssen die Anzahl und die Anordnung der Polygonpunkte übereinstimmen.





## Elementeigenschaften

Mit diesem Dialog werden Eigenschaften markierter Stäbe bearbeitet bzw. die Eigenschaften für neu zu erzeugende Stäbe voreingestellt. Der Dialog ist aus den folgenden Seiten aufgebaut:

- *Allgemein*
- *Ersatzstablänge*
- *Querschnitt*

### Allgemein

Diese Dialogseite zeigt die allgemeinen Stabeigenschaften.

#### Knoten

Anzeige der Knotenkoordinaten.

#### Länge

Anzeige der Stablänge [m].

#### Gelenke

Die Gelenkeigenschaften können für jeden Freiheitsgrad getrennt angegeben werden. Bei gesetzter Markierung ist der betreffende Freiheitsgrad gelenkig definiert. Der Pfeil zeigt das gewählte Ende des Stabes.

#### Gelenkfedern

Federsteifigkeit [MN/m, MNm] mit der das jeweilige Stabende (a = Anfang, b = Ende) elastisch am Knoten angeschlossen ist. Ist kein Wert definiert, gilt die entsprechende Gelenkeigenschaft.

### Ersatzstablänge

Für den Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren können bei Stäben aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 die Ersatzstablängen definiert werden.

#### y-Achse, z-Achse

Die Vorgabe einer unter Berücksichtigung von Lagerung und Belastung zutreffenden Ersatzstablänge liegt im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders. Bei Eingabe von 0 wird für die betreffende Richtung kein Nachweis geführt.

#### Hinweis

Wenn ein Bauteil mit konstantem Querschnitt in mehrere Stäbe geteilt ist, sollte allen Teilen die für das ganze Bauteil maßgebende Knicklänge zugeordnet werden. Eine rechnerische Ermittlung von Knicklängen und Knickeigenformen ist im FEM-Programm für ausgewählte Lastzusammenstellungen möglich (s. Beschreibung zur *Lastgruppe*).

### Querschnitt

Der Querschnitt beschreibt folgende Eigenschaften eines Stabes:

- Form
- Vorgaben für die Schubspannungsberechnung
- Material
- Bettung
- Vorgaben für die Stahlbetonbemessung
- Vorgaben für die Thermische Berechnung
- Brandeinwirkung für den vereinfachten Nachweis nach EN 1995-1-2

Jeder Querschnitt wird eindeutig mit einer Nummer zwischen 1 und 9999 identifiziert. In der Regel ist ein Querschnitt nicht nur einem Stab, sondern einer Gruppe von Stäben zugeordnet.

### Nummer

Auswahl des Querschnitts. Bei einem neu erzeugten Querschnitt kann die Nummer frei vergeben werden. Eine nachträgliche Umnummerierung von Querschnitten ist in der Datenbasis über das Kontextmenü des Unterpunktes *Strukturbeschreibung / Querschnittswerte* möglich.

### Querschnittsart

- *Stab*
- *Polygon*
- Stahlbauprofil mit Profilnummer.
  - IPE*: Mittelbreite I-Träger nach DIN 1025 Teil 5 und Euronorm 19-57.
  - HEA*: Breite I-Träger, leichte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPBI-Reihe nach DIN 1025 Teil 3.
  - HEB*: Breite I-Träger nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPB-Reihe nach DIN 1025 Teil 2.
  - HEM*: Breite I-Träger, verstärkte Ausführung nach Euronorm 53-62 bzw. Träger der IPBv-Reihe nach DIN 1025 Teil 4.
  - I*: Schmale I-Träger nach DIN 1025 Teil 1.
  - U*: U-Stahl nach DIN 1026.
  - T*: T-Stahl nach DIN 1024.
- *Parameter*: Parametrisiertes Stahlbauprofil mit I-, L-, T-, U-, rohr- oder kastenförmiger Querschnittsgeometrie.
- *Bibliothek*: Querschnittsbibliothek mit Stahlbauprofilen.
- *Datenbank*: Profil aus der Anwenderdatenbank (*Anwend.pro*).
- *Rechteck*
- *Zugstab*

### Materialart

- *B25 bis B55*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045:1988, Tab.1.
- *C12/15 bis C100/115*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1 bzw. ENV 1992-1-1:1991 (ab *C55/67* nur zur Bemessung nach DIN 1045-1).
- *LC12/13 bis LC60/66*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1.
- *C12/15-EN bis C90/105-EN*: Betonfestigkeitsklassen nach EN 1992-1-1.
- *C12/15-EN-D bis C100/115-EN-D*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1.
- *ÖC16/20 bis ÖC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach ÖNORM B 4710-1.
- *ÖNB40*: Betonfestigkeitsklasse nach ÖNORM B 4200-10.
- *ÖNBeton*: Beton nach ÖNORM mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *SC12/15 bis SC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SLC12/13 bis SLC50/55*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SCX*: Beton nach SIA262 bzw. SN EN206-1 mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *S235, S275, S355, S450*: Baustahl gemäß DIN 18800 T1, Tab.1.
- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 10025-2.
- *NH1, NH2, NH3*: Nadelholz der Güteklassen I, II und III nach DIN 1052:1988.

- *BSH1* , *BSH2*: Brettschichtholz der Güteklassen I und II nach DIN 1052:1988.
- *C14* bis *C50*, *D18* bis *D70*: Vollholz nach EN 338.
- *GL20h* bis *GL32h*, *GL20c* bis *GL32c*: Brettschichtholz nach EN 14080.
- *Frei*: Anwenderdefiniertes Material.
- *Beton*: Anwenderdefinierter Beton.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

### Neu

Einen neuen Querschnitt erzeugen.

### Kopie

Den aktuellen Querschnitt kopieren.

### Löschen

Den aktuellen Querschnitt löschen.

### Bezeichnung

Der Querschnitt kann mit einem beliebigen Text bezeichnet werden.

Je nach Querschnitts- und Materialart stehen weitere Dialogseiten zur Verfügung:

- *Form*
- *Schubspannungen*
- *Material*
- *Bettung*
- *DIN 1045-1*
- *DIN EN 1992-1-1*
- *EN 1992-1-1*
- *ÖNORM B 4700*
- *ÖNORM EN 1992-1-1*
- *SIA 262*
- *SS EN 1992-1-1*
- *EN 1995-1-2*
- *Thermische Berechnung*

## Polygonquerschnitt

### A

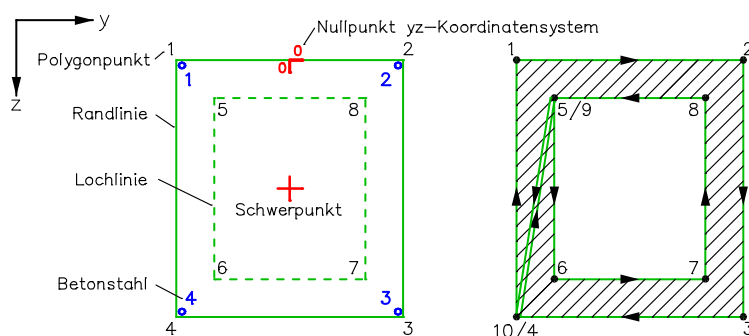
Anzeige der berechneten Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

### I<sub>y</sub>

Anzeige des berechneten Biegeträgheitsmoments [m<sup>4</sup>].

### Bearbeiten...

Die graphische Bearbeitung der Querschnittsgeometrie erfolgt in einem eigenen Fenster. Der Querschnitt wird mit Rand- und Lochlinien definiert.



Die interne Speicherung geschieht durch ein Polygon, das nach der Umfassungsmethode berechnet wird. Die Anzahl der Polygonpunkte ist auf 200 begrenzt.

Die Rand- und Lochpunkte werden automatisch so nummeriert, dass der am weitesten links liegende Punkt die Nummer 1

erhält. Kommen hierfür mehrere Punkte in Betracht, wird von diesen derjenige mit dem kleinsten z-Wert gewählt. Wenn die Polygonpunkte in der Datenbasis eingegeben wurden, bleibt die dort festgelegte Punktfolge auch in der graphischen Darstellung erhalten, solange das Polygon nicht modifiziert wird.

### Betonstahl...

Eigenschaften jeder Betonstahllage der markierten Querschnitte.

## Datei-Menü des Bearbeitungsfensters

### Neu

Mit einem neuen Querschnittspolygon beginnen.

### Einfügen

Ein Querschnittspolygon, Stahlbau- oder Datenbankprofil in das aktuelle Polygon einfügen.

### In Datenbank speichern...

Das aktuelle Querschnittspolygon in der Anwenderdatenbank *Anwend.pro* speichern.

### Import

Eine Zeichnung einer Projektdatei oder eine DXF-Datei importieren.

### Export

Das Querschnittspolygon als DXF-Datei exportieren.

## Polygon-Menü des Bearbeitungsfensters

### Linie

Einzelne Rand- oder Lochlinie eingeben.

### Kreis Rohr Rechteck Unterzug Überzug

Diese Querschnittsformen werden nach Eingabe der maßgeblichen Parameter automatisch erzeugt. Wahlweise lässt sich gleichzeitig Betonstahl im vorgegebenen Randabstand definieren.

### Betonstahl

Der Betonstahl für die Biegebemessung kann frei im Querschnitt positioniert werden. Zur Unterstützung wird eine Hilfslinie mit dem eingestellten Randabstand dargestellt. Die angezeigte Betonstahlnummer dient zur Identifizierung der Stahllagen bei der Ergebnisausgabe. Die Stahleigenschaften (z.B. Streckgrenze  $f_{yk}$ , Grundbewehrung) sind voreingestellt. Für markierten Betonstahl lassen sich die Eigenschaften über das Kontextmenü bearbeiten.

### +16+ Beschriften

Beschriftung des Polygons ein- oder ausschalten.

### +16+ Erneuern

Angezeigte Beschriftung des Polygons erneuern.

### Einstellen

Art und Umfang der Beschriftung sowie den Randabstand für die Eingabe des Betonstahls einstellen.

### Rand Loch übernehmen

Rand- bzw. Lochlinien aus anderen Linien übernehmen, z.B. nach dem DXF-Import einer Querschnittszeichnung.

### Querschnittswerte

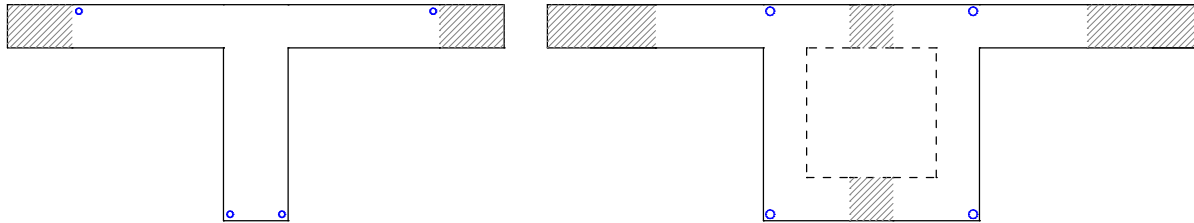
Ausführliche Querschnittswerte anzeigen (z.B.: Schubmittelpunkt, Widerstandsmomente, Einheitsverwölbung  $\omega$ ).

### Mitwirkende Breite

Definition der mitwirkenden Plattenbreite durch Markieren der Flächen außerhalb der mitwirkenden Breite. Dazu wird der Querschnitt automatisch in Dreiecke eingeteilt. Die markierten Flächen werden bei der Berechnung der Schwerpunktskoordinaten und der Biegeträgheitsmomente nicht berücksichtigt.

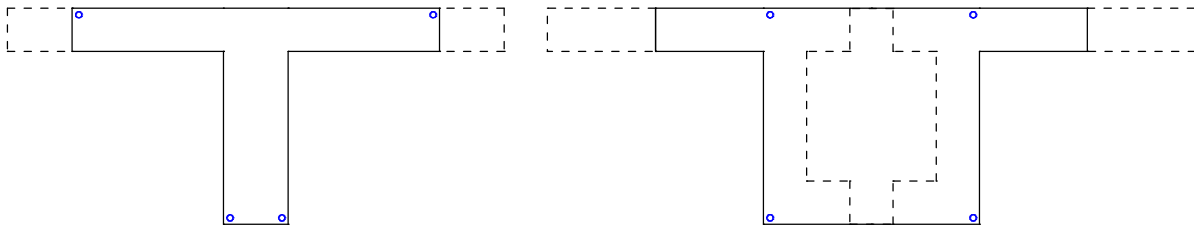
Bei Stahlbetonquerschnitten wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Eingabe des Vollpolygons mit Polygonpunkten an den Grenzen der mitwirkenden Breite
- Markierung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Flächen
- Positionierung der Betonstahllagen innerhalb der mitwirkenden Breite



Schraffierte Darstellung der außerhalb der mitwirkenden Breite liegenden Querschnittsteile

Alternativ kann das Querschnittspolygon mit den auf die mitwirkende Breite reduzierten Querschnittsabmessungen eingegeben werden.



Auf die mitwirkende Plattenbreite reduzierte Querschnittspolygone

## Betonstahl - Eigenschaften

### Streckgrenze $f_{yk}$

Streckgrenze des Betonstahls [MN/m<sup>2</sup>].

### Grundbewehrung

Die Grundbewehrung ist die Ausgangsbewehrung für die Bemessung. Sie wird in keinem Fall vom Programm verringert. Durch Eingabe unterschiedlicher Grundbewehrungen kann ein Verhältnis der zu ermittelnden Stahlquerschnitte untereinander festgelegt werden.

### Grundbewehrung fixieren

Eine fixierte Stahllage erfährt bei der Bemessung keine Erhöhung.

### Zv0

Diese Kraft dient zur Berücksichtigung einer Vordehnung  $\epsilon_0 = Z_{v0} / E \cdot A$  bei der Berechnung der Spannungen des Betonstahls.

## Rechteckquerschnitt

Für diese Querschnittsart kann kein Stahlbetonnachweis durchgeführt werden.

### Breite $d_y$ , Höhe $d_z$

Ausdehnung des Rechtecks in lokaler y- bzw. z-Richtung der Stäbe [m].

## Stabquerschnitt

Für diese Querschnittsart können keine Nachweise geführt werden.

### A

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

### I<sub>y</sub>

Biegeträgheitsmoment [m<sup>4</sup>].

### Längstragwirkung

- *Standard*: Die Stäbe übertragen Druck- und Zugkräfte.
- *Nur Druckkraft*: Die Stäbe übertragen nur Druckkräfte.
- *Nur Zugkraft*: Die Stäbe übertragen nur Zugkräfte.

Die Verwendung von Druck- oder Zugstäben führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Dabei ist das Superpositionsprinzip nicht mehr gültig.

## Zugstab

Diese Querschnittsart beschreibt Stäbe ohne Druckfestigkeit. Diese sollten nach Möglichkeit gelenkig angeschlossen sein. Die Verwendung dieser Querschnittsart führt zu einer nichtlinearen Berechnung. Das Superpositionsprinzip ist dabei nicht mehr gültig. Für Zugstäbe können keine Nachweise geführt werden.

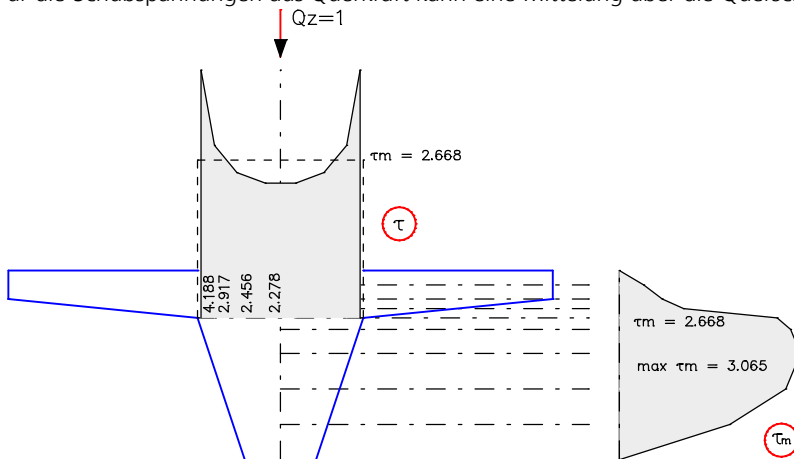
### A

Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>].

## Schubspannungen

Die linear-elastischen Schubspannungen werden standardmäßig nach der Theorie dickwandiger Profile berechnet. Im Ausrundungsbereich von Walzprofilen oder in stumpfen Ecken von geschweißten Profilen ergeben sich danach größere Spannungen als nach der Theorie dünnwandiger Profile.

Für die Schubspannungen aus Querkraft kann eine Mittelung über die Querschnittsbreite gewählt werden.



Schnittführung und Schubspannungsverteilung aus Querkraft am Querschnittspolygon nach der Theorie dickwandiger Profile ( $\tau$ ) und nach Mittelung ( $\tau_m$ )

## Material

### E-Modul

Elastizitätsmodul [MN/m<sup>2</sup>].

### G-Modul

Schubmodul [MN/m<sup>2</sup>].

**Gamma**

Spezifisches Gewicht des Materials [kN/m<sup>3</sup>]. Dieses wird bei der Lastart *Eigenlast* verwendet.

**Alpha.t**

Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K].

**fyk**

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze einzugeben [MN/m<sup>2</sup>].

**Rohdichte**

Rohdichte für Leichtbeton und Holz [kg/m<sup>3</sup>].

**ke für E-Modul**

Faktor zur Berechnung des Elastizitätsmoduls nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.3.3.

**Nutzungsstufe**

Bei Querschnitten aus Bauholz nach EN 338 und EN 14080 ist für die Holznachweise eine Nutzungsstufe auszuwählen.

Bei der Materialart *ÖNBeton* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend ÖNORM B 4700, Tabelle 4 definiert.

**fcwk**

Charakteristische Würfeldruckfestigkeit, Nennfestigkeit der Festigkeitsklasse [MN/m<sup>2</sup>].

**fctm**

Mittlere Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fctk**

Charakteristische Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**taud**

Rechenwert der Schubspannung [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *SCX* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend SIA 262, Tabelle 3 definiert.

**fck**

Charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fck,cube**

Charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

**fctm**

Mittelwert der Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *Frei* sind für eine nichtlineare Systemanalyse zusätzlich deren Festigkeitsgrenzen anzugeben.

**Druckfestigkeit**

Streckgrenze bei Druckspannungen  $f_{y,Druck}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

**Zugfestigkeit**

Streckgrenze bei Zugspannungen  $f_{y,Zug}$  (positiver Wert) [MN/m<sup>2</sup>].

**Material linear**

Der Schalter bewirkt auch in der nichtlinearen Systemanalyse ein linear-elastisches Materialverhalten dieses Querschnitts. Grundsätzlich können nur Polygonquerschnitte, Datenbankquerschnitte und Stahlbauprofile einer nichtlinearen Analyse unterworfen werden. Bei allen übrigen Querschnittsarten und bei den Materialarten *Beton* sowie *Bauholz* wird elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

## Hinweis

Der Elastizitätsmodul geht unter anderem in die Spannungs-Dehnungsfunktion nach EN 1992-1-1, Gleichung (3.14), und SIA 262, Gleichung (28), ein. Die Funktion besitzt eine Polstelle, die sich bei Abminderung des vorgegebenen Elastizitätsmoduls in den maßgebenden Dehnungsbereich verschieben kann. Daraus resultierende Ergebnisse der nichtlinearen Systemanalyse sowie der Stahlbetonnachweise können dann beeinträchtigt werden.

## Bettung

### Bettungsmodul $x, z$

Bettungsmoduln für die Stabrichtungen  $[MN/m^3]$ . Die Bettungsmoduln können zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Stabes linear veränderlich sein.

### Bettungsbreite

Für jeden Bettungsmodul ist die gebettete Breite  $[m]$  anzugeben.

### Druck- bzw. Zugfestigkeit (Nichtlineare Systemanalyse)

Die hier definierten Festigkeiten  $[MN/m^2]$  des Bodens gelten ausschließlich für eine nichtlineare Systemanalyse. Hiermit kann eine bilineare Bettungskennlinie im Druck- und Zugbereich realisiert werden (siehe auch "Baugrundmodelle"). Die Festigkeiten können zwischen Anfang (a) und Ende (e) des Stabes linear veränderlich sein.

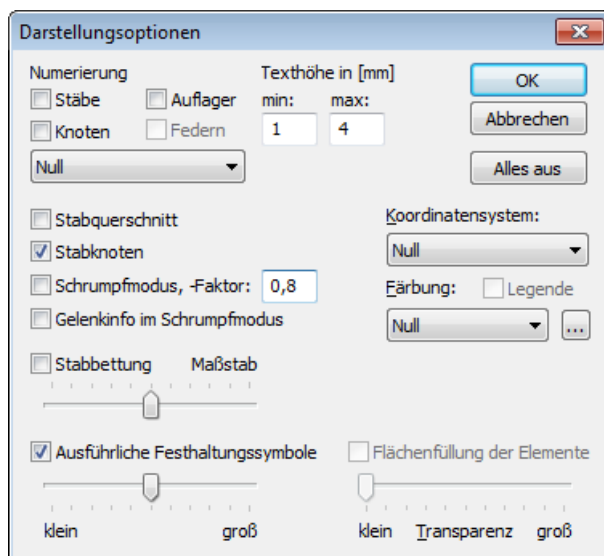
## Elementinformationen

Diese Funktion zeigt am Element und in der Statusleiste folgende Eigenschaften eines Stabes an:

- Stabnummer
- Knotennummern
- Stabsystem
- Querschnitt
- Material
- Gelenke

## Darstellung

Dieser Menüpunkt dient zur Darstellung und Kontrolle der Tragwerkseigenschaften.



### Numerierung

Stäbe, Knoten und Lager können mit Ihren Nummern beschriftet werden. Zusätzlich lassen sich Stäbe mit den Querschnittsnummern versehen. Die Anzeige der Nummern lässt sich auf Werte  $> 1$  beschränken. Alternativ kann der Querschnittsname angeschrieben werden.



**Texthöhe**

Minimale und maximale Texthöhe einstellen [mm].

**Stabquerschnitt**

Der Stabquerschnitt wird an der Stabmitte eingezeichnet.

**Stabknoten**

Die Stabknoten werden gekennzeichnet.

**Schrumpfmodus**

Verkleinerte Darstellung der Stäbe ein- oder ausschalten. Die meisten Eingabefunktionen sind in diesem Modus inaktiv.

**Schrumpffaktor**

Verkleinerungsfaktor für den Schrumpfmodus definieren.

**Gelenkinfo im Schrumpfmodus**





Im Schrumpfmodus werden vorhandene Stabendgelenke beschriftet. Gelenkfedern werden mit „\*“ gekennzeichnet.

**Stabbettung**

Die Bettungsmoduln werden entlang der Stabachsen mit gewähltem Maßstab aufgetragen.

**Ausführliche Festhaltungssymbole**

Die Eigenschaften der Festhaltungen werden ausführlich dargestellt. Der Schieberegler verändert die Größe der verwendeten Symbole.

Symbole	$u_x$	$u_z$	$\varphi_y$
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	Frei
	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>	<b>Fest</b>
	Frei	<b>Fest</b>	Frei
	<b>Fest</b>	Frei	<b>Fest</b>

**Koordinatensystem**

Koordinatensystem für Stäbe oder für Festhaltungen einschalten.

**Färbung**

Die Stäbe werden in der Farbe gezeichnet, die ihrer Querschnittsnummer entspricht. Die Farbzunordnung kann bei Bedarf modifiziert werden.

**Legende**

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

**Alles aus**

Schaltet alle Darstellungsoptionen aus.

**Netzprüfung**

Mit diesem Menüpunkt können Stäbe und Knoten überprüft werden.

**Knotenabstand**

Die Funktion prüft, ob in der Nachbarschaft eines Knotens innerhalb der angegebenen Toleranz weitere Knoten liegen. Diese sogenannten doppelten Knoten werden mit einem roten Pfeil markiert und nach Abfrage verschmolzen. Dabei werden ihre Koordinaten gemittelt.

**Stababstand**

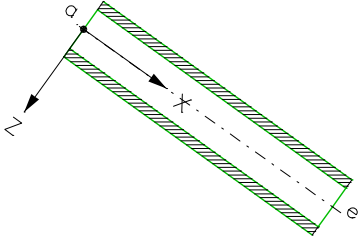
Es wird geprüft, ob Stäbe aufeinander liegen, z.B. aufgrund zweifacher Stabeingabe. Die gefundenen Stäbe werden mit einem roten Pfeil markiert.

## Elementsystem

Mit diesem Menüpunkt kann das Koordinatensystem von markierten Stäben geändert werden.

### Eingabe

+x, -x, +z, -z Durch Vertauschung des Anfangs- und Endknotens des Stabes wird erreicht, dass die positive bzw. negative Achse zum angegebenen Punkt zeigt.



## Nummern sortieren

Mit diesem Menüpunkt können Stab- und Knotennummern geändert werden.

### Eingabe

*Sortieren* Knoten- oder Stabnummern geometrisch sortieren.  
*Definieren* Definition neuer Startwerte und Inkremente für Knoten- und Stabnummern.  
*Ändern* Knoten- und Stabnummern ändern.

## Festhaltungen

Mit dieser Funktion werden Festhaltungen eingegeben. Eine Festhaltung beschreibt die Lagerungsbedingungen eines Systemknotens. Die einzelnen Freiheitsgrade können dabei starr oder federnd gelagert werden. Die Richtung der Freiheitsgrade kann vom globalen Koordinatensystem abweichen (Beschreibung durch Winkel). Die festgehaltenen Knoten sind durch einfache oder ausführliche rote Symbole gekennzeichnet (siehe *Darstellung*).

### Eingeben

Startet die Eingabe von Festhaltungen durch die Auswahl von Knoten. Die nachträgliche Bearbeitung geschieht mit den Kontextmenüfunktionen:

- Festhaltung
- Orientierung

### Info












Zeigt das Festhaltungssystem mit den gebundenen Freiheitsgraden für eine gewählte Festhaltung.

Hinweis: Bei aktiver Funktion können nur Festhaltungen markiert werden. Das erleichtert die Bearbeitung dieser Objekte.

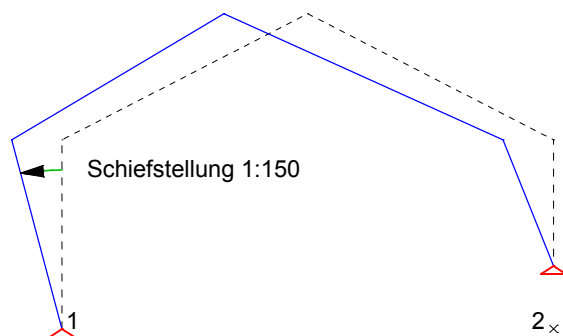
## Vorverformung

Mit dieser Funktion werden spannungsfreie Knotenverschiebungen für ein Tragwerk eingegeben und bearbeitet. Diese Knotenverschiebungen werden bei der Berechnung zu den ursprünglichen Systemkoordinaten addiert und dienen z.B. als Imperfektion für eine Berechnung nach Th. 2. Ordnung. Im Rahmen einer *Lastgruppe* wird die Vorverformung für die Berechnung aktiviert.

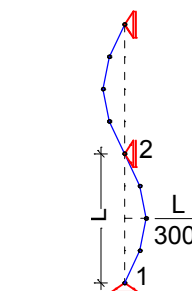
Mit den folgenden Optionen können Vorverformungen definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

-  Erstellt eine Kopie der aktuellen Vorverformung.
-  Addiert eine ausgewählte Vorverformung oder Knickeigenform zur aktuellen Vorverformung hinzu.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Vorverformungsdarstellung.
-  Erstellt eine neue Vorverformung.
-  Zeigt eine bestehende Vorverformung.
-  Ändert die Nummer der aktuellen Vorverformung.
-  Vorverformung löschen.
-  Vorverformung bearbeiten.
-  Startet die Eingabe einer Vorkrümmung.
-  Startet die Eingabe einer Schiefstellung.

Eine Absoluteingabe der Vorverformung bezieht sich auf das ursprüngliche System, eine Relativeingabe auf das bereits verformte System.



Schiefstellung der gewählten Knoten eines Rahmens  
1: 1. Punkt Basislinie, 2: 2. Punkt Basislinie



Vorkrümmung einer Stütze

## Knoten bewegen

Mit dieser Funktion kann die Lage von ausgewählten Knoten verändert werden. Bei einem einzelnen Stabknoten wird dessen neue Position abgefragt. Sollen mehrere Stabknoten bewegt werden, ist die Option *Gruppe* oder *Stäbe* zu wählen.

### Gruppe

Stabknoten wählen, welche bewegt werden sollen.

### Stäbe

Stäbe wählen, deren Knoten bewegt werden sollen.

### Verschiebungsvektor

Bewegen durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert.

### Rotieren

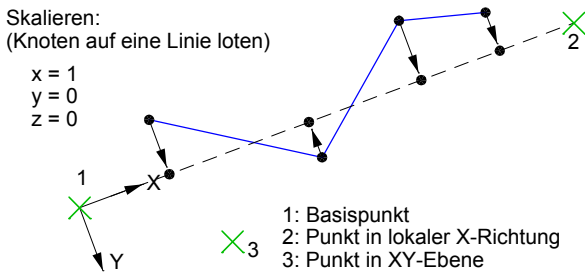
Bewegen durch Rotation.

### Spiegeln

Bewegen durch Spiegelung.

### Skalieren

Bewegen durch Skalierung im globalen oder einem lokalen Bezugssystem. Mit einem Skalierungsfaktor von Null können Knoten auf eine Achse ausgerichtet werden.



Auf Wunsch werden verschobene Knoten, die mit nicht markierten Knoten zusammenfallen, mit diesen zusammengeführt.

## Knoten oder Stäbe suchen

Wird ein Knoten mit einer bestimmten Nummer gesucht, sind die Funktionen *Knoten markieren* und *Knoten bewegen* hilfreich. Innerhalb dieser Funktion kann die gesuchte Knotennummer angegeben werden.

Wird ein Stab mit einer bestimmten Nummer gesucht, können die Funktionen *Elementinformationen* oder *Markieren* Verwendung finden. In beiden Funktionen kann die Stabnummer angegeben werden. Ist der Stab trotz Markierens nicht erkennbar, können mit Hilfe der Funktion *Elementeigenschaften* weitere Informationen abgefragt werden. Die Farbe und der Layer der markierten Objekte werden in der Symbolleiste angezeigt.

## Verdichten

Mit dieser Funktion können vorhandene Stäbe verdichtet werden.

### Punkt

Am eingegebenen Punkt wird auf der Stabachse ein Knoten eingefügt.

### Teilen

Markierte Stäbe werden geteilt. Die gewünschte Anzahl der Teile wird abgefragt.

### Anpassen

An den markierten Stäben wird geprüft, ob Knoten an deren Achsen stoßen. Bei Bedarf werden die betroffenen Stäbe an diesen Knoten geteilt.

## Koppelungen

Mit der Funktion *Koppelungen* lassen sich kinematische Abhängigkeiten zwischen den globalen Freiheitsgraden zweier Stabknoten festlegen, indem die Knotenfreiheitsgrade eines abhängigen Knotens über eine Bedingungsgleichung durch die Freiheitsgrade des bezogenen Knotens ausgedrückt werden.

$$\text{z.B. } u_{x,\text{abhängig}} = f_1 \cdot u_{x,\text{bezogen}} + f_2 \cdot u_{z,\text{bezogen}} + f_3 \cdot \varphi_{y,\text{bezogen}}$$

mit

$f_1, f_2$  Faktoren für die Verschiebungen,

$f_3$  Faktor für die Verdrehung.

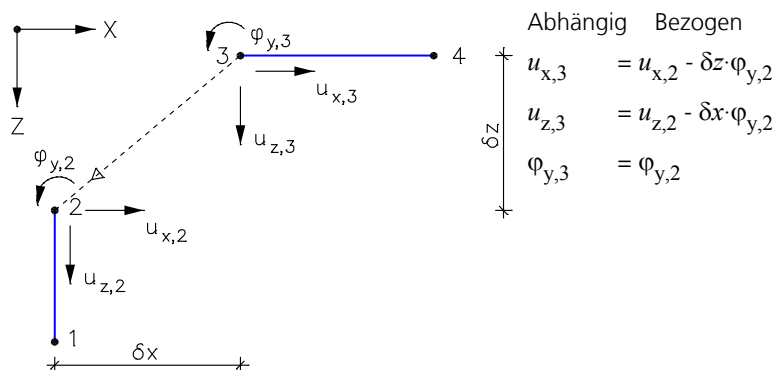
An einen bezogenen Knoten dürfen beliebig viele abhängige Knoten gekoppelt werden. Knoten mit Festhaltungen dürfen nicht als abhängige Knoten definiert werden. Die Koppelungen werden gestrichelt dargestellt. Zusätzlich zeigt ein Pfeil auf den bezogenen Knoten.

Nach Auswahl der abhängigen Knoten und des bezogenen Knotens ist die Koppelungsart festzulegen.

**Art**

- *Starr*: Starre Koppelung (Kürzel: SS).
- *Gelenkig*: Einseitig gelenkige Koppelung mit Kugelgelenk am abhängigen Knoten (Kürzel: GS).
- *ux, uz, phi.y*: Abhängiger Freiheitsgrad der benutzerdefinierten Bedingungsgleichung. Die Faktoren für die Verschiebungen und Verdrehung der Bedingungsgleichung sind festzulegen.

**Benutzerdefinierte Bedingungsgleichungen für eine starre Koppelung**



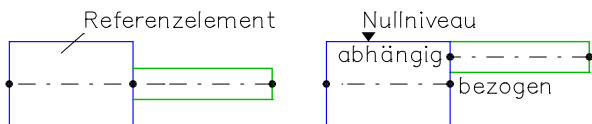
**Stäbe ausrichten**

Mit dieser Funktion werden markierte Stäbe auf einen Referenzstab ausgerichtet.

Die lokalen z-Achsen der Stäbe müssen in die gleiche Richtung zeigen. Die Ausrichtung erfolgt durch eine Verschiebung in lokaler z-Richtung, so dass die Nullniveaus dem des Referenzstabes entsprechen. In der Standardeinstellung liegt das Nullniveau bei  $z = 0$  im Querschnittspolygon. Darüber hinaus kann es folgendermaßen festgelegt werden:

- $z=0$  (Standard)
- Oberseite
- Unterseite

Zusätzlich werden zwischen den alten und den neuen Knoten starre Koppelungen erzeugt. Der obere Knoten der Koppelung wird abhängiger Knoten, sofern an diesem keine Festhaltung definiert ist. Bereits vorhandene Koppelungen bleiben erhalten.












Stäbe vor und nach dem Ausrichten (Standardfall)

## Belastung

Das folgende Kapitel beschreibt die Lasteingabe sowie die verschiedenen Lastarten. Die eingegebenen Lasten werden durch Symbole dargestellt.

Stablasten wirken generell auf die Schwereachse der Stäbe. Bei unsymmetrischen Querschnitten wird der Einfluss der Exzentrizität des Schubmittelpunkts auf die Festeinspannreaktionen nicht berücksichtigt.

Ein Lastfall besteht aus einer oder mehreren Lasten. Mit den folgenden Optionen können Lastfälle definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

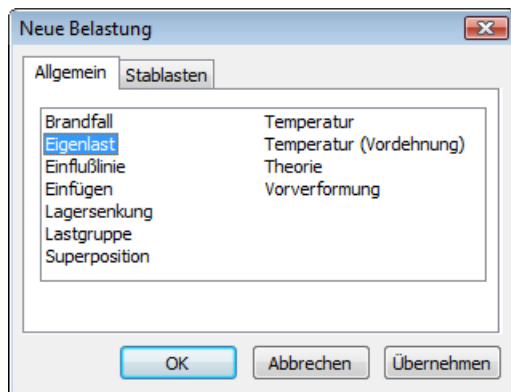
-  Erstellt eine Kopie des aktuellen Lastfalls.
-  Generiert Lastfälle nach den Vorschriften der Funktion *Generieren*. Dabei werden entweder alle oder nur die markierten Lasten vervielfältigt.
-  Importiert Lastdaten.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Belastungsdarstellung.
-  Erstellt einen neuen Lastfall.
-  Zeigt einen bestehenden Lastfall.
-  **Nr.** Ändert die Nummer und die Bezeichnung des aktuellen Lastfalls.
-  Startet die Belastungseingabe.

Im Datenbaum können Lastfälle gruppenweise unnummeriert werden.

Mit der Kontextfunktion *Belastung skalieren* können die Ordinatenwerte von mehreren markierten Lasten mit einem Faktor skaliert werden.

## Eingabe

Dieser Dialog dient zur Eingabe von Belastungen innerhalb eines Lastfalls.



Die Lastarten werden auf den nachfolgenden Seiten erläutert. Zur eindeutigen Identifizierung sind sie mit Lastkürzeln versehen.

## Eigenlast

Das gesamte Tragwerk wird mit seiner Eigenlast in globaler z-Richtung beansprucht (Lastkürzel: *EG*).

## Einflusslinie

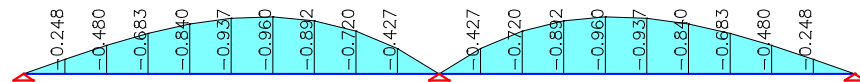
### Eingabe

Auswahl des gewünschten Stabes (Lastkürzel: *EFL*).

*Aufpunkt* Aufpunkt im Stab. Gespeichert wird der Abstand vom Stabanfang.

*Einflusslinie* "Nx", "Qz", "My".

Die Ordinaten der resultierenden Einflusslinie ergeben sich als Verformung in Richtung der auszuwertenden Last.



Einflusslinie "My" für einen Durchlaufträger

## Einfügen von Lastfalldaten

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *EINF*) können Lastdaten anderer Lastfälle in den aktuellen Lastfall gewichtet eingefügt werden. In eingefügten Lastfällen dürfen die Lastarten *Superposition* und *Einfügen* nicht enthalten sein.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der eingefügt wird.

*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der eingefügt wird.

*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Lastdaten multipliziert werden.

## Lagersenkung

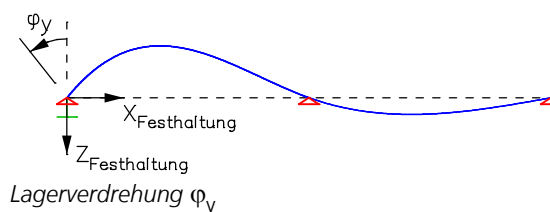
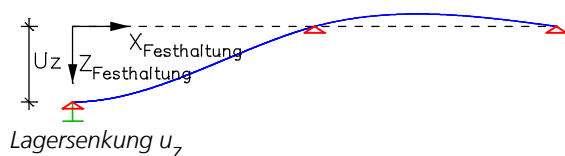
Die Lagersenkung wirkt auf festgehaltene Knoten in Richtung der gebundenen Freiheitsgrade (Lastkürzel: *DS*).

### Eingabe

Auswahl der betroffenen Festhaltungen.

*ux, uz* Verschiebungen [mm].

*phi.y* Verdrehungen [rad/1000].



## Superposition von Lastfällen

Durch Superposition (Lastkürzel: *SUP*) werden die vorhandenen Ergebnisse anderer Lastfälle addiert und gewichtet. Andere Lastarten sind in dem betreffenden Lastfall nicht zugelassen. Da die Lastfälle in aufsteigender Reihenfolge berechnet werden, sollte die Lastfallnummer der zu superponierenden Lastfälle kleiner sein als die Nummer des aktuellen Lastfalls.

### Eingabe

*Erster Lastfall* Erster Lastfall, der superponiert wird.

*Letzter Lastfall* Letzter Lastfall, der superponiert wird.

*Wichtungsfaktor* Faktor, mit dem alle Ergebnisse multipliziert werden.

## Temperatur

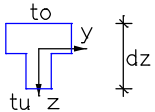
### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *TEMP*).

*tm* Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

*tu - to* Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts [K].

Für die Berechnung gelten folgende Zusammenhänge:



$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot t_m$$

$$\kappa_{T,y} = \alpha_T \cdot (t_u - t_o)/dz$$

Bei der Querschnittsart *Stab* ist diese Lastart unzulässig, da die Abmessung  $d_z$  undefiniert ist. Alternativ kann die Lastart *Vordehnung* verwendet werden.

## Temperatur, Vordehnung

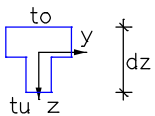
### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *TMPA*).

*alpha.t* Temperatureausdehnungskoeffizient [1/K].

*tm* Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

$(t_u - t_o)/d$  Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts bezogen auf die Querschnittshöhe [K/m].



Querschnitt mit Temperaturbeanspruchung

## Theorie

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *TH*) wird die Berechnungstheorie für den betreffenden Lastfall festgelegt.

### Eingabe

*Theorie 2. Ordnung* Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung.

*Anzahl Iterationen* Dieser Wert wird z.Z. nicht genutzt.

*Fehler* Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%].  
Es sind nur Werte  $\leq 1$  % zulässig.

*Ausfall Zugbettung* Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die Hinweise im Abschnitt *Lastgruppe* sinngemäß zu beachten.

## Vorverformung

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *VV*) wird das Tragwerk vorverformt. Dazu ist die Nummer der Vorverformung einzugeben.

## Brandfall

Diese Lastart (Lastkürzel: *FIRE*) gibt an, dass der Lastfall unter Berücksichtigung des gewählten Brandfalls berechnet werden soll. Sie wird nur bei einer nichtlinearen Systemanalyse (Brandfall) berücksichtigt.



## Lastgruppe

Diese Lastart (Lastkürzel: *GRL*) eignet sich insbesondere zum Aufbereiten von Lastfällen für eine nichtlineare Berechnung. Hiermit können Belastungen aus bestehenden Lastfällen mit den erforderlichen Lastfaktoren zusammengestellt und die gewünschte Berechnungstheorie aktiviert werden. Mit der Lastgruppe werden die bestehenden Lastarten *Einfügen*, *Theorie* und *Vorverformung* innerhalb einer Lastart zusammengefasst.

### Allgemein

<i>Berechnungstheorie</i>	<i>Theorie 1./2. Ordnung</i> : Berechnung nach geometrischer Theorie 1./2. Ordnung.
<i>Fehlerschranke</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1\%$ zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche. Bei einer nichtlineare Systemanalyse gelten immer die für die nichtlineare Bettung angegebenen Zugfestigkeiten.
<i>Zus. globaler Lastfaktor</i>	Zusätzlicher Faktor für alle Lasten.
<i>Vorverformung</i>	Nummer der Vorverformung.
<i>Lastfälle</i>	Lastfälle markieren, um sie der Auswahlliste hinzuzufügen.
<i>Lastfaktor</i>	Die einzelnen Lastfälle werden mit einem Faktor gewichtet.
<i>Übernehmen</i>	Der Wichtungsfaktor markierter Lastfälle wird geändert.

### Betonkriechen

Für die nichtlineare Systemanalyse ist eine lastfallbezogene Definition der Kriechbeiwerte für die Betonquerschnitte möglich. Eine Beschreibung der zugrundeliegenden Berechnungsmethode kann den Grundlagen zur geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnung entnommen werden.

#### *Betonkriechen bei der nichtlinearen Systemanalyse berücksichtigen*

Aktiviert das Betonkriechen für die in der Tabelle aufgeführten Querschnitte. Bei erstmaliger Aktivierung werden vorhandene Querschnitte automatisch in die Tabelle eingefügt.

#### *Aktualisieren*

Aktualisiert die vorhandenen Querschnittseinträge.

#### *Alle Qu. gleich*

Übernimmt die Eingabewerte der 1. Tabellenzeile für die weiteren Querschnitte.

#### *phi*

Kriechbeiwert.

#### *Berechnet*

Ja: Der Kriechbeiwert wird aus den weiteren Parametern ermittelt.

#### *t0, t*

Belastungsbeginn und Betonalter.

#### *Faktor*

Optionaler Faktor für den berechneten Kriechbeiwert.

Dieser dient z.B. zur Ermittlung von  $\varphi_{ef}$  gemäß EN 1992-1-1:2004 aus dem berechneten Beiwert.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die folgenden Hinweise zu beachten.

### Berechnung nach Theorie 2. Ordnung

Vor einer Berechnung nach Theorie 2. Ordnung ist sicherzustellen, dass das System nach Theorie 1. Ordnung kinematisch stabil ist. Ein Stabilitätsversagen aufgrund Stabknickens wird im Berechnungslauf nach 2. Ordnung durch eine Singularität des Gleichungssystems oder einer Stabsteifigkeitsmatrix erkannt. Dieser Zustand wird dann mit einem Abbruch der Berechnung unter Angabe des Ortes und des versagten Freiheitsgrades gemeldet. In Grenzfällen kann es notwendig sein, die Fehlerschranke auf „0“ zu setzen, um den Versagenszustand feststellen zu können.

### Fehlerschranke des Residuums

Die Lösung aller nichtlinearen Problemstellungen erfolgt iterativ. Als Maß für die Steuerung der Iteration gilt die Länge des Fehlervektors, das Residuum. Es wird für jeden Iterationsschritt in der Ausgabeleiste angezeigt. Die Iteration wird beendet, wenn das verbleibende Residuum in Bezug auf das Anfangsresiduum die vorgegebene Fehlerschranke erreicht hat. Die Berechnungsergebnisse sind dann durchschnittlich mit einem relativen Fehler in gleicher Höhe behaftet. Falls die Fehlerschranke nicht erreicht werden kann, gibt das Rechenprogramm eine Meldung aus.

### Ausfall der Zugbettung

Bei unrealistischer Lastzusammenstellung (z.B. Fehlen der Eigenlast) kann es zum Ausfall aller Bettungen kommen (siehe auch "Baugrundmodelle"). Wenn dadurch das System verschieblich wird, erfolgt ein Abbruch der Berechnung wegen singulären Gleichungssystems mit Angabe des verschieblichen Freiheitsgrades.

### Berücksichtigung von Zug- und Druckstäben

Bei Tragwerken mit Zug- und Druckstäben erfolgt die iterative Ermittlung des Gleichgewichtszustands automatisch mit einer Fehlerschranke von 1%. Im Lastfall kann ein kleinerer Wert vorgegeben werden. Instabilitäten durch Ausfall von Stäben bewirken ein singuläres Gleichungssystem mit Abbruch der Berechnung.

### Lastzusammenstellung

Zur Zusammenstellung der maßgeblichen Einwirkungen für Berechnungen nach Theorie 2. Ordnung oder mit Ausfall der Zugbettung werden die betreffenden Lastfälle in die Auswahlliste übertragen und mit Lastfaktoren versehen.

Bei Berechnungen nach DIN 18800, Teil 2, oder EN 1993-1-1 sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Berechnung nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit linearem Materialgesetz nach der Elastizitätstheorie und anschließend Nachweis Elastisch-Elastisch oder Elastisch-Plastisch. Die Schnittgrößen sind gemäß Norm mit den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungswerten der Einwirkungen zu ermitteln. Die Lastfälle der Auswahlliste sind dazu mit dem Faktor  $\gamma_F$  zu wichten. Zusätzlich ist  $\gamma_M$  als globaler Lastfaktor anzugeben.
- Durchführung eines Tragfähigkeitsnachweises nach geometrischer Theorie 2. Ordnung mit nichtlinearem Materialgesetz nach der Plastizitätstheorie. Hierbei wird  $\gamma_M$  gemäß Norm auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Die Schnittgrößen-ermittlung hat mit den Bemessungswerten der Einwirkungen zu erfolgen. Als Wichtungsfaktor ist also lediglich  $\gamma_F$  anzugeben.

### Superpositionsverbot

Berechnungen mit Zug- und Druckstäben, nach der Theorie 2. Ordnung oder unter Ausschluss der Zugbettung liefern ihre Ergebnisse nach nichtlinearer Iteration. Für diese gilt folglich nicht mehr das Superpositionsprinzip, d.h. sie dürfen nicht mit anderen Ergebnissen additiv überlagert werden. Eine Weiterverarbeitung in Lastfallkombinationen ist nur zulässig, wenn diese keine anderen als sich gegenseitig ausschließende (exklusive) Einwirkungen enthalten.

## Einzellast

### Eingabe

<i>Global orientiert</i>	Einzellast im Globalsystem (Lastkürzel: <i>EGX, EGZ</i> ).
<i>Lokal orientiert</i>	Einzellast im Stabsystem (Lastkürzel: <i>EL</i> ).
<i>Lastort</i>	Lastort im Stab, der abhängig von der Lastausrichtung festgelegt wird. <i>Global orientiert:</i> Koordinatendifferenz $\Delta x$ oder $\Delta z$ zum Stabanfang. <i>Lokal orientiert:</i> Abstand vom Stabanfang.
<i>P<sub>x</sub>, P<sub>z</sub>, M<sub>y</sub></i>	Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN] bzw. [kNm].

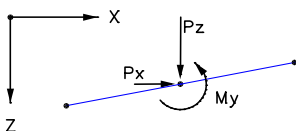
## Knotenlast

Knotenlasten wirken im Globalsystem (Lastkürzel: *KNL*).

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stabknoten.

<i>P<sub>x</sub>, P<sub>z</sub></i>	Kräfte [kN].
<i>M<sub>y</sub></i>	Moment [kNm].



## Linienlast

### Eingabe

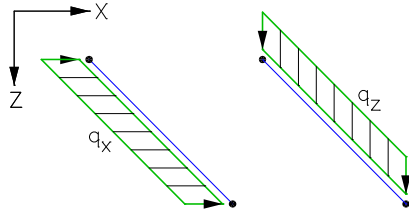
Auswahl der belasteten Stäbe.

*Global orientiert* Linienlast im Globalsystem (Lastkürzel: *LG*).

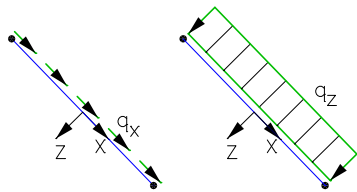
*Lokal orientiert* Linienlast im Stabsystem (Lastkürzel: *LL*).

*Projektiv orientiert* Projektion der Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: *LP*).

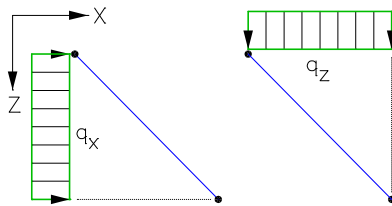
$q_x, q_z$  Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].



*Globale Linienlast*



*Lokale Linienlast*



*Projektive Linienlast*

## Trapezlast

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe.

*Anfang* Lastanfang.

*Ende* Lastende.

*Global orientiert* Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: *TG*).

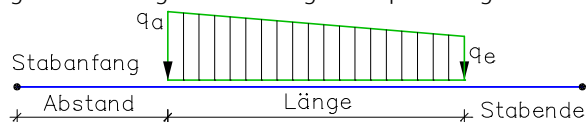
*Lokal orientiert* Trapezlast im Stabsystem (Lastkürzel: *TL*).

*Projektiv orientiert* Projektion der Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: *TP*).

*Startordinate* Lastordinate am Lastanfang in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

*Endordinate* Lastordinate am Lastende in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m].

Bei einer Trapezlast über mehrere Stäbe wird die Last automatisch geteilt. Die Abstände von den Stabanfängen, die Lastlängen und die interpolierten Lastordinaten werden für die gewählten Stäbe automatisch ermittelt. Dadurch kann ein ganzer Stabzug mit einer Eingabe trapezförmig belastet werden.



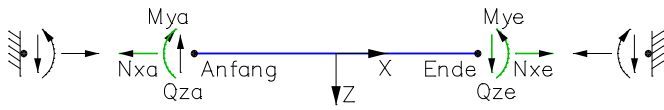
## Volleinspannkkräfte

### Eingabe

Auswahl der belasteten Stäbe (Lastkürzel: *S0*).

$N_a$ ,  $Q_a$ ,  $N_e$ ,  $Q_e$  Normal- und Querkraft an Stabanfang- bzw. -ende [kN].

$M_a$ ,  $M_e$  Moment an Stabanfang- bzw. -ende [kNm].



Festeinspanngrößen am Stabanfang und -ende.

## Berechnung

Im Berechnungs-Menü werden programmspezifische Einstellungen vorgenommen und die Rechenprogramme gestartet.



Einstellungen...



Stapel...



Statik

Querschnittstemperaturen

Lastfallkombination

DIN 1045-1 Bemessung

DIN EN 1992-1-1 Bemessung

EN 1992-1-1 Bemessung

ÖNORM B 4700 Bemessung

ÖNORM EN 1992-1-1 Bemessung

SIA 262 Bemessung

SS EN 1992-1-1 Bemessung

Einzelbemessung

DIN 18800 Stahlnachweise

EN 1993-1-1 Stahlnachweise

DIN 1052 Holznachweise

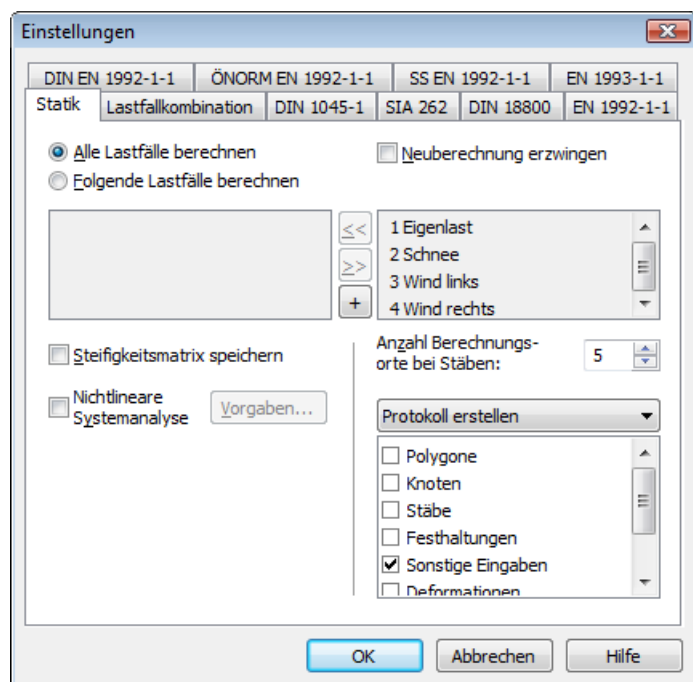
EN 1995-1-1 Holznachweise

Markierte Elemente

Stop Berechnung

Während der Berechnung wird in der Ausgabeleiste der Programmfortschritt mit eventuellen Fehlermeldungen und Warnungen angezeigt.

## Einstellungen Statik



### Alle Lastfälle berechnen

Alle Lastfälle werden berechnet (Standard).

### Folgende Lastfälle berechnen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

### Neuberechnung erzwingen

Ist dieser Schalter aktiviert, werden alle gewählten Lastfälle neu berechnet. Anderenfalls untersucht das Berechnungsprogramm, ob eine Neuberechnung erforderlich ist.

### Steifigkeitsmatrix speichern

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix wird für eine spätere Wiederverwendung gespeichert. In der 64-Bit Edition ist die Funktion inaktiv.

### Nichtlineare Systemanalyse

Eine nichtlineare Systemanalyse wird durchgeführt. Die Schaltfläche *Vorgaben* öffnet den Einstellungsdialog für den Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis sowie für den Nachweis im Brandfall. Dort werden die Lastfälle ausgewählt, die statt der hier getroffenen Auswahl berechnet werden.

### Anzahl Berechnungsorte bei Stäben

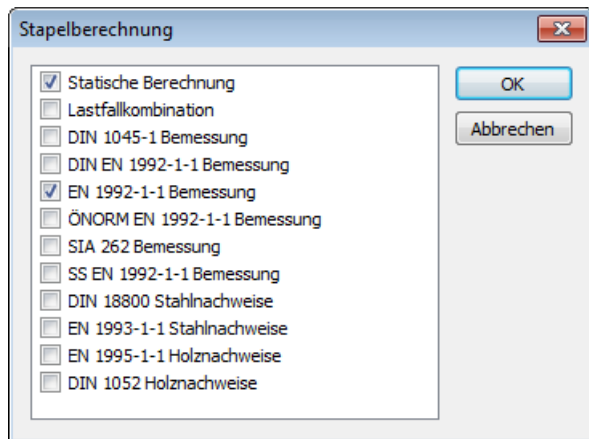
Die Schnittgrößen werden an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Standardmäßig werden fünf Berechnungsorte benutzt. Bei gebetteten Stäben werden Reaktionen nur in den Knoten berechnet.

### Protokoll

- *Kein Protokoll*: Vom Berechnungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Protokoll erstellen*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll gemäß Auswahlliste erstellt.

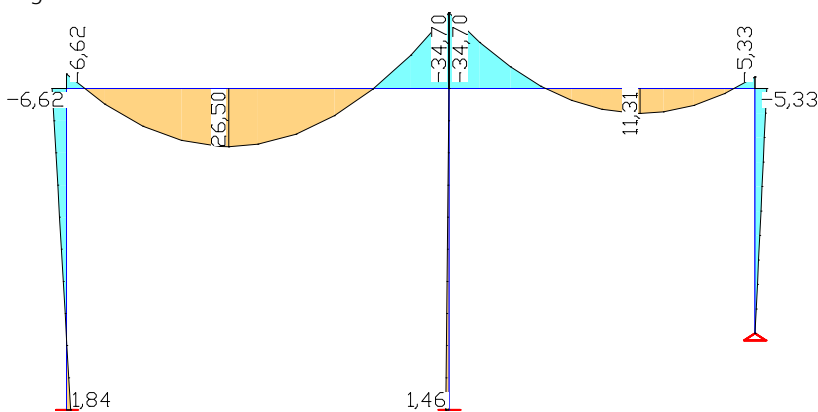
## Stapelberechnung

Mit diesem Menüpunkt werden ausgewählte Berechnungen nacheinander gestartet.



## Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird die Darstellung der Berechnungsergebnisse beschrieben. Ergebnisse können sowohl graphisch als auch tabellarisch angezeigt werden. Deren Auswahl erfolgt in der Datenbasis oder mit der Funktion *Ergebnisse* des Tragwerksmenüs.



Schnittgrößendarstellung  $M_y$  einer Hallenkonstruktion








### Summe der aufgetragenen Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fz [kN]
1	ständige Lasten	0,000	227,550
	Auflagerreaktionen	0,000	227,550
2	Verkehr von oben	0,000	30,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	30,000
3	Verkehr Feld 1	0,000	37,500
	Auflagerreaktionen	0,000	37,500
4	Verkehr Feld 2	0,000	30,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	30,000
5	Wind von links	42,000	0,000
	Auflagerreaktionen	42,000	0,000
6	Wind von rechts	-32,000	0,000
	Auflagerreaktionen	-32,000	-0,000
7	Anpralllast	10,000	0,000
	Auflagerreaktionen	10,000	-0,000

Tabellarische Ausgabe der Lastsummen

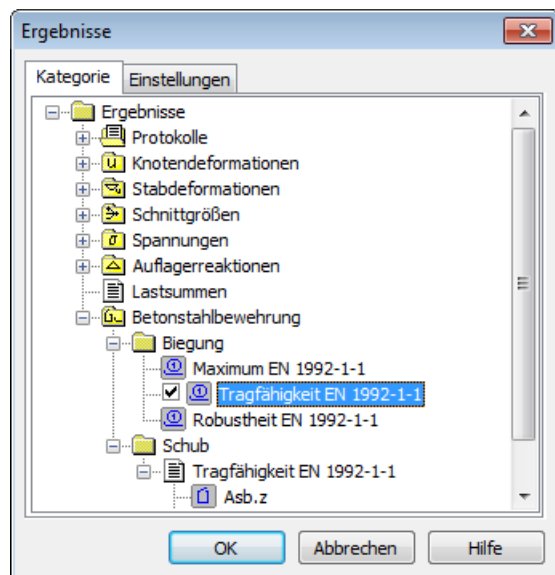
## Ergebnisleiste



Die Ergebnisleiste enthält folgende Schaltflächen zur Ergebnisdarstellung:

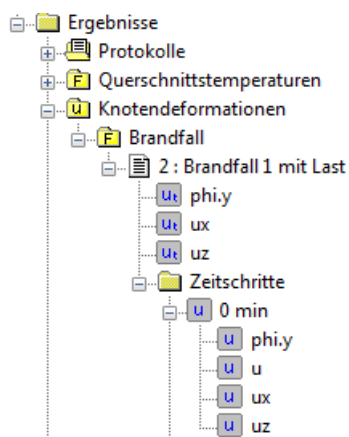
-  Startet den Dialog für die Ergebnisdarstellung.
-  Ergebnisdarstellung abschalten.
-  Ordinatenauswahl für die manuelle Beschriftung.
-  Ergebnisdarstellung für markierte Stäbe auswählen.
-  Ergebnisdarstellung für markierte Stäbe abwählen.
-  Ergebnismarker für Spannungen im Brandfall einfügen. An diesen Orten werden bei der Berechnung die Spannungsverteilungen über den Querschnitt für jeden Zeitpunkt gespeichert. Diese Ergebnisse können mit einem Doppelklick auf den entsprechenden Marker angezeigt werden.
-  Ordinatenwert am Markierungsort in der Statusleiste ausgegeben.

## Ergebniskategorien

Die nachfolgende Dialogseite zeigt mögliche Ergebniskategorien.



In den Unterpunkten zu der jeweiligen Kategorie sind die berechneten Lastfälle und Kombinationen sowie alle darstellbaren Ergebniskomponenten aufgeführt. Nach getroffener Auswahl bietet die Registerkarte *Einstellungen* die nachfolgend erläuterten Darstellungsformen mit weiteren Optionen an. Das vorangestellte Symbol kennzeichnet die Art der Darstellung (z.B. : Tabellarische Darstellung, : graphische Schnittkraftdarstellung).



Ergebnisse einer Brandanalyse werden nach Auswahl eines Zeitschritts wie die Ergebnisse eines Lastfalls angezeigt. Bei Wahl einer übergeordneten Komponente lässt sich der Ergebnisverlauf entweder für einen gewählten Ort als Diagramm darstellen oder am Gesamtsystem animieren (*Verformungsfigur, Zustandslinie*).

## Verformungsfigur

### Maßstab

Der Maßstab kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden. Die Knotenverschiebungen werden mit dem Verzerrungsfaktor multipliziert und zu den Knotenkoordinaten addiert. Bei Lastfällen wird zusätzlich die Biegelinie dargestellt.

### Originalsystem gestrichelt darstellen

Ein- oder Ausschalten des gestrichelten undeformierten Systems während der Verformungsdarstellung.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung der Knoten mit der Länge des Verschiebungsvektors [mm].
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.

### Grenzwert für Beschriftung

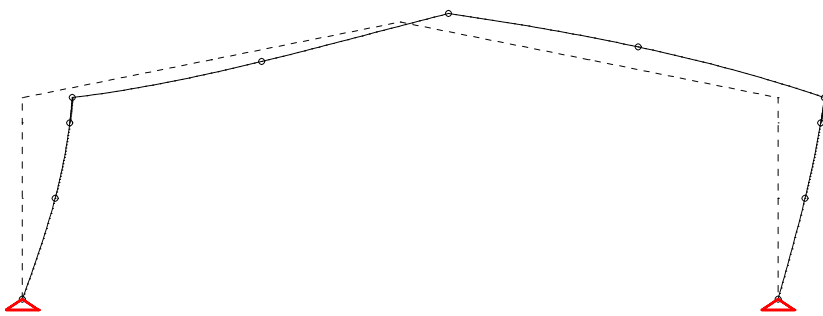
Nur betragsmäßig größere Verschiebungen werden beschriftet.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



Überhöhte Verformungsfigur

## Numerisch

In dieser Darstellungsform werden Auflagerreaktionen oder Knotendeformationen numerisch angezeigt.

### Unterer Grenzwert für Darstellung

Nur betragsmäßig größere Ergebnisse werden ausgegeben.

### Texthöhe [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

## Zustandslinien

Die Stabschnittgrößen von Lastfällen werden mit ihrem exakten Verlauf entlang der Stabachse aufgetragen. Bei allen anderen Ergebnissen wird zwischen den Berechnungsorten von einem linearen Verlauf der Ergebnisse ausgegangen.

### Maßstab

Der Maßstab der Ordinatarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.



**Beschriftung**

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung aller Ordinaten.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisleiste wählen.

**Grenzwert für Beschriftung**

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

**Dezimalstellen**

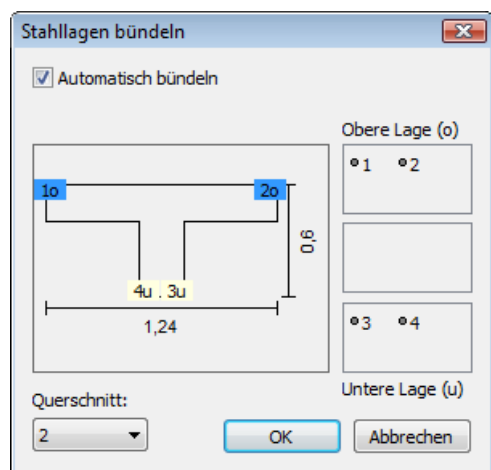
- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

**Texthöhe in [mm]**

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

**Stahllagen bündeln...**

Mit dieser Funktion wird die Darstellung der Stahllagen festgelegt.



Bei der automatischen Bündelung werden alle Stahllagen, deren z-Komponente kleiner ist als die z-Komponente des Schwerpunkts, auf der Oberseite der Elemente dargestellt, alle anderen Lagen auf der Unterseite.

Bei der manuellen Bündelung können die Stahllagen mit der Maus zwischen den Listenfeldern verschoben werden. Die Stahllagen des mittleren Listenfeldes sind von der Darstellung ausgenommen.

**Grundbewehrung abziehen**

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.

**Querschnittsspannungen**

Der Spannungsverlauf wird an einem Stabquerschnitt in einem Dialogfenster dargestellt. Dieses ist über das Kontextmenü der Stäbe erreichbar, wenn Zustandslinien von Spannungen oder Schnittgrößen angezeigt werden.

**Lastfall**

Auswahl der berechneten Lastfälle und Kombinationen.

**Satz**

Auswahl des Schnittkraftsatzes für die Spannungsermittlung. Bei *Extremum* werden die betragsmäßigen Extremwerte der Spannungen aus allen Schnittkraftsätzen dargestellt.

**Stab**

Nummer des ausgewählten Stabes.

**Ort**

Auswahl des Berechnungsortes im Stab.

### Querschnitt

Bezeichnung des dargestellten Querschnitts.

### $N_x, Q_y, Q_z, M_x, M_y, M_z$

Schnittgrößen am gewählten Berechnungsort, aus welchen sich der dargestellte Spannungsverlauf ergibt.

### Spannung

Die Spannungen werden im allgemeinen unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens berechnet. Bei Ergebnissen aus einer nichtlinearen Systemanalyse werden an Polygonquerschnitten und Stahlbauprofilen aus Baustahl (S235 bis S450 oder S235-EN bis S450-EN) oder Stahl die Spannungen des plastischen Zustands dargestellt.

- $\sigma_x$ : Längsspannungen aus Biegemomenten und Längskraft.
- $\sigma_v$ : Vergleichsspannungen nach der Huber-v.Mises-Fließbedingung.
- $\sigma_{1,2}$ : Hauptspannungen aus Biegemomenten, Längskraft, Querkraften und Torsion.
- $\tau_{r}$ : Schubspannungen aus Querkraften und Torsion parallel zum Rand.
- $\tau_{xy}$ : Schubspannungen aus Querkraften und Torsion in y-Richtung.
- $\tau_{xz}$ : Schubspannungen aus Querkraften und Torsion in z-Richtung.

### Beschriftung

Beschriftung der Extremwerte. Optional kann mit der rechten Maustaste die Beschriftung ausgewählte Ordinatenwerte ein- bzw. ausgeschaltet werden.

### Drucken

Drucken der Querschnittsspannungen.

### ->Druckliste

Einfügen der aktuellen Ansicht in die Druckliste.

### Darstellung

Die Spannungen können entweder linienförmig entlang des Randes oder flächig dargestellt werden.

Die Ansicht kann mit Hilfe der Maus gedreht werden. In Verbindung mit der Hochtaste wird der Bildausschnitt verschoben. In Verbindung mit der Strg-Taste wird die Größe des Zoomausschnitts verändert. Verbleibt der Mauszeiger für einen Moment an einer Ordinate, wird die dort vorhandene Spannung dargestellt.

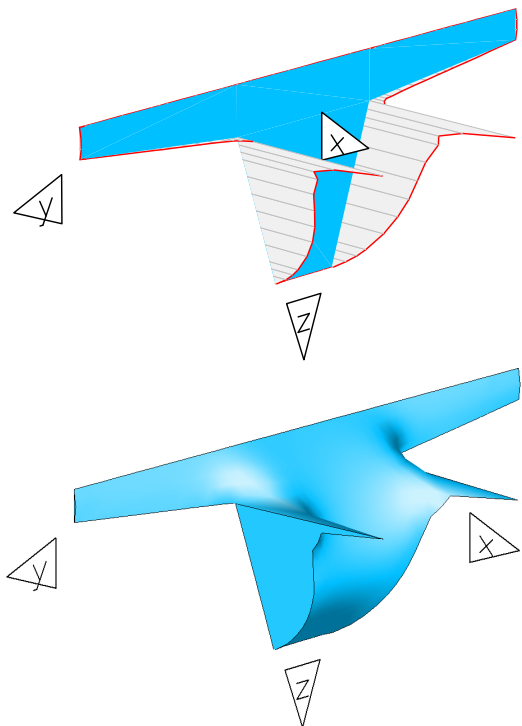
### Querschnittsspannungen $\tau_{xz}$ (Elastisch)

Stab 1, Punkt 1, Querschnitt Polygon - C20/25

Lastfall 1

$N_x / Q_y / Q_z = 0,00 / -0,00 / 5865,00$  kN;  $M_x / M_y / M_z = -0,00 / -58650,00 / 0,00$  kNm

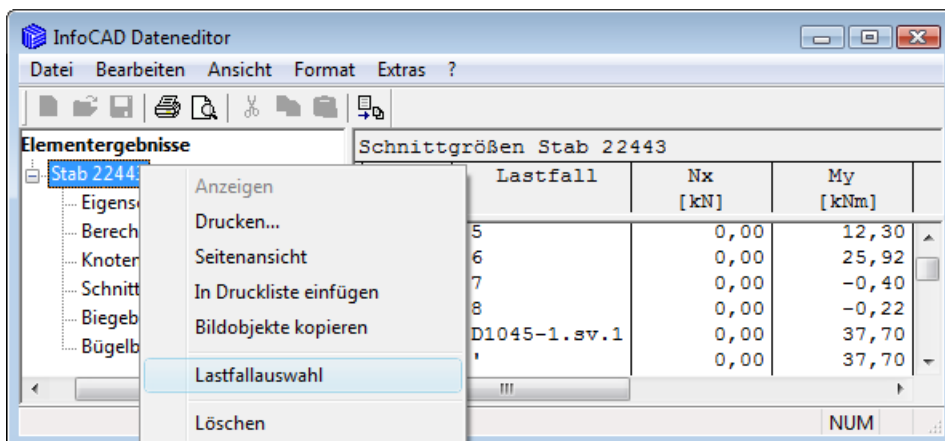
Wertebereich der Spannungen:  $-0,00157631$  bis  $4,18786$  MN/m<sup>2</sup>.



Schubspannungsverteilung  $\tau_{xz}$  entlang des Randes bzw. flächig

## Ergebnisliste

Die Ergebnisliste wird für markierte Elemente im Dateneditor ausgegeben. Sie ist über das Kontextmenü der Elemente erreichbar.



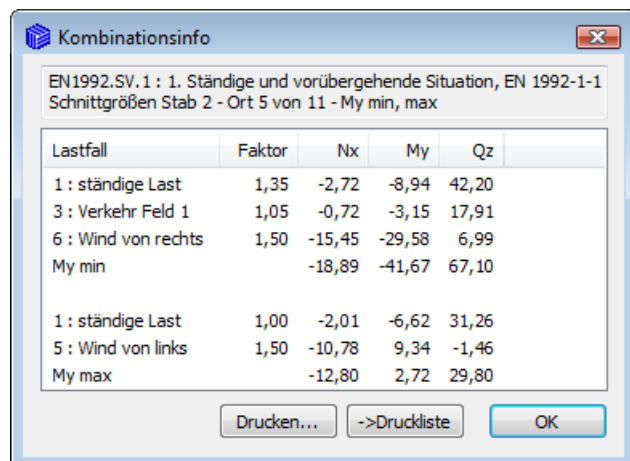
Mit der Kontextfunktion *Lastfallauswahl* kann die Ausgabe auf bestimmte Lastfälle beschränkt werden.

## Kombinationsinfo

Mit der *Kombinationsinfo* können die an einem Kombinationsergebnis beteiligten Lastfälle mit Ihren jeweiligen Wichtungen bestimmt werden. Diese Funktion steht während der Ergebnisdarstellung einer Kombination zur Verfügung. Nach der Auswahl des gewünschte Ergebnisortes mit der rechten Maustaste erscheint im Kontextmenü die Funktion *Kombinationsinfo*.

Über das Kontextmenü des Dialoges können folgende Funktionen aufgerufen werden:

- *Kopieren* (Zwischenablage)
- *Lastgruppe erzeugen...*
- *Superpositions-Lastfall erzeugen*
- *Zugehörige Deformationen...*
- *Zugehörige Auflagerkräfte...*



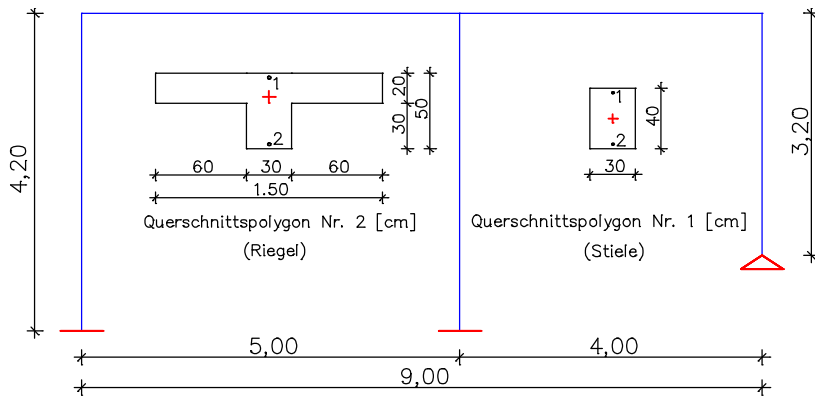
### Letzte Kombination

Zeigt die zum letzten *Kombinationsinfo* zugehörigen Zustandsgrößen.

# Beispiele

## Stahlbetonrahmen

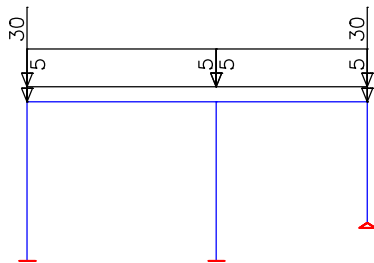
Der abgebildete Stahlbetonrahmen (C20/25 - EN 1992-1-1, BSt 500/550, Überdeckung 3 cm) wird berechnet und anschließend nach EN 1992-1-1 bemessen.



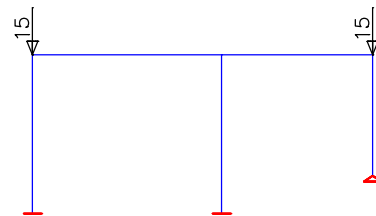
Statisches System und Querschnittspolygone

### Lastfälle

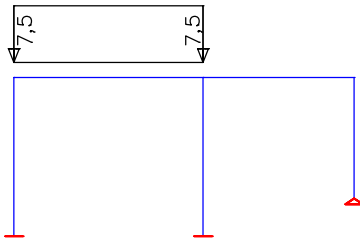
#### EIGENLAST



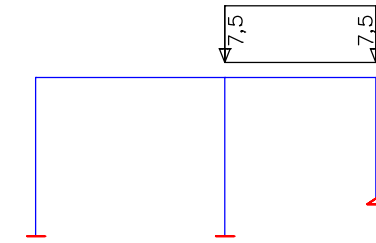
Lastfall 1: ständige Last



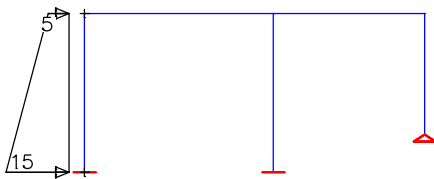
Lastfall 2: Verkehr von oben



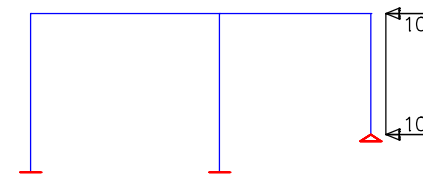
Lastfall 3: Verkehr Feld 1



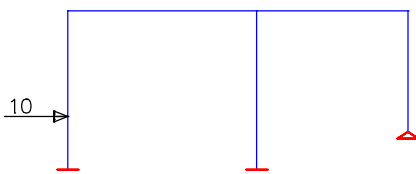
Lastfall 4: Verkehr Feld 2



Lastfall 5: Wind von links



Lastfall 6: Wind von rechts



Lastfall 7: Anpralllast Einzellast 1,4 m vom Auflager

**EN 1992-1-1 Einwirkungen****Standard Bemessungsgruppe****G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lastfälle

1 ständige Last

**QN - Nutzlast, Verkehrslast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten

Nutzlasten - Kategorie A: Wohngebäude

Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,7 / 0,5 / 0,3

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

2 Verkehr von Oben  
 3 Verkehr Feld 1  
 4 Verkehr Feld 2

**QW - Windlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten

Windlasten

Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

5 Wind von links  
 6 Wind von rechts

**A - Außergewöhnliche Einwirkung**Lastfälle 1. Variante, exklusiv

7 Anpralllast

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

G Eigenlast  
 QN Nutzlast, Verkehrslast  
 QW Windlast

**1. Außergewöhnliche Situation**

Endzustand

G Eigenlast  
 QN Nutzlast, Verkehrslast  
 QW Windlast  
 A Außergewöhnliche Einwirkung

**1. Seltene (charakteristische) Situation**

Endzustand

G Eigenlast  
 QN Nutzlast, Verkehrslast  
 QW Windlast

**Bemessungsvorgaben EN 1992-1-1**

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung M R B Q T	Ermüd. S P C	Riss- br.	De- komp.	Spannungen Druck S P
1	XC4	Nicht vorgesp.	. . x x .	. . . .	.	.	. . .
2	XC4	Nicht vorgesp.	x . x x .	. . . .	.	.	. . .

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.  
 (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.  
 (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.  
 (Q) (Mindest-)Querkräftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.  
 (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.  
 (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.  
 (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.  
 (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
 (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.  
 fyk Stahlgüte der Bügel.  
 Theta Neigung der Betondruckstreben.  
 Pl. Balken werden wie Platten bemessen.  
 Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.  
 rhow Faktor für Mindestbewehrungsgrad rho.w,min nach Kap. 9.3.2 (2).  
 Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

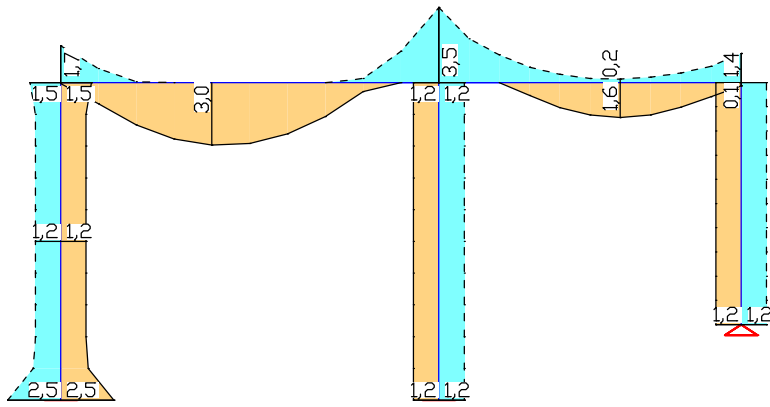
Qu.	Beton	Roh- dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Bild 6.3 vorh.	Red. Fak. rhow	Red. Vor- spg.
1	C20/25-EN	.	DG	500	1,00	.	0,00	.	1,00
2	C20/25-EN	.	ST	500	1,00	.	0,00	.	1,00

**Schubquerschnitte**

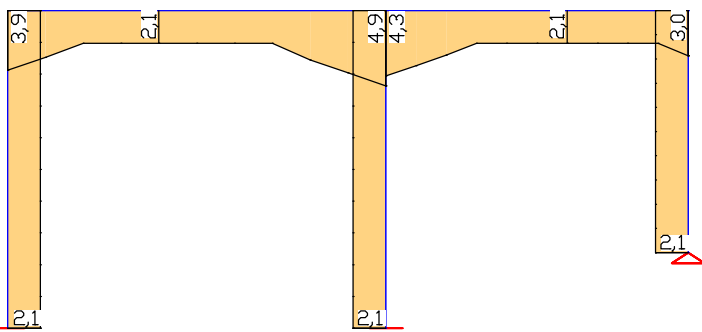
kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d.

Qu.	Breite [m] bw	Nutzhöhe [m] bn	Höhe [m] h	Nutzhöhe [m] kd	Torsionsquerschn. [m] z1 z2	tef K.
1	0,300	.	.	0,370	0,90	.
2	0,300	.	.	0,470	0,90	.

**Ergebnisse**



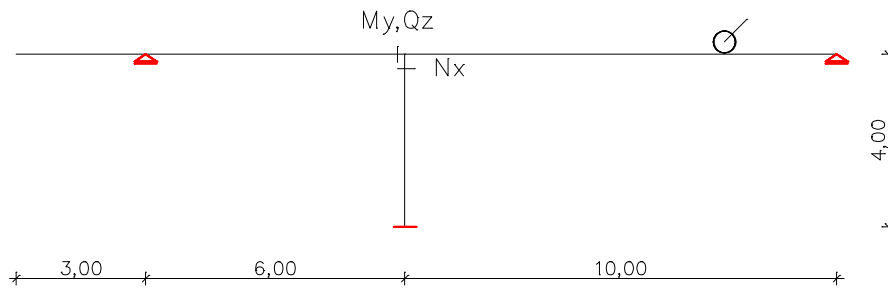
Obere und untere Biegebewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit [cm²]



Bügelbewehrung  $A_{sb}$  [cm²/m]

**Einflusslinien**

Das folgende Beispiel zeigt die Berechnung von Einflusslinien (Hirschfeld S. 355).



Statisches System mit den Aufpunkten für  $N_x$ ,  $Q_z$ ,  $M_y$

**Materialkennwerte**

Nr.	Mat.-Art	E-Modul [MN/m²]	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m³]	kbx [MN/m³]	kbz [MN/m³]	bx [m]	bz [m]
1	Frei	1	1,000e-05	25,000	0,0	0,0	1,00	1,00

**Querschnittswerte**

Nr. 1 Stab, Frei  
 $A = 1,000e+05$  [m²],  $I_y = 1,000e+00$  [m4]

**Knotenbeschreibung**

Nr.	x [m]	z [m]
1	0,000	0,000
2	3,000	0,000
3	9,000	0,000
4	19,000	0,000
5	9,000	4,000

**Elemente**

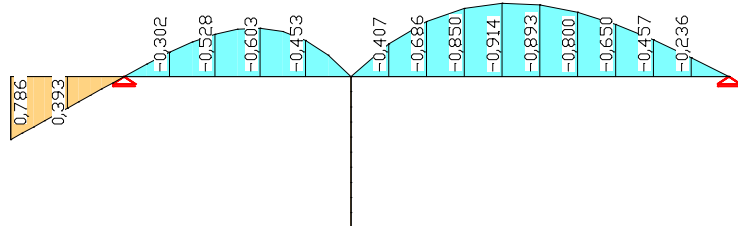
Nr.	Kn 1	Kn 2	Qsw Mat	Gelenke NQM NQM	Länge [m]	Layer
1	1	2	1	0 0	3,000	1
2	2	3	1	0 0	6,000	1
3	3	4	1	0 0	10,000	1
4	3	5	1	0 0	4,000	1

**Festhaltungen**

Knoten- nummer	x - Richtung			z - Richtung			Verdrehung	
	F=	Feder [MN/m]	Winkel [grad]	F=	Feder [MN/m]	Winkel [grad]	F=	Feder [MNm]
2	-		0,00	F		0,00	-	
4	-		0,00	F		0,00	-	
5	F		0,00	F		0,00	F	

**Lastdaten Lastfall 1**

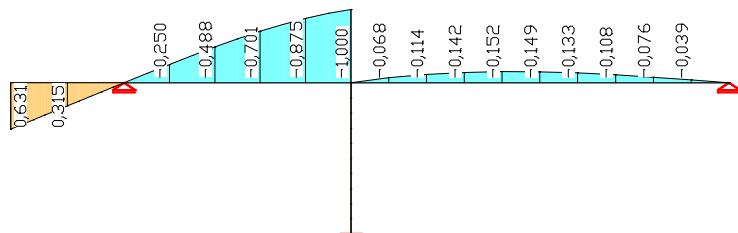
SEFL : Einflusslinie für die Schnittgröße My  
 Stab 2 Abstand von Stabanfang 6,00 [m]



*Einflusslinie  $M_y$  für die Belastungsrichtung z-global*

**Lastdaten Lastfall 2**

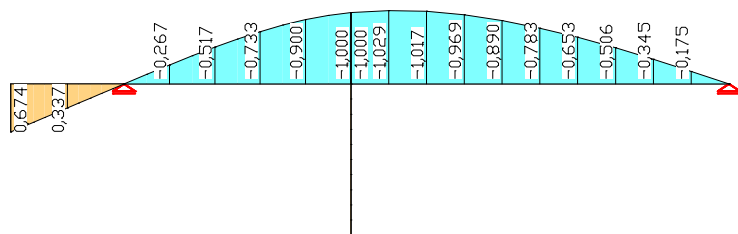
SEFL : Einflusslinie für die Schnittgröße Qz  
 Stab 2 Abstand von Stabanfang 6,00 [m]



*Einflusslinie  $Q_z$  für die Belastungsrichtung z-global*

**Lastdaten Lastfall 3**

SEFL : Einflusslinie für die Schnittgröße Nx  
 Stab 4 Abstand von Stabanfang 0,00 [m]

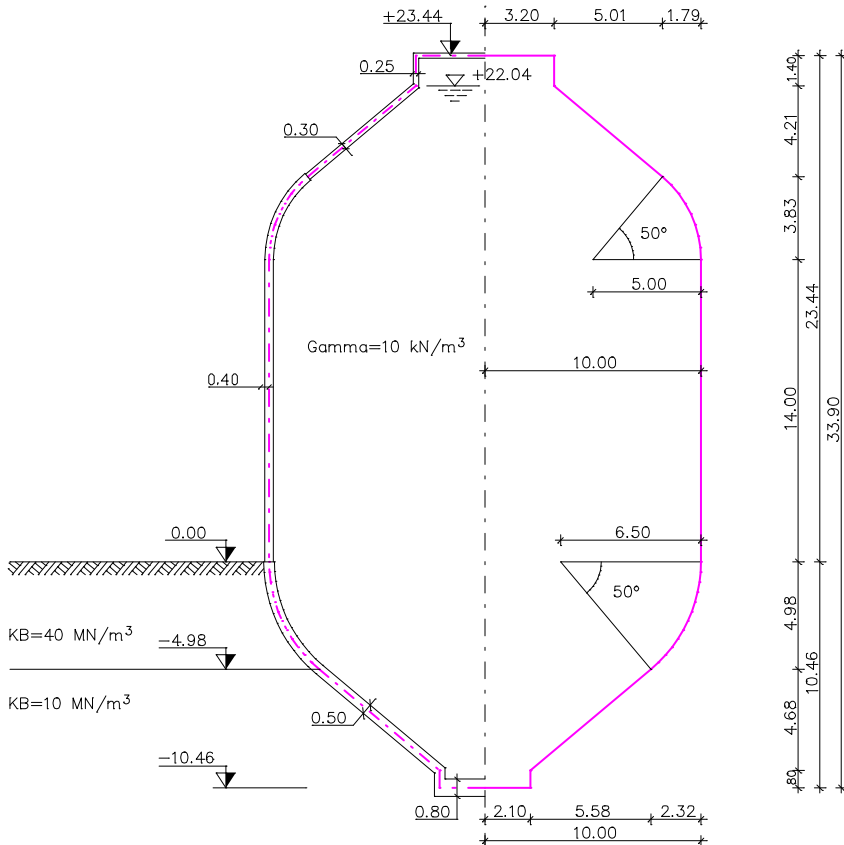


*Einflusslinie  $N_x$  für die Belastungsrichtung z-global*

# Rotationsschale

## Grundlagen

Das Programmsystem *Rotationsschale* ist für die Berechnung von rotationssymmetrischen Flächentragwerken unter rotationssymmetrischer Belastung konzipiert. Als Anwendungsbeispiel wird im nachfolgenden Bild das Schalenmodell eines Faulbehälters gezeigt.



Statisches System eines Faulbehälters mit Füllung

## Berechnungsmethode

Das Rechenprogramm arbeitet nach der Methode der finiten Elemente unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie. Das Tragwerk wird in Elemente unterteilt, die in den Systemknoten miteinander verbunden sind. Als Unbekannte treten je Knoten die globalen Verformungen  $u_r$ ,  $u_z$  und  $\varphi$  auf, welche durch Formulierung der drei Gleichgewichtsbedingungen am Knoten bestimmbar sind. Dies geschieht durch Aufbau der Elementsteifigkeitsmatrizen im jeweiligen lokalen System, Transformation auf globale Koordinaten und Einsortieren in die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems. Nach Transformation der Lasten auf globale Koordinaten und Einführung der Lagerungsbedingungen des Tragwerks ergibt sich ein lineares Gleichungssystem ( $K \cdot u = p$ ) zur Bestimmung der unbekanntenen Knotenverformungen mit

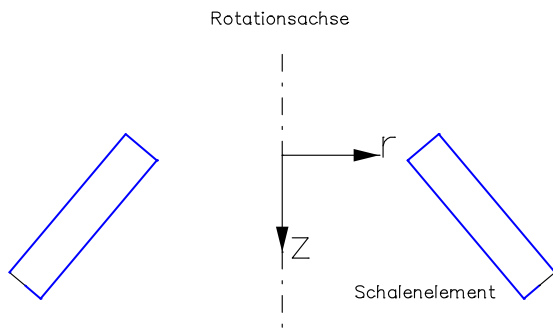
- $K$  Gesamtsteifigkeitsmatrix,
- $u$  Verformungsvektor der globalen Knotenverformungen,
- $p$  globaler Lastvektor.



# Koordinatensysteme

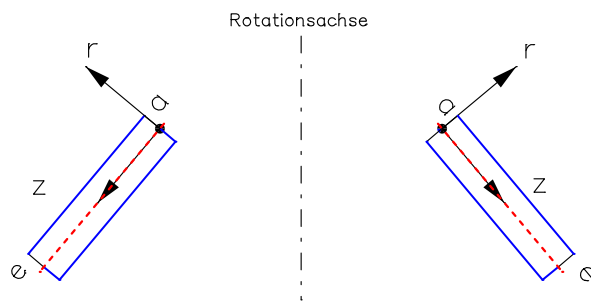
## Globales Koordinatensystem

Das globale Koordinatensystem ist ein Rechtssystem und befindet sich auf der Rotationsachse.



Globales Koordinatensystem mit Rotationsachse

## Elementsystem

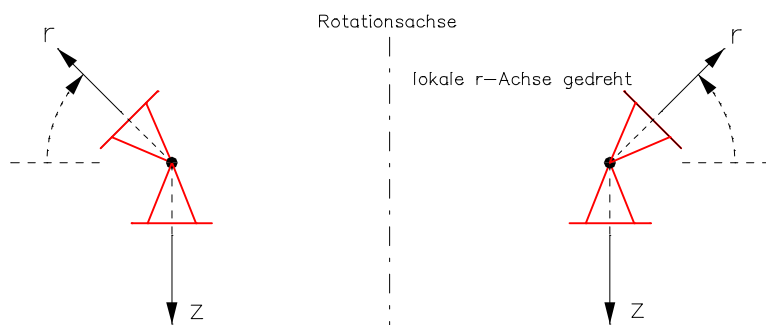


Lokales Koordinatensystem eines Elementes

Das Koordinatensystem ist ein Rechtssystem. Die lokalen Elementkoordinaten haben ihren Ursprung im Elementanfangsknoten (a). Die lokale z-Achse verläuft von (a) nach (e), dem Elementendknoten. Die r-Achse zeigt zur Oberseite der Elemente.

## Festhaltungssystem

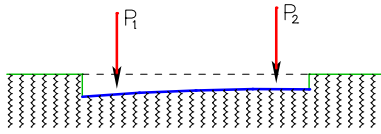
Normalerweise entspricht das Festhaltungssystem dem globalen Koordinatensystem. Das Festhaltungssystem kann durch Drehung der lokalen Achsen verändert werden.



Festhaltungssystem mit gedrehter r-Achse

## Elementbettung

Die Elementbettung wird mit Hilfe des Bettungsmodulverfahrens modelliert. Dieses beruht auf der Annahme, dass die Setzung ( $s$ ) proportional zur Sohlspannung  $\sigma_0$  so ist, also  $\sigma_0/s = k_b = \text{konstant}$  ( $k_b = \text{Bettungsmodul}$ ). Das heißt, eine Last ruft nur Setzungen in ihrer Wirkungsrichtung hervor.



Bettungsmodulverfahren

### Ausfall von Zugbettung

Das Tragwerk kann unter Ausfall der Zugbettung berechnet werden. Die r-Achse des Elementsystems zeigt in Richtung des Bodens. Wenn die Zugspannungen in r-Richtung ausfallen, wird die Mantelreibung (z-Richtung) nicht berücksichtigt.

## Singuläres Gleichungssystem

Gesamtsteifigkeitsmatrizen werden im Gleichungslöser durch Triangulation gelöst. Wenn das Gleichungssystem nicht eindeutig lösbar, d.h. singular ist, wird die Berechnung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Lastfall 1

```
Gesamtsteifigkeitsmatrix aufbereiten (100 %)
Festhaltungen einbauen
Gleichungssystem triangulieren
```

\*\* Fehlermeldungen \*\*

ROS-F001: Gleichungssystem ist singular, Zeile 163, Knoten 74 (Uz).

Programmabbruch, 0 Warnung(en), 1 Fehler.

Die Meldung weist auf den Knotenfreiheitsgrad hin, an dem die Singularität festgestellt wurde. Als Ursache kommen folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Das System ist verschieblich.
- Nach Ausfall der Zugbettung sind Freiheitsgrade nicht mehr gehalten.

In der Mehrzahl der Fälle ist die Verschieblichkeit des Systems auf Fehleingaben zurückzuführen:

- Es wurden Gelenkketten definiert, die das System kinematisch machen. Zur Fehlersuche kann es hilfreich sein, zunächst alle Gelenke durch starre Verbindungen zu ersetzen und sie dann nacheinander wieder zu aktivieren, bis der Fehler gemeldet wird.
- Berechnungen unter Ausschluss der Zugbettung erfolgen unter unrealistischer Lastannahme, z.B. ohne Eigenlast, und führen zum Abheben des Tragwerks.

## Berechnungsergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten werden folgende Ergebnisse erläutert:

- *Deformationen*
- *Schnittgrößen*
- *Spannungen*
- *Bodenpressungen*
- *Auflagerreaktionen*

### Deformationen

Die Knotenverformungen sind auf das globale Koordinatensystem bezogen und folgendermaßen bezeichnet:

$u_r, u_z$  Knotenverschiebungen [m] in Richtung der globalen Achsen.

$\varphi$  Knotenverdrehung [rad].

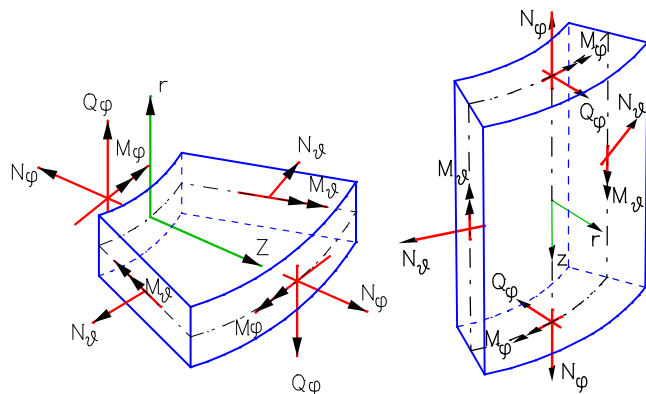
Zusätzlich werden Biegelinien berechnet.

### Schnittgrößen

Die folgenden Schnittgrößen werden in den Elementknoten berechnet.

$N_\varphi, Q_\varphi$  Meridiankraft und Querkraft [kN/m].

- $M_\varphi$  Meridianmoment [kNm/m].
- $N_\varphi$  Ringkraft [kN/m].
- $M_\vartheta$  Ringmoment [kNm/m].



Elementsystem mit positiven Schnittgrößen

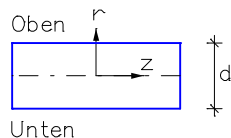
**Spannungen**

Die Spannungen [MN/m<sup>2</sup>] werden am oberen und unteren Querschnittsrand ermittelt.

$$\sigma_{\varphi, \text{oben, unten}} = \frac{N_\varphi}{d} \mp \frac{M_\varphi}{d^2/6} \quad \text{Normalspannungen in Meridianrichtung.}$$

$$\sigma_{\vartheta, \text{oben, unten}} = \frac{N_\vartheta}{d} \mp \frac{M_\vartheta}{d^2/6} \quad \text{Normalspannungen in Ringrichtung.}$$

Die Querschnittsränder sind wie folgt definiert:



**Bodenpressungen**

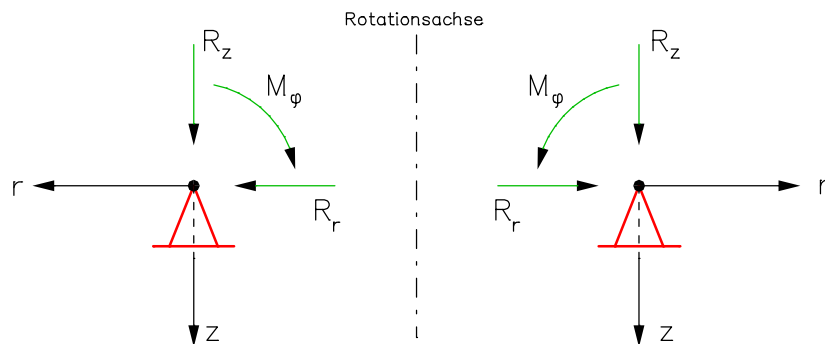
Die Bodenpressungen  $\sigma_r$  und  $\sigma_z$  [kN/m<sup>2</sup>] sind im Elementsystem definiert. Zugspannungen im Boden haben ein positives Vorzeichen.

**Auflagerreaktionen**

Die Auflagerreaktionen werden im Koordinatensystem der Festhaltungen berechnet. Sie wirken auf die jeweilige Festhaltung.

Im einzelnen werden folgende Auflagerreaktionen ermittelt:

- $R_r, R_z$  Auflagerkräfte [kN/m].
- $M_\varphi$  Auflagermoment [kNm/m].



Festhaltungssystem mit positiven Auflagerreaktionen

## Programmkapazitäten

Knoten	99999
Elemente	99999
Lastfälle	9999
Lastfallkombinationen	9999

### Einschränkungen bei der Studienversion

Knoten	10
Elemente	10
Querschnitte	1

## Strukturbeschreibung

Aufgrund der Rotationssymmetrie kann das Tragwerksmodell durch linienförmig dargestellte Elemente im Vertikalschnitt beschrieben werden. Die gesamte Bearbeitung erfolgt dazu in der x,z-Ebene, wobei x der Radialrichtung r des Rotationskörpers entspricht. Eingaben sind nur rechts von der bei x=0 dargestellten Rotationsachse, d.h. mit positiven x-Werten zulässig. Die eingegebenen Elemente definieren somit die rechte Hälfte der Schnittkurve, die linke Hälfte wird automatisch ergänzt. Zur Systemeingabe und Ergebnisausgabe dienen die Funktionen des nachfolgend aufgeführten Menüs *Tragwerk*:

-  *Elementeingabe*
-  *Elementeigenschaften...*
-  *Elementinformationen*
-  *Darstellung...*
-  *Netzprüfung*
-  *Elementsystem*
-  *Nummern sortieren*
-  *Festhaltungen*
-  *Belastung*
-  *Knoten bewegen*
-  *Verdichten*
-  *Koppelungen*
-  *Eingabedaten drucken...*
-  *Ergebnisse...*

## Elementeingabe

Mit diesem Menüpunkt werden Elemente eingegeben.

### Eingabe

- Anfangspunkt*    Eingabe eines Elementes vom Anfangs- zum Endpunkt.
- Eigenschaften*    Mit dieser Option wird der Dialog der Elementeigenschaften aufgerufen.
- Generier*    Die eingegebene Strecke wird in *n* gleich lange Elemente unterteilt. Dabei können unterschiedliche Anfangs- und Endquerschnitte vorgegeben werden. Das Programm interpoliert dann die gewählte Anzahl von Querschnitten. Dies ermöglicht die Modellierung einer Voute.

## Elementeigenschaften

Mit diesem Dialog werden Eigenschaften markierter Elemente bearbeitet bzw. die Eigenschaften für neu zu erzeugende Elemente voreingestellt. Der Dialog ist aus den folgenden Seiten aufgebaut:

- *Allgemein*
- *Querschnitt*

### Allgemein

Diese Dialogseite zeigt die allgemeinen Elementeigenschaften.

#### Länge

Anzeige der Elementlänge [m].

#### Knoten

Anzeige der Knotenkoordinaten.

#### Gelenke

Die Gelenkeigenschaften können für jeden Freiheitsgrad getrennt angegeben werden. Bei gesetzter Markierung ist der betreffende Freiheitsgrad gelenkig definiert. Der Pfeil zeigt das gewählte Ende des Elementes.

### Querschnitt

Der Querschnitt beschreibt folgende Eigenschaften eines Elementes:

- Dicke
- Material
- Bettung
- Vorgaben für die Stahlbetonbemessung

Jeder Querschnitt wird eindeutig mit einer Nummer zwischen 1 und 9999 identifiziert. In der Regel ist ein Querschnitt nicht nur einem Element, sondern einer Gruppe von Elementen zugeordnet.

#### Nummer

Auswahl des Querschnitts. Bei einem neu erzeugten Querschnitt kann die Nummer frei vergeben werden. Eine nachträgliche Umnummerierung von Querschnitten ist in der Datenbasis über das Kontextmenü des Unterpunktes *Strukturbeschreibung / Querschnittswerte* möglich.

### **Dicke**

Querschnittsdicke [m].

### **Materialart**

- *B25 bis B55*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045:1988, Tab.1.
- *C12/15 bis C100/115*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1 bzw. ENV 1992-1-1:1991 (ab *C55/67* nur zur Bemessung nach DIN 1045-1).
- *LC12/13 bis LC60/66*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045-1.
- *C12/15-EN bis C90/105-EN*: Betonfestigkeitsklassen nach EN 1992-1-1.
- *C12/15-EN-D bis C100/115-EN-D*: Betonfestigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1.
- *ÖC16/20 bis ÖC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach ÖNORM B 4710-1.
- *ÖNB40*: Betonfestigkeitsklasse nach ÖNORM B 4200-10.
- *ÖNBeton*: Beton nach ÖNORM mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *SC12/15 bis SC50/60*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SLC12/13 bis SLC50/55*: Betonfestigkeitsklassen nach SIA262 bzw. SN EN206-1.
- *SCX*: Beton nach SIA262 bzw. SN EN206-1 mit anwenderdefinierten Kennwerten.
- *S235, S275, S355, S450*: Baustahl gemäß DIN 18800 T1, Tab.1.
- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 10025-2.
- *NH1, NH2, NH3*: Nadelholz der Güteklassen I, II und III nach DIN 1052:1988.
- *BSH1, BSH2*: Brettschichtholz der Güteklassen I und II nach DIN 1052:1988.
- *C14 bis C50, D18 bis D70*: Vollholz nach EN 338.
- *GL20h bis GL32h, GL20c bis GL32c*: Brettschichtholz nach EN 14080.
- *Frei*: Anwenderdefiniertes Material.
- *Beton*: Anwenderdefinierter Beton.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

### **Neu**

Einen neuen Querschnitt erzeugen.

### **Kopie**

Den aktuellen Querschnitt kopieren.

### **Löschen**

Den aktuellen Querschnitt löschen.

### **Bezeichnung**

Der Querschnitt kann mit einem beliebigen Text bezeichnet werden.

Als weitere Dialogseiten stehen zur Verfügung:

- *Material*
- *Bettung*
- *Betonstahl*
- *DIN 1045-1*
- *DIN EN 1992-1-1*
- *EN 1992-1-1*
- *ÖNORM B 4700*
- *ÖNORM EN 1992-1-1*
- *SIA 262*
- *SS EN 1992-1-1*

## Material

### E-Modul

Elastizitätsmodul in Meridianrichtung  $\varphi$  [MN/m<sup>2</sup>].

### E-Modul Ringrichtung

Elastizitätsmodul in Ringrichtung  $\upsilon$  [MN/m<sup>2</sup>].

### Querdehnzahl

Querdehnzahl für beide Richtungen.

### Gamma

Spezifisches Gewicht des Materials [kN/m<sup>3</sup>]. Dieses wird bei der Lastart *Eigenlast* verwendet.

### Alpha.t

Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K].

### fyk

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze einzugeben [MN/m<sup>2</sup>].

### Rohdichte

Rohdichte für Leichtbeton und Holz [kg/m<sup>3</sup>].

### ke für E-Modul

Faktor zur Berechnung des Elastizitätsmoduls nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.3.3.

Bei der Materialart *ÖNBeton* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend ÖNORM B 4700, Tabelle 4 definiert.

### fcwk

Charakteristische Würfeldruckfestigkeit, Nennfestigkeit der Festigkeitsklasse [MN/m<sup>2</sup>].

### fctm

Mittlere Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fctk

Charakteristische Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### taud

Rechenwert der Schubspannung [MN/m<sup>2</sup>].

Bei der Materialart *SCX* werden zusätzlich die Betonkennwerte entsprechend SIA 262, Tabelle 3 definiert.

### fck

Charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fck,cube

Charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### fctm

Mittelwert der Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>].

### Hinweis

Der Elastizitätsmodul geht unter anderem in die Spannungs-Dehnungsfunktion nach EN 1992-1-1, Gleichung (3.14), und SIA 262, Gleichung (28), ein. Die Funktion besitzt eine Polstelle, die sich bei Abminderung des vorgegebenen Elastizitätsmoduls in den maßgebenden Dehnungsbereich verschieben kann. Daraus resultierende Ergebnisse der Stahlbetonnachweise können dann beeinträchtigt werden.

## Bettung

### Bettungsmodul $r, z$

Bettungsmoduln für die Elementrichtungen [MN/m<sup>3</sup>].

## Betonstahl

### Auswahl der Lage

Markieren von Stahllagen durch Anklicken in der Graphik.

### Neue Lage

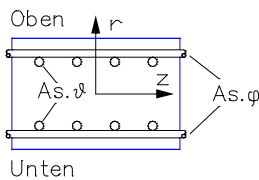
Hinzufügen neuer Stahllagen.

### Lage löschen

Löschen markierter Stahllagen.

### Randabstand Meridian- bzw. Ringrichtung

Achsabstand der Stahllage vom Querschnittsrand in Meridianrichtung  $\varphi$  bzw. Ringrichtung  $\upsilon$  [m]



### Grundbewehrung

Mindestquerschnitt der Bewehrung für die Biegebemessung. Hierdurch kann außerdem ein Verhältnis der zu ermittelnden Stahlquerschnitte untereinander festgelegt werden [cm<sup>2</sup>/m].

### Grundbewehrung fixieren

Die Grundbewehrung wird bei der Bemessung nicht erhöht.

### Güte

- 420S: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- 500S: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- 500M: Betonstahlmatten nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045 Tab.6.
- Allgemein: Frei definierbare Stahlgüte.

### Streckgrenze

Streckgrenze  $f_{yk}$  [MN/m<sup>2</sup>].

## Elementinformationen

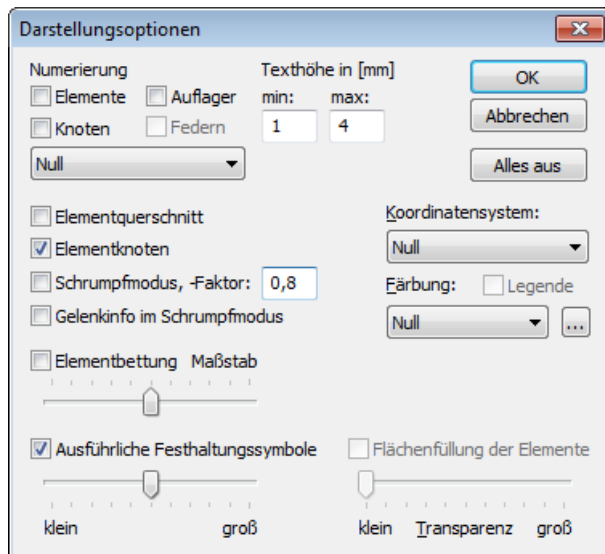
Diese Funktion zeigt am Element und in der Statusleiste folgende Eigenschaften eines Elementes an:

- Elementnummer
- Knotennummern
- Elementsystem
- Querschnitt
- Material
- Gelenke



## Darstellung

Dieser Menüpunkt dient zur Darstellung und Kontrolle der Tragwerkseigenschaften.



### Numerierung

Elemente, Knoten und Lager können mit Ihren Nummern beschriftet werden. Zusätzlich lassen sich Elemente mit Querschnittsnummern versehen. Die Anzeige der Nummern lässt sich auf Werte > 1 beschränken. Alternativ kann der Querschnittsname angeschrieben werden.

### Texthöhe

Minimale und maximale Texthöhe einstellen [mm].

### Elementquerschnitt

Der Elementquerschnitt wird an der Elementmitte eingezeichnet.

### Elementknoten

Die Elementknoten werden gekennzeichnet.

### Schrumpfmodus

Verkleinerte Darstellung der Elemente ein- oder ausschalten. Die meisten Eingabefunktionen sind in diesem Modus inaktiv.

### Schrumpffaktor

Verkleinerungsfaktor für den Schrumpfmodus definieren.

### Gelenkinfo im Schrumpfmodus

Im Schrumpfmodus werden vorhandene Elementendgelenke beschriftet.

### Elementbettung

Die Bettungsmoduln werden entlang der Elemente mit gewähltem Maßstab aufgetragen.

### Ausführliche Festhaltungssymbole

Die Eigenschaften der Festhaltungen werden ausführlich dargestellt. Der Schieberegler verändert die Größe der verwendeten Symbole.

### Koordinatensystem

Koordinatensystem für Elemente oder für Festhaltungen einschalten.

### Färbung

Die Elemente werden in der Farbe gezeichnet, die ihrer Querschnittsnummer entspricht. Die Farbzuordnung kann bei Bedarf modifiziert werden.

### Legende

Ein- oder Ausschalten der Farblegende.

### Alles aus

Schaltet alle Darstellungsoptionen aus.

## Netzprüfung

Mit diesem Menüpunkt können Elemente und Knoten überprüft werden.

### Knotenabstand

Die Funktion prüft, ob in der Nachbarschaft eines Knotens innerhalb der angegebenen Toleranz weitere Knoten liegen. Diese sogenannten doppelten Knoten werden mit einem roten Pfeil markiert und nach Abfrage verschmolzen. Dabei werden ihre Koordinaten gemittelt.

### Elementabstand

Es wird geprüft, ob Elemente aufeinander liegen, z.B. aufgrund zweifacher Elementeingabe. Die gefundenen Elemente werden mit einem roten Pfeil markiert.

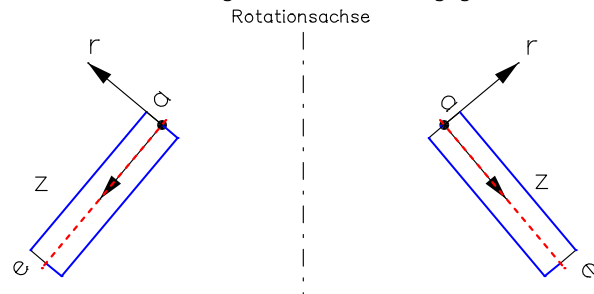
## Elementsystem

Mit diesem Menüpunkt kann das Koordinatensystem von markierten Elementen geändert werden.

### Eingabe

+r, -r, +z, -z

Durch Vertauschung des Anfangs- und Endknotens des Elements wird erreicht, dass die positive bzw. negative Achse zum angegebenen Punkt zeigt.



## Nummern sortieren

Mit diesem Menüpunkt können Element- und Knotennummern geändert werden.

### Eingabe

Sortieren

Knoten- oder Elementnummern geometrisch sortieren.

Definieren

Definition neuer Startwerte und Inkremente für Knoten- und Elementnummern.

Ändern

Knoten- und Elementnummern ändern.

## Festhaltungen

Mit dieser Funktion werden Festhaltungen eingegeben. Eine Festhaltung beschreibt die Lagerungsbedingungen eines Systemknotens. Die einzelnen Freiheitsgrade können dabei starr oder federnd gelagert werden. Die Richtung der Freiheitsgrade kann vom globalen Koordinatensystem abweichen (Beschreibung durch Winkel). Die festgehaltenen Knoten sind durch einfache oder ausführliche rote Symbole gekennzeichnet (siehe *Darstellung*).

### Eingeben

Startet die Eingabe von Festhaltungen durch die Auswahl von Knoten. Die nachträgliche Bearbeitung geschieht mit den Kontextmenüfunktionen:

- Festhaltung
- Orientierung

### Info

Zeigt das Festhaltungssystem mit den gebundenen Freiheitsgraden für eine gewählte Festhaltung.

Hinweis: Bei aktiver Funktion können nur Festhaltungen markiert werden. Das erleichtert die Bearbeitung dieser Objekte.

## Knoten bewegen

Mit dieser Funktion kann die Lage von ausgewählten Knoten verändert werden. Bei einem einzelnen Elementknoten wird dessen neue Position abgefragt. Sollen mehrere Elementknoten bewegt werden, ist die Option *Gruppe* oder *Elemente* zu wählen.

### Gruppe

Elementknoten wählen, welche bewegt werden sollen.

### Elemente

Elemente wählen, deren Knoten bewegt werden sollen.

### Verschiebungsvektor

Bewegen durch Verschiebung. Der Verschiebungsvektor wird durch zwei Punkte definiert.

### Rotieren

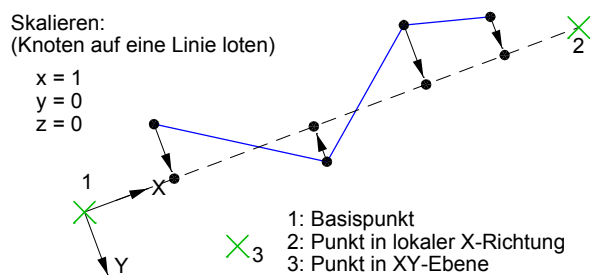
Bewegen durch Rotation.

### Spiegeln

Bewegen durch Spiegelung.

### Skalieren

Bewegen durch Skalierung im globalen oder einem lokalen Bezugssystem. Mit einem Skalierungsfaktor von Null können Knoten auf eine Achse ausgerichtet werden.



Auf Wunsch werden verschobene Knoten, die mit nicht markierten Knoten zusammenfallen, mit diesen zusammengeführt.

## Knoten oder Elemente suchen

Wird ein Knoten mit einer bestimmten Nummer gesucht, sind die Funktionen *Knoten markieren* und *Knoten bewegen* hilfreich. Innerhalb dieser Funktion kann die gesuchte Knotennummer angegeben werden.

Wird ein Element mit einer bestimmten Nummer gesucht, können die Funktionen *Elementinformationen* oder *Markieren* Verwendung finden. In beiden Funktionen kann die Elementnummer angegeben werden. Ist das Element trotz Markierens nicht erkennbar, können mit Hilfe der Funktion *Elementeigenschaften* weitere Informationen abgefragt werden. Die Farbe und der Layer der markierten Objekte werden in der Symbolleiste angezeigt.

## Verdichten

Mit dieser Funktion können vorhandene Elemente verdichtet werden.

### Punkt

Am eingegebenen Punkt wird auf der Elementachse ein Knoten eingefügt.

### Teilen

Markierte Elemente werden geteilt. Die gewünschte Anzahl der Teile wird abgefragt.

### Anpassen

An den markierten Elementen wird geprüft, ob Knoten an deren Achsen stoßen. Bei Bedarf werden die betroffenen Elemente an diesen Knoten geteilt.

## Koppelungen

Mit der Funktion *Koppelungen* lassen sich kinematische Abhängigkeiten zwischen den globalen Freiheitsgraden zweier Elementknoten festlegen, indem die Knotenfreiheitsgrade eines abhängigen Knotens über eine Bedingungsgleichung durch die Freiheitsgrade des bezogenen Knotens ausgedrückt werden.

$$\text{z.B. } u_{x,\text{abhängig}} = f_1 \cdot u_{x,\text{bezogen}} + f_2 \cdot u_{z,\text{bezogen}} + f_3 \cdot \varphi_{\text{bezogen}}$$

mit

$f_1, f_2$  Faktoren für die Verschiebungen,

$f_3$  Faktor für die Verdrehung.

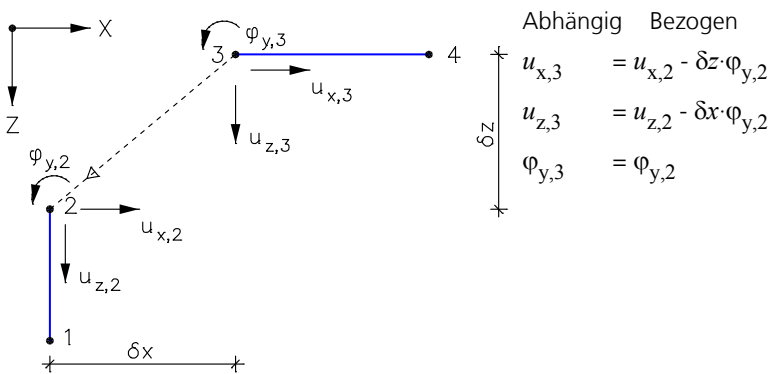
An einen bezogenen Knoten dürfen beliebig viele abhängige Knoten gekoppelt werden. Knoten mit Festhaltungen dürfen nicht als abhängige Knoten definiert werden. Die Koppelungen werden gestrichelt dargestellt. Zusätzlich zeigt ein Pfeil auf den bezogenen Knoten.

Nach Auswahl der abhängigen Knoten und des bezogenen Knotens ist die Koppelungsart festzulegen.

### Art

- *Starr*: Starre Koppelung (Kürzel: SS).
- *Gelenkig*: Einseitig gelenkige Koppelung mit Kugelgelenk am abhängigen Knoten (Kürzel: GS).
- *ux, uz, phi.y*: Abhängiger Freiheitsgrad der benutzerdefinierten Bedingungsgleichung. Die Faktoren für die Verschiebungen und Verdrehung der Bedingungsgleichung sind festzulegen.










### Benutzerdefinierte Bedingungsgleichungen für eine starre Koppelung



## Belastung

Das folgende Kapitel beschreibt die Lasteingabe sowie die verschiedenen Lastarten. Die eingegebenen Lasten werden durch Symbole dargestellt.

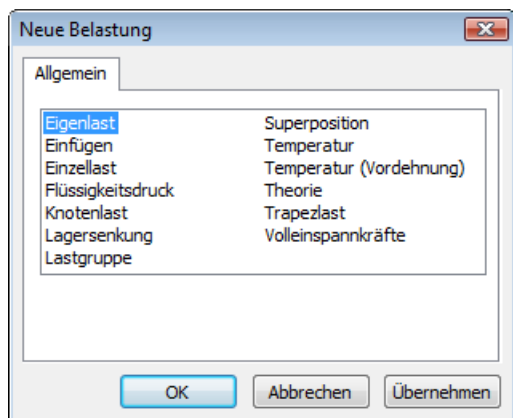
Ein Lastfall besteht aus einer oder mehreren Lasten. Mit den folgenden Optionen können Lastfälle definiert und bei Bedarf nachträglich geändert werden.

-  Erstellt eine Kopie des aktuellen Lastfalls.
-  Generiert Lastfälle nach den Vorschriften der Funktion *Generieren*. Dabei werden entweder alle oder nur die markierten Lasten vervielfältigt.
-  Importiert Lastdaten.
-  Startet den Dialog für Darstellungsoptionen.
-  Beendet die Belastungsdarstellung.
-  Erstellt einen neuen Lastfall.
-  Zeigt einen bestehenden Lastfall.
-  Ändert die Nummer und die Bezeichnung des aktuellen Lastfalls.
-  Startet die Belastungseingabe.

Im Datenbaum können Lastfälle gruppenweise umnummeriert werden. Mit der Kontextfunktion *Belastung skalieren* können die Ordinatenwerte von mehreren markierten Lasten mit einem Faktor skaliert werden.

## Eingabe

Dieser Dialog dient zur Eingabe von Belastungen innerhalb eines Lastfalls.



Die Lastarten werden auf den nachfolgenden Seiten erläutert. Zur eindeutigen Identifizierung sind sie mit Lastkürzeln versehen.

## Eigenlast

Das gesamte Tragwerk wird mit seiner Eigenlast in globaler z-Richtung beansprucht (Lastkürzel: *EG*).

## Einfügen von Lastfalldaten

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *EINF*) können Lastdaten anderer Lastfälle in den aktuellen Lastfall gewichtet eingefügt werden. In eingefügten Lastfällen dürfen die Lastarten *Superposition* und *Einfügen* nicht enthalten sein.

### Eingabe

<i>Erster Lastfall</i>	Erster Lastfall, der eingefügt wird.
<i>Letzter Lastfall</i>	Letzter Lastfall, der eingefügt wird.
<i>Wichtungsfaktor</i>	Faktor, mit dem alle Lastdaten multipliziert werden.

## Einzellast

### Eingabe

*Global orientiert*

Einzellast im Globalsystem (Lastkürzel: *EGK*).

*Lokal orientiert*

Einzellast im Elementsystem (Lastkürzel: *EL*).

*Lastort*

Lastort auf der Elementachse, der abhängig von der Lastausrichtung festgelegt wird.

*Global orientiert:* Globale Koordinaten  $r$  und  $z$ .

*Lokal orientiert:* Abstand vom Elementanfang.

$P_r, P_z, M_{phi}$

Lastkomponenten in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m] bzw. [kNm/m].

## Flüssigkeitsdruck

Der Flüssigkeitsdruck (Lastkürzel: *FD*) belastet alle gewählten Elemente.

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente.

*Oberkante Flüssigkeit  $z$*

Z-Koordinate des Flüssigkeitsspiegels [m].

*Spezifisches Gewicht*

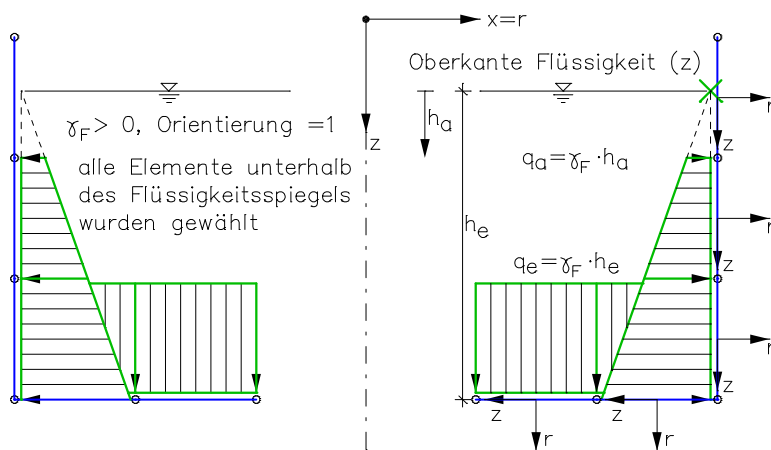
Spezifisches Gewicht  $\gamma_F$  der Flüssigkeit [kN/m<sup>3</sup>].

*Orientierung (-1, 1)*

Orientierung der Last in  $r$ -Richtung festlegen.

-1 : In Richtung  $-r$

1 : In Richtung  $+r$



Elemente mit Flüssigkeitsdruck

## Knotenlast

Knotenlasten wirken in globaler Richtung (Lastkürzel: *KNL*).

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elementknoten.

$P_r, P_z$

Kräfte [kN/m].

$M_{phi}$

Meridianmoment [kNm/m].

## Lagersenkung

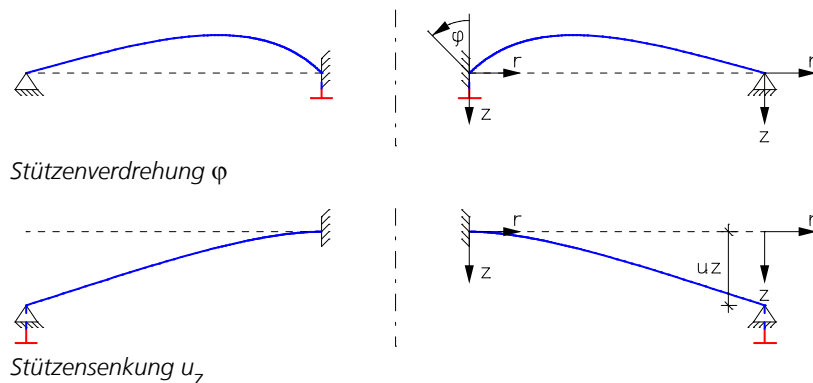
Die Lagersenkung wirkt auf festgehaltene Knoten in Richtung der gebundenen Freiheitsgrade (Lastkürzel: *DS*).

### Eingabe

Auswahl der betroffenen Festhaltungen.

$ur, uz$  Verschiebungen [mm].

$phi$  Verdrehungen [rad/1000].



Stützenverdrehung  $\varphi$

Stützensenkung  $u_z$

## Superposition von Lastfällen

Durch Superposition (Lastkürzel: *SUP*) werden die vorhandenen Ergebnisse anderer Lastfälle addiert und gewichtet. Andere Lastarten sind in dem betreffenden Lastfall nicht zugelassen. Da die Lastfälle in aufsteigender Reihenfolge berechnet werden, sollte die Lastfallnummer der zu superponierenden Lastfälle kleiner sein als die Nummer des aktuellen Lastfalls.

### Eingabe

Erster Lastfall Erster Lastfall, der superponiert wird.

Letzter Lastfall Letzter Lastfall, der superponiert wird.

Wichtungsfaktor Faktor, mit dem alle Ergebnisse multipliziert werden.

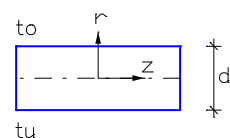
## Temperatur

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente (Lastkürzel: *TEMP*).

$tm$  Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

$tu - to$  Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts [K].



Unter und Oberseite des Querschnitts

## Temperatur, Vordehnung

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente (Lastkürzel: *TMPA*).

$alpha.t$  Temperaturausdehnungskoeffizient [1/K].

$tm$  Temperatur als Differenz gegen die Einbautemperatur [K].

$(tu - to)/d$  Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Querschnitts bezogen auf die Querschnittsdicke [K/m].

## Theorie

Mit dieser Lastart (Lastkürzel: *TH*) wird die Berechnungstheorie für den betreffenden Lastfall festgelegt.

### Eingabe

<i>Anzahl Iterationen</i>	Dieser Wert wird z.Z. nicht genutzt.
<i>Fehler</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1\%$ zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die Hinweise im Abschnitt *Lastgruppe* sinngemäß zu beachten.

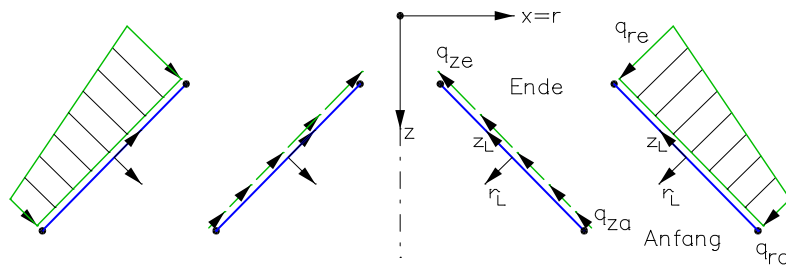
## Trapezlast

### Eingabe

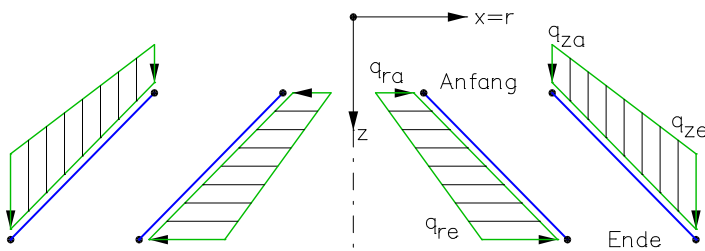
Auswahl der belasteten Elemente.

<i>Anfang</i>	Lastanfang.
<i>Ende</i>	Lastende.
<i>Global orientiert</i>	Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: <i>TG</i> ).
<i>Lokal orientiert</i>	Trapezlast im Elementsystem (Lastkürzel: <i>TL</i> ).
<i>Projektiv orientiert</i>	Projektion der Trapezlast im Globalsystem (Lastkürzel: <i>TP</i> ).
<i>Startordinate</i>	Lastordinate am Lastanfang in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m <sup>2</sup> ].
<i>Endordinate</i>	Lastordinate am Lastende in den Richtungen des gewählten Koordinatensystems [kN/m <sup>2</sup> ].

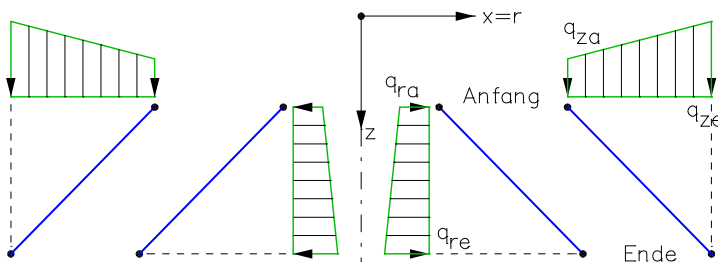
Bei einer Trapezlast über mehrere Elemente wird die Last automatisch geteilt. Die interpolierten Lastordinaten an den Knoten der gewählten Elemente werden automatisch ermittelt. Die Trapezlasten wirken immer auf die gesamte Elementlänge.



Lokale Trapezlast



Globale Trapezlast



Projektion der Trapezlast



## Lastgruppe

Diese Lastart (Lastkürzel: *GRL*) eignet sich insbesondere zum Aufbereiten von Lastfällen für eine nichtlineare Berechnung. Hiermit können Belastungen aus bestehenden Lastfällen mit den erforderlichen Lastfaktoren zusammengestellt und die gewünschte Berechnungstheorie aktiviert werden.

Mit der *Lastgruppe* werden die bestehenden Lastarten *Einfügen* und *Theorie* innerhalb einer Lastart zusammengefasst.

### Eingabe

<i>Fehlerschranke</i>	Fehlerschranke für die relative Größe des verbleibenden Residuums in [%]. Es sind nur Werte $\leq 1\%$ zulässig.
<i>Ausfall Zugbettung</i>	Ausschluss von Zugspannungen in der Gründungsfläche.
<i>Zus. globaler Lastfaktor</i>	Zusätzlicher Faktor für alle Lasten.
<i>Lastfälle</i>	Lastfälle markieren, um sie der Auswahlliste hinzuzufügen.
<i>Lastfaktor</i>	Die einzelnen Lastfälle werden mit einem Faktor gewichtet.
<i>Übernehmen</i>	Der Wichtungsfaktor markierter Lastfälle wird geändert.

Bei Anwendung dieser Lastart sind die folgenden Hinweise zu beachten.

### Fehlerschranke des Residuums

Die Lösung des nichtlinearen Bettungsproblems erfolgt iterativ. Als Maß für die Steuerung der Iteration gilt die Länge des Fehlervektors, das Residuum. Es wird für jeden Iterationsschritt in der Ausgabeleiste angezeigt. Die Iteration wird beendet, wenn das verbleibende Residuum in Bezug auf das Anfangsresiduum die vorgegebene Fehlerschranke erreicht hat. Die Berechnungsergebnisse sind dann durchschnittlich mit einem relativen Fehler in gleicher Höhe behaftet. Falls die Fehlerschranke nicht erreicht werden kann, gibt das Rechenprogramm eine Meldung aus.

### Ausfall der Zugbettung

Bei unrealistischer Lastzusammenstellung (z.B. Fehlen der Eigenlast) kann es zum Ausfall aller Bettungen kommen. Wenn dadurch das System verschieblich wird, erfolgt ein Abbruch der Berechnung wegen singulären Gleichungssystems mit Angabe des verschieblichen Freiheitsgrades.

### Lastzusammenstellung

Zur Zusammenstellung der maßgeblichen Einwirkungen für Berechnungen mit Ausfall der Zugbettung werden die betreffenden Lastfälle in die Auswahlliste übertragen und mit Lastfaktoren versehen.

### Superpositionsverbot

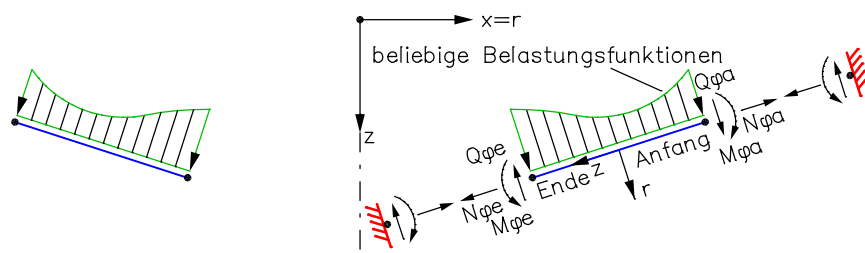
Berechnungen unter Auschluss der Zugbettung liefern ihre Ergebnisse nach nichtlinearer Iteration. Für diese gilt folglich nicht mehr das Superpositionsprinzip, d.h. sie dürfen nicht mit anderen Ergebnissen additiv überlagert werden. Eine Weiterverarbeitung in Lastfallkombinationen ist nur zulässig, wenn diese keine anderen als sich gegenseitig ausschließende (exklusive) Einwirkungen enthalten.

## Volleinspannkkräfte

### Eingabe

Auswahl der belasteten Elemente (Lastkürzel: *S0*).

<i>Nphia, Qphia</i>	Meridiankraft- und Querkraft an Elementanfang [kN/m].
<i>Nphie, Qphie</i>	Meridiankraft- und Querkraft an Elementende [kN/m].
<i>Mphia, Mphie</i>	Meridianmoment an Elementanfang- bzw. -ende [kNm/m].



Festeinspanngrößen an Elementanfang und -ende.

## Berechnung

Im Berechnungs-Menü werden programmspezifische Einstellungen vorgenommen und die Rechenprogramme gestartet.



Einstellungen...



Stapel...



Statik

*Lastfallkombination*

*DIN 1045-1 Bemessung*

*DIN EN 1992-1-1 Bemessung*

*EN 1992-1-1 Bemessung*

*ÖNORM B 4700 Bemessung*

*ÖNORM EN 1992-1-1 Bemessung*

*SIA 262 Bemessung*

*SS EN 1992-1-1 Bemessung*

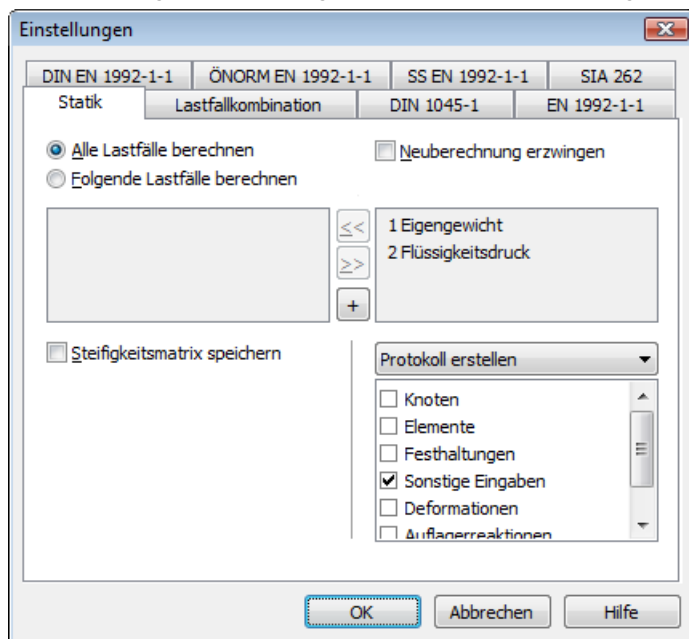
*Markierte Elemente*

*Stop Berechnung*

Während der Berechnung wird in der Ausgabeleiste der Programmfortschritt mit eventuellen Fehlermeldungen und Warnungen angezeigt.

## Einstellungen Statik

Diese Seite zeigt die Einstellungen für die Schalenberechnung.



### Alle Lastfälle berechnen

Alle Lastfälle werden berechnet (Standard).

### Folgende Lastfälle berechnen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

### Neuberechnung erzwingen

Ist dieser Schalter aktiviert, werden alle gewählten Lastfälle neu berechnet. Anderenfalls untersucht das Berechnungsprogramm, ob eine Neuberechnung erforderlich ist.

### Steifigkeitsmatrix speichern

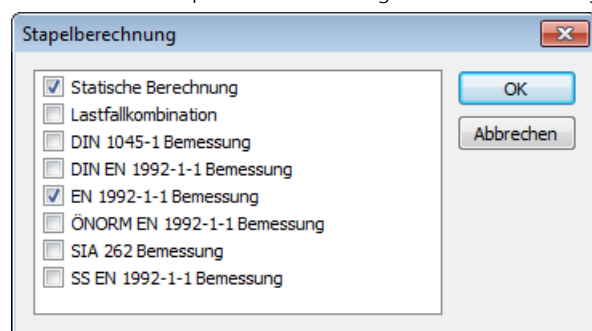
Die Gesamtsteifigkeitsmatrix wird für eine spätere Wiederverwendung gespeichert. In der 64-Bit Edition ist die Funktion inaktiv.

### Protokoll

- *Kein Protokoll:* Vom Berechnungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Protokoll erstellen:* Bei der Berechnung wird ein Protokoll gemäß Auswahlliste erstellt.

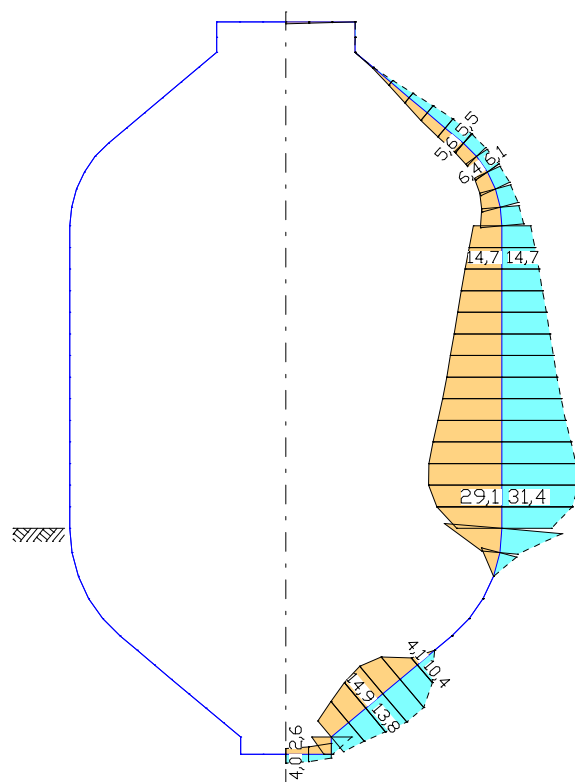
## Stapelberechnung

Mit diesem Menüpunkt werden ausgewählte Berechnungen nacheinander gestartet.



## Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird die Darstellung der Berechnungsergebnisse beschrieben. Ergebnisse können sowohl graphisch als auch tabellarisch angezeigt werden. Deren Auswahl erfolgt in der Datenbasis oder mit der Funktion *Ergebnisse* des Menüs *Tragwerk*.



Darstellung der Ringbewehrung eines Faulbehälters [cm<sup>2</sup>/m]

### Bodenpressungen LF 1

	Element	Sigma.r [kN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.z [kN/m <sup>2</sup> ]
1	31	-20,97	0,00
2	31	-16,90	0,00
3	32	-53,50	0,00
4	32	-47,11	0,00
5	33	-82,06	0,00
6	33	-75,41	0,00
7	34	-107,87	0,00
8	34	-104,27	0,00
9	35	-133,44	0,00
10	35	-135,74	0,00

Tabellarische Ausgabe der Bodenpressungen des 1. Lastfalls

### Ergebnisleiste

Die Ergebnisleiste enthält folgende Schaltflächen zur Ergebnisdarstellung:



Startet den Dialog für die Ergebnisdarstellung.



Ergebnisdarstellung abschalten.



Ordinatenauswahl für die manuelle Beschriftung.



Ergebnisdarstellung für markierte Elemente auswählen.



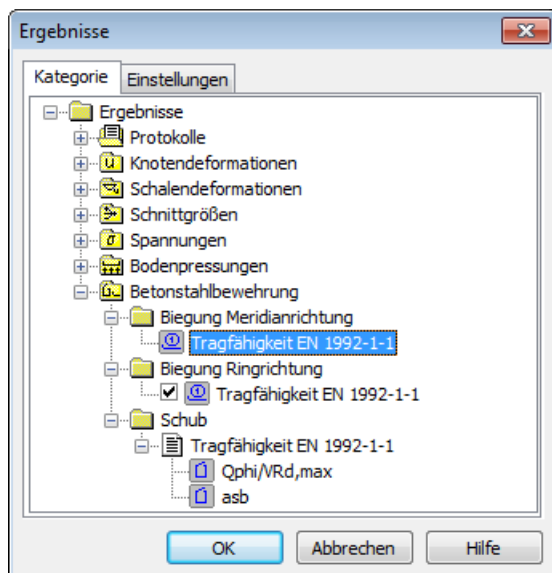
Ergebnisdarstellung für markierte Elemente abwählen.



Ordinatenwert am Markierungsort in der Statusleiste ausgegeben.

### Ergebniskategorien

Die nachfolgende Dialogseite zeigt mögliche Ergebniskategorien.



In den Unterpunkten zu der jeweiligen Kategorie sind die berechneten Lastfälle und Kombinationen sowie alle darstellbaren Ergebniskomponenten aufgeführt. Nach getroffener Auswahl bietet die Registerkarte *Einstellungen* die nachfolgend erläuterten Darstellungsformen mit weiteren Optionen an. Das vorangestellte Symbol kennzeichnet die Art der Darstellung (z.B. : Tabellarisdarstellung, : graphische Schnittkraftdarstellung).

## Verformungsfigur

### Maßstab

Der Maßstab kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden. Die Knotenverschiebungen werden mit dem Verzerrungsfaktor multipliziert und zu den Knotenkoordinaten addiert. Bei Lastfällen wird zusätzlich die Biegelinie dargestellt.

### Originalsystem gestrichelt darstellen

Ein- oder Ausschalten des gestrichelten undeformierten Systems während der Verformungsdarstellung.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung der Knoten mit der Länge des Verschiebungsvektors [mm].
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.

### Grenzwert für Beschriftung

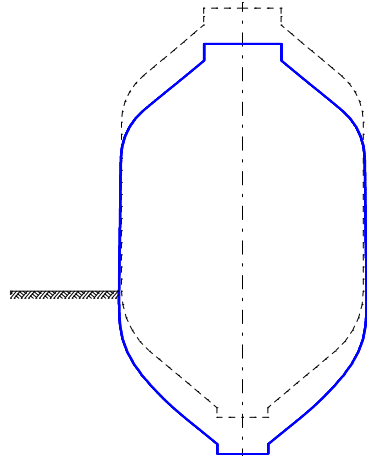
Nur betragsmäßig größere Verschiebungen werden beschriftet.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.



Überhöhte Verformungsfigur

## Numerisch

In dieser Darstellungsform werden Auflagerreaktionen oder Knotendeformationen numerisch angezeigt.

### Unterer Grenzwert für Darstellung

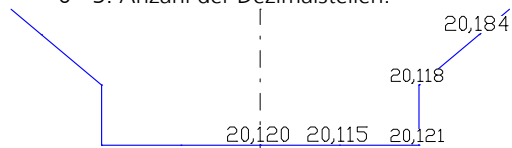
Nur betragsmäßig größere Ergebnisse werden ausgegeben.

### Texthöhe [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Dezimalstellen

- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.



Numerische Darstellung der Deformationen  $u_z$  [mm]

## Zustandslinien

Die Ergebnisse werden entlang der Elementachse aufgetragen. Zwischen den Berechnungsorten wird von einem linearen Verlauf der Ergebnisse ausgegangen.

### Maßstab

Der Maßstab der Ordinatarstellung kann automatisch oder auch manuell eingestellt werden.

### Beschriftung

- *Auto*: Automatische Beschriftung wählen.
- *Aus*: Beschriftung ausschalten.
- *Überall*: Beschriftung aller Ordinaten.
- *Wählbar*: Manuelle Beschriftung mit Hilfe der Ergebnisleiste wählen.

### Grenzwert für Beschriftung

Nur betragsmäßig größere Ordinaten werden beschriftet.

### Dezimalstellen

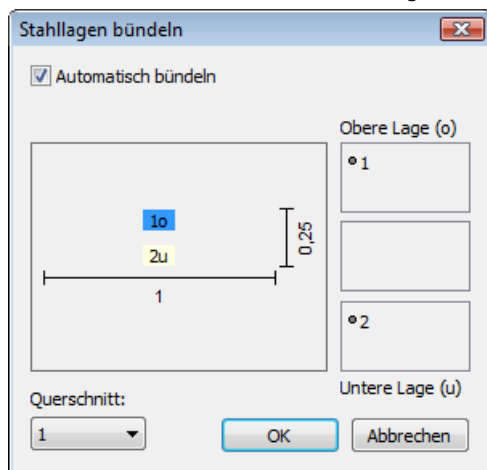
- *Standard*: Automatische Einstellung der Dezimalstellen.
- 0 - 3: Anzahl der Dezimalstellen.

### Texthöhe in [mm]

Die Einheit bezieht sich auf das Ausgabegerät.

### Stahllagen bündeln ...

Mit dieser Funktion wird die Darstellung der Stahllagen festgelegt.



Bei der automatischen Bündelung werden alle Stahllagen, deren  $r$ -Komponente größer ist als die  $r$ -Komponente des Schwerpunkts, auf der Oberseite der Elemente dargestellt, alle anderen Lagen auf der Unterseite.

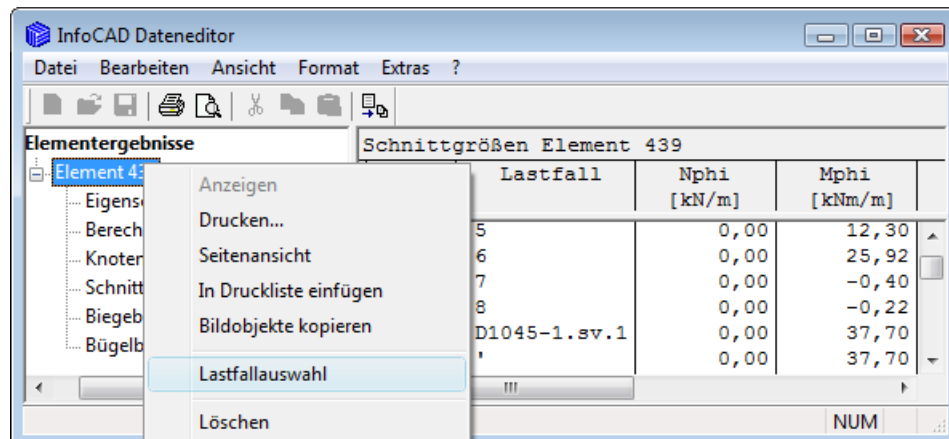
Bei der manuellen Bündelung können die Stahllagen mit der Maus zwischen den Listenfeldern verschoben werden. Die Stahllagen des mittleren Listenfeldes sind von der Darstellung ausgenommen.

### Grundbewehrung abziehen

Die in den Querschnitten definierten Grundbewehrungen werden von der berechneten Bewehrung subtrahiert und nur die verbleibende Bewehrung wird ausgegeben.

## Ergebnisliste

Die Ergebnisliste wird für markierte Elemente im Dateneditor ausgegeben. Sie ist über das Kontextmenü der Elemente erreichbar.



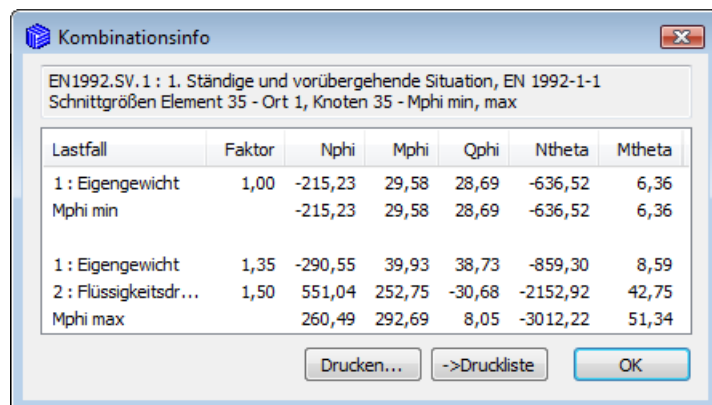
Mit der Kontextfunktion *Lastfallauswahl* kann die Ausgabe auf bestimmte Lastfälle beschränkt werden.

## Kombinationsinfo

Mit der *Kombinationsinfo* können die an einem Kombinationsergebnis beteiligten Lastfälle mit Ihren jeweiligen Wichtungen bestimmt werden. Diese Funktion steht während der Ergebnisdarstellung einer Kombination zur Verfügung. Nach der Auswahl des gewünschte Ergebnisortes mit der rechten Maustaste erscheint im Kontextmenü die Funktion *Kombinationsinfo*.

Über das Kontextmenü des Dialoges können folgende Funktionen aufgerufen werden:

- *Kopieren* (Zwischenablage)
- *Lastgruppe erzeugen...*
- *Superpositions-Lastfall erzeugen*
- *Zugehörige Deformationen...*
- *Zugehörige Auflagerkräfte...*



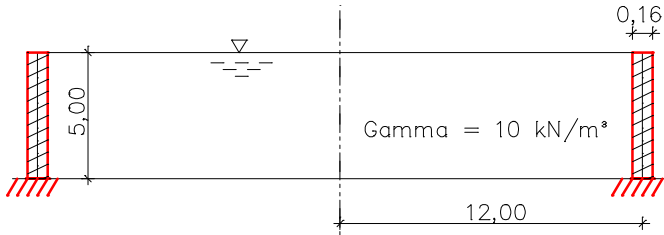
### Letzte Kombination

Zeigt die zum letzten *Kombinationsinfo* zugehörigen Zustandsgrößen.

# Beispiele

## Wasserbehälter

Das nachfolgende Beispiel (Hampe Bd. 2, S. 187) zeigt die Berechnung eines Wasserbehälters.



Wasserbehälter, System und Abmessungen

### Material- und Querschnittswerte

Nr.	Mat.- Art	E-Moduli [MN/m <sup>2</sup> ] E.phi E.theta	Querd.-Z. mue.phi	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m <sup>3</sup> ]	Schalen- Dicke [m]	Bettung [MN/m <sup>3</sup> ] kbr kbz
1	Frei	21000 21000	0,17	1,000e-05	25,000	0,1600	0,0 0,0

### Knotenbeschreibung

Nr.	r [m]	z [m]
1	12,000	0,000
2	12,000	1,000
3	12,000	2,000
4	12,000	3,000
5	12,000	3,500
6	12,000	4,000
7	12,000	4,500
8	12,000	5,000

### Elemente

Nr.	Kn 1	Kn 2	Qsw Mat	Gelenke NQM NQM	Länge [m]	Layer
1	1	2	1	0 0	1,000	1
2	2	3	1	0 0	1,000	1
3	3	4	1	0 0	1,000	1
4	4	5	1	0 0	0,500	1
5	5	6	1	0 0	0,500	1
6	6	7	1	0 0	0,500	1
7	7	8	1	0 0	0,500	1

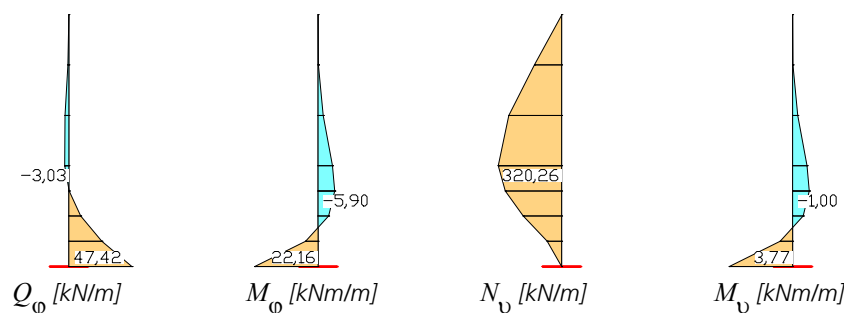
### Festhaltungen

Knoten- nummer	r - Richtung		z - Richtung		Verdrehung F= Feder Fest [MNm]
	F= Feder Fest [MN/m]	Winkel [grad]	F= Feder Fest [MN/m]	Winkel [grad]	
8	F		0,00	F	0,00 F

### Lastdaten Lastfall 1

FD	Element von bis	Spiegelhöhe z [m]	Spez. Gew. der Flüssigkeit [kN/m <sup>3</sup> ]	Vorzeichen
:	1 7	0,00	10,00	1

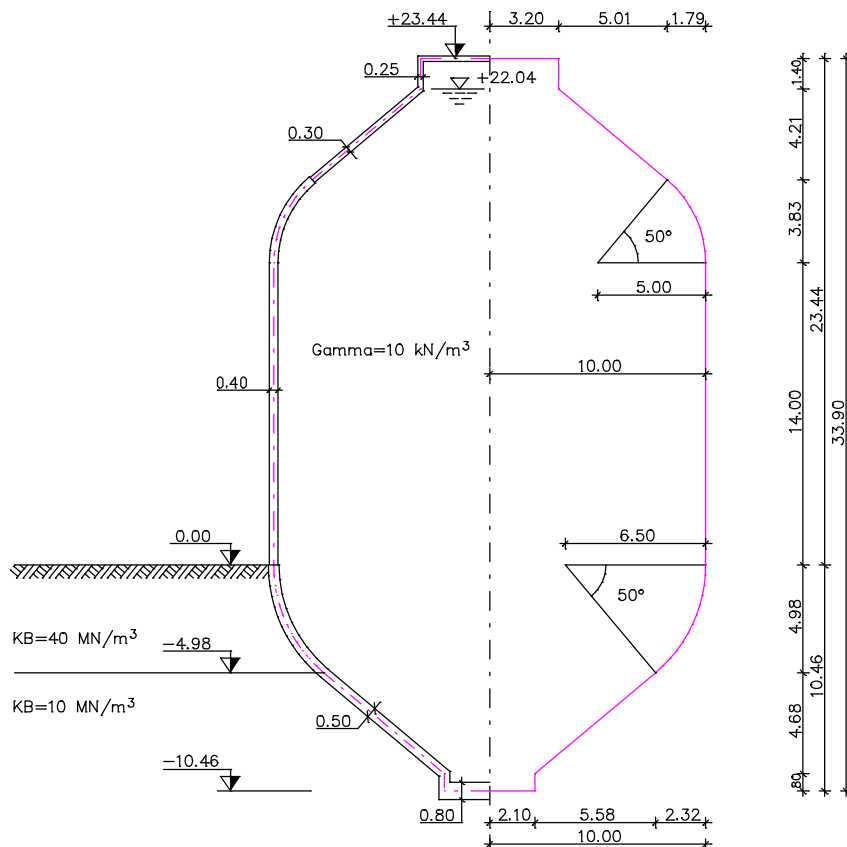
### Schnittgrößen Lastfall 1





# Faulbehälter

Der dargestellte Faulbehälter ist elastisch gebettet und wird durch Flüssigkeitsdruck beansprucht.



Faulbehälter mit Füllung, C 20/25 - EN 1992-1-1, Überdeckung 5 cm

### Material- und Querschnittswerte

Nr.	Material- Art	E-Moduli [MN/m <sup>2</sup> ]		Querd.-Z. mue.phi	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m <sup>3</sup> ]	Schalen- Dicke [m]	Bettung [MN/m <sup>3</sup> ]	
		E.phi	E.theta					kbr	kbz
1	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,2500	0	0
2	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,3000	0	0
3	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,4000	0	0
4	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,5000	40	0
5	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,5000	10	0
6	C20/25-EN	30000	30000	0,20	1,000e-05	25,000	0,8000	10	0

### Lastdaten Lastfall 1 (Eigenlast)

EG : Eigengewicht für alle Elemente

### Lastdaten Lastfall 2 (Flüssigkeitsdruck)

FD : Flüssigkeitsdruck  
 Element Spiegelhöhe z Spez. Gew. der Flüssigkeit Vorzeichen  
 von bis [m] [kN/m<sup>3</sup>]  
 6 45 -22,04 10,00 1

### EN 1992-1-1 Einwirkungen

#### Standard Bemessungsgruppe

#### G - Eigenlast

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

#### Lastfälle

1 Eigenlast

#### QH - Veränderlicher Flüssigkeitsdruck

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Sonstige Einwirkungen  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 1 / 1 / 1

#### Lastfälle 1. Variante, exklusiv

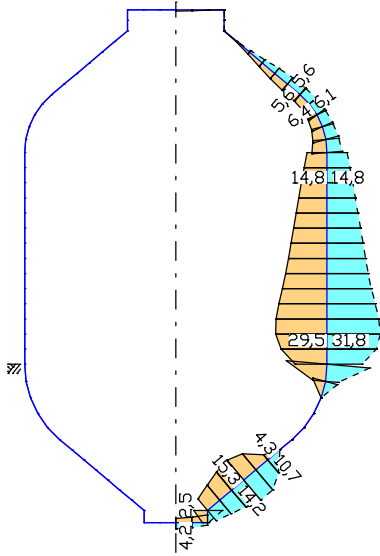
2 Flüssigkeitsdruck

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

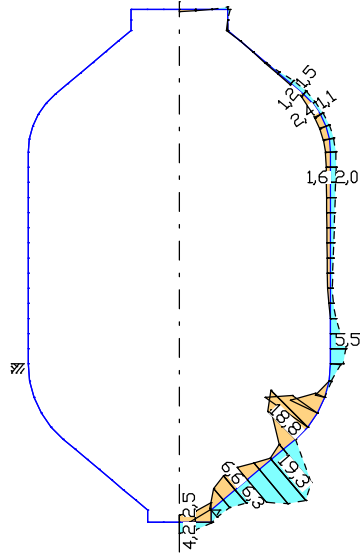
Endzustand

G Eigenlast  
 QH Veränderlicher Flüssigkeitsdruck

**Biegebewehrung aus EN 1992-1-1**



Ringbewehrung [cm<sup>2</sup>/m]



Meridianbewehrung [cm<sup>2</sup>/m]

# Lastfallkombination

## Grundlagen

Mit der Lastfallkombination werden die Ergebnisse einer Tragwerksberechnung sowie Ergebnisse anderer Lastfallkombinationen zu min-, max-Grenzl原因en kombiniert.

Dazu werden Lastfälle und Kombinationen den folgenden Einwirkungsgruppen zugeordnet:

- **Ständige:** Die einzelnen Lastfälle und Kombinationen werden immer berücksichtigt (z.B. Eigenlast).
- **Veränderliche inklusiv:** Die einzelnen Lastfälle und Kombinationen können gleichzeitig wirken (z.B. Verkehrslasten einzelner Deckenfelder). Sie werden nur kombiniert, wenn sie einen ungünstigen Beitrag liefern.
- **1. (-6.) veränderliche exklusiv:** Von den angegebenen Lastfällen bzw. Kombinationen werden diejenigen berücksichtigt, welche den kleinsten (<0) und den größten (>0) Beitrag liefern. Die einzelnen Lastfälle und Kombinationen schließen sich somit gegenseitig aus (z.B. SLW-Stellungen). Es können sechs unabhängige, gleichzeitig wirkende Einwirkungsgruppen dieser Art beschrieben werden.
- **Auswahl exklusiv:** Die einzelnen Lastfälle und Kombinationen schließen sich gegenseitig aus. Der ungünstigste Beitrag dieser Gruppe wird immer berücksichtigt.

## Eingaben

Die Kombinationsvorschrift wird in der Datenbasis oder in den Berechnungseinstellungen zur Lastfallkombination eingegeben und unter einer Nummer gespeichert. Nachfolgend sind die einzelnen Teile des Dialogs "Lastfallkombination" erläutert:

### Bezeichnung

Name der Lastfallkombination.

### Lastfälle

Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen markieren, um sie der aktuellen Einwirkung hinzuzufügen.

### Mehrfachwahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

### Einwirkung

Einwirkung auswählen. Die eingestellte Einwirkung ist abgehakt, wenn Einträge in ihr enthalten sind.

### Faktor

Die einzelnen Lastfälle und Kombinationen werden mit einem Faktor gewichtet.

### Übernehmen

Der Wichtungsfaktor markierter Lastfälle und Kombinationen wird geändert.

### Enthaltene Kombinationen nicht neu berechnen

Dieser Schalter unterbindet die Neuberechnung enthaltener Lastfallkombinationen.

### Kombinationen...

Startet den Dialog mit den ersten 9999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung oder für die nichtlineare Analyse nutzen.

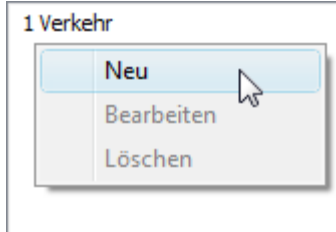
# Berechnungseinstellungen

## Alle Kombinationen berechnen

Alle vorhandenen Lastfallkombinationen werden berechnet (Standard).

## Folgende Auswahl berechnen

Nur die in dem linken Listenfeld vorhandenen Lastfallkombinationen werden berechnet. Das in den Listenfeldern verfügbare Kontextmenü ermöglicht die Bearbeitung der Lastfallkombinationen.



## Protokoll erstellen für ...

Vom Lastfallkombinationsprogramm wird im Standardfall nur ein Protokoll mit den Kombinationsbeschreibungen erstellt. Zusätzlich können auch Kombinationsergebnisse in das Protokoll aufgenommen werden. Das Protokoll ist in den meisten Fällen nicht unbedingt erforderlich.

# Ergebnisse

Die Lastfallkombination berechnet für die nachfolgenden Ergebnisse alle min-, max- Grenzl意思 und alle zugehörigen Werte.

z.B.:  $\min u_x$  und zugehörig  $u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$   
 $\max u_x$  "  $u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$

Stabschnittgrößen  $M_x, M_y, M_z, N_x, Q_y, Q_z$

Schalenschnittgrößen  $m_x, m_y, m_{xy}, n_x, n_y, n_{xy}, q_x, q_y$

Plattenschnittgrößen  $m_x, m_y, m_{xy}, q_x, q_y$

Scheibenschnittgrößen  $n_x, n_y, n_{xy}$

Rotationsschalenschnittgrößen  $M_\varphi, N_\varphi, M_\nu, N_\nu, Q_\varphi$

Deformationen  $u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$

Geschwindigkeiten  $v_x, v_y, v_z$

Beschleunigungen  $a_x, a_y, a_z$

Spannungen bei Volumenelementen  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$

Auflagerreaktionen  $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$

Bodenreaktionen  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

### Hinweis zur Lastfallkombination:

Ist die Betrag der betrachteten Steuergröße kleiner als der Schwellenwert ( $10^{-3}$ , bei Deformationen  $10^{-6}$ ), so werden diese und die zugehörigen Größen bei der Überlagerung ignoriert. Im folgenden sind Ergebnisse von drei Lastfällen abgebildet, die anschließend inklusiv kombiniert werden.

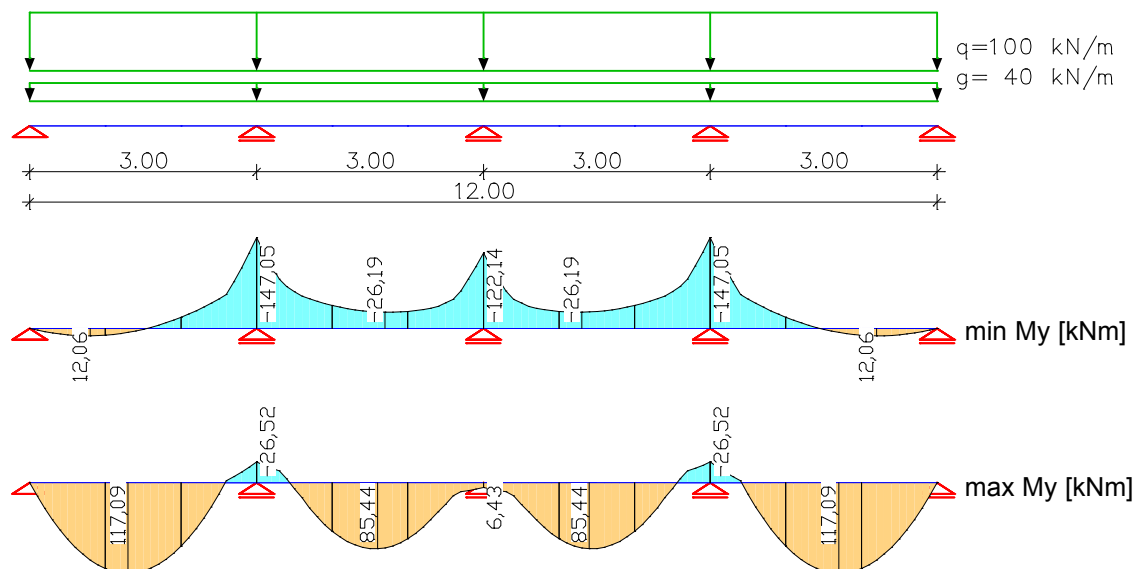
Ergebnisse von Lastfällen:				Ergebnis der Lastfallkombination:			
Nr.	Nx (kN)	Qz (kN)	My (kNm)		Nx (kN)	Qz (kN)	My (kNm)
LF.1	0,00	40,00	-35,00	min NX	0,00	0,00	0,00
LF.2	0,00	-10,00	20,00	max NX	100,00	0,00	0,00
LF.3	100,00	0,00	0,00	min MY	0,00	40,00	-35,00
				max MY	0,00	-10,00	20,00
				min QZ	0,00	-10,00	20,00
				max QZ	0,00	40,00	-35,00

Da Lastfall 1 und 2 keinen Beitrag zu min/max Nx liefern, ergeben sich hierfür auch keine zugehörigen Werte.

## Beispiele

### Lastfallkombination an einem Mehrfeldträger

In diesem Beispiel wird ein Mehrfeldträger berechnet, der mit der Eigenlast  $g$  (Lastfall 1) und feldweise mit der veränderlichen inklusiven Verkehrslast  $q$  (Lastfälle 2 bis 5) belastet ist. Die unten abgebildeten Schnittgrößen  $\min M_y$  und  $\max M_y$  ergeben sich aus der Lastfallkombination.



#### Protokoll Lastfallkombination:

##### Lastfallkombination 1 - ständige Einwirkung

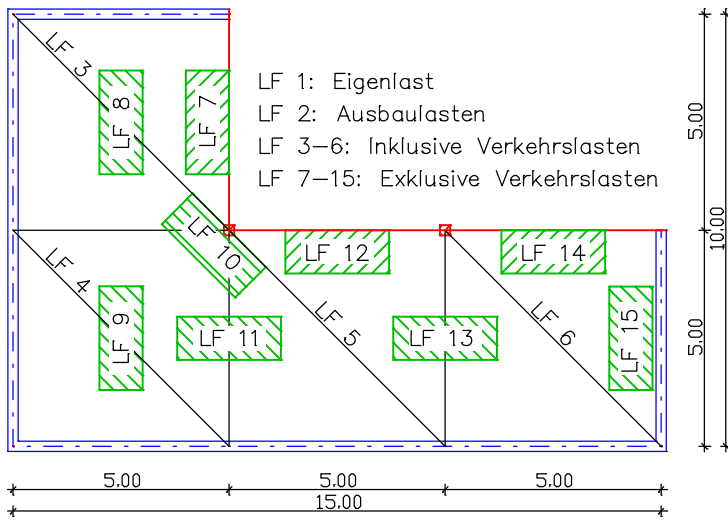
Lastfall	Faktor
1 Eigenlast $g = 40 \text{ kN/m}$	1,000

##### Lastfallkombination 1 - veränderliche inklusive Einwirkung

Lastfall	Faktor
2 Feld 1 $q = 100 \text{ kN/m}$	1,000
3 Feld 2 $q = 100 \text{ kN/m}$	1,000
4 Feld 3 $q = 100 \text{ kN/m}$	1,000
5 Feld 4 $q = 100 \text{ kN/m}$	1,000

## Lastfallkombination bei einer Deckenplatte

Das nachfolgende Beispiel zeigt eine Deckenplatte mit 15 Lastfällen.



### Deckensystem und Beanspruchung

Die Lastfälle 1 und 2 wirken ständig. Die vier feldweise definierten Flächenlasten wirken inklusive, d.h. sie können gleichzeitig wirken. Die Lastfälle 7-15 sind als exklusive Verkehrslasten zu berücksichtigen, d.h. sie schließen sich gegenseitig aus.

Das nachfolgende Protokoll der Lastfallkombination zeigt die Zuordnung der Lastfälle zu den Einwirkungsgruppen.

#### Lastfallkombination 1 - ständige Einwirkungen

Lastfall	Faktor
1 Eigenlast	1,000
2 Ausbaulasten	1,000

#### Lastfallkombination 1 - veränderliche inklusive Einwirkungen

Lastfall	Faktor
3 Feld 1	1,000
4 Feld 2	1,000
5 Feld 3	1,000
6 Feld 4	1,000

#### Lastfallkombination 1 - 1. veränderliche exklusive Einwirkung

Lastfall	Faktor
7 Laststellung 1	1,000
8 Laststellung 2	1,000
9 Laststellung 3	1,000
10 Laststellung 4	1,000
11 Laststellung 5	1,000
12 Laststellung 6	1,000
13 Laststellung 7	1,000
14 Laststellung 8	1,000
15 Laststellung 9	1,000

# Spannbeton

## Grundlagen

Diese Programmkomponente wurde für Spannbetontragwerke mit interner Vorspannung konzipiert, insbesondere also zur Berechnung von Brücken, Behältern und Deckenplatten. Grundlage ist dabei das Prinzip der räumlichen Spanngliederführung, die bei Stab-, Schalen- und Volumenmodellen eingesetzt werden kann. Der Anwendungsbereich umfasst vorgespannte Bauteile ohne Verbund und mit nachträglichem Verbund.

Die Berechnung eines Spannbetontragwerks erfolgt zunächst in drei Arbeitsschritten:

- Eingeben der Spannstränge, Spannverfahren und Spannanweisungen mit der Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs.
- Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung*.
- FEM-Berechnung zur Lastaufbereitung und Schnittkraftermittlung. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden zusätzlich die statisch bestimmten (P0) und statisch unbestimmten (P1) Anteile der Schnittgrößen gespeichert.

Wenn Einwirkungen aus Kriechen und Schwinden zu berücksichtigen sind, schließen sich folgende Schritte an:

- Eingabe der Kriech- und Schwindbeiwerte im Querschnittsdialog.
- Eingabe eines kriecherzeugenden Dauerlastfalls. Dazu werden die Lastfälle der Eigenlasten, Ausbaulasten und Vorspannung mit Hilfe der Lastart *Superposition* zusammengefasst.
- Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Kriechen und Schwinden* und Angabe des kriecherzeugenden Dauerlastfalls. Optional kann die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spann Stahl berücksichtigt werden, z.B. bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund.
- FEM-Berechnung zur Schnittkraftermittlung. Wenn die Schnittkraftumlagerung gewählt wurde, werden zusätzlich die resultierenden Spannstrangkkräfte gespeichert.

Die weitere Vorgehensweise hängt von den anzuwendenden Normen ab und ist in den entsprechenden Abschnitten beschrieben:

- DIN Fachbericht Brückennachweise.
- DIN 1045-1 Bemessung.
- ÖNORM B 4700 Bemessung.
- EN 1992-1-1 Bemessung.
- EN 1992-2 Brückennachweise.
- SIA 262 Bemessung.

Generell ist bei der Bearbeitung vorgespannter Tragwerke der Modellbildung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. In der Praxis ist häufig die Anwendung von Mischsystemen zu empfehlen. So ist z.B. bei einer mehrstegigen Plattenbalkenbrücke die Kombination von vorgespannten Stabelementen für die Brückenlängsrichtung (Plattenbalkenquerschnitt) mit Platten-elementen (Querrichtung) sinnvoll. Dadurch lässt sich das Problem der Lastverteilung auf einfache Weise lösen. Zusätzlich ist eine Bemessung der Brücke in Querrichtung im gleichen Arbeitsgang möglich. Eine pauschale Angabe sinnvoller Tragwerksmodelle ist jedoch aufgrund der Komplexität der Problemstellung nicht möglich.

## Verbundquerschnitt

Für den Nachweis von Spannbetonbauwerken sind die Umlagerungen der Schnittkräfte zwischen Beton und Spann Stahl am Verbundquerschnitt infolge Kriechen und Schwinden von Interesse. Diese können vereinfacht als prozentualer Anteil des Lastfalls Vorspannung vorgegeben werden. Es ist jedoch auch eine direkte Behandlung des Verbundquerschnittes möglich. Hierzu werden die Spannstatleinlagen bei der Berechnung des Lastfalls Kriechen und Schwinden während der Aufbereitung der Gesamtsteifigkeitsmatrix mit berücksichtigt. Somit werden quasi Verbundelemente realisiert, über deren Dehnungszustand der jeweilige Schnittgrößenanteil der Verbundkomponenten angegeben werden kann. Diese Vorgehensweise ist für alle Elementtypen implementiert. Kriechumlagerungen können somit auch für Flächen- und Volumenmodelle ermittelt werden. Hierdurch entsteht allerdings insbesondere bei der Aufbereitung der Gesamtsteifigkeitsmatrix ein wesentlich erhöhter Berechnungsaufwand, der direkt von der Anzahl der Spannstränge abhängt. Die vom Programm angegebenen Schnittgrößen (Normalkräfte, Biegemomente, Querkräfte) beziehen sich stets auf den **Betonquerschnitt**. Bei Untersuchungen von Verbundelementen stehen diese allein nicht im Gleichgewicht mit den äußeren Lasten, da die Spannstrangkkräfte unter Berücksichtigung ihrer räumlichen Anordnung mit herangezogen werden müssen. Da der Integration der Spannstatsteifigkeiten ein Finite-Element-Ansatz zugrunde liegt, **ist insbesondere bei Stabelementen auf eine ausreichende Elementierung zu achten**. Flächen- und Volumenmodelle weisen hingegen i.d.R. eine genügend feine Diskretisierung auf.

## Kriechen und Schwinden

Im Spannbetonbau ist der Berücksichtigung zeitabhängigen Materialverhaltens aus Gründen der Tragwerkssicherheit besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Im Allgemeinen wird bei Stabwerksmodellen eine Abschätzung über eine Näherung für statisch bestimmte Verbundtragwerke mit einer Spannstranglage (nach Trost bzw. Rüschi) vorgenommen. Im vorliegenden Rechenmodell kommen jedoch auch Flächen- und Volumenmodelle zum Einsatz. Hierfür können vergleichbare Näherungen nicht angegeben werden.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1 + \rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \varphi \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,S})$$

Hierin bedeuten:

$\sigma_b(t)$	Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt $t$ .
$E_b$	E-Modul des Betons.
$\rho$	Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt $t$ (i.d.R. $\rho = 0,80$ ).
$\varphi$	Kriechbeiwert für den Zeitpunkt $t$ .
$\varepsilon_b(t)$	Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt $t$ .
$\varepsilon_{b,0}$	Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.
$\varepsilon_{b,S}$	Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben.

Die Kriech- und Schwindbeiwerte werden im Querschnittsdialog eingegeben. Zur Berücksichtigung in der FEM-Berechnung muss ein Lastfall definiert werden, der die Lastart *Kriechen und Schwinden* enthält und den kriecherzeugenden Dauerlastfall angibt.

## Einwirkungen aus Vorspannung

Die Definition der Spannstränge erfolgt grundsätzlich elementunabhängig. Dadurch ist größtmögliche Flexibilität bei der graphischen Eingabe und Modifikation der Spannstranggeometrie gewährleistet. Die Zuordnung der Spannstränge zu den Elementen erfolgt erst zum Zeitpunkt der Schnittgrößenermittlung über geometrische Bedingungen. Dabei werden folgende Typen von Spannsträngen unterschieden:

- **Stab:** Der Spannstrang wird einem Stab zugeordnet, wenn er
  - beide Stirnflächen durchdringt,
  - eine Stirnfläche durchdringt und im Stab beginnt bzw. endet oder
  - im Stab beginnt und endet.
 Je nach Benutzervorgabe ist es zulässig, dass der Spannstrang
  - innerhalb des Querschnitts,
  - innerhalb des Außenpolygons oder
  - innerhalb des umschließenden Rechtecks verläuft.
 Die beiden letzten Optionen erlauben vor allem bei Hohlquerschnitten eine vereinfachte Spannstrangführung in der Entwurfsphase.
- **Fläche:** Dieser Typ ist sowohl für Flächen- als auch für Volumenelemente anwendbar. Der Spannstrang wird einem Flächenelement zugeordnet, wenn er
  - zwei Seitenflächen durchdringt oder
  - eine Seitenfläche durchdringt und im Element beginnt bzw. endet.
 Bei Volumenelementen kann der Spannstrang das Element an einer beliebigen Außenseite durchdringen.
- **Gemischt:** Dieser Spannstrangtyp dient der gleichzeitigen Vorspannung von Stab-, Flächen- und Volumenelementen. Der Anwendungsschwerpunkt liegt auf Berechnung und Nachweis zusammengesetzter Querschnitte. Für den Verlauf innerhalb der Elemente gibt es keine Restriktionen, allerdings muss der Spannstrang auch bei Stabelementen immer im Querschnitt liegen.

Grundlegend für die Berechnung der Einwirkungen aus Vorspannung ist der Verlauf der Spannstrangkraft unter Berücksichtigung von Anspannen, Nachlassen und Ankerschlupf. Der Einfluss der Spanngliedreibung wird mit dem üblichen Ansatz der Seilreibung erfasst, so dass sich der Anspannvorgang in Parameterform allgemein wie folgt formulieren lässt:

$$V(p) = V(0) \cdot e^{-\mu(\alpha + l(p)\beta)}$$

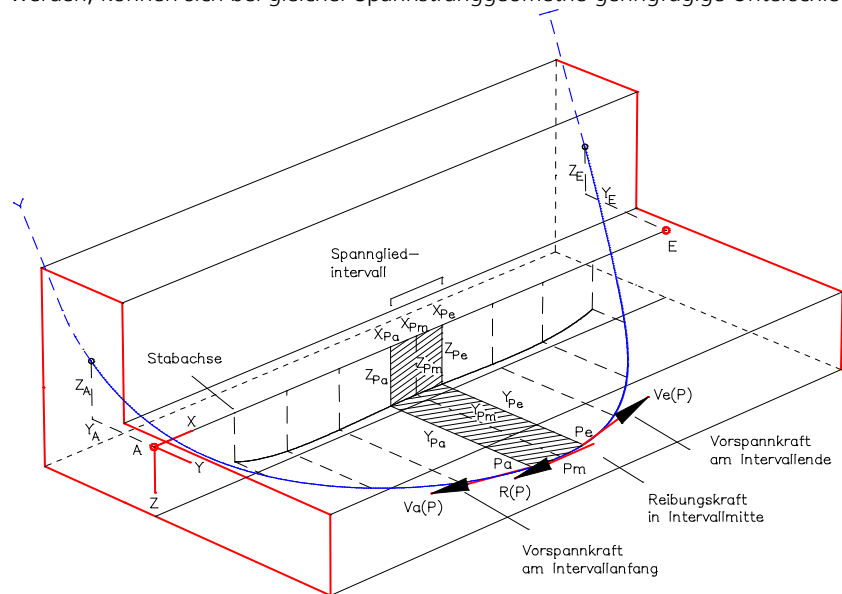
mit



- $p$  Kurvenparameter.
- $V(p)$  Spannkraft am Kurvenparameter  $p$ .
- $V(0)$  Vorspannkraft am Spannanker.
- $\mu$  Reibungsbeiwert.
- $\alpha$  gewollter Umlenkwinkel des Spannglieds.
- $l(p)$  Spanngliedlänge am Kurvenparameter  $p$ .
- $\beta$  ungewollter Umlenkwinkel.

Entsprechende Ansätze gelten für das Nachlassen. Hierbei können ggfs. noch unterschiedliche Reibungsbeiwerte Berücksichtigung finden. Die Einwirkungen (Kräfte und Momente) aus Vorspannung ergeben sich für den untersuchten Elementort aus der zugehörigen Spannstrang- und Reibungskraft.

Bei der praktischen Berechnung wird der Spannstrang in eine endliche Anzahl von Intervallen zerlegt, und es werden hierfür an den jeweiligen Intervallpunkten exzentrische Reibungs- und Umlenkkräfte ermittelt. Diese werden dann als räumliche Einzelkräfte und Momente auf das zugehörige Element aufgebracht. Da Spannstränge vom Typ *Fläche* und *Gemischt* äquidistant über die gesamte Länge, Spannstränge vom Typ *Stab* dagegen äquidistant innerhalb eines Stabes unterteilt werden, können sich bei gleicher Spannstranggeometrie geringfügige Unterschiede in der Kräfteinleitung ergeben.



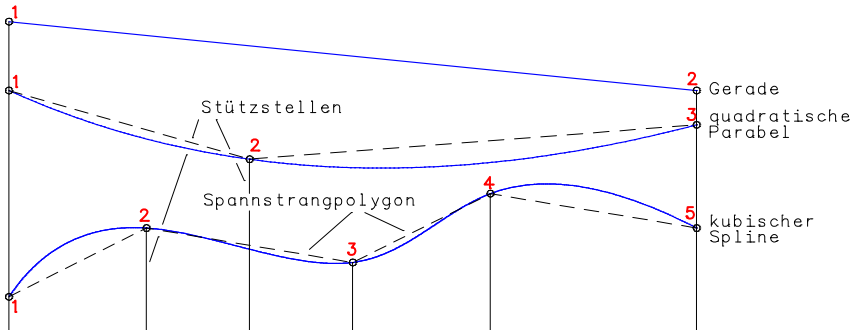
*Umlenk- und Reibungskräfte aus Vorspannung*

Die beschriebene Methode erlaubt die Ermittlung des räumlichen Schnittgrößenzustandes des vorgespannten Betons. Hierin sind sowohl die statisch bestimmten als auch die statisch unbestimmten Schnittgrößenanteile enthalten. Die Summe der Auflagerreaktionen ergibt sich hierbei stets zu Null, da Anker-, Reibungs- und Umlenkkräfte ein Gleichgewichtssystem bilden.

Zur Berücksichtigung der Vorspannung bei der FEM-Berechnung muss ein Lastfall mit der Lastart *Vorspannung* definiert werden.

## Spannstranggeometrie

Der dem Berechnungsansatz zugrunde liegende räumliche Spannstrangverlauf wird durch eine räumliche kubische Splinefunktion wiedergegeben, welche durch ein sogenanntes Spannstrangpolygon definiert ist. Hierdurch steht eine geordnete Punktmenge zur Verfügung, die die Stützstellen der Splinefunktion repräsentiert. Die Splinefunktion ist die räumliche Kurve, die mit der geringsten Krümmung durch alle Stützstellen verläuft. Werden nur 2 Stützstellen vorgegeben, ergibt sich eine Gerade. Bei 3 Stützstellen erhält man eine quadratische Parabel. Bei mehr als 3 Stützstellen wird eine kubische Splinefunktion erzeugt.



Spannstrangpolygon und Splinefunktion

## Eingaben

### Vorspannung

Mit dem Menüpunkt *Vorspannung* können Spannstränge eingegeben und bearbeitet werden. Vorhandene Spannstränge werden automatisch geladen.

#### Eingabe

<i>Aus</i>	Spannstränge aus der Graphikansicht entfernen.
<i>Speichern</i>	Alle Spannstränge in der Projektdatei speichern.
<i>Eingeben</i>	Zur Definition eines neuen Spannstrangs wird der Dialog <i>Spannstrangeigenschaften</i> aufgerufen. Die Splinepunkte des Spannstrangs können entweder tabellarisch oder graphisch definiert werden.
<i>Splinepunkte</i>	Markierte Splinepunkte bearbeiten.
<i>X, Y, Z</i>	Koordinaten der markierten Splinepunkte ändern.
<i>Einfügen</i>	Neuen Splinepunkt vor dem markierten Punkt einfügen.
<i>Löschen</i>	Markierten Splinepunkt löschen.
<i>Ansicht...</i>	Spannstrangansicht auswählen.
<i>Neu</i>	Eine neue Spannstrangansicht eingeben.
<i>Standard</i>	Die <i>Standard Ansicht</i> wählen.
<i>0-Punkt</i>	Neuen Ursprung für das Koordinatensystem der Ansicht einstellen.
<i>Stützstellen</i>	Die unter <i>Ansicht...</i> ausgewählten Werte werden für Schnitt- und Stabansichten an diskreten Stützstellen tabellarisch dargestellt.
<i>Splinepunkte</i>	Jeder Splinepunkt sichtbarer Spannstränge definiert eine Stützstelle.
<i>Variabel</i>	Stützstellen werden durch abschnittsweise Vorgabe von Teilungen festgelegt.
<i>Äquidistant</i>	Stützstellen ergeben sich mit der eingegebenen konstanten Teilung.
<i>  --x-- </i>	Eingabe neuer Teilungen für die Optionen <i>Variabel</i> und <i>Äquidistant</i> .

## Spannstrangeigenschaften

Die Spannstrangeigenschaften werden mit der nachfolgenden Dialogbox bearbeitet.

The dialog box 'Spannstrangeigenschaften' has three tabs: 'Allgemein', 'Spannverfahren', and 'Spannanweisung'. The 'Allgemein' tab is selected. It contains the following fields and controls:

- Nummer:** A dropdown menu with the value '1'.
- Bezeichnung:** A text input field containing 'Lage 1 oben'.
- Spannverfahren:** A dropdown menu with the value '1 - SUSPA EC 140'.
- Spannglied-anzahl:** A text input field with the value '6'.
- Typ:** A dropdown menu with the value 'Stab'.
- Spannanweisung:** A dropdown menu with the value '1 - mit Pmax'.
- Splinepunkte:** A table with columns 'x [m]', 'y [m]', and 'z [m]'. The table contains three rows of data:
 

	x [m]	y [m]	z [m]
1	-0,800	0,000	-0,286
2	10,000	0,000	0,480
3	20,800	0,000	-0,286
*			
- In Lastart Vorspannung ignorieren:** A checkbox that is currently unchecked.

At the bottom of the dialog are 'OK' and 'Abbrechen' buttons.

### Nummer

Nummer des Spannstrangs bzw. Startwert für Umnummerierung.

### Bezeichnung

Bezeichnung des Spannstrangs.

### Spannverfahren

Das zu verwendende Spannverfahren, dessen Eigenschaften auf der gleichnamigen Dialogseite zu definieren sind.

### Anzahl Spannglieder

Anzahl der Spannglieder, die in diesem Spannstrang gebündelt werden.

### Typ

- *Stab*: Spannstrang für Stabvorspannung. Mit dem zweiten Kombinationsfeld wird die Geometrie für die Zuordnung zwischen Spannstrang und Stäben festgelegt.
- *Fläche*: Spannstrang für Flächen- und Volumenvorspannung.
- *Gemischt*: Spannstrang zur gleichzeitigen Vorspannung von Stab-, Flächen- und Volumenelementen, z.B. für zusammengesetzte Querschnitte.
- *Inaktiv*: Spannstrang ist nicht aktiv.

Weitere Erläuterungen siehe Abschnitt „Einwirkungen aus Vorspannung“.

### In Lastart Vorspannung ignorieren

Bei der FEM-Berechnung eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* wird dieser Spannstrang ignoriert. Bei der Erzeugung von Bauzuständen wird für alle vorhandenen Spannstränge dieser Schalter gesetzt.

### Spannanweisung

Die zu verwendende Spannanweisung, deren Eigenschaften auf der gleichnamigen Dialogseite zu definieren sind.

### Splinepunkte

Koordinaten der Splinepunkte des Spannstrangs.

## Spannverfahren

Im Spannverfahren werden typische Eigenschaften zusammengefasst, die den Spannsträngen über eine Nummer zugewiesen werden.

### Nummer, Bezeichnung

Nummer und Bezeichnung des Spannverfahrens. Mit der Option <Datenbank> können Eigenschaften aus der Datei *Igraph.dat* geladen oder dort gespeichert werden.

### Zulassung nach

- DIN 1045-1
- DIN 4227
- EC2
- ÖNORM
- SIA 262

Mit Wahl der Zulassung wird die Vorspannkraft  $P_{m0}$  normgerecht festgelegt.

### Fläche $A_p$

Querschnittsfläche  $A_p$  eines Spannglieds [mm<sup>2</sup>].

### $\beta_s, \beta_{02}$

Streck- bzw.  $\beta_{0,2}$  - Grenze des Spannstahls nach DIN 4227 [MN/m<sup>2</sup>].

### $f_{p0,1k}$

Charakteristischer Wert der 0,1%-Dehngrenze des Spannstahls nach DIN 1045-1, ÖNORM, SIA 262 und EC2 [MN/m<sup>2</sup>].

### E-Modul

E-Modul des Spannstahls [MN/m<sup>2</sup>].

### $\beta_z$

Zugfestigkeit des Spannstahls nach DIN 4227 [MN/m<sup>2</sup>].

### $f_{pk}$

Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Spannstahls nach DIN 1045-1, ÖNORM, SIA 262 und EC2 [MN/m<sup>2</sup>].

### $P_{m0}$

Die entsprechend der gewählten Zulassung erlaubte Vorspannkraft eines Spannglieds [kN] wird angezeigt, wobei der jeweils kleinere der beiden möglichen Werte maßgebend ist. Nach Freischaltung des Eingabefeldes kann eine davon abweichende Vorspannkraft definiert werden.

Zulassung nach DIN 1045-1:

$$P_{m0} = A_p \cdot 0,85 f_{p0,1k} \text{ bzw. } A_p \cdot 0,75 f_{pk} \text{ gemäß DIN 1045-1, Gl. (49).}$$

Zulassung nach DIN 4227:

$$P_{m0} = A_p \cdot 0,75 \beta_s \text{ bzw. } A_p \cdot 0,55 \beta_z \text{ gemäß DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65.}$$

Zulassung nach EC2:

$$P_{m0} = A_p \cdot 0,85 f_{p0,1k} \text{ bzw. } A_p \cdot 0,75 f_{pk} \text{ gemäß EN 1992-1-1, Gl. (5.43).}$$

Zulassung nach ÖNORM:

$$P_{m0} = A_p \cdot 0,80 f_{p0,1k} \text{ bzw. } A_p \cdot 0,70 f_{pk} \text{ gemäß ÖNORM B 4750, Gl. (4) und (5), und ÖNORM B 1992-1-1, Kapitel 8.9.6.}$$

Zulassung nach SIA 262:

$$P_{m0} = A_p \cdot 0,70 f_{pk} \text{ gemäß SIA 262, Gl. (22), Kapitel 4.1.5.2.2.}$$

### Hüllrohrdurchmesser

Wird nur bei Stabspanngliedern zur Berechnung der Netto- und ideellen Querschnittswerte genutzt [mm].

### Reibungsbeiwerte

Reibungsbeiwerte  $\mu$  für das Anspannen und Nachlassen.

### Ankerschlupf

Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker [mm].

### Ungewollter Umlenkwinkel $\beta'$

Ungewollter Umlenkwinkel eines Spannglieds [°/m].

## Spannanweisung

In der Spannanweisung wird unterschieden zwischen Anfang und Ende des Spannstrangs. Die Größe der maximalen Vorspannkraft wird durch Faktoren bezüglich der zulässigen Vorspannkraft bestimmt. Diese ist im Normalfall  $P_{m0}$  (siehe *Spannverfahren*). Durch den beim Nachlassen angegebenen Faktor wird die maximal im Spannstrang verbleibende Vorspannkraft bzgl.  $P_{m0}$  festgelegt. Die am Spannanker verbleibende Vorspannkraft wird hieraus vom Programm errechnet. Pro Spannanker kann zweimal angespannt und nachgelassen werden. Die Spannanweisungen werden nummeriert.

Bezogene Spannkraft	1. Anspannen	1. Nachlassen	2. Anspannen	2. Nachlassen
Anfang:	1	1	0	0
Ende:	1	1	0	0

### Nummer, Bezeichnung

Nummer und Bezeichnung der Spannanweisung.

### Anspannen mit Pmax

Die Markierung dieses Kontrollkästchens bewirkt bei Spanngliedern mit einer Zulassung nach DIN 1045-1 oder EC2, dass die Faktoren zum Anspannen auf die zulässige Höchstkraft  $P_{max}$  bezogen werden (s. nachfolgendes Beispiel).

### Kappa

Beim Anspannen mit  $P_{max}$  wird die zulässige Höchstkraft unter Verwendung des Vorhaltemaßes  $\kappa$  zur Sicherung einer Überspannreserve berechnet.

## 1. Anspannen

Faktor bezüglich  $P_{m0}$  bzw.  $P_{max}$  für die Vorspannkraft am Anker beim 1. Anspannen.

## 1. Nachlassen

Faktor bezüglich  $P_{m0}$  für die maximal verbleibende Vorspannkraft beim 1. Nachlassen. „0“: kein Nachlassen !

## 2. Anspannen

Faktor bezüglich  $P_{m0}$  bzw.  $P_{max}$  für die Vorspannkraft am Anker beim 2. Anspannen. „0“: kein 2. Anspannen !

## 2. Nachlassen

Faktor bezüglich  $P_{m0}$  für die maximal verbleibende Vorspannkraft beim 2. Nachlassen. „0“: kein 2. Nachlassen !

Bei der Ermittlung des Spannkraftverlaufes wird von folgender Reihenfolge ausgegangen:

- Anspannen und Nachlassen am Anfang,
- Anspannen und Nachlassen am Ende,
- Ankerschlupf am Anfang,
- Ankerschlupf am Ende.

Die Unterschiede beim Anspannen mit  $P_{m0}$  bzw.  $P_{max}$  sind in den nachfolgenden Beispielen dargestellt.

**Die Zulässigkeit der während des Anspannens erreichten Höchstkraft ist vom Anwender zu prüfen.**

## Beispiele zur Spannanweisung

### Anspannen mit $P_{m0}$

Die Wirkungsweise der Faktoren *Anspannen* und *Nachlassen* soll an einem Einzelspannglied St 1500/1770 mit Zulassung nach EC2 und Spannanker am Spanngliedanfang verdeutlicht werden.

The image shows two screenshots of the 'Spannstrangeigenschaften' dialog box in a software application. Both screenshots have the 'Spannanweisung' tab selected.

**Left Screenshot:**

- Nummer, Bezeichnung: 1 - SUSPA EC 140
- Zulassung nach: EC2
- Fläche  $A_p$ : 2660 mm<sup>2</sup>
- $f_{p0,1k}$ : 1500 MN/m<sup>2</sup>
- E-Modul: 190000 MN/m<sup>2</sup>
- $f_{pk}$ : 1770 MN/m<sup>2</sup>
- $P_{m0}$ : 3391,5 kN
- Hüllrohrdurchmesser: 97 mm
- Reibungsbeiwerte  $\mu$ : Spannen: 0,21; Nachlassen: 0,21; Ankerschlupf: 5 mm
- Ungewollter Umlenkwinkel  $\beta'$ : 0,2 °/m

**Right Screenshot:**

- Nummer, Bezeichnung: 1 - EC2
- Anspannen mit  $P_{max}$
- Kappa: [ ]
- Table: Bezogene Spannkraft

Bezogene Spannkraft	1. Anspannen	1. Nachlassen	2. Anspannen	2. Nachlassen
Anfang:	1,05	1	0	0
Ende:	0	0	0	0

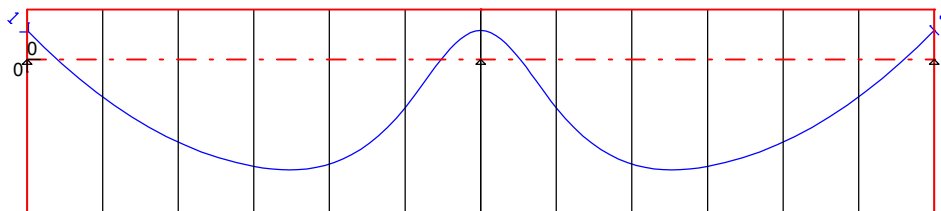
Die zulässigen Spannkraften sind definiert durch

$$P_{max} = \min(A_p \cdot 0,80 f_{pk}, A_p \cdot 0,90 f_{p0,1k}) = 3591,0 \text{ kN}$$

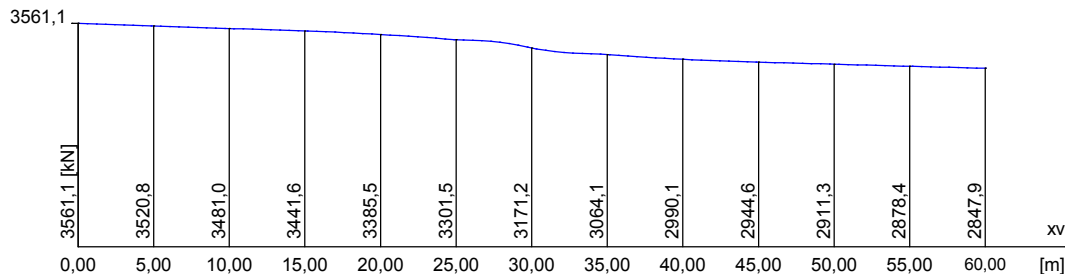
$$P_{m0} = \min(A_p \cdot 0,75 f_{pk}, A_p \cdot 0,85 f_{p0,1k}) = 3391,5 \text{ kN}$$

Der erste Spannkraftverlauf der nachfolgenden Abbildung ergibt sich nach Überspannen um 5% mit dem Faktor 1,05 bezogen auf  $P_{m0}$ , d.h. die maximale Vorspannkraft beträgt 3561,1 kN  $< P_{max}$ .

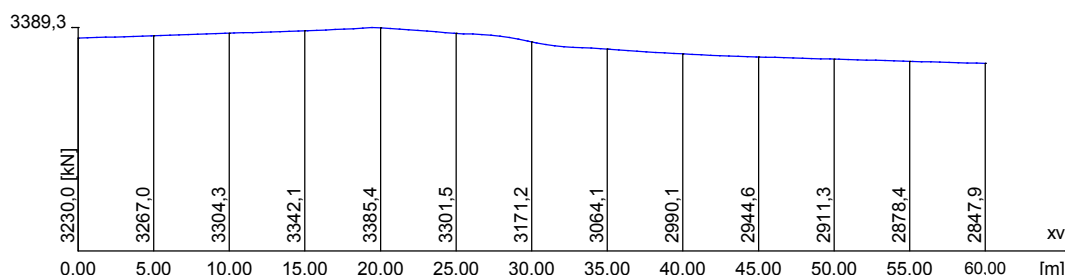
Den zweiten Spannkraftverlauf erhält man nach Anspannen und Nachlassen mit den Faktoren 1,05 und 1,0, d.h. die nach dem Verankern maximal im Spannglied verbleibende Vorspannkraft beträgt 3389,3 kN  $< P_{m0}$ .



Einzelspannglied, 10-fach überhöht



Spannkraftverlauf nach dem 1. Anspannen mit Faktor 1,05



Spannkraftverlauf nach dem 1. Nachlassen mit Faktor 1,0

Ein eventuell vorhandener Ankerschlupf wurde hier zur Verdeutlichung der beschriebenen Effekte nicht berücksichtigt. Dieser würde eine zusätzliche Variation des Spannkraftverlaufs zur Folge haben. Ein zweiter Anspann- und Nachlassvorgang hätte analoge Auswirkungen. Entsprechendes gilt für Anspannen und Nachlassen am Spanngliedende.

## Anspannen mit $P_{\max}$

Für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 1045-1 und EC2 darf die am Spannglied aufgebrauchte Höchstkraft während des Spannvorgangs den kleineren der folgenden Werte nicht übersteigen:

$$P_{\max} = A_p \cdot 0,80 f_{pk} e^{-\mu\gamma(\kappa-1)} \text{ bzw. } A_p \cdot 0,90 f_{p0,1k} e^{-\mu\gamma(\kappa-1)}$$

DIN 1045-1 bzw. Heft 525, Kap. 8.7.2  
DIN FB 102, Kap. 4.2.3.5.4(2)\*P  
DIN EN 1992-1-1, Kap. 5.10.2.1(NA.3)

mit

$\mu$  Reibungsbeiwert nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung.

$\gamma$   $\Phi + k \cdot x$

$\Phi$  = Summe der planmäßigen Umlenkwinkel über die Länge  $x$ ,

$k$  = ungewollter Umlenkwinkel pro Längeneinheit (entspricht  $\beta'$  im Dialog),

$x$  = entspricht bei einseitigem Vorspannen dem Abstand zwischen Spannanker und Festanker, bei zweiseitiger Vorspannung der Einflusslänge des jeweiligen Ankers.

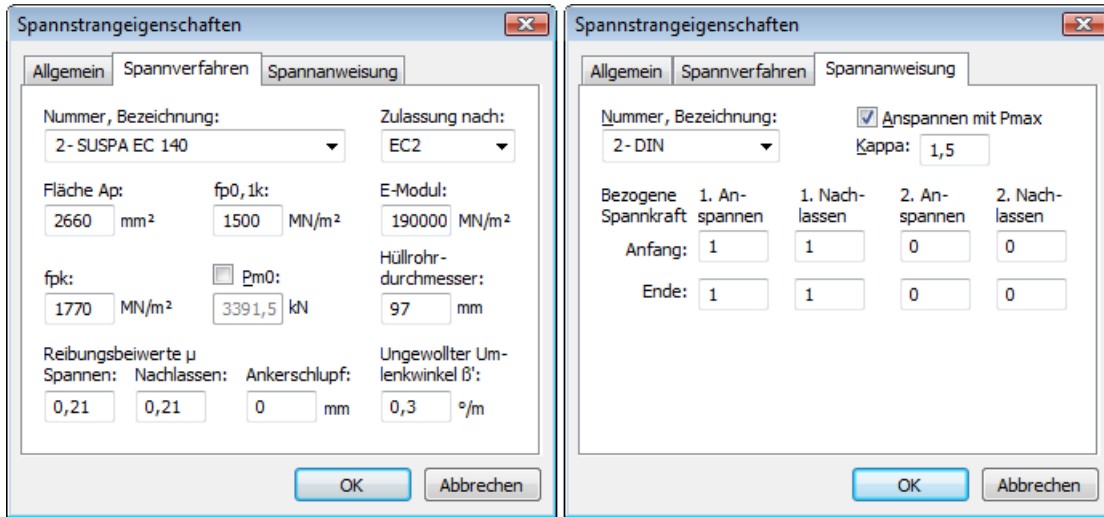
$\kappa$  Vorhaltemaß zur Sicherung einer Überspannreserve mit  $1,5 \leq \kappa \leq 2$  für Spannglieder mit nachträglichem Verbund und  $\kappa = 1$  für alle anderen Fälle.

Das Programm ermittelt mit dem eingegebenen Vorhaltemaß  $\kappa$  den zulässigen Höchstwert  $P_{\max}$ . Für die Einflusslänge  $x$  wird bei einseitiger Vorspannung die Spanngliedlänge, bei zweiseitiger Vorspannung vereinfachend die halbe Spanngliedlänge angenommen.

**Der Anspannfaktor bezieht sich bei dieser Einstellung auf  $P_{\max}$ , d.h. mit dem Wert 1,0 wird die nach der Norm zulässige Höchstkraft gewählt.**

Der Nachlassfaktor bezieht sich weiterhin auf  $P_{m0}$ . Die Zulässigkeit der nach dem Verankern im Spannglied verbleibenden Kraft wird ebenfalls mit einem Wert von 1,0 sichergestellt.

Am Beispiel eines beidseitig angespannten Einzelspannglieds St 1500/1770 mit Zulassung nach EC2 soll der Spannkraftverlauf für  $\kappa = 1,5$  verdeutlicht werden. Der Ankerschlupf wird dabei zur Vereinfachung vernachlässigt.

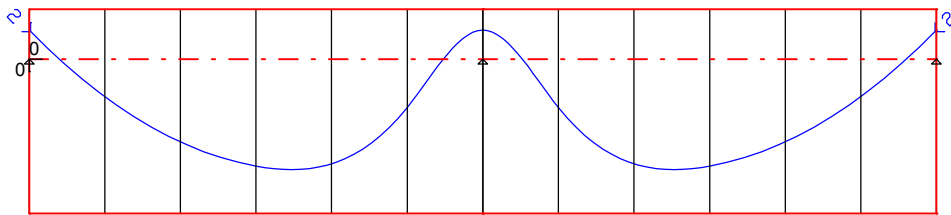


Das Programm ermittelt die zulässigen Spannkraften zu

$$P_{max} = e^{-\mu \cdot (\kappa - 1)} \cdot \min(A_p \cdot 0,80 f_{pk}, A_p \cdot 0,90 f_{p0,1k}) = 0,9457 \cdot 3591 = 3395,9 \text{ kN}$$

$$P_{m0} = \min(A_p \cdot 0,75 f_{pk}, A_p \cdot 0,85 f_{p0,1k}) = 3391,5 \text{ kN}$$

Die Höchstkraft  $P_{max}$  wird mit dem Anspannfaktor von 1,0 automatisch eingehalten. Wie aus dem nachfolgend abgebildeten Spannkraftverlauf ersichtlich ist, verbleiben nach dem Verankern 3391,2 kN im Spannglied. Damit wird die Grenze  $P_{m0}$  ebenfalls eingehalten.



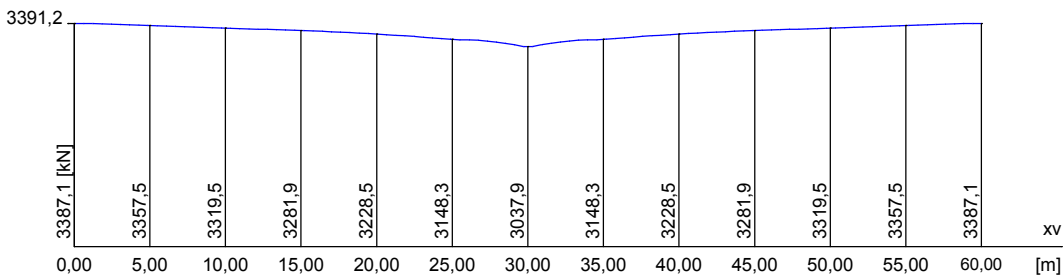
Einzelspannglied, 10-fach überhöht

Spannkraftverlauf Spannstrang 2 (1 Spannglied(er), l = 60,16 m)

Spannverfahren 2 - SUSPA EC 140. Zulassung nach EC2.  
 $P_{m0} = 3391,5 \text{ kN}$ ,  $A_p = 2660,0 \text{ mm}^2$ ,  $\mu_a = 0,21$ , Winkel  $\beta' = 0,30 \text{ }^\circ/\text{m}$   
 $E\text{-Modul} = 190000 \text{ MN/m}^2$ ,  $A_h = 7389,8 \text{ mm}^2$ ,  $\mu_n = 0,21$ , Schlupf = 0,00 mm

Spannanweisung 2 - DIN  
 Anspannen mit Pmax (DIN-Fachbericht, DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1). Kappa = 1,5.

Spannanker	Anfang	Ende
Bez. Spannkraft:	1,000 1,000	1,000 1,000
Spannkraft [kN]:	3395,9 3387,1	3395,9 3387,1
Längung [mm]:	362,2 -0,0	26,0 -0,0



Spannkraftverlauf nach Anspannen und Nachlassen

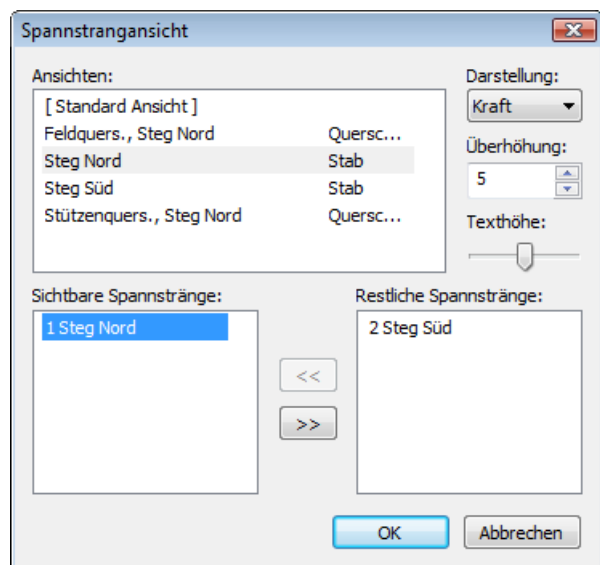
Falls die beim Anspannen errechnete Kraft kleiner ist als der Wert beim Nachlassen, wird programmseitig sichergestellt, dass auch nach dem Verankern der kleinere Wert nicht überschritten wird.



## Ansicht von Spannsträngen

Folgende Spannstrangansichten sind möglich:

- *Schnitt*: Ansicht eines Schnitts durch Flächen- oder Volumenelemente.
- *Stab*: Ansicht eines Längsschnitts durch Stäbe.
- *Querschnitt*: Ansicht des Stabquerschnitts an einem beliebigen Ort auf der Stabachse.



### Ansichten

Liste der vorhandenen Ansichten.

### Darstellung

- *Nichts*: Keine Spannstrangeigenschaften darstellen.
- *Höhe zv*: Spannstrangordinaten ausgeben.
- *Kraft*: Spannkraftverlauf darstellen.
- *Radius*: Krümmungsradien ausgeben.

### Überhöhung

Überhöhung der Darstellung festlegen.

### Texthöhe

Texthöhe für die Beschriftung festlegen.

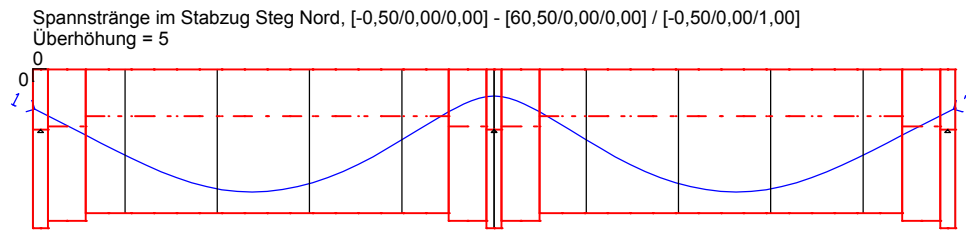
### Sichtbare, Restliche Spannstränge

Die Spannstränge können zwischen den beiden Listenfeldern der Ansicht verschoben werden.

Die Schnitt- und Stabdarstellung bilden die gewählten Spannstränge in einer durch drei Punkte definierten Darstellungsebene xv-zv ab. Gleichzeitig werden alle zugehörigen Elemente mit ihrer Querschnittsdicke dargestellt, um die Höhenlage der Spannstränge im Querschnitt beurteilen zu können.

In der Schnittdarstellung ist es optional möglich nur den Durchstoßpunkt der Spannstränge mit der Schnittebene, ähnlich der Querschnittsdarstellung, anzuzeigen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die überhöhte Darstellung eines Spannstrangs, seine Ordinaten und den zugehörigen Spannkraftverlauf.



Spannstrangordinaten  $z_v$  [cm] an den Stützstellen

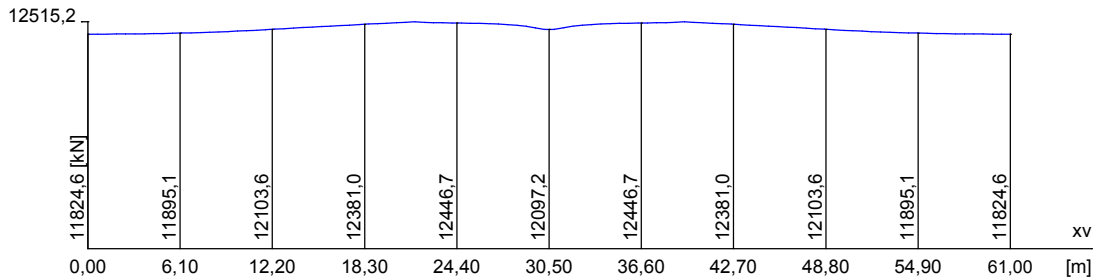
xv	0,00	6,10	12,20	18,30	24,40	30,50	36,60	42,70	48,80	54,90	61,00
1	52,0	114,4	159,0	151,9	94,0	36,0	94,0	151,9	159,0	114,4	52,0

Spannkraftverlauf Spannstrang 1 (10 Spannglied(er),  $l = 61,22$  m)

Spannverfahren 1 - LH Holzmann. Zulassung nach DIN 4227.  
 $P_{m0} = 1226,6$  kN,  $A_p = 1260,0$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_a = 0,20$ , Winkel  $\beta' = 0,20$  °/m  
 $E\text{-Modul} = 195000$  MN/m<sup>2</sup>,  $A_h = 4071,5$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_n = 0,20$ , Schlupf = 5,00 mm

Spannanweisung 1 - Beispiel

Spannanker	:	Anfang		Ende	
Bez. Spannkraft:		1,080	1,050	1,080	1,050
Spannkraft [kN]:		1324,7	1252,2	1324,7	1252,2
Längung [mm]:		301,7	-2,6	16,9	-2,6



### Erläuterungen zur Schnitt- und Stabdarstellung

[...]-[...] / [...] Koordinaten [m] von drei Punkten der Darstellungsebene. Die ersten beiden Punkte legen die  $x_v$ -Richtung fest, der dritte Punkt zeigt in Richtung  $z_v$ .

#### Spannstrangordinaten $z_v$

Die Ordinaten [cm] beziehen sich auf den eingegebenen Ursprung. Dieser ist im Längsschnitt gekennzeichnet (hier an der Querschnittsoberkante).

#### Spannverfahren

$P_{m0}$  Zulässige Vorspannkraft je Spannglied [kN].

$E\text{-Modul}$  E-Modul des Spannstahls [MN/m<sup>2</sup>].

$A_p$  Querschnittsfläche eines Spannglieds [mm<sup>2</sup>].

$A_h$  Querschnittsfläche eines Hüllrohrs [mm<sup>2</sup>].

$\mu_a, \mu_n$  Reibungsbeiwert beim Anspannen und Nachlassen.

Winkel  $\beta'$  Ungewollter Umlenkwinkel eines Spannglieds [Grad/m].

Schlupf' Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker [mm].

Spannanweisung Nummer und Bezeichnung der Spannanweisung.

Bez. Spannkraft Der Faktor für das Überspannen und Nachlassen am Spanngliedanfang und Spanngliedende.

Spannkraft Die Spannkraft am Spanngliedanfang und -ende für das Anspannen und Nachlassen [kN].

Längung Rechnerische Längenänderung des Spannglieds am Spanngliedanfang und -ende durch das Überspannen und Nachlassen ohne Berücksichtigung von Ankerschlupf und Bauwerksverformungen [mm].

Die maximal im Spannstrang auftretende Spannkraft wird am linken Rand angeschrieben.

# EN 1992-1-1 Bemessung

## Grundlagen

Die Stahlbeton- und Spannbetonbemessung nach EN 1992-1-1 (Eurocode 2) ist anwendbar für Hoch- und Ingenieurbauwerke unter Berücksichtigung der folgenden Normen:

- EN 1992-1-1:2004/A1:2014 als Basisdokument
- DIN EN 1992-1-1:2015 mit Nationalem Anhang Deutschland 2015-12
- ÖNORM EN 1992-1-1:2015 mit Nationalem Anhang Österreich B 1992-1-1:2011-12
- SS EN 1992-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Schweden 2011-04

Die Auswahl der gewünschten Vorschrift erfolgt im Dialog *Bemessungsnormen* des Extras-Menüs. Davon abhängig werden die entsprechenden Eingabe-, Berechnungs- und Ergebnisdialoge in der Bedienungsfläche angeboten. Bei der Materialauswahl stehen folgende Alternativen für Verfügung:

- *C12/15-EN-D* bis *C100/115-EN-D* sowie *LC12/13-EN-D* bis *LC80/88-EN-D* für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1
- *C12/15-EN* bis *C90/105-EN* sowie *LC12/13-EN* bis *LC80/88-EN* für die Bemessung nach den anderen Normen

Als Tragwerksmodelle sind Stab-, Flächen- und Volumentragwerke zugelassen. Der Nachweis vorgespannter Tragwerke ist nur innerhalb des FEM-Moduls möglich.

Innerhalb eines Tragwerksmodells sind verschiedenartige Bauteile kombinierbar:

- Nicht vorgespannte Bauteile
- Vorgespannte Bauteile mit nachträglichem Verbund
- Vorgespannte Bauteile ohne Verbund
- Bauteile mit externer Vorspannung
- Bauteile in Mischbauweise

Die Bemessung erfolgt im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle den Einwirkungen nach EN 1991:2002 (Eurocode 1), Teil 1, zuzuordnen. In den gewünschten Bemessungssituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte nach EN 1990:2010 (Eurocode 0) automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente.

Die Dialoge zu den Einwirkungen und zur Nachweisauswahl werden über die Berechnungseinstellungen aufgerufen. Die detaillierten Nachweisvorgaben und Bewehrungsangaben sind im Rahmen der Querschnittsdefinition einzugeben.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden alle Nachweise am Polygonquerschnitt geführt. Allgemeine Hinweise zur Anwendung von Bemessungsobjekten sind dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

Im Ordner *EN 1992-1-1 Bemessung* der Datenbasis und den Ordnern der nationalen Varianten ist zusätzlich eine Einzelbemessung für frei definierte Polygonquerschnitte oder Verbundquerschnitte möglich.

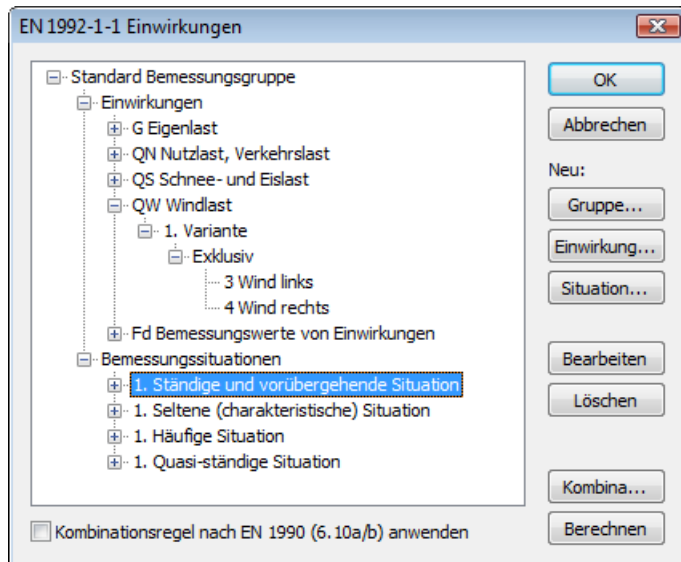
In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften der EN 1992-1-1 zitiert. Auf die jeweiligen nationalen Festlegungen wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthalten. Die betreffenden Passagen werden durch senkrechten Strich am Text markiert.

# Eingaben

## Einwirkungen und Bemessungssituationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die gewünschten Bemessungssituationen.

Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



Einwirkungsdialog für EN 1992-1-1 (Nationale Varianten entsprechend)

### Einwirkung...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Einwirkungen:

- Ständige Einwirkungen (G, GE, GH)
- Vorspannung (P)
- Kriechen und Schwinden, Relaxation (CSR1, CSR2). Diese Einwirkungen stehen nur zur Auswahl, wenn bereits eine Einwirkung P definiert ist. Sie werden in den Kombinationen zusammen mit P wie eine einzige Einwirkung behandelt.
- Veränderliche Einwirkungen (QN, QS, QW, QT, QH, QD)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)
- Einwirkungen infolge Erdbeben (AE)
- Bemessungswerte von Einwirkungen (Fd). In diesen Einwirkungen sind die Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte bereits enthalten. Sie werden exklusiv kombiniert.
- Zyklische Ermüdungseinwirkungen (Qfat)

### Gruppe...

Startet den Dialog zur Eingabe einer neuen Bemessungsgruppe. Optional können für bestimmte Bauteile (Querschnitte) eigene Einwirkungen und Bemessungssituationen definiert werden.

### Situation...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Bemessungssituationen. Zur Steuerung der Nachweise ist die Situation als Bau- oder Endzustand einzuordnen. Für Spannbetontragwerke mit nachträglichem Verbund lässt sich festlegen, dass die Spannglieder noch unverpresst sind.

### Bearbeiten

Öffnet den Bearbeitungsdialog der markierten Einwirkung oder Situation.

### Löschen

Entfernt die markierte Einwirkung oder Situation.

### Kombinationen...

Startet den Dialog mit den ersten 999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung oder für die nichtlineare Analyse nutzen.

## Berechnen

Berechnet die definierten Bemessungssituationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Situationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls. Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

## Kombinationsregel nach EN 1990 (6.10a/b) anwenden

Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen wird optional nach Gl. (6.10a/b) kombiniert, anderenfalls nach Gl. (6.10).

In der nachfolgenden Tabelle ist die Verwendung der Situationen in den verschiedenen Nachweisen dargestellt. Die Ziffern verweisen auf die Kapitel der EN 1992-1-1.

Situation	Tragfähigkeit	Kapitel	Gebrauchstauglichkeit	Kapitel
Ständig & vorüb. Außergewöhnlich Erdbeben	Längsbewehrung Querbewehrung Torsionsbewehr.	6.1 6.2 6.3		
Charakteristisch (selten)	Robustheitsbew. (in Anlehnung an EN 1992-2:2005, 6.1(110))	9.2.1.1	Betondruckspannungen Betonstahlspannungen Spannstahlspannungen Rissbreite, Vorsp. mit sof. Verbund	7.2(2) 7.2(5) 7.2(5) 7.3.1DE
Häufig	Ermüdung, vereinfacht	6.8.6(2)	Dekompression, Klasse XD1-XS3 Rissbreite, Vorsp. mit Verbund	7.3.1 7.3.1
Quasi-ständig			Betondruckspannungen Spannstahlspannungen Dekompression, Klasse XC2-XC4 Rissbreite, Stahlbeton & Vorsp. o.V. Verformungen	7.2(2) 7.2(5)DE 7.3.1 7.3.1 7.4
Ermüdung	Beton Betonstahl Spannstahl	6.8.7(1) 6.8.4 6.8.4		

## Definition einer Einwirkung

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Dialogfeld zur Eingabe einer veränderlichen Einwirkung. Die Dialogfelder für die weiteren Einwirkungsarten sehen entsprechend aus.

### Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

**Gamma.sup, Gamma.inf**

Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{\text{sup}}$  und  $\gamma_{\text{inf}}$ . Die national gültigen Werte nach EN 1990, Tabelle A.1.2(B), werden vorgeschlagen.


DIN EN 1992-1-1:

Nach 2.3.1.3(4) darf bei linear-elastischer Schnittgrößenermittlung mit den Steifigkeiten der ungerissenen Querschnitte für Setzungen der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{\text{G,Set}} = 1,0$  angenommen werden.

SS EN 1990:

Im Programm werden die Teilsicherheitsbeiwerte so vorgeschlagen, wie sie sich nach § 2 für Sicherheitsklasse 3 aus  $\gamma_{\text{d}} \cdot \gamma_{\text{sup}}$  mit dem Abminderungsfaktor  $\gamma_{\text{d}} = 1,0$  nach § 6 ergeben. Niedrigere Sicherheitsklassen lassen sich bei Bedarf durch Eingabe geringerer Werte berücksichtigen.

**Kombinationsbeiwerte psi für:**

Eingabefelder zur Auswahl der Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen gemäß EN 1990. Die Vorbelegung der Zahlenwerte richtet sich nach der nationalen Festlegung zur Tabelle A.1.1 der Norm. Mit der Schaltfläche  können die gewählten Kombinationsbeiwerte  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  und  $\psi_2$  eingesehen und geändert werden.



**Lastfälle**

Liste der möglichen Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen. Die Auswahl geschieht durch Markieren und Betätigung der entsprechenden Schaltfläche oder Drag & Drop.

**Mehrfachauswahl**

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

**Exklusive Varianten**

Veränderliche Einwirkungen können aus mehreren exklusiven Varianten bestehen, die sich gegenseitig ausschließen. Die Varianten selber enthalten inklusive und exklusive Anteile. Mit den Schaltflächen  oder  können Einwirkungsvarianten hinzugefügt oder gelöscht werden.

**Inklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

**Exklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

**Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls**

Der Spannkraftverlust wird als konstante prozentuale Minderung der Vorspannung definiert.

**CS als konstante Minderung der Vorspannung**

Alternativ zur Definition von CS-Lastfällen kann der Einfluss des Kriechens und Schwindens durch eine konstante prozentuale Minderung der Vorspannung berücksichtigt werden.

**Interne Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die interne Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

**Externe Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die externe Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

**Teilsicherheitsbeiwerte**

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe sind nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1, mit den jeweils national gültigen Werten vorgelegt. In den Bemessungssituationen infolge Erdbeben gelten gemäß EN 1998-1, Kapitel 5.2.4(2), die Beiwerte der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen werden innerhalb der Definition der Einwirkungen entsprechend EN 1990, Tabelle A.1.2(B), festgelegt.

## Querschnittseingaben

Die Querschnittseingaben umfassen alle spezifischen Festlegungen für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Eine Übersicht der Bemessungsvorgaben kann im Ordner *EN 1992-1-1 Bemessung* der Datenbasis und in den Ordnern der nationalen Varianten aufgerufen werden.

## Nachweise

Im nachfolgenden Dialog wird festgelegt, welche Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für den Querschnitt vorgesehen sind. In den Berechnungseinstellungen kann diese Auswahl für das gesamte Tragwerk übersteuert werden.

Nachweisauswahl für EN 1992-1-1 (Nationale Varianten entsprechend)

### Vorspannung des Bauteils

Die Art der Vorspannung kann für jeden Querschnitt getrennt gewählt werden:

- *Nicht vorgespannt*
- *Nachträglicher Verbund*
- *Ohne Verbund*
- *Extern*
- *Mischbauweise*

### Expositionsklasse

Die Nachweisbedingungen für den Dekompressions- und Rissbreitennachweis sind in EN 1992-1-1, Kapitel 7.3, Tabelle 7.1N, nach Expositionsklassen geordnet. Eine Zuordnung der Bauteile zu Expositionsklassen ist mit Hilfe der Tabelle 4.1 der Norm möglich.

SS EN 1992-1-1, § 20, § 21:

Zusätzlich kann eine Lebensdauerklasse zur Festlegung der Rissbreiten nach Tabelle D-2 und des Sicherheitsfaktors nach Tabelle D-3 gewählt werden.

### Robustheit

Dieser Nachweis ermittelt die Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung (Robustheitsbewehrung) nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.1(5)P mit dem in EN 1992-2, Kapitel 6.1(109), Gleichung (6.101a), für Spannbetonbrücken angegebenen Verfahren. Er bietet damit eine Alternative zur Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.1.1(1), Gleichung (9.1N). Letztere kann bei Bedarf durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigt werden.

DIN EN 1992-1-1:

Das duktile Bauteilverhalten ist nach Kapitel 9.2.1.1(1) für Bauteile mit und ohne Vorspannung stets durch Anordnung der Robustheitsbewehrung sicherzustellen.

## Stahlzugspannungen

Bei Bauteilen mit interner Vorspannung werden neben den Betonstahlspannungen auch die Spannsteelspannungen nachgewiesen.

## Mindest-Rissbewehrung, Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch Berechnung nach Kapitel 7.3.4. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung als Maximum aus Biegebewehrung, Robustheitsbewehrung und Mindest-Rissbewehrung nach 7.3.2 angesetzt. Letztere wird bei Bedarf automatisch erhöht, um die Rissbreite einzuhalten.

## Basiswerte

Die Basiswerte gelten für alle Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

### Bemessungsmodus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach Kapitel 9.5.2(2) durchgeführt.

### Reduktionsfaktor der Vorsp. für Robustheit

Für die Anordnung der Robustheitsbewehrung sind programmseitig die Vorschriften der EN 1992-2, Kapitel 6.1(110), maßgebend. Danach soll bei Ermittlung der Zugzone die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung unberücksichtigt bleiben. Da diese bei Flächentragwerken nicht bestimmbar ist, kann ersatzweise die Vorspannung mit einem Reduktionsfaktor abgemindert werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes liegt im Ermessen des Anwenders.

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe für die Schubbemessung von Flächenelementen [m].

### Neigung cot Theta

$\cot \Theta$  definiert die Neigung der Betondruckstreben gemäß Kapitel 6.2.3(2), Gl. (6.7N). Das Programm schlägt den Wert 1 vor (45° Druckstrebenneigung). Davon abweichend kann der Anwender einen Wert innerhalb der national zugelassenen Grenzen frei wählen. Die Vorgabe eines größeren Wertes hat in aller Regel eine geringere erforderliche Querkraftbewehrung  $A_{sw}$ , eine geringere aufnehmbare Querkraft  $V_{Rd,max}$  und ein größeres Versatzmaß  $a_1$  nach Kapitel 9.2.1.3, Gleichung (9.2), zur Folge.



DIN EN 1992-1-1:

Für den Nachweis stehen drei Berechnungsmethoden zur Auswahl:

- *Standard*: Der Eingabewert wird auf den nach Gl. (6.7aDE) für Querkraft, Torsion und kombinierte Beanspruchungen jeweils zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung).
- *Konstant*: Der Nachweis erfolgt ohne weitere Begrenzung mit dem für  $\cot \Theta$  eingegebenen Wert (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).
- *Std./45°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  nach Gl. (6.7aDE) begrenzt, für Torsion wird gemäß Kapitel 6.3.2(2) vereinfachend eine konstante Druckstrebenneigung von 45° angenommen.

Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

ÖNORM B 1992-1-1:

Die Druckstrebenneigung wird durch  $\tan \Theta$  beschrieben und ist nach den Gleichungen (3AT) und (4AT) zu begrenzen.

SS EN 1992-1-1, § 15:

Bei vorgespannten Bauteilen gilt abweichend von Gl. (6.7N) die Bedingung  $1,0 \leq \cot \Theta \leq 3,0$ .

### Asl nach Bild 6.3

Die anzurechnende Biegezugbewehrung nach Kapitel 6.2.2 Bild 6.3 [cm<sup>2</sup>].

### Asl erhöhen bis

Bei Flächen kann optional ein Größtwert angegeben werden, bis zu dem das Programm automatisch den vorgenannten Eingabewert erhöht, um Bügelbewehrung zu vermeiden [cm<sup>2</sup>].

### Stahlgüte der Bügel

- *420S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 420$  MN/m<sup>2</sup>.
- *500S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 500$  MN/m<sup>2</sup>.
- *500M*: Betonstahlmatten mit  $f_{yk} = 500$  MN/m<sup>2</sup>.
- *Allgemein*: Frei definierbare Stahlgüte [MN/m<sup>2</sup>].

### Bemessung wie Platten

Stäbe bzw. Bemessungsobjekte werden wie Platten behandelt, d.h. es wird gemäß Kapitel 6.2.1(4) keine Mindestquerkraftbewehrung ermittelt, wenn rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist.

### Faktor für $\rho_{w,\min}$

Der Mindestbewehrungsgrad  $\rho_{w,\min}$  wird über einen Faktor in Bezug auf den Grundwert für Balken nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.2 (5) festgelegt.

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

Bei Platten mit  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  ist mindestens der 0,6-fache Wert der Mindestbewehrung von Balken erforderlich.

DIN EN 1992-1-1:

Für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt ist nach Gleichung (9.5bDE) der 1,6-fache Wert anzusetzen.

### Verlegemaß $c_{v,l}$

DIN EN 1992-1-1:

In Kapitel 6.2.3(1) wird der innere Hebelarm  $z$  auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,l} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,l}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,l}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Das Programm schlägt für  $c_{v,l}$  den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ , vor.

### Getrennter Nachweis für x- und y-Richtung

DIN EN 1992-1-1:

Nach Kapitel 6.2.1(10) darf bei zweiachsig gespannten Platten der Querkraftnachweis in den Spannrichtungen x und y getrennt geführt werden. Die problemgerechte Orientierung der Bewehrungsrichtungen obliegt dem Anwender.

## Schubquerschnitt

Bei Polygonquerschnitten werden für die Querkraft- und Torsionsbemessung zusätzliche Querschnittsabmessungen benötigt. Diese werden nachfolgend erläutert. Bei Querschnitten mit interner Vorspannung oder vom Rechteck abweichender Form sollten die vom Programm vorgeschlagenen Abmessungen überprüft werden.

### Breite

Querschnittsbreite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Höhe

Querschnittshöhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Nutzbreite

Statisch wirksame Breite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nom. Breite, Nom. Höhe

Die nominelle Breite bzw. Höhe intern vorgespannter Bauteile gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(6), zur Berücksichtigung der Hüllrohrdurchmesser bei der Berechnung des Bemessungswertes der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$ .

### Faktor kb, Faktor kd

Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe  $bn$  bzw. Nutzhöhe  $d$  im Nachweis der Quertragfähigkeit für  $Q_y$  bzw.  $Q_z$ .

### Kernquerschnitt $A_k = z_1 * z_2$

Abmessungen des Kernquerschnitts für die Berechnung der Torsionsbewehrung [m].

### tef

Die effektive Wandstärke des Torsionsquerschnitts nach Bild 6.11 [m].

### Kastenquerschnitt

Auswahl der für Kastenquerschnitte geltenden Regeln zum Nachweis der Maximaltragfähigkeit nach Kapitel 6.3.2(4) und erforderlichen Bewehrung nach Kapitel 6.3.2(5) bei kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion.

## Spannungen

**Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-1-1 - Spannungen**

Querschnitt: 1 - Dach, Polygon, Materialart: C45/55-EN

Bezeichn.: Dachträger

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Charakt. EK.	Quasi-ständige EK.	Zum Zeitpunkt t der Vorspannung	Betonfestigkeit
zul sigma.c.: <input checked="" type="radio"/> 0,60 fck	zul sigma.c.: <input type="checkbox"/> 0,45 fck	zul sigma.c(t): <input checked="" type="radio"/> 0,45 fck(t)	fck(t) [MN/m²]: 45
		<input type="radio"/> 0,60 fck(t)	

**Nachweis der Betonstahlspannungen**

Charakteristische EK.

zul sigma.s.:  0,80 fyk

1,00 fyk

Buttons: OK, Abbrechen, Hilfe

### zul sigma.c

Die Betondruckspannung  $\sigma_c$  ist in den Bau- und Endzuständen nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(2), auf  $0,60 \cdot f_{ck}$  unter der charakteristischen Einwirkungskombination zu begrenzen. Falls die Spannung im Beton unter quasi-ständiger Kombination die Grenze  $0,45 \cdot f_{ck}$  nicht übersteigt, darf nach 7.2(3) von linearem Kriechen ausgegangen werden, anderenfalls ist nicht-lineares Kriechen zu berücksichtigen.

### zul sigma.c(t)

Zulässige Betonspannung  $\sigma_{c(t)}$  zum Zeitpunkt  $t$  der Einleitung der Vorspannung gemäß Kapitel 5.10.2.2(5), Gl.(5.42). Übersteigt die Druckspannung den Wert  $0,45 \cdot f_{ck(t)}$ , so soll nach der Norm die Nichtlinearität des Kriechens berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt der Eintragung der Vorspannung wird im Programm bei der Bemessungssituation „G+P“ angenommen.

### fck(t)

Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung gemäß Kapitel 5.10.2.2(5) der Norm [MN/m²].

### Betonstahlspannungen

Die Zugspannungen in der Bewehrung dürfen nach Kapitel 7.2(5) unter der charakteristischen Einwirkungskombination den Wert  $0,8 \cdot f_{yk}$  nicht übersteigen. Bei Spannungen aus indirekter Einwirkung darf die Grenze zu  $1,0 \cdot f_{yk}$  angenommen werden.

SS EN 1992-1-1, § 19:

Als Grenze wird generell  $1,0 \cdot f_{yk}$  angenommen.

## Rissbreiten

Die Vorgaben gelten für die Berechnung der Mindestrissbewehrung und den Nachweis der Rissbreite.

### Querschnittsrand

Der Grenzwert der rechnerischen Rissbreite  $w_{\max}$ , der größte vorhandene Stabdurchmesser  $\max. d_s$  und der Rissabstand  $s_{r,\max}$  können für Querschnittsränder und Bewehrungsrichtungen unterschiedlich definiert werden.

*Standard* Die Standard-Definition gilt für nicht spezifizierte Ränder und Richtungen.

*Oben, unten, x, y* Definition für den oberen oder unteren Rand in Bewehrungsrichtung x oder y.

<Hinzufügen> Startet den Dialog zum Hinzufügen eines Querschnittsrands.

<Löschen> Löscht den angezeigten Querschnittsrand.

### w<sub>max</sub>

Grenzwert für die rechnerische Rissbreite nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.1, Tabelle 7.1N [mm]. Das Programm schlägt den Tabellenwert vor, der sich nach den nationalen Bestimmungen aus der gewählten Expositions-kategorie und der Vorspannung des Bauteils ergibt. Nach Freischaltung des Eingabefeldes kann dieser Wert modifiziert werden.

SS EN 1992-1-1, § 20:

In die Bestimmung des Vorschlagswerts nach Tabelle D-2 geht zusätzlich die gewählte Lebensdauerklasse ein. Bei Spannbetonbauteilen werden die Tabellenwerte für höhere, bei Stahlbetonteilen für geringe Korrosionsanfälligkeit angenommen.

### max. d<sub>s</sub>

Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung zur Auswertung der Gleichungen (7.6N), (7.7N) und (7.11) in Kapitel 7.3 der Norm [mm].

### s<sub>r,max</sub>

Bei der Berechnung der Rissbreite wird der Rissabstand  $s_{r,\max}$  standardmäßig nach Gleichung (7.11) der Norm ermittelt. Alternativ kann vom Anwender eine Obergrenze für vorgegeben werden, um z.B. die Besonderheiten der Gleichung (7.14) oder der Absätze (4) und (5) des Kapitels 7.3.4 zu berücksichtigen.

### Beiwert $\xi_1$

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  nach Kapitel 7.3.2, Gleichung (7.5), legt fest, in welchem Maße Spannstahl gemäß 7.3.2(3) auf die Mindestrissbewehrung angerechnet werden kann. Er geht ferner in die Berechnung des effektiven Bewehrungsgrads nach Kapitel 7.3.4, Gleichung (7.10), und damit in die direkte Berechnung der Rissbreite ein. Bei Flächenelementen ist die Eingabe gesperrt, da hier Spannstahl generell nicht angerechnet wird.

ÖNORM B 1992-1-1:

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  dient auch zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Betonstahl und Spannstahl in den Spannungsnachweisen nach Kapitel 7.2 der Norm.

### Festlegung der Betonzugzone

Die Festlegung der Zugbereiche, in denen risseverteilende Mindestbewehrung nach Kapitel 7.3.2 einzulegen ist, kann entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination (EK) oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen.

### Dickes Bauteil

DIN EN 1992-1-1:

Gemäß DIN EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2 (5), darf bei dicken Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (NA.7.5.1) berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gl. (7.1) ergeben.

### Mindestbewehrung nach Gl. (17AT)

ÖNORM B 1992-1-1:

Bei zentrischem Zwang darf die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (17AT) berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gl. (7.1) ergeben.

### Beiwert $k$

Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Betonzugspannungen im Querschnitt in Kapitel 7.3.2, Gleichung (7.1). In Abhängigkeit von der Gurtdicke oder Steghöhe  $h$  darf  $k$  zwischen 0,65 ( $h \geq 800$  mm) und 1,0 ( $h \leq 300$  mm) angenommen werden.

DIN EN 1992-1-1:

Bei Zwang innerhalb des Bauteils darf  $k$  mit 0,8 multipliziert werden, wobei für  $h$  das Minimum aus Höhe und Breite des Querschnitts oder Teilquerschnitts anzusetzen ist. Bei Zugspannungen infolge außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs gilt  $k = 1,0$ .

### Faktor für $f_{ctm}$

Mit diesem Faktor wird die wirksame Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  in Bezug auf den Mittelwert der Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  festgelegt, und zwar getrennt für die Berechnung der Mindestbewehrung nach Gleichung (7.1) und die Berechnung der Rissbreite nach Gleichung (7.9) der Norm. Die vom Betonalter abhängige Zugfestigkeit ist in Gleichung (3.4) des Kapitels 3.1.2 definiert.

DIN EN 1992-1-1:

Wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, sollte für Gl. (7.1) mindestens eine Zugfestigkeit von 3,0 MN/m<sup>2</sup> für Normalbeton und von 2,5 MN/m<sup>2</sup> für Leichtbeton angenommen werden. Diese Bedingung wird programmseitig erfüllt, sofern der Abminderungsfaktor mit 1,0 vorgegeben wird.

### Einwirkungskombination

Die Einwirkungskombination (EK) für den Nachweis der Rissbreite ergibt sich in der Regel aus der gewählten Expositionsklasse. Alternativ kann eine davon abweichende Kombination gewählt werden.

### Lastdauer; $k_t$

Mit dieser Auswahl wird der Faktor  $k_t$  in Gleichung (7.9) zur Berechnung der Rissbreite festgelegt.

## Ermüdung

Dialog 'Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-1-1 - Ermüdung':

- Querschnitt: 1 - Dac
- Querschnittsart: Polygon
- Materialart: C45/55-EN
- Bezeichn.: Dachträger
- Warnung: Es sind weitere Elemente betroffen.
- Betonstahl, Spannstahl:
  - Vereinfachter Nachweis
  - Längsbew. dSigma.Rsk,s: 162
  - Schubbew. dSigma.Rsk,b: 73
  - Spannstahl dSigma.Rsk,p: 120 MN/m<sup>2</sup>
  - Eta: 1
- Beton:
  - Vereinfachter Nachweis
  - fcd,fat: 20,9 MN/m<sup>2</sup>
- Bemessungsvarianten einschränken

### $d\sigma_{Rsk,s}$ , $d\sigma_{Rsk,b}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  der Längsbewehrung und Schubbewehrung bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.4 [MN/m<sup>2</sup>]. Im Dialog wird der national maßgebende Wert nach Tabelle 6.3N Zeile 1 (Stabquerschnitte) bzw. Zeile 2 (Flächenquerschnitte) vorgeschlagen. Für die Schubbewehrung wird dabei der Biegerollendurchmesser mit dem vierfachen Stabdurchmesser angenommen.

### $d\sigma_{Rsk,p}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  des Spannstahls bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach Kapitel 6.8.4 [MN/m<sup>2</sup>]. Im Dialog wird der national maßgebende Wert nach Tabelle 6.4N, Zeile 4, vorgeschlagen.

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

Der Wert für Spannstahl der Klasse 1 wird vorgeschlagen.

### Eta

Erhöhungsfaktor  $\eta$  für die Betonstahlspannung der Längsbewehrung. Er dient zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl gemäß Kapitel 6.8.2 (1), Gl. (6.64).

### $f_{cd,fat}$

Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung nach Kapitel 6.8.7 (1), Gl. (6.76) [MN/m<sup>2</sup>]. Im allgemeinen gilt:

$$f_{cd,fat} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.76)$$

mit

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{s(1-\sqrt{28/t_0})}$$

$s$  ein vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert.

$t_0$  Zeitpunkt der Erstbelastung des Betons.

$$k_1 = 0,85$$

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1, SS EN 1992-1-1:

$$k_1 = 1,0$$

Im Dialog wird  $f_{cd,fat}$  für  $s = 0,2$ ,  $t_0 = 28$  und  $f_{cd}$  gemäß Gl. (3.15) vorgeschlagen.

## Vereinfachter Nachweis

Im vereinfachten Nachweis ist gemäß Kapitel 6.8.6(2) die häufige Kombination mit den für die Gebrauchsnachweise benutzten Verkehrslasten maßgebend. Die Nachweismethode für Beton richtet sich nach Kapitel 6.8.7(2), die zulässige Spannungsschwingbreite für Stahl wird im Dialog gemäß Kapitel 6.8.6(1) vorgeschlagen. Für Schubbewehrung wird dieser Wert wie in Tabelle 6.3N gemindert.

## Bemessungsvarianten einschränken

Bei Flächenelementen können die Varianten zur Ermittlung der Schwingbreite auf korrespondierende Sätze von Bemessungsschnittgrößen beschränkt werden. Eine nähere Erläuterung ist im Kapitel „Nachweise gegen Ermüdung / Besonderheit bei Flächentragwerken“ zu finden.

## Streifaktoren

Dialog: Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-1-1 - Streifaktoren

Querschnitt: Form, Schubspannungen, Material, Standardwerte, Kriechbeiwerte, Bettung, EN 1992-1-1, Nachweise, Basiswerte, Schubquerschnitt, Spannungen, Rissbreiten, Ermüdung, Streifaktoren, Thermische Berechnung, Allgemein

Nummer: 1 - Dac | Querschnittsart: Polygon | Materialart: C45/55-EN

Bezeichn.: Dachträger

Es sind weitere Elemente betroffen.

Streifaktoren für die Wirkung aus interner Vorspannung in den Gebrauchsnachweisen.

	r.sup	r.inf
Bauzustand:	1,1	0,9
Endzustand:	1,1	0,9

Buttons: OK, Abbrechen, Hilfe

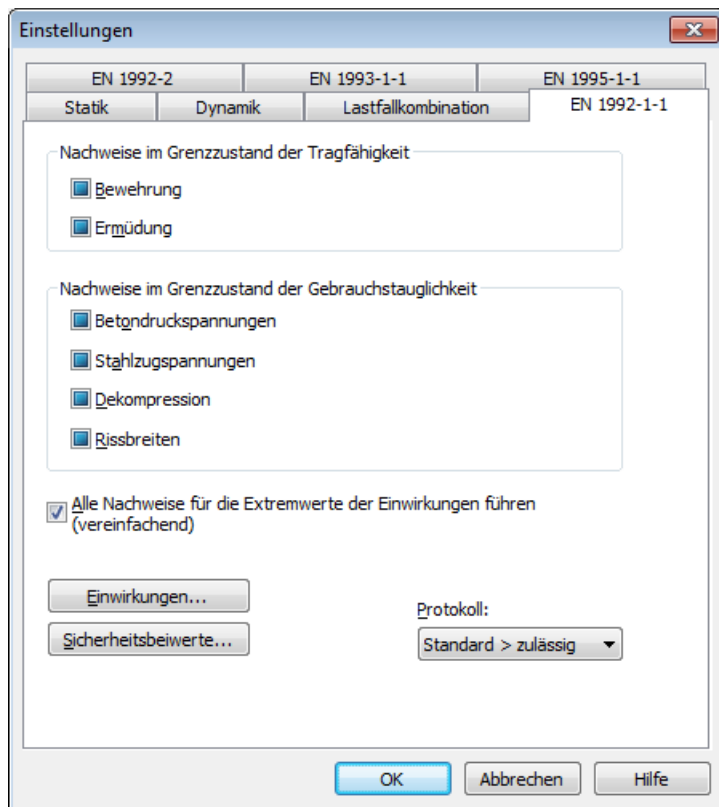
Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft sind in EN 1992-1-1 in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung festgelegt. Im Dialog werden die Werte nach Kapitel 5.10.9(1)P für nachträglichen Verbund vorgeschlagen. Die definierten Streifaktoren werden für die Wirkungen aus interner Vorspannung bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:

- Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen.
- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streifaktoren mit  $r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1$  angenommen.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *EN 1992-1-1* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Nachweisauswahl

Bei der Nachweisauswahl sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Der Nachweis wird gemäß Einstellung im Querschnittsdialog geführt (s. Querschnittseingaben).
- Der Nachweis wird für alle Querschnitte des Tragwerks geführt.
- Der Nachweis wird für keinen Querschnitt des Tragwerks geführt.

Zugehörige Querschnittseinstellungen werden dabei folgendermaßen zusammengefasst:

Bewehrung	Biegung und Längskraft Querkraft Torsion Robustheit
Ermüdung	Ermüdung für Beton Ermüdung für Betonstahl und Spannstahl
Rissbreiten	Mindest-Rissbewehrung Berechnung der Rissbreite

Mit der Funktion *Bemessungsvorgaben* im Ordner *EN 1992-1-1 Bemessung* der Datenbasis kann eine Nachweisübersicht angezeigt werden.

### Alle Nachweise für die Extremwerte der Einwirkungen führen (vereinfachend)

Bei gesetzter Auswahl werden für jede Schnittkraftkomponente die minimalen und maximalen Werte gebildet. Mit diesen sowie den zugehörigen Werten wird dann die Bemessung durchgeführt. Alternativ werden alle möglichen Kombinationen von Lastfällen gebildet und bemessen. Dies ist bei einer größeren Anzahl von Lastfällen zeitaufwendig.

### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

### Sicherheitsbeiwerte...

Startet den Dialog zur Änderung der Teilsicherheitsbeiwerte.



**Protokoll**

- *Nicht erstellen*: Vom Nachweisprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Protokoll mit tabellarischer Ausgabe der Ergebnisse.
- *Ausführlich*: Zusätzliche Ausgabe der maßgebenden Kombinationsschnittgrößen an den Nachweisorten.
- *Standard > zulässig*: Beschränkung des Standardprotokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.
- *Ausführlich > zulässig*: Beschränkung des ausführlichen Protokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.

**Einzelbemessung**

Mit der Einzelbemessung lassen sich unabhängig vom Gesamtsystem einzelne Querschnitte mit vorgegebenen Schnittgrößen untersuchen. Die nachfolgend aufgeführten Angaben sind in der Tabelle *Einzelbemessung* im Ordner *EN 1992-1-1 Bemessung* der Datenbasis bzw. in den Ordnern der nationalen Varianten einzugeben.

**Querschnitt**

Nummer des zu bemessenden Querschnitts. Es können Polygon- und Verbundquerschnitte bemessen werden.

**Kombination**

Bemessungssituation nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1.

- *0*: Ständige und vorübergehende Bemessungssituation
- *1*: Außergewöhnliche Bemessungssituation

**Nsd, Mysd, Mzsd**

Schnittgrößen, die bemessen werden. Bei Polygonquerschnitten beziehen sich die Schnittgrößen auf den Schwerpunkt, bei Verbundquerschnitten auf den Querschnittsnullpunkt.

**Modus**

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach Kapitel 9.5.2(2) durchgeführt.
- *Dehnungen*: Dehnungszustand für vorhandene Betonstahllagen ermitteln.
- *Dehnungen GZG*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird in der Druckzone eine lineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons verwendet.
- *Dehnungen GZG2*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons nach Bild 3.2 verwendet, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.
- *Aufnehmbare Belastung*: Ermittlung der aufnehmbaren Belastung in Grenzzustand der Tragfähigkeit.
- *Inaktiv*: Bemessung inaktiv.

Die Berechnung wird bei geöffneter Eingabetabelle mit dem Menüpunkt *Einzelbemessung* oder mit der Seitenansicht ausgeführt.

ÖNORM B 1992-1-1:

In den Modi *GZG* und *GZG2* wird der Spannungszuwachs vorgespannter Stahllagen nach Gl. (14AT) mit dem für den Nachweisquerschnitt eingegebenen Verbundbeiwert  $\xi_1$  ermittelt.

## Durchstanznachweis

Nach der Auswahl eines Nachweisnotens werden die maßgebenden Nachweisdaten in einem Dialogfeld präsentiert. Dieses gliedert sich in drei Dialogseiten.

### 1a. Eingabedaten, Stütze

Es sind die Stützenformen *Rechteck* und *Rund*, mit den Standpunkten *Innen*, *Rand parallel zu x*, *Rand parallel zu y* und *Ecke* vorgesehen. Bei der Neueingabe werden die Abmessungen vorhandener Stützen vorgeschlagen. Die Randabstände  $a_x$  und  $a_y$  dienen zur Berechnung der Umfänge  $u_i$  der Nachweisschnitte.

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

Alternativ ist als Nachweisort *Wandende* oder *Wandecke* wählbar.

### 1b. Eingabedaten, Platte

Dieses Kapitel präsentiert die Materialeigenschaften, die vorhandene Biegewehrung, sowie weitere Beiwerte zur Berechnung der Durchstanzwiderstände.

### 1c. Eingabedaten, Einwirkung

Die Einwirkung  $V_{Ed}$  kann entweder als Auflagerkraft aus einer vorausgegangenen Bemessung nach EN 1992-1-1 übernommen oder direkt eingegeben werden. Etwaige mittlere Bodenpressungen  $\sigma_0$  vermindern den Bemessungswert der Querkraft innerhalb der Fläche des maßgebenden Rundschnittes. Die mittleren Längskräfte  $N_{Ed}$  werden zur Berechnung der Betonnormalspannung verwendet.

### 2. Öffnung

Diese Dialogseite dient zur Definition der Öffnungsgeometrie und ihrer Lage.

### 3. Ergebnisse

Diese Dialogseite zeigt die berechneten Durchstanzwiderstände, die eventuell erforderliche Durchstanzbewehrung und die Mindestbiegebewehrung, sofern national relevant. Eine verbesserte Biegebewehrung kann mit der Schaltfläche *Vorschlag* abgerufen werden.

## Beispiel

The image shows two screenshots of a software interface for punching shear verification. The left window is titled "EN 1992-1-1 Durchstanznachweis Knoten 4312" and shows the input data. The right window is titled "EN 1992-1-1 Durchstanznachweis Knoten 4312" and shows the results of the calculation.

**EN 1992-1-1 Durchstanznachweis Knoten 4312 (Input Data):**

- Stütze: Rechteck, Innen
- Breite  $b_x$ : 0,45 m
- Höhe  $b_y$ : 0,45 m
- Beton: C35/45-EN
- Stahl: BSt 500
- Öffnung berücksichtigen
- asx: 36  $cm^2/m$ , asy: 36  $cm^2/m$ ,  $\beta$ : 1,15
- Nutzh. dx: 0,19 m, Nutzh. dy: 0,19 m, sr: 0,142 m
- Plattendicke: 0,24 m, Bügelneig.: 90°
- Abstand des kritischen Rundschnitts:  $d * 2$
- Einwirkung:   $V_{Ed}$  aus Berechnung,   $V_{Ed}$  eingeben
- Grundkombination:  $V_{Ed}$  [kN]: 809,  $N_{Ed}$  [kN/m]: 0,  $\sigma_0$  [kN/m<sup>2</sup>]: 0
- Außergewöhnliche K.:  $V_{Ed}$  [kN]: 0,  $N_{Ed}$  [kN/m]: 0,  $\sigma_0$  [kN/m<sup>2</sup>]: 0

**EN 1992-1-1 Durchstanznachweis Knoten 4312 (Results):**

Ergebnisse der Grundkombination

Vorh. Längsbewehrung  $a_{sx} = 36,00 \text{ cm}^2/m$   $a_{sy} = 36,00 \text{ cm}^2/m$

$V_{Ed} = 1,17 \text{ MN/m}^2$   $V_{Rd,c} = 0,97 \text{ MN/m}^2$   $V_{Ed}/V_{Rd,c} = 1,20$

$\rho_1 = 0,0189$

$A_{sw1} = 5,87 \text{ cm}^2$   $V_{Rd,cs1} = 1,17 \text{ MN/m}^2$   $V_{Ed}/V_{Rd,cs1} = 1,00$

$A_{sw2} = 5,87 \text{ cm}^2$   $V_{Rd,cs2} = 1,17 \text{ MN/m}^2$   $V_{Ed}/V_{Rd,cs2} = 1,00$

$V_{Ed,out} = 0,97 \text{ MN/m}^2$   $V_{Rd,c} = 0,97 \text{ MN/m}^2$   $V_{Ed,out}/V_{Rd,c} = 1,00$

**Der Nachweis ist erfüllt!**

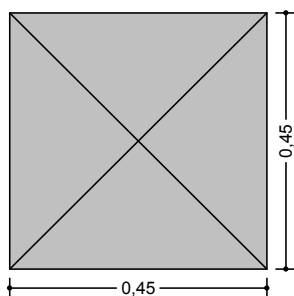
Buttons: Vorschlag, Vorschlag 1 übernehmen, Vorschlag 2 übernehmen, OK, Abbrechen, Hilfe

## Durchstanznachweis Knoten 4312

Der Nachweis wird nach EN 1992-1-1:2004/A1:2014 geführt.

### 1. Abmessungen, Lage und Material

Rechteckstütze mit der Breite  $b_x = 0,45 \text{ m}$  und der Höhe  $b_y = 0,45 \text{ m}$   
Lage: Innen;  $\beta = 1,15$



Kritischer Rundschnitt  $u_1 = 4,19$  m (Abstand = 0,38 m);  $A_1 = 1,34$  m<sup>2</sup>

Plattendicke  $h = 0,240$  m

Nutzhöhe der Platte  $d_x = 0,190$  m;  $d_y = 0,190$  m;  $d = (d_x + d_y) / 2 = 0,190$  m

Vorh. Längsbewehrung  $a_{sx} = 36,00$  cm<sup>2</sup>/m;  $a_{sy} = 36,00$  cm<sup>2</sup>/m

Bügelneigung  $\alpha = 90,0^\circ$

Beton: C35/45-EN

$$f_{ck} = 35,00 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cc} = 1,00$$

$$\gamma_c = 1,50$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 23,33 \text{ MN/m}^2$$

Betonstahl: BST 500

$$f_{yk} = 500,00 \text{ MN/m}^2$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 434,78 \text{ MN/m}^2$$

## 2. Einwirkung aus Grundkombination

$$V_{Ed} = 809,00 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 0,00 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_0 = 0,00 \text{ kN/m}^2$$

$$v_{Ed} = \beta \cdot V_{Ed} / (u_i \cdot d)$$

$$(6.38)$$

mit  $u_i = u_1$

$$v_{Ed} = 1,17 \text{ MN/m}^2$$

## 3. Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \quad (6.47)$$

$$\text{mit } C_{Rd,c} = 0,12$$

$$k = 2,00$$

$$\rho_l = 0,0189$$

$$f_{ck} = 35,00 \text{ MN/m}^2$$

$$k_1 = 0,1$$

$$\sigma_{cp} = -N_{Ed} / h = 0,00 \text{ MN/m}^2$$

$$v_{min} = 0,59 \text{ MN/m}^2$$

$$v_{Rd,c} = 0,97 \text{ MN/m}^2$$

$v_{Ed} / v_{Rd,c} = 1,20 > 1$  Durchstanzbewehrung erforderlich!

$$v_{Ed,0} = \beta \cdot V_{Ed} / (u_0 \cdot d) = 2,72 < v_{Rd,max} = 4,82 \text{ MN/m}^2 \quad (6.53)$$

mit  $u_0 = 1,80$  m

## 4. Durchstanzbewehrung rechtwinklig zur Plattenebene

$$A_{sw} = \frac{(v_{Ed} - 0,75 \cdot v_{Rd,c})}{1,5 \cdot (d / s_r) \cdot f_{ywd,ef} \cdot (1 / (u_1 \cdot d))} \quad (6.52)$$

$$A_{sw,i,min} = 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} \cdot \frac{s_r \cdot u_{cont,i}}{1,5} \quad (9.11)$$

$$\text{mit } v_{Ed} = 1,17 \text{ MN/m}^2$$

$$v_{Rd,c} = 0,97 \text{ MN/m}^2$$

$$s_r = 0,14 \text{ m}$$

$$f_{ywd,ef} = 297,50 \text{ MN/m}^2$$

$$f_{ck} = 35,00 \text{ MN/m}^2$$

$$f_{yk} = 500,00 \text{ MN/m}^2$$

Reihe 1: Abstand = 0,10 m;  $u_{cont,1} = 2,40$  m;  $A_{sw,1} = 5,87 \text{ cm}^2 > A_{sw,1,min} = 2,15 \text{ cm}^2$

Reihe 2: Abstand = 0,24 m;  $u_{cont,2} = 3,29$  m;  $A_{sw,2} = 5,87 \text{ cm}^2 > A_{sw,2,min} = 2,95 \text{ cm}^2$

Äußerer Rundschnitt nach Gl. (6.54) und Bild 6.22 A

$$u_{out} = \beta \cdot V_{Ed} / (v_{Rd,c} \cdot d) = 5,04 \text{ m}$$

Abstand = 0,52 m

Die äußerste Bewehrungsreihe ist  $0,28 \text{ m} \leq 1,5 \cdot d = 0,29 \text{ m}$  entfernt. Der Nachweis ist erfüllt!

Maximale Tragfähigkeit mit Durchstanzbewehrung nach Gl. (6.52)

$$v_{Ed} = 1,17 \leq k_{max} \cdot v_{Rd,c} = 1,50 \cdot 0,97 = 1,46. \text{ Der Nachweis ist erfüllt!}$$

## Vorgespannte Tragwerke

### Interne Vorspannung

Bei interner Vorspannung werden die Spannstränge einschließlich der Spannverfahren und Spannanweisungen über die Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs eingegeben und durch Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* bei der FEM-Berechnung berücksichtigt. Näheres dazu ist dem Handbucheil *Spannbeton* zu entnehmen.

Die Unterscheidung zwischen Vorspannung mit und ohne Verbund erfolgt in den Querschnittseingaben und den Vorgaben für den Lastfall *Kriechen und Schwinden*.

### Externe Vorspannung, Mischbauweise

Externe Vorspannung lässt sich durch direkte Eingabe der äußeren Kräfte berücksichtigen. Bei Mischbauweise sind die zusätzlichen im Verbund liegenden Spannglieder wie oben beschrieben einzugeben.

### Streuung der Wirkungen aus Vorspannung

Bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt für den Bemessungswert der Vorspannkraft nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.8(1):

$$P_{d,t}(x) = \gamma_P \cdot P_{m,t}(x)$$

mit

$P_{m,t}(x)$  Mittelwert der Vorspannkraft zur Zeit  $t$  am Ort  $x$  inkl. Spannkraftverlusten aus Reibung, Ankerschlupf, Kriechen und Schwinden sowie Relaxation.

$\gamma_P$  Teilsicherheitsbeiwert der Vorspannkraft,  $\gamma_P = 1$  nach Kapitel 2.4.2.2(1).

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden in Kapitel 5.10.9(1) zwei charakteristische Werte der Vorspannkraft festgelegt:

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{m,t}(x) \quad \text{Oberer charakteristischer Wert gemäß Gleichung (5.47)}$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{m,t}(x) \quad \text{Unterer charakteristischer Wert gemäß Gleichung (5.48)}$$

Die Streufaktoren der internen Vorspannung werden im Querschnittsdialog getrennt für Bau- und Endzustände definiert. Sie kommen bei folgenden Nachweisen zur Anwendung:

- Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen.
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streufaktoren mit  $r_{sup} = r_{inf} = 1$  angenommen.

Bei interner Vorspannung sind die empfohlenen landesspezifischen Werte:

- für Spannglieder im sofortigen Verbund und ohne Verbund:

$$r_{sup} = 1,05 \text{ und } r_{inf} = 0,95.$$

- für Spannglieder im nachträglichen Verbund:

$$r_{sup} = 1,10 \text{ und } r_{inf} = 0,90.$$

ÖNORM B 1992-1-1:

- für Spannglieder im sofortigen Verbund und ohne Verbund:

$$r_{sup} = r_{inf} = 1,00.$$

- für Spannglieder im nachträglichen Verbund:

$$r_{sup} = 1,05 \text{ und } r_{inf} = 0,95.$$

## Kriechen und Schwinden

Die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens erfolgt ebenso wie bei der Vorspannung durch einen entsprechenden Lastfall (Lastart *Kriechen und Schwinden*) in der FEM-Berechnung. Dabei ist neben dem kriecherzeugenden Dauerlastfall anzugeben, ob die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden soll. Diese Option ist nur bei im Verbund liegenden Spanngliedern sinnvoll.

Die Eingabe der maßgeblichen Kriech- und Schwindbeiwerte für die Berechnung des Lastfalls *Kriechen und Schwinden* erfolgt im Querschnittsdialog. Alternativ können dort die Beiwerte gemäß Kapitel 3.1.4 mit Anhang B berechnet werden.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1 + \rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \varphi \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,s})$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_b(t)$      Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $E_b$             E-Modul des Betons.
- $\rho$              Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt  $t$  (i.d.R.  $\rho = 0,80$ ).
- $\varphi$              Kriechbeiwert für den Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_b(t)$      Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_{b,0}$      Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.
- $\varepsilon_{b,s}$      Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben. Sofern im Lastfall gewählt, werden im Weiteren die resultierenden Spannungsänderungen im Spannstahl ermittelt. Ein eventueller Einfluss aus der Relaxation des Spannstahls bleibt dabei unberücksichtigt. Nach Zilch/Rogge (2002, S. 256) lässt sich dieser getrennt berechnen (s. nächster Abschnitt) und mit den Änderungen aus Kriechen und Schwinden zu den gesamten zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenfassen:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \Delta\sigma_{pr} + E_p \cdot \Delta\varepsilon_{cpt}$$

mit

- $\Delta\sigma_{pr}$      Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls.
- $\Delta\varepsilon_{cpt}$     Dehnungsänderung des Betons aus Kriechen und Schwinden.
- $E_p$          E-Modul des Spannstahls.

## Relaxation des Spannstahls

Nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.6, ist neben den Spannungsverlusten aus Kriechen und Schwinden des Betons die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  in den Spanngliedern an der Stelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  infolge Relaxation zu berücksichtigen. Die Relaxation des Stahls hängt ab von der Verformung des Betons infolge Kriechen und Schwinden. Diese Wechselwirkung darf nach 5.10.6(1) (b) generell und näherungsweise mit einem Abminderungsbeiwert von 0,8 berücksichtigt werden.

Die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  ist nach 5.10.6(2) für die Ausgangsspannung in den Spanngliedern infolge Vorspannung und quasi-ständigen Einwirkungen zu bestimmen. Näheres ist in Kapitel 3.3.2 der Norm geregelt.

Die Spannkraftverluste werden in den Einwirkungen CSR des Dialogs *EN 1992-1-1 Einwirkungen* definiert.

DIN EN 1992-1-1:

Die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  darf mit den Angaben der Zulassung des Spannstahls für das Verhältnis Ausgangsspannung zu charakteristischer Zugfestigkeit ( $\sigma_{p0}/f_{pk}$ ) bestimmt werden. Als Ausgangsspannung darf  $\sigma_{p0} = \sigma_{pg0}$  angenommen werden, wobei  $\sigma_{pg0}$  die anfängliche Spannstahlspannung aus Vorspannung und den ständigen Einwirkungen ist.

## Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

Es stehen folgende Nachweise zur Verfügung:

- Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein (EN 1992-1-1, Kapitel 6.1).
- Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung (Kapitel 5.10.1(5)P und 9.2.1.1).
- Querkraft (Kapitel 6.2).
- Torsion und kombinierte Beanspruchung (Kapitel 6.3).
- Durchstanzen (Kapitel 6.4).
- Nachweis gegen Ermüdung (Kapitel 6.8).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.4.3, berücksichtigt:

- Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen darf entweder nach Gleichung (6.10) oder mit der ungünstigeren der beiden Gleichungen (6.10a) und (6.10b) kombiniert werden.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Der Beiwert  $\xi$  ergibt sich nach Tabelle A.1.2(B) zu  $\xi = 0,85$ .

DIN EN 1990, ÖNORM B 1990:

Die Kombination erfolgt nach Gleichung (6.10).

SS EN 1990:

Die Gleichungen (6.10a) und (6.10b) sind anzuwenden. Der Beiwert  $\xi$  wird zu  $\xi = 0,89$  gesetzt.

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" A_d "+" (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Für die Kombination kommt im Programm  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  zur Anwendung.

ÖNORM B 1990-1:

$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  ist maßgebend.

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" A_{Ed} "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

Im Nachweis gegen Ermüdung kommen alternativ folgende Kombinationen zur Anwendung:

- Häufige Kombination für vereinfachte Nachweise gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.6 (2) in Verbindung mit EN 1990, Kapitel 6.5.3.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Ermüdungskombination für Nachweise mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten.

$$\left( \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right) \text{ "+" } Q_{fat} \quad (6.69)$$

Dabei sind  $Q_{k,1}$  und  $Q_{k,i}$  nicht-zyklische, nicht-ständige Einwirkungen und  $Q_{fat}$  die zyklische Einwirkung aus dem maßgebenden Ermüdungslastmodell.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

## Spannungs-Dehnungslinien

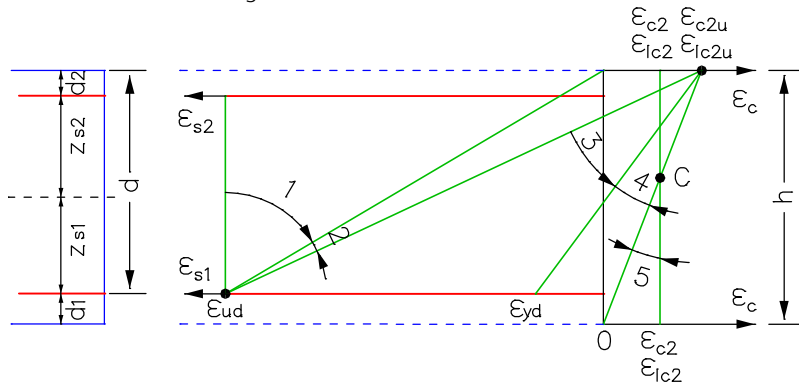
Bei der Querschnittsbemessung kommen die folgenden Kennlinien zur Anwendung:

- Beton: Parabel-Rechteck-Diagramm nach EN 1992-1-1, Bild 3.3. Dabei ist der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit  $f_{cd}$  in Gleichung (3.15) zu  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$  mit  $\alpha_{cc} = 1$  für Normalbeton und  $\alpha_{cc} = 0,85$  für Leichtbeton definiert.  
 DIN EN 1992-1-1:  
 $\alpha_{cc} = 0,85$  für Normalbeton und  $\alpha_{cc} = 0,75$  für Leichtbeton.  
 SS EN 1992-1-1:  
 $\alpha_{cc} = 1$  für Normalbeton und Leichtbeton.
- Betonstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.8 mit ansteigendem oberem Ast, wobei die Maximalspannung zu  $k \cdot f_{yk} / \gamma_s$  mit  $k = 1,05$  nach Tabelle C.1, Klasse A, angenommen wird.
- Spannstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.10, mit horizontalem oberem Ast gemäß Kapitel 3.3.6 (7) der Norm.

Beim Nachweis gegen Ermüdung werden die Betondruckspannungen mit der Spannungs-Dehnungslinie nach Bild 3.2 ermittelt.

## Bemessung für Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein

Die Bemessung für Längskraft und Biegemoment erfolgt nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.1. Für Platten-, Scheiben- und Schalenelemente mit rechtwinkliger oder schiefwinkliger Bewehrung werden die Bemessungsschnittgrößen analog zur Bemessung nach DIN 1045-1 berechnet. Die für jede Schnittkraftkombination erforderliche Bewehrung am Stahlbetonquerschnitt wird iterativ, nach Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen, unter Beachtung der in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Grenzdehnungslinien ermittelt. Das endgültige Resultat ergibt sich aus dem Extremwert aller berechneten Bewehrungen.



Dehnungsbereiche für die Bemessung mit  $\varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk}$  und  $\varepsilon_{uk} = 0,025$  nach Tabelle C.1.

DIN EN 1992-1-1:

$$\varepsilon_{ud} = 0,025$$

Der Anwender steuert durch die Vorgabe der Bewehrungsgeometrie und die Auswahl eines von drei Bemessungsmodi das Ergebnis der Bemessung. Bei Querschnitten, die einer Drucknormalkraft ausgesetzt sind, wird die Mindestexzentrizität nach Kapitel 6.1(4) berücksichtigt. Die Betonstauchung nach Kapitel 6.1(5) kann nicht überprüft werden.

### Modus Standard

Dies ist der Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Längskraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Die Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich eingelegt. In den Dehnungsbereichen 4 und 5 wird wie bei symmetrischer Bemessung verfahren.

DIN EN 1992-1-1:

Die bezogene Druckzonenhöhe  $x_d / d$  wird gemäß Kapitel 5.4 (NA.5) und NA.11.5.2(1) wie folgt begrenzt:

$$x_d / d \leq 0,45 \text{ bei Betonfestigkeitsklassen bis C50/60.}$$

$$\leq 0,35 \text{ bei Betonfestigkeitsklassen ab C55/67 und bei Leichtbeton.}$$

### Modus Symmetrisch

Im Gegensatz zur Standardbemessung wird in allen Dehnungsbereichen, falls erforderlich, die Bewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen bestimmten Bewehrungslagen bleiben erhalten.

### Modus Druckglied

Die Bemessung wird symmetrisch durchgeführt. Zusätzlich wird die nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.5.2(2), verlangte Mindestbewehrung ermittelt:

$$A_{s,min} = 0,10 | N_{Ed} | / f_{yd} \text{ oder } 0,002 A_c, \text{ je nachdem welcher der größere Wert ist} \quad (9.12N)$$

mit

$N_{Ed}$  Bemessungswert der aufzunehmenden Längskraft.

$f_{yd}$  Bemessungswert der Festigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze.

DIN EN 1992-1-1:

$$A_{s,min} = 0,15 N_{Ed} / f_{yd} \quad (9.12DE)$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$A_{s,min} = 0,13 N_{Ed} / f_{yd} \geq 0,0026 A_c \quad (30AT)$$

SS EN 1992-1-1, § 28:

$$A_{s,min} = 0,002 A_c$$



### Berücksichtigung von Spanngliedern im Verbund

In der Bemessung von Stäben und Bemessungsobjekten werden die Schnittgrößen des Betonquerschnitts um die statisch bestimmten Anteile gemindert, wie sie sich aus Vorspannung abzüglich der Verluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation des Spannstahls (CSR) ergeben. Ausgenommen sind die Situationen vor dem Verpressen der Spannglieder. In den verbleibenden Schnittgrößen für den Verbundquerschnitt sind dann nur noch die Zwängungsanteile aus „P+CSR“ und die äußeren Lasten enthalten. Die durch den Benutzer lagemäßig festgelegte Schlaffstahlbewehrung wird bei Bedarf solange erhöht, bis die Verbundschnittgrößen aufgenommen werden können.

Die Lage der Spannstränge im Querschnitt, die Spannkraftverluste aus CSR, die statisch bestimmten Anteile sowie die Schnittgrößen des Betonquerschnitts und Verbundquerschnitts werden im ausführlichen Protokoll ausgegeben.

Da bei Flächentragwerken eine Trennung in statisch bestimmte und unbestimmte Anteile der Schnittgrößen aus Vorspannung nicht möglich ist, wird bei der Bemessung der Längsbewehrung die Vorspannung vollständig auf der Einwirkungsseite berücksichtigt, während auf der Widerstandsseite nur Schlaffstahl und Beton wirksam werden. Die Dehnungsreserven der im Verbund liegenden Spannglieder bleiben folglich ungenutzt.

### Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung

Bei Spannbetontragwerken darf nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.1(5)P, ein Bauteilversagen ohne Ankündigung nicht durch das Versagen der Spannglieder hervorgerufen werden. Das Versagen kann durch Einbau der Mindestbewehrung nach Kapitel 9.2.1 oder eine andere in Absatz (6) genannte Maßnahme verhindert werden.

Die Mindestbewehrung ist - wie auch für Stahlbetonbauteile - nach Kapitel 9.2.1 mit Gleichung (9.1N) zu dimensionieren und kann im Programm durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigt werden.

Alternativ ist im Querschnittsdialog die Mindestbewehrung entsprechend dem in EN 1992-2:2005, Kapitel 6.1(109), für Spannbetonbrücken angegebenen Verfahren wählbar (Robustheitsbewehrung). Diese wird nach Gleichung (6.101a) ermittelt:

$$A_{s,\min} = M_{\text{rep}} / (z_s \cdot f_{yk}) \quad (6.101a)$$

mit

$M_{\text{rep}}$  Rissmoment ohne Anrechnung der Vorspannkraft und unter der Annahme, dass die Randzugspannung den Wert  $f_{\text{ctm}}$  annimmt. Bei Bauteilen mit Spanngliedern ohne Verbund oder mit externer Vorspannung wird  $M_{\text{rep}}$  gemäß Kapitel 9.2.1.1(4) um den Faktor 1,15 erhöht.

$z_s$  Hebelarm der inneren Kräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Die Mindestbewehrung soll nach EN 1992-2, Kapitel 6.1(110), in den Bereichen eingebaut werden, wo unter der charakteristischen Einwirkungskombination Zugspannungen im Beton auftreten. Dabei soll die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung berücksichtigt, die statisch bestimmte Wirkung jedoch vernachlässigt werden.

Im Programm werden alle Spannungen am Bruttoquerschnitt ermittelt. Die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung kann nur bei Stäben und Bemessungsobjekten in Abzug gebracht werden. Bei Flächenelementen wird die Vorspannung ersatzweise mit dem Reduktionsfaktor gemäß Benutzervorgabe abgemindert.

Der Hebelarm  $z_s$  der inneren Kräfte wird vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Die ermittelte Bewehrung wird gleichmäßig auf die in der Zugzone liegenden Bewehrungslagen verteilt. Im Bemessungsmodus *Symmetrisch* erhalten die übrigen Lagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten. Für Querschnitte mit Bemessungsmodus *Druckglied* wird keine Robustheitsbewehrung nachgewiesen, da bei der Bemessung für Biegung und Längskraft bereits Mindestdruckbewehrung ermittelt wird.

DIN EN 1992-1-1:

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens muss statt der Mindestbewehrung nach Gleichung (9.1N) für Bauteile mit und ohne Vorspannung grundsätzlich die vorgenannte Robustheitsbewehrung eingebaut werden. Die Bewehrung ist gleichmäßig in der Zugzone zu verteilen. Diese wird - da nicht näher spezifiziert - mit der charakteristischen Kombination wie oben beschrieben ermittelt. Die Möglichkeit zur Anrechnung von Spanngliedern wird im Programm nicht genutzt.

SS EN 1992-1-1, § 13:

Es sollte das Verfahren D der Norm (Nachweise hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Spannglieder) mit mindestens einem der anderen Verfahren verwendet werden. Die letzte Bedingung kann durch Einbau der Mindestbewehrung nach Kapitel 9.2.1 (Verfahren A) oder mit der oben beschriebenen Robustheitsbewehrung erfüllt werden.

## Oberflächenbewehrung

Zur Vermeidung von Betonabplatzungen kann nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.4, eine Oberflächenbewehrung notwendig sein. Detaillierte Angaben hierzu sind in Anhang J enthalten. Die danach ermittelte Bewehrung lässt sich im Programm durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigen.

ÖNORM B 1992-1-1:

Die Vorschriften nach Anhang J sind nicht normativ.

## Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft umfasst die Ermittlung der Querkraftbewehrung und den Nachweis der Betondruckstreben nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.2. Es gelten folgende Besonderheiten:

- Die Neigung der Querkraftbewehrung wird mit 90° angenommen.
- Der Wert für  $\cot \Theta$  kann vom Benutzer innerhalb der national zugelassenen Grenzen der Gleichung (6.7N) frei gewählt werden.

DIN EN 1992-1-1:

In der Berechnung wird der eingegebene Wert für  $\cot \Theta$  auf den nach Gleichung (6.7aDE) zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung), sofern im Querschnittsdialog nicht der Nachweis mit einem konstanten Wert gewählt wurde. Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

- In der berechneten Bügelbewehrung ist die Mindestbewehrung nach Kapitel 9.2.2(5) der Norm enthalten. Bei Flächen wird Mindestbewehrung gemäß Kapitel 6.2.1(4) nur dann ermittelt, wenn Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich ist. Bei Stäben wird für die Richtung, für die  $M = Q = 0$  ist, keine Mindestbewehrung berechnet.
- Platten- und Schalenelemente werden für die Querkraft  $q_T = \sqrt{(q_{x^2} + q_{y^2})}$  bemessen. Für die zugehörige Längskraft wird, je nachdem was ungünstig wirkt, die Hauptdruck- oder die Hauptzugkraft eingesetzt.

DIN EN 1992-1-1:

Falls gewählt, wird der Nachweis gemäß Kapitel 6.2.1(10) getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y geführt. Für die zugehörige Längskraft wird dann die in Bewehrungsrichtung wirkende Normalkraft eingesetzt. Wenn Querkraftbewehrung erforderlich ist, wird diese aus beiden Richtungen addiert.

- Es erfolgt **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten nach Kapitel 6.2.1(8) der Norm.
- Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die maßgebenden Werte des Ersatzrechtecks unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie vom Anwender definiert. Die Beiwerte zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe und Nutzhöhe sind ebenfalls vorzugeben. Bei Flächenelementen wird generell mit dem Hebelarm  $z = 0,9 d$  gerechnet.
- DIN EN 1992-1-1:  
Der innere Hebelarm wird nach 6.2.3(1) auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,1} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,1}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,1}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone.
- Bei Stabquerschnitten mit interner Vorspannung wird der Bemessungswert der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  gemäß Kapitel 6.2.3(6) mit dem Nennwert  $b_{w,nom}$  der Querschnittsbreite ermittelt.
- Die Notwendigkeit einer Querkraftbewehrung wird nach Kapitel 6.2.2(1) der Norm untersucht. Die Besonderheiten der Absätze (2) bis (7) kommen dabei nicht zur Anwendung.

Nachfolgend sind die verwendeten Formeln der EN 1992-1-1 wiedergegeben.

### Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (6.2a)$$

mit mindestens

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \quad (6.2b)$$

Für Leichtbeton gilt

$$V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{lck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (11.6.2)$$

$$\geq (\eta_1 \cdot v_{l,min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d$$

Dabei ist

$f_{ck}, f_{lck}$  die charakteristische Betonfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>].

$k = 1 + \sqrt{(200 / d)} \leq 2,0$  mit  $d$  in mm.

$$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02.$$

$A_{sl}$  die Fläche der Zugbewehrung, die mindestens  $(l_{bd} + d)$  über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird (siehe Bild 6.3).

$b_w$  die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts [mm].

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 f_{cd} \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

$N_{Ed}$  die Normalkraft im Querschnitt infolge Lastbeanspruchung oder Vorspannung [N] ( $N_{Ed} > 0$  für Druck). Der Einfluss von Zwang auf  $N_{Ed}$  darf vernachlässigt werden.

$A_c$  die Gesamtfläche des Betonquerschnitts [mm<sup>2</sup>].

$V_{Rd,c}$ ,  $V_{lRd,c}$  der Bemessungswert für den Querkraftwiderstand [N].

$\eta_1$  der Reduktionsfaktor für Leichtbeton nach Gl. (11.1).

Die empfohlenen Werte sind:

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c \text{ für Normalbeton}$$

$$C_{lRd,c} = 0,15 / \gamma_c \text{ für Leichtbeton}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ für Normalbeton} \quad (6.3N)$$

$$v_{l,min} = 0,028 k^{3/2} \cdot f_{lck}^{1/2} \text{ für Leichtbeton nach 11.6.1(1)}$$

DIN EN 1992-1-1:

$$C_{Rd,c} = C_{lRd,c} = 0,15 / \gamma_c$$

$$k_1 = 0,12$$

$$v_{min} = (\kappa_1 / \gamma_c) k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

$$v_{l,min} = (\kappa_1 / \gamma_c) k^{3/2} \cdot f_{lck}^{1/2}$$

mit

$$\kappa_1 = 0,0525 \text{ für } d < 600 \text{ mm}$$

$$= 0,0375 \text{ für } d > 800 \text{ mm}$$

Für  $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$  darf interpoliert werden.

### Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Der Winkel  $\theta$  zwischen den Betondruckstreben und der rechtwinklig zur Querkraft verlaufenden Bauteilachse ist zu begrenzen:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (6.7N)$$

DIN EN 1992-1-1:

$$1,0 \leq \cot \theta \leq (1,2 + 1,4 \sigma_{cp} / f_{cd}) / (1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}) \leq 3,0 \quad (6.7aDE)$$

mit

$$V_{Rd,cc} = c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} (1 - 1,2 \sigma_{cp} / f_{cd}) \cdot b_w \cdot z \quad (6.7bDE)$$

Dabei ist

$$c = 0,5$$

$\sigma_{cp}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c \text{ in N/mm}^2.$$

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen ( $N_{Ed} > 0$  als Längsdruckkraft).

Bei Leichtbeton ist der Druckstrebenwinkel nach Gl. (6.7aDE) auf  $\cot \theta = 2$  zu begrenzen. Der Eingangswert  $V_{Rd,cc}$  aus Gl. (6.7bDE) ist mit  $\eta_1$  nach Gl. (11.1) zu multiplizieren.

ÖNORM B 1992-1-1:

$$0,6 \leq \tan \theta \leq 1,0 \quad (3AT)$$

Wenn der Querschnitt überdrückt ist, dann darf  $\theta$  im Bereich

$$0,4 \leq \tan \theta \leq 1,0 \quad (4AT)$$

gewählt werden.

SS EN 1992-1-1, § 15:

Bei vorgespannten Bauteilen gilt abweichend von Gl. (6.7N) die Bedingung  $1,0 \leq \cot \Theta \leq 3,0$ .Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse ist der Querkraftwiderstand  $V_{Rd}$  der kleinere Wert aus

$$V_{Rd,s} = (A_{sw} / s) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (6.8)$$

und

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (6.9)$$

Dabei ist

 $A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung. $s$  der Abstand der Bügel untereinander. $f_{ywd}$  der Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung. $v_1$  ein Abminderungsbeiwert für die Betonfestigkeit bei Schubrisen. $\alpha_{cw}$  ein Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt.

Die empfohlenen Werte sind:

$$v_1 = v$$

mit

$$v = 0,6 (1 - f_{ck} / 250) \quad \text{für Normalbeton } (f_{ck} \text{ in N/mm}^2) \quad (6.6N)$$

$$v = 0,5 \eta_1 (1 - f_{lck} / 250) \quad \text{für Leichtbeton } (f_{lck} \text{ in N/mm}^2) \quad (11.6.6N)$$

$$\alpha_{cw} = 1 \quad \text{für nicht vorgespannte Bauteile}$$

$$= (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd} \quad (6.11aN)$$

$$= 1,25 \quad \text{für } 0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd} \quad (6.11bN)$$

$$= 2,5 (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0 f_{cd} \quad (6.11cN)$$

Dabei ist

 $\sigma_{cp}$  die mittlere Druckspannung im Beton, positiv bezeichnet, infolge des Bemessungswertes der Normalkraft.Die höchstens wirksame Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung  $A_{sw,max}$  für  $\cot \theta = 1$  ist gegeben durch:

$$(A_{sw,max} \cdot f_{ywd}) / (b_w \cdot s) \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad (6.12)$$

Die zusätzliche Zugkraft in der Längsbewehrung infolge Querkraft ergibt sich nach Gl. (6.18) zu

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot V_{Ed} (\cot \Theta - \cot \alpha). \quad (6.18)$$

DIN EN 1992-1-1:

$$v_1 = \eta_1 \cdot 0,75 \cdot \min(1,0; 1,1 - f_{ck} / 500)$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ für Normalbeton, nach Gl. (11.1) für Leichtbeton.}$$

$$\alpha_{cw} = 1,0$$

Gleichung (6.12) wird nicht angewendet.

**Querkraftbewehrung**

Der Querkraftbewehrungsgrad ergibt sich aus Gleichung (9.4):

$$\rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin \alpha) \quad (9.4)$$

Dabei ist

$\rho_w$  der Bewehrungsgrad der Querkraftbewehrung. Dieser hat in der Regel nicht kleiner als  $\rho_{w,\min}$  zu sein.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung je Länge  $s$ .

$s$  der Abstand der Querkraftbewehrung gemessen entlang der Bauteilachse.

$b_w$  die Stegbreite des Bauteils.

$\alpha$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und der Bauteilachse.

Der empfohlene Wert für die Mindestbewehrung ist:

$$\rho_{w,\min} = 0,08 \sqrt{f_{ck} / f_{yk}} \quad (9.5N)$$

DIN EN 1992-1-1:

$$\rho_{w,\min} = 0,16 f_{ctm} / f_{yk} \quad (9.5aDE)$$

Bei Platten kann der Wert gemäß Kapitel 9.3.2(2) zwischen dem Null- und Einfachen des vorgenannten Wertes variieren.

Für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt gilt:

$$\rho_{w,\min} = 0,256 f_{ctm} / f_{yk} \quad (9.5bDE)$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$\rho_{w,\min} = 0,15 f_{ctm} / f_{yd} \quad (24AT)$$

Bei Platten mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung ist mindestens der 0,6-fache Wert der Mindestquerkraftbewehrung von Balken vorzusehen.

**Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung**

Die Bemessung für Torsion geschieht nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.3. Sie beinhaltet die Ermittlung der Schrägzugbewehrung und der Längsbewehrung nach Gleichung (6.28) sowie den Nachweis der Betondruckstreben bei gleichzeitig wirkender Querkraft nach Formel (6.29) der Norm.

Der zu Grunde liegende Ersatzquerschnitt ist, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert.

**Druckstrebenneigung**

Für die Druckstrebenneigung gelten nach 6.3.2(2) die Regeln in Kapitel 6.2.3(2) für Querkraft.

DIN EN 1992-1-1:

Bei kombinierter Beanspruchung aus Torsion und anteiliger Querkraft ist in Gleichung (6.7aDE) für  $V_{Ed}$  die Schubkraft der Wand  $V_{Ed,T+V}$  nach Gleichung (NA.6.27.1) und in Gleichung (6.7bDE) für  $b_w$  die effektive Dicke der Wand  $t_{ef}$  einzusetzen.

Mit dem gewählten Winkel  $\Theta$  ist der Nachweis sowohl für Querkraft als auch für Torsion zu führen. Die so ermittelten Bewehrungen sind zu addieren.

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + V_{Ed} \cdot t_{ef} / b_w \quad (NA.6.27.1)$$

Alternativ kann im Querschnittsdialog für Torsion gemäß Kapitel 6.3.2(2) eine Druckstrebenneigung von 45° oder für Querkraft und Torsion ein konstanter Wert  $\cot \Theta$  gewählt werden (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).

**Torsionsbewehrung**

Die erforderliche Bewehrung ist gemäß Kapitel 6.3.2(3) zu ermitteln:

$$\Sigma A_{sl} \cdot f_{yd} / u_k = T_{Ed} / 2A_k \cdot \cot \Theta \quad (6.28)$$

bzw.

$$A_{sw} \cdot f_{yd} / s = T_{Ed} / 2A_k \cdot \tan \Theta$$

Dabei ist

$A_{sl}$  die Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung.

- $A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Torsionsbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse.  
 $u_k$  der Umfang der Fläche  $A_k$ .  
 $s$  der Abstand der Torsionsbewehrung gemessen entlang der Bauteilachse.  
 $A_k$  die durch die Mittellinien der Wände eingeschlossene Fläche.

Bei näherungsweise rechteckigen Vollquerschnitten ist nach Absatz (5) nur die Mindestbewehrung erforderlich, falls die Bedingung der Gleichung (6.31) erfüllt ist:

$$T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1,0 \quad (6.31)$$

Dabei ist

$T_{Rd,c}$  das Torsionsrissmoment, das nach Zilch (2006, S. 290) zu  $T_{Rd,c} = f_{ctd} \cdot W_T$  ermittelt wird.

$V_{Rd,c}$  der Querkraftwiderstand nach Gleichung (6.2).

DIN EN 1992-1-1:

Die Bedingung (6.31) wird durch folgende Gleichungen ergänzt:

$$T_{Ed} \leq \frac{V_{Ed} \cdot b_w}{4,5} \quad (NA.6.31.1)$$

$$V_{Ed} \left[ 1 + \frac{4,5 T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w} \right] \leq V_{Rd,c} \quad (NA.6.31.2)$$

### Druckstreben­tragfähigkeit

Um die Druckstreben­tragfähigkeit eines auf Torsion und Querkraft beanspruchten Bauteils nicht zu überschreiten, ist folgende Bedingung zu erfüllen:

$$T_{Ed} / T_{Rd,max} + V_{Ed} / V_{Rd,max} \leq 1,0 \quad (6.29)$$

Dabei ist

$T_{Ed}$  der Bemessungswert des Torsionsmoments.

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der Querkraft.

$T_{Rd,max}$  der Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmoments gemäß

$$T_{Rd,max} = 2 v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \quad (6.30)$$

mit  $\alpha_{cw}$  nach Gleichung (6.9) und  $v$  nach Gl. (6.6N) für Normalbeton sowie Gl. (11.6.6N) für Leichtbeton.

DIN EN 1992-1-1:

Für Kompaktquerschnitte wird die Interaktionsgleichung (NA.6.29.1) benutzt:

$$(T_{Ed} / T_{Rd,max})^2 + (V_{Ed} / V_{Rd,max})^2 \leq 1,0 \quad (NA.6.29.1)$$

In Gleichung (6.30) wird für Kastenquerschnitte  $v = \eta_1 \cdot 0,75$  angenommen, in allen anderen Fällen

$v = \eta_1 \cdot 0,525 \cdot \min(1,0; 1,1 - f_{ck} / 500)$  mit  $\eta_1 = 1$  für Normalbeton, nach Gl. (11.1) für Leichtbeton.

ÖNORM B 1992-1-1:

Für Vollquerschnitte darf die folgende Interaktionsgleichung benutzt werden:

$$(T_{Ed} / T_{Rd,max})^2 + (V_{Ed} / V_{Rd,max})^2 \leq 1,0 \quad (9AT)$$

## Durchstanzen

Der Nachweis der Tragsicherheit gegenüber Durchstanzen wird nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.4, geführt. Es wird die notwendige Durchstanzbewehrung ermittelt. Dabei gelten folgende Besonderheiten:

- Die in der Norm mit  $y$  und  $z$  bezeichneten orthogonalen Wirkungsrichtungen werden nachfolgend sowie im Dialog und im Ausdruck  $x$  und  $y$  genannt, um Übereinstimmung mit den im Programm gebräuchlichen Richtungen für die Flächenbewehrung zu erreichen.
- Die mittlere statische Nutzhöhe  $d$  ergibt sich folglich aus den Eingabeparametern  $d_x$  und  $d_y$  zu  $d = (d_x + d_y) / 2$ . Diese sind entsprechend Bild 6.12, 6.16 oder 6.17 zu wählen.
- Für Einzelfundamente wird kein Nachweis geführt.
- Die Einwirkung kann entweder direkt eingegeben oder aus den berechneten Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit übernommen werden. In diesem Fall wird für die jeweilige Einwirkungskombination für  $V_{Ed}$  die maximale Auflagerkraft  $R_z$  eingesetzt.

Der Nachweis gilt als erbracht wenn:

1. Bei Platten ohne Durchstanzbewehrung

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$$

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$$

2. Bei Platten mit Durchstanzbewehrung

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$$

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$$

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

3. Die Mindestlängsbewehrung eingehalten ist

mit

$$v_{Ed} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{u_i \cdot d} \quad (6.38)$$

Dabei ist

$v_{Ed}$  die maximal einwirkende Querkraft je Flächeneinheit.

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der gesamten aufzunehmenden Querkraft. Bei Bodenplatten darf die Querkraft gemäß 6.4.3(8) um die günstige Wirkung des Sohldrucks abgemindert werden. Zur Minderung wird im Programm die Fläche innerhalb  $u_1$  angenommen, sofern der nationale Anhang nicht eine abweichende Regelung vorsieht.

$\beta$  der Lasterhöhungsfaktor zur Berücksichtigung ausmittiger Lasteinleitung gemäß Gleichung (6.39). Die Festlegung des Wertes erfolgt durch den Anwender.

$d$  die mittlere Nutzhöhe der Platte, die als  $(d_x + d_y) / 2$  angenommen werden darf, mit:

$d_x, d_y$  die statische Nutzhöhe der Platte in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung in der Querschnittsfläche des betrachteten Rundschnitts.

$u_i$  der Umfang des betrachteten Rundschnitts.

$v_{Rd,c}$  der Bemessungswert des Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit bei einer Platte ohne Durchstanzbewehrung.

$v_{Rd,cs}$  der Bemessungswert des Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit bei einer Platte mit Durchstanzbewehrung.

$v_{Rd,max}$  der Bemessungswert des maximalen Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit.

Die Lasteinleitungsflächen und Nachweisschnitte nach Kapitel 6.4.2, Absatz (1) bis (7), werden berücksichtigt. Zur Berechnung der Nachweisschnitte gelten die vom Benutzer angegebenen Öffnungsabmessungen.

### Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung

Der Durchstanzwiderstand einer Platte ohne Durchstanzbewehrung berechnet sich durch

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \quad (6.47)$$

Für Leichtbeton gilt

$$v_{lRd,c} = C_{lRd,c} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{lck})^{1/3} + k_2 \cdot \sigma_{cp} \geq (\eta_1 \cdot v_{l,min} + k_2 \cdot \sigma_{cp}) \quad (11.6.47)$$

Dabei ist

$f_{ck}, f_{lck}$  die charakteristische Betondruckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$$k = 1 + \sqrt{(200 / d) \leq 2,0}; \quad d \text{ [mm]}$$

$$\rho_l = \sqrt{(\rho_{lx} \cdot \rho_{ly})} \leq 0,02$$

$\rho_{lx}, \rho_{ly}$  der Bewehrungsgrad bezogen auf die verankerte Zugbewehrung in x- bzw. y-Richtung. Die Werte  $\rho_{lx}$  und  $\rho_{ly}$  sind in der Regel als Mittelwerte zu berechnen unter Berücksichtigung einer Plattenbreite entsprechend der Stützenabmessung zuzüglich  $3 \cdot d$  pro Seite.

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cx} + \sigma_{cy}) / 2$$

Dabei ist

$\sigma_{cx}, \sigma_{cy}$  die Normalspannungen im Beton in x- und y-Richtung im kritischen Querschnitt (MN/m<sup>2</sup>, für Druck positiv):

$$\sigma_{cx} = N_{Ed,x} / A_{cx} \quad \text{und} \quad \sigma_{cy} = N_{Ed,y} / A_{cy}$$

$N_{Ed,x}, N_{Ed,y}$  die Normalkräfte, die für Innenstützen im kompletten Bereich innerhalb der Querschnittsfläche des betrachteten Rundschnittes wirken und die Normalkräfte, die für Rand- und Eckstützen in der Fläche des betrachteten Rundschnittes wirken. Diese Kraft kann durch eine Last oder durch Vorspannung entstehen.

$A_c$  die Querschnittsfläche des Betons gemäß der Definition von  $N_{Ed}$ .

Die empfohlenen landesspezifischen Werte sind:

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c \quad \text{für Normalbeton}$$

$$C_{IRd,c} = 0,15 / \gamma_c \quad \text{für Leichtbeton}$$

$$k_1 = 0,1$$

$$k_2 = 0,08$$

$v_{min}$  gegeben durch Gleichung (6.3N) für Normalbeton:

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (6.3N)$$

$v_{l,min}$  gegeben nach Kapitel 11.6.1(1) für Leichtbeton:

$$v_{l,min} = 0,028 \cdot k^{3/2} \cdot f_{lck}^{1/2}$$

Für Stützenfundamente und Bodenplatten gilt nach Kapitel 6.4.4(2):

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot 2 \cdot d/a \geq (v_{min} \cdot 2 \cdot d/a) \quad (6.50)$$

$$v_{lRd,c} = C_{lRd,c} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \rho_l \cdot f_{lck})^{1/3} \cdot 2 \cdot d/a \geq (\eta_1 \cdot v_{l,min} \cdot 2 \cdot d/a) \quad (11.6.50)$$

$a$  Abstand vom Stützenrand zum betrachteten Rundschnitt. Innerhalb des Rundschnittes dürfen die Bodenpressungen abzüglich der Fundamenteigenlast entlastend angesetzt werden.

DIN EN 1992-1-1:

$v_{min}$  wie im Abschnitt 6.2.2(1)

Für Innenstützen bei Flachdecken mit  $u_0/d < 4$  gilt nach Heft 600 des DAfStb:

$$C_{Rd,c} = C_{lRd,c} = 0,18 / \gamma_c \cdot (0,1 \cdot u_0/d + 0,6) \geq 0,15 / \gamma_c \quad (H.6-16)$$

Für Stützenfundamente und Bodenplatten gilt:

$a$  Programmseitig erfolgt keine iterative Ermittlung des Abstands  $a$  nach NCI zu 6.4.4(2). Wenn zur Vereinfachung ein konstanter Rundschnitt im Abstand  $a = 1,0 d$  angenommen wird, dürfen nur 50% der Bodenpressungen entlastend angesetzt werden. Dies wird bei der Berechnung des Widerstands berücksichtigt.

$$C_{Rd,c} = C_{lRd,c} = 0,15 / \gamma_c$$

In allen anderen Fällen gilt für  $C_{Rd,c}$  der empfohlene Wert.

Der Biegebewehrungsgrad  $\rho_l$  ist zusätzlich auf  $\rho_l \leq 0,5 f_{cd} / f_{yd}$  zu begrenzen.

ÖNORM B 1992-1-1:

Der für die Bestimmung von  $v_{Rd,c}$  anrechenbare Bewehrungsgrad beträgt höchstens

$$\rho_l = 0,4 \cdot f_{cd} / f_{yd} \leq 0,02.$$

Bei Bodenplatten erfolgt programmseitig keine iterative Ermittlung des Abstands  $a$  gemäß Ergänzung zu Kapitel 6.4.4(2). Zur Vereinfachung darf ein konstanter Rundschnitt im Abstand  $a = 1,0 d$  angenommen werden.



**Durchstanzwiderstände mit Durchstanzbewehrung**

1) Die Durchstanzwiderstände mit Durchstanzbewehrung berechnen sich durch

$$v_{Ed} = \beta \cdot V_{Ed} / (u_0 \cdot d) \leq v_{Rd,max} \quad \text{für Normalbeton} \quad (6.53)$$

$$v_{Ed} = V_{Ed} / (u_0 \cdot d) \leq v_{lRd,max} \quad \text{für Leichtbeton} \quad (11.6.53)$$

Dabei ist

$$u_0 \quad \begin{array}{ll} \text{für eine Innenstütze} & u_0 = \text{Umfang der Stütze} \\ \text{für eine Randstütze} & u_0 = c_2 + 3 \cdot d \leq c_2 + 2 \cdot c_1 \\ \text{für eine Eckstütze} & u_0 = 3 \cdot d \leq c_1 + c_2 \end{array}$$

$c_1, c_2$  sind die in Bild 6.20 gezeigten Abmessungen der Stütze. Bei Rundstützen werden die für  $u_0$  maßgebenden Größen proportional ermittelt. Bei Wänden wird  $u_0$  wie bei Rand- und Eckstützen bestimmt.

ÖNORM B 1992-1-1: Die Möglichkeit zur Vereinfachung bei runden Rand- und Eckstützen wird nicht genutzt.  
 $\beta$  siehe 6.4.3 (3), (4) und (5).

$v_{Ed}$  die aufzunehmende Querkraft am Stützenanschnitt je Flächeneinheit.

Die empfohlenen landesspezifischen Werte sind:

$$v_{Rd,max} = 0,4 \cdot v \cdot f_{cd} \quad \text{mit } v \text{ nach Gl. (6.6N)}$$

$$v_{lRd,max} = 0,4 \cdot v \cdot f_{lcd} \quad \text{mit } v \text{ nach Gl. (11.6.6N)}$$

DIN EN 1992-1-1:

Die Maximaltragfähigkeit ist im kritischen Rundschnitt  $u_1$  zu ermitteln:

$$v_{Ed,u1} \leq v_{Rd,max} = 1,4 \cdot v_{Rdc,u1} \quad (NA.6.53.1)$$

ÖNORM B 1992-1-1:

Der maximale Durchstanzwiderstand ist für Normalbeton der kleinere der folgenden Werte:

$$- V_{Rd,max} = 0,40 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot u_0 \cdot d$$

$$- V_{Rd,max} = \kappa \cdot v_{Rd,c} \cdot u_1 \cdot d$$

Der Beiwert  $\kappa$  wird zu  $\kappa = 1,65$  angenommen. Dabei wird gemäß ÖNorm davon ausgegangen, dass die Durchstanzbewehrungen die jeweils äußeren Lagen der Biegebewehrung umfassen.

Für Leichtbeton wird der empfohlene Wert übernommen.

SS EN 1992-1-1, § 16:

$$v_{Rd,max} \leq \{ 0,50 \cdot v \cdot f_{cd} ; 1,6 \cdot v_{Rd,c} \cdot u_1 / u_0 \}$$

Für Leichtbeton wird der empfohlene Wert übernommen.

2) Die erste Bewehrungsreihe wird im Abstand  $0,5 \cdot d$  vom Stützenrand festgelegt, die weiteren Bewehrungsreihen im Abstand  $s_r \leq 0,75 \cdot d$  untereinander (s. Bild 9.10). Die Bewehrung wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot (d / s_r) A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot (1 / (u_1 \cdot d)) \sin \alpha \leq k_{max} \cdot v_{Rd,c} \quad [MN/m^2] \quad (6.52)$$

Dabei ist

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung in einer Bewehrungsreihe um die Stütze [mm<sup>2</sup>].

$s_r$  der radiale Abstand der Durchstanzbewehrungsreihen [mm].

$f_{ywd,ef}$  der wirksame Bemessungswert der Streckgrenze der Durchstanzbewehrung, gemäß

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot d \leq f_{ywd} \quad [MN/m^2]$$

$u_1$  der Umfang des kritischen Rundschnitts [mm].

$d$  der Mittelwert der statischen Nutzhöhen in den orthogonalen Richtungen [mm].

$\alpha$  der Winkel zwischen Durchstanzbewehrung und Plattenebene.

$k_{max}$  Faktor zur Berechnung der Maximaltragfähigkeit mit Durchstanzbewehrung. Der empfohlene Wert ist 1,5.

Bei aufgebogener Bewehrung wird  $d / s_r = 0,67$  nach Abschnitt 6.4.5(1) angesetzt.

DIN EN 1992-1-1:

Es müssen in jedem Fall mindestens zwei Bewehrungsreihen innerhalb des Umfangs  $u_{\text{out}}$  nach Abschnitt 6.4.5(4) verlegt werden. Bei Flachdecken ist  $A_{\text{sw}}$  in den ersten beiden Bewehrungsreihen mit den Faktoren  $k_{\text{sw},1} = 2,5$  bzw.  $k_{\text{sw},2} = 1,4$  zu vergrößern. Für aufgebogene Durchstanzbewehrung ist  $d / s_t = 0,53$  anzusetzen. Die aufgebogene Bewehrung darf mit  $f_{\text{ywd,ef}} = f_{\text{ywd}}$  ausgenutzt werden. Bei Bodenplatten wird die Bügelbewehrung nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\beta \cdot V_{\text{Ed,red}} \leq V_{\text{Rd,s}} = A_{\text{sw},1+2} \cdot f_{\text{ywd,ef}} \quad (\text{NA.6.52.1})$$

Bei aufgebogener Bewehrung:

$$\beta \cdot V_{\text{Ed,red}} \leq V_{\text{Rd,s}} = 1,3 A_{\text{sw},1+2} \cdot f_{\text{ywd}} \sin \alpha \quad (\text{NA.6.52.2})$$

Zur Bestimmung von  $V_{\text{Ed,red}}$  wird der Abzugswert der Sohlpressung  $\Delta V_{\text{Ed}}$  in Gl. (6.48) für die ersten beiden Bewehrungsreihen mit der Fläche  $A_{\text{crit}}$  gemäß Bild NA.6.21.1, für die Reihen  $i > 2$  mit der Fläche  $A_i > A_{\text{crit}}$  berechnet, wobei jeweils nur 50% der Bodenpressungen entlastend angesetzt werden. In den ersten beiden Bewehrungsreihen ist jeweils die Hälfte, in den weiteren Reihen jeweils ein Drittel der nach Gl. (NA.6.52.1) ermittelten Bewehrungsmenge zu verlegen. Die erste Reihe ist im Abstand  $0,3 \cdot d$  vom Stützenrand anzuordnen. Die Abstände  $s_t$  zwischen den ersten drei Reihen sollen auf  $0,5 \cdot d$  begrenzt werden.

ÖNORM B 1992-1-1:

In den ersten beiden Reihen ist  $A_{\text{sw}}$  um jeweils 60% zu erhöhen.

3) Der Rundschnitt  $u_{\text{out,ef}}$ , für den Durchstanzbewehrung nicht mehr erforderlich ist, ist in der Regel nach Gl. (6.54) zu ermitteln:

$$u_{\text{out,ef}} = \beta \cdot V_{\text{Ed}} / (v_{\text{Rd,c}} \cdot d) \quad (6.54)$$

Die äußerste Reihe der Durchstanzbewehrung hat in der Regel nicht weiter als  $1,5 \cdot d$  von  $u_{\text{out,ef}}$  entfernt zu sein.

DIN EN 1992-1-1:

$v_{\text{Rd,c}}$  ist als Querkraftwiderstand nach Kapitel 6.2.2(1) zu ermitteln.

4) Für die minimal erforderliche Durchstanzbewehrung  $A_{\text{sw,min}}$  der inneren Nachweisschnitte gilt:

$$A_{\text{sw,min}} \cdot (1,5 \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) / (s_r \cdot s_t) \geq 0,08 \cdot \sqrt{f_{\text{ck}}} / f_{\text{yk}} \quad (9.11)$$

Dabei ist

$\alpha$  der Winkel zwischen Durchstanzbewehrung und der Längsbewehrung (d.h. bei vertikalen Bügeln  $\alpha = 90^\circ$  und  $\sin \alpha = 1$ ).

$s_t$  der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in radialer Richtung.

$s_r$  der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in tangentialer Richtung.

$f_{\text{ck}}$  in  $\text{N/mm}^2$ .

DIN EN 1992-1-1:

$$A_{\text{sw,min}} = A_s \cdot \sin \alpha = 0,08 / 1,5 \cdot \sqrt{f_{\text{ck}}} / f_{\text{yk}} \cdot s_r \cdot s_t \quad (9.11\text{DE})$$

5) Mindestlängsbewehrung

DIN EN 1992-1-1:

Die Mindestbewehrung ergibt sich nach Kapitel 6.4.5(NA.6) aus der Bemessung der Mindestmomente:

$$m_{\text{Ed,x}} = \eta_x \cdot V_{\text{Ed}} \text{ und } m_{\text{Ed,y}} = \eta_y \cdot V_{\text{Ed}} \quad (\text{NA.6.54.1})$$

mit

$\eta_x, \eta_y$  der Momentenbeiwert nach Tabelle NA.6.1.1 für die x- bzw. y-Richtung.

ÖNORM B 1992-1-1:

Die Mindestbewehrung ist nach Gleichung (28AT), zu ermitteln:

$$a_{\text{s,min}} = \frac{V_{\text{Ed}}}{0,9 \cdot d \cdot f_{\text{yd}}} \cdot \frac{e}{b_{\text{eff}}} \quad (28\text{AT})$$

mit

$e/b_{\text{eff}}$  die bezogene Ausmitte nach Tabelle 13AT.

## Nachweise gegen Ermüdung

Für die Nachweise können vom Benutzer alternativ zwei Verfahren gewählt werden:

- Vereinfachter Nachweis für die häufige Einwirkungskombination gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.6(2), und EN 1990, Gl. (6.15b), mit den im Gebrauchszustand relevanten Verkehrslasten.
- Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten für die Ermüdungskombination gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.3, Gl. (6.69), mit der speziell definierten zyklischen Einwirkung  $Q_{fat}$ .

Die Betondruckspannungen im Zustand II werden in beiden Fällen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 3.2 der Norm ermittelt. Die Streuung der Vorspannung wird abweichend von Kapitel 5.10.9 nicht berücksichtigt.

## Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl

Der Ermüdungsnachweis wird nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8, geführt. Die Ermittlung der Stahlspannungen erfolgt für Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft sowie für Spannstahl in Stäben und Bemessungsobjekten unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Schub- und Längsbewehrung aus Querkraft und Torsion werden die Spannungen gemäß 6.8.3(3) auf der Grundlage eines Fachwerkmodells mit der Druckstrebenneigung  $\tan \Theta_{fat} = \sqrt{\tan \Theta} \leq 1$  nach Gl. (6.65) berechnet. Spannstahlspannungen in Flächenelementen werden am ungerissenen Betonquerschnitt ermittelt. Für Spannglieder ohne Verbund und externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

DIN EN 1992-1-1:

Die Druckstrebenneigung ist nach Heft 600 des DAfStb, Gl. (H.6-26), zu ermitteln.

### Vereinfachter Nachweis

Nach Kapitel 6.8.6 kann ausreichender Widerstand gegen Ermüdung angenommen werden, wenn unter der häufigen Einwirkungskombination die Spannungsschwingbreite für nichtgeschweißte Bewehrungsstäbe  $70 \text{ MN/m}^2$  und für geschweißte Bewehrungsstäbe  $35 \text{ MN/m}^2$  nicht übersteigt. Die Bedingung nach Kapitel 6.8.6(3) für Kopplungen in Spannbetonbauteilen wird programmseitig nicht überprüft.

DIN EN 1992-1-1:

Für geschweißte Bewehrungsstäbe ist der vereinfachte Nachweis nicht zulässig.

### Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten

Der Nachweis gilt nach Kapitel 6.8.5(3) als erbracht, wenn für Betonstahl und Spannstahl Gl. (6.71) erfüllt ist:

$$\gamma_{F,fat} \cdot \Delta\sigma_{s,eq}(N^*) \leq \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / \gamma_{s,fat} \quad (6.71)$$

mit

$$\gamma_{F,fat} = 1 \text{ gemäß Kapitel 2.4.2.3.}$$

$$\gamma_{s,fat} = 1,15 \text{ für Betonstahl und Spannstahl gemäß Kapitel 2.4.2.4.}$$

$$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*) \text{ Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite bei } N^* \text{ Lastzyklen gemäß den Wöhlerlinien nach Tab. 6.4N für Spannstahl bzw. Tab. 6.3N für Betonstahl.}$$

$$\Delta\sigma_{s,eq}(N^*) \text{ Schadensäquivalente Schwingbreite bei } N^* \text{ Lastzyklen. Für den Hochbau darf diese näherungsweise zu } \Delta\sigma_{s,max} \text{ angenommen werden.}$$

$$\Delta\sigma_{s,max} \text{ Maximale Spannungsschwingbreite aus der Ermüdungskombination.}$$

### Berechnungsmethode

Als vorhandene Längsbewehrung wird das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung angenommen. Falls damit die Beanspruchung aus der Nachweiskombination im Zustand II nicht aufnehmbar ist, wird mit der vorhandenen Bewehrung und den Nachweisschnittgrößen eine erneute Bemessung durchgeführt.

Die sich aus dem Dehnungszustand im Zustand II bzw. am Fachwerkmodell ergebende maximale Spannungsschwingbreite je Stahllage wird für jede Nachweissituation getrennt ermittelt. Bei Längsbewehrung wird das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl durch Erhöhung mit dem Beiwert  $\eta$  nach Gl. (6.64) berücksichtigt. Wenn bei Längs- oder Schubbewehrung die resultierende Schwingbreite die zulässige Spannungsschwingbreite übersteigt, wird die erforderliche Bewehrung solange iterativ erhöht, bis der Nachweis für alle Situationen erfüllt ist. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* wird die Längsbewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Die zulässigen Spannungsschwingbreiten und der Beiwert  $\eta$  werden vom Benutzer im Querschnittsdialog vorgegeben.

Die für den Nachweis maßgebliche, gegebenenfalls erhöhte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll ausgegeben und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Druckbeanspruchung erfolgt für Biegung und Längskraft nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.7, am gerissenen Querschnitt. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis für Betonstahl berücksichtigt. Druckstreben von querkraftbeanspruchten Bauteilen werden nicht untersucht.

### Vereinfachter Nachweis

Ausreichender Widerstand gegen Ermüdung kann angenommen werden, wenn die nachfolgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 \text{ für } f_{ck} \leq 50 \text{ MN/m}^2 \quad (6.77)$$

$$f_{cd,fat} \leq 0,8 \text{ für } f_{ck} > 50 \text{ MN/m}^2$$

Dabei ist

$\sigma_{c,max}$  die maximale Druckspannung in einer Faser unter der häufigen Einwirkungskombination (Druckspannungen positiv bezeichnet).

$\sigma_{c,min}$  die minimale Druckspannung in derselben Faser, in der  $\sigma_{c,max}$  wirkt ( $\sigma_{c,min} = 0$  bei Zugspannung).

$f_{cd,fat}$  der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit des Betons nach Gl. (6.76). Dieser Wert wird im Querschnittsdialog vorgegeben.

$$f_{cd,fat} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot (1 - f_{ck} / 250) \quad (6.76)$$

mit  $\beta_{cc}(t_0)$  nach Gl. (3.2) und  $f_{cd}$  nach Gl. (3.15)

$$k_1 = 0,85$$

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1, SS EN 1992-1-1:

$$k_1 = 1,0$$

### Nachweis über schadensäquivalente Betondruckspannungen

Der Nachweis gilt nach Kapitel 6.8.7(1) als erbracht, wenn Gl. (6.72) erfüllt ist:

$$E_{cd,max,equ} + 0,43 \sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1 \quad (6.72)$$

Dabei ist

$R_{equ} = E_{cd,min,equ} / E_{cd,max,equ}$  das Verhältnis der Spannungen.

$E_{cd,min,equ} = \sigma_{cd,min,equ} / f_{cd,fat}$  das minimale Niveau der Druckspannung.

$E_{cd,max,equ} = \sigma_{cd,max,equ} / f_{cd,fat}$  das maximale Niveau der Druckspannung.

$\sigma_{cd,min,equ}$  die Unterspannung der Dauerschwingfestigkeit mit  $N = 10^6$  Zyklen.

$\sigma_{cd,max,equ}$  die Oberspannung der Dauerschwingfestigkeit mit  $N = 10^6$  Zyklen.

$f_{cd,fat}$  der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit des Betons nach Gl. (6.76).

### Besonderheit bei Flächentragwerken

Bei Flächentragwerken kann der Dehnungszustand am gerissenen Betonquerschnitt unter allgemeiner Beanspruchung nicht eindeutig ermittelt werden. Die Bemessung erfolgt deshalb getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y mit den oben näher erläuterten Bemessungsschnittgrößen nach Wolfensberger/Thürlimann bzw. nach Rüschi. Mit der so ermittelten Bewehrung kann die Tragfähigkeit als gesichert angenommen werden.

Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite für Betonstahl und Beton kann diese Methode im Fall von Drill- oder Scherbeanspruchungen zu unrealistischen Ergebnissen führen, wie am folgenden Beispiel deutlich wird:

Gegeben seien zwei identische Sätze von Plattenschnittgrößen:

Satz	$m_x$ [kNm/m]	$m_y$ [kNm/m]	$m_{xy}$ [kNm/m]
1	300	200	100
2	300	200	100

Daraus folgen nach Wolfensberger/Thürlimann als Bemessungsvarianten für die x-Richtung:

Satz	Variante	m [kNm/m]
1	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$
2	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$

Die Drillmomente erzeugen eine Variation der Bemessungsmomente und damit rein rechnerisch eine Spannungsschwingbreite. Im Ermüdungsnachweis könnte dadurch eine Bewehrungserhöhung aufgrund scheinbarer Überbeanspruchung notwendig werden. Bei Bemessungsnormalkräften gilt dies für die Scherkräfte sinngemäß.

Mit der Benutzerauswahl **Bemessungsvarianten einschränken** im Querschnittsdialog lässt sich der beschriebene Effekt vermeiden. In diesem Fall werden bei der Ermittlung der Schwingbreite nur noch die korrespondierenden Varianten verglichen, im Beispiel also nur die jeweils ersten und die jeweils zweiten Varianten der beiden Sätze. Bei konstanter Beanspruchung wird somit die Schwingbreite korrekt zu Null ermittelt.

**Diese Alternative kann allerdings nicht sicherstellen, dass immer alle denkbaren Spannungsschwankungen erfasst werden. Die Ergebnisse sind deshalb mit besonderer Aufmerksamkeit zu bewerten. Im ausführlichen Protokoll werden dazu die für den Nachweis maßgeblichen Varianten und Bemessungsschnittgrößen angegeben.**

Bei Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Rüschi für schiefwinklige Bewehrung gelten die dargestellten Zusammenhänge entsprechend.

## Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

Im einzelnen werden folgende Nachweise geführt:

- Begrenzung der Betondruckspannungen (EN 1992-1-1, Kapitel 7.2).
- Begrenzung der Betonstahlspannungen (Kapitel 7.2).
- Begrenzung der Spannstahlspannungen (Kapitel 7.2).
- Nachweis der Dekompression (Kapitel 7.3.1).
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite (Kapitel 7.3.2).
- Berechnung der Rissbreite (Kapitel 7.3.4).
- Begrenzung der Verformungen (Kapitel 7.4).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.5.3, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Soweit erforderlich, wird die im Nachweis vorgeschriebene Kombination automatisch aus den Querschnittsvorgaben ermittelt. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Spannungsberechnung

Am ungerissenen Betonquerschnitt wird angenommen, dass sich Beton und Stahl unter Zug- und Druckbeanspruchung elastisch verhalten. Bei Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts werden die Betondruckspannungen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.2, bestimmt, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen werden die Betonspannungen am Bruttoquerschnitt berechnet. Der Nachweis der Stahlspannungen erfolgt für Betonstahl durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt und für Spannstahl am ungerissenen Betonquerschnitt.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Die ohne Nachweis darstellbaren Spannungen der Einwirkungskombinationen werden immer am Bruttoquerschnitt berechnet.

In den Nachweisen werden dagegen die Spannungen wie folgt ermittelt und graphisch dargestellt bzw. protokolliert:

- Beim Nachweis der Rissbewehrung und der Rissbreite erfolgt die Ermittlung der Betonspannung am Bruttoquerschnitt.
- Beim Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen erfolgt die Berechnung der Betonspannung
  - ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern im Verbund für die Situationen vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.
- Der Nachweis der Betonstahl- und Spannstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

ÖNORM B 1992-1-1:

Wenn die Spannungen nach Kapitel 7.2 am gerissenen Querschnitt berechnet werden, soll das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl berücksichtigt werden. Hierfür ist der Zuwachs an Zugkraft  $\Delta F_{tp}$  im Spannstahl wie folgt zu berechnen:

$$\Delta F_{tp} = \xi_1^2 \cdot A_p \cdot \epsilon(y_p) \cdot E_p \quad (14AT)$$

Dabei ist

$\xi_1$  der Verbundbeiwert nach Gl. (7.5); die Eingabe erfolgt im Dialog für den Nachweis der Rissbreite;

$A_p$  die Querschnittsfläche des im Verbund liegenden Spannstahls;

$\epsilon(y_p)$  die Dehnung des Betonquerschnitts am Ort  $y_p$  des Spannstahls;

$E_p$  der Elastizitätsmodul des Spannstahls.

Die Vorschrift wird programmseitig bei Stäben und Bemessungsobjekten in Situationen nach dem Verpressen berücksichtigt. Bei Flächenelementen kommt sie nicht zur Anwendung, da Spannstahl hier nur am ungerissenen Querschnitt nachgewiesen wird.

## Begrenzung der Betondruckspannungen

Der Nachweis der Betondruckspannungen erfolgt nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2. Gemäß Kapitel 7.1(2) ist von gerissenen Querschnitten auszugehen, wenn die im ungerissenen Zustand berechnete Zugspannung den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet.

Die Berechnung im gerissenen Zustand erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands mit der endgültigen Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis). Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden im Verbund liegende Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind. Bei Flächenelementen wird, da der allgemeine Dehnungszustand nicht eindeutig bestimmbar ist, die Druckspannung für beide Bewehrungsrichtungen getrennt ermittelt und der Extremwert nachgewiesen.

Für Bauteile der Expositionsklassen XD, XF und XS ist in den Bau- und Endzuständen die Betondruckspannung  $\sigma_c$  nach Kapitel 7.2(1) auf  $0,60 f_{ck}$  unter der charakteristischen Kombination zu begrenzen. Falls die Spannung im Beton unter quasi-ständiger Kombination die Grenze  $0,45 f_{ck}$  nicht übersteigt, darf nach 7.2(3) von linearem Kriechen ausgegangen werden, anderenfalls ist nichtlineares Kriechen zu berücksichtigen. Beide Bedingungen werden nach Benutzervorgabe berücksichtigt.

In Spannbetonbauteilen nach Kapitel 5.10.2.2 ist die maximale Betondruckspannung bei Eintragung des Mittelwerts der Vorspannung auf  $0,60 f_{ct(t)}$  zu beschränken. Übersteigt die Betondruckspannung den Wert von  $0,45 f_{ct(t)}$ , ist die Nicht-

linearität des Kriechens zu berücksichtigen. Dabei bezeichnet  $f_{c(t)}$  den Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung.

Im Programm wird der Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannung bei der Situation  $G+P$  angenommen. Falls in der maßgebenden Kombination eine Situation  $G+P$  definiert ist, wird für diese Situation die Betonspannung je nach Benutzervorgabe gegen den Grenzwert  $0,45 f_{c(t)}$  oder  $0,60 f_{c(t)}$  geprüft. Der Wert für  $f_{c(t)}$  wird ebenfalls im Dialog festgelegt.

## Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen

### Betonstahl

Bei Betonstahl wird gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(5), die Begrenzung der Stahlspannung unter der charakteristischen Kombination je nach Benutzerauswahl auf  $0,8 f_{yk}$  oder  $1,0 f_{yk}$  nachgewiesen. Die erhöhte Grenze ist für Spannungen aus indirekten Einwirkungen zulässig. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt am gerissenen Betonquerschnitt. Im Verbund liegende Spannglieder werden bei Stäben und Bemessungsobjekten auf der Widerstandseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind.

SS EN 1992-1-1, § 19:

Als Grenze wird generell  $1,0 f_{yk}$  angenommen.

### Spannstahl

Bei Spanngliedern im Verbund wird die Begrenzung der Stahlspannung für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen und für Flächenelemente am ungerissenen Betonquerschnitt nachgewiesen. Dabei gilt die Grenze  $0,75 f_{pk}$  unter der charakteristischen Einwirkungskombination.

Für Situationen vor dem Verpressen und für Spannglieder ohne Verbund wird die Spannung  $\sigma_{pm0}(x)$  gemäß Gleichung (5.43) nachgewiesen. Für externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

DIN EN 1992-1-1:

Der Nachweis wird für die quasi-ständige Kombination mit der Grenze  $0,65 f_{pk}$  geführt. Zusätzlich wird geprüft, ob unter der charakteristischen Kombination das Minimum aus  $0,9 f_{p0,1k}$  und  $0,8 f_{pk}$  nicht überschritten wird.

## Nachweis der Dekompression

Der Nachweis ist für vorgespannte Bauteile der Expositionsklassen XC2-XC4, XD1-XD3 und XS1-XS3 nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.1, Tabelle 7.1N, zu führen. Danach wird verlangt, dass alle Teile des Spannglieds im Verbund oder des Hüllrohrs mindestens 25 mm tief im überdrückten Beton liegen. Die maßgebende Einwirkungskombination ergibt sich aus der Expositionsklasse.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten erfolgt die Untersuchung für die Spannungen aus Biegung und Normalkraft. Dabei wird ein gerissener Querschnitt angenommen, falls die Zugspannung unter der maßgebenden Einwirkungskombination den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet. Im übrigen gelten die oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

Bei Flächenquerschnitten wird von einem ungerissenen Querschnitt ausgegangen. Für den Nachweis ist die in Richtung des Spannglieds wirkende ebene Betonspannung maßgebend.

Als Ergebnis wird die „Drucktiefe“, d.h. der geringste Abstand des Spannglieds oder Hüllrohrs von der Zugzone bzw. vom Querschnittsrand ausgegeben. Dieser Wert ist negativ, wenn das Spannglied in der Zugzone liegt.

DIN EN 1992-1-1:

Tabelle 7.1DE ist maßgebend. Die Einhaltung des Grenzzustands der Dekompression bedeutet, dass der Betonquerschnitt um das Spannglied im Bereich von 100 mm oder von 1/10 der Querschnittshöhe unter Druckspannungen steht. Der größere Bereich ist maßgebend. Die Spannungen sind im Zustand II nachzuweisen.

ÖNORM B 1992-1-1:

Tabelle 7AT ist maßgebend.

## Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wird in EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2 geregelt. Sie ist nach 7.3.2(1) in den Bereichen einzulegen, wo Zug zu erwarten ist. Die Festlegung der Zugbereiche kann im Querschnittsdialog entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* erhalten die nicht gezogenen Betonstahllagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Nach Absatz (2) soll bei profilierten Querschnitten jeder Teilquerschnitt (Gurte und Stege) einzeln nachgewiesen werden. Dies ist unter Berücksichtigung beliebiger polygonaler Querschnittsgeometrien nicht möglich. Das Programm ermittelt deshalb die Mindestbewehrung immer am Gesamtquerschnitt. Bei rechteckigen Vollquerschnitten kommt dabei Gleichung (7.2), in allen anderen Fällen Gleichung (7.3) zur Anwendung.

SS EN 1992-1-1, § 20:

Die zulässigen Rissbreiten sind in Tabelle D-2 für die quasiständige Kombination in Abhängigkeit von der Expositionsklasse, der Lebensdauerklasse und der Korrosionsanfälligkeit festgelegt. Wenn die Zugspannung  $f_{ctk} / \zeta$  mit  $\zeta$  nach Tabelle D-3 nicht überschritten wird, kann der Beton als ungerissen betrachtet werden. In diesem Fall wird keine Mindestbewehrung nachgewiesen. Im Programm wird  $f_{ctk} = f_{ctk;0,05}(t) = 0,7 \cdot f_{ctm}(t) = 0,7 \cdot f_{ct,eff}$  mit  $f_{ct,eff}$  nach Gl. (7.1) angenommen.

### Ermittlung der Mindestbewehrung

Die Ermittlung der Mindestbewehrung  $A_{s,min}$  erfolgt nach Gleichung (7.1) der Norm:

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (7.1)$$

Dabei ist

$A_{ct}$  die Fläche der Betonzugzone bei Erstrissbildung im Zustand I. Das Programm skaliert hierzu die Biegemomente der Einwirkungskombination soweit, dass die maximale Randspannung im Zustand I den Wert  $f_{ct,eff}$  annimmt.

$\sigma_s$  die maximal zulässige Spannung in der Betonstahlbewehrung in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser des Betonstahls.

$k$  der Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen gemäß Eingabe, der je nach Querschnittshöhe zwischen 0,65 und 1,0 variieren kann.

DIN EN 1992-1-1:

Bei Zwang innerhalb des Bauteils dürfen diese Werte mit 0,8 multipliziert werden, bei Zugspannungen infolge außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs soll  $k = 1,0$  angenommen werden.

$f_{ct,eff}$  die effektive Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung gemäß Eingabe. Der Wert ist mit  $f_{ctm}$  oder niedriger anzunehmen, falls die Rissbildung vor Ablauf von 28 Tagen erwartet wird. Die vom Betonalter abhängige Zugfestigkeit ist in Gleichung (3.4) des Kapitels 3.1.2 definiert.

DIN EN 1992-1-1:

Wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, sollte mindestens eine Zugfestigkeit von 3 MN/m<sup>2</sup> für Normalbeton und von 2,5 MN/m<sup>2</sup> für Leichtbeton angenommen werden.

$k_c$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor der Erstrissbildung.

$k_c = 1,0$  bei reinem Zug

Für Rechteckquerschnitte und Stege von Hohlkästen oder T-Querschnitten:

$$k_c = 0,4 (1 - \sigma_c / (k_1 \cdot h / h^*) / f_{ct,eff}) \leq 1 \quad (7.2)$$

Für Gurte von Hohlkästen und T-Querschnitten:

$$k_c = 0,9 \cdot F_{cr} / A_{ct} / f_{ct,eff} \geq 0,5 \quad (7.3)$$

$\sigma_c$  die mittlere Betonspannung im untersuchten Teil des Querschnitts mit

$$\sigma_c = N_{Ed} / (b \cdot h) \quad (7.4)$$

$N_{Ed}$  die Normalkraft im untersuchten Querschnittsteil (Druckkraft positiv) unter der maßgebenden Einwirkungskombination.

$h^*$  =  $\min(h; 1,0 \text{ m})$ .

$k_1$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Normalkraft  $N_{Ed}$  auf die Spannungsverteilung:

$k_1 = 1,5$  für Drucknormalkraft

$k_1 = 2 h^* / (3 h)$  für Zugnormalkraft



$F_{cr}$  der Absolutwert der Zugkraft im Gurt unmittelbar vor Rissbildung. Die Zugkraft wird durch Integration der Zugspannungen innerhalb der Fläche  $A_{ct}$  gewonnen.

Im Querschnittsdialog wird der größte vorhandene Stabdurchmesser  $\phi_s$  angegeben (dort mit  $d_s$  bezeichnet). Daraus ergibt sich mit den folgenden Gleichungen der Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  als Eingangswert für die Tabelle 7.2N:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot h_{cr} / (2(h-d)) \quad \text{für Biegung} \quad (7.6N)$$

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot h_{cr} / (8(h-d)) \quad \text{für zentrischen Zug} \quad (7.7N)$$

Dabei ist

$h$  die Gesamthöhe des Querschnitts.

$d$  die statische Nutzhöhe bis zum Schwerpunkt der äußersten Lage der Bewehrung.

$h_{cr}$  die Höhe der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung unter der maßgebenden Einwirkungskombination.

Mit dem Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  und der zulässigen Rissbreite  $w_{max}$  ergibt sich nach Tabelle 7.2N die zulässige Betonstahlspannung  $\sigma_s$  für Gleichung (7.1). Dabei wird innerhalb der Tabelle linear interpoliert, außerhalb für  $w_k$  linear und für  $\sigma_s$  quadratisch extrapoliert.

Wenn gleichzeitig der Nachweis der Rissbreite zu führen ist, überprüft das Programm, ob durch Einlegen der ermittelten Mindestbewehrung die vorgegebene Rissbreite nach Kapitel 7.3.4 eingehalten wird. Bei Bedarf wird die Mindestbewehrung bis zum Erreichen der Nachweisgrenze iterativ erhöht. Im Protokoll wird die erhöhte Bewehrung dann durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

DIN EN 1992-1-1:

Der Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  für Tabelle 7.2DE wird mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (4(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad \text{für Biegung} \quad (7.6DE)$$

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (8(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad \text{für zentrischen Zug} \quad (7.7DE)$$

Die Stahlspannung  $\sigma_s$  wird mit der zu Tabelle 7.2DE angegebenen Gleichung berechnet.

Gemäß Kapitel 7.3.2 (NA.5) darf bei dickeren Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (NA.7.5.1) berechnet werden. Es braucht jedoch nicht mehr Bewehrung eingelegt zu werden, als sich nach Gl. (7.1) ergibt. Die vorgenannten Regelungen kommen gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung, während die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung für langsam erhärtende Betone nach Absatz (NA.6) ungenutzt bleibt.

ÖNORM B 1992-1-1:

Tabelle 7.2N wird durch Tabelle 8AT ersetzt. Die Stahlspannung  $\sigma_s$  wird nach Gl. (19AT) bestimmt. Der Grenzdurchmesser ist wie folgt zu modifizieren:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (4(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad (21AT)$$

Bei zentrischem Zug ist je Bauteilseite  $h_{cr} / 2$  anzusetzen.

Bei Bauteilen unter zentrischem Zwang darf die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (17AT) ermittelt werden. Die Vorschrift kommt gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung. Die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung bei langsam erhärtenden Betonen wird im Programm nicht genutzt.

### Besonderheit bei Spannbetontragwerken

Spannglieder im Verbund, die in der Zugzone liegen, dürfen nach den Vorschriften des Kapitels 7.3.2(3) auf die Mindestbewehrung angerechnet werden, sofern ihr Achsabstand zu den Betonstahlagen nicht mehr als 150 mm beträgt. Die Anrechnung erfolgt durch Addition des Terms

$$\xi_1 \cdot A_p' \cdot \Delta\sigma_p$$

zur linken Seite der Gleichung (7.1). Dabei ist

$A_p'$  die Querschnittsfläche der in  $A_{c,eff}$  liegenden Spannglieder im Verbund.

$A_{c,eff}$  der Wirkungsbereich der Bewehrung gemäß Bild 7.1. Die Ermittlung von  $A_{c,eff}$  ist im übernächsten Abschnitt beschrieben.

$\xi_1$  das angepasste Verhältnis der Verbundfestigkeiten zwischen Betonstahl und Spannstahl nach Gleichung (7.5).

$\Delta\sigma_p$  die Spannungsänderung in den Spanngliedern.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden Spanngliedlagen im Verbund, sofern sie in der Nachweissituation verpresst

sind, mit dem im Querschnittsdialog eingegebenen Wert für  $\xi_1$  angerechnet. Bei Flächenelementen kann Spannstahl generell nicht berücksichtigt werden.

Nach Absatz (4) des Kapitels 7.3.2 wird bei Bauteilen aus Spannbeton keine Mindestbewehrung in den Querschnitten benötigt, in denen unter der charakteristischen Einwirkungskombination und der charakteristischen Vorspannung der Betrag der Betonzugspannung  $\sigma_{ct,p}$  kleiner als  $f_{ct,eff}$  ist. Diese Bedingung wird im Programm automatisch berücksichtigt.

DIN EN 1992-1-1:

Nach Absatz (4) ist bei Bauteilen mit nachträglichem Verbund keine Mindestbewehrung erforderlich, wenn die Betondruckspannung unter der charakteristischen Kombination am Querschnittsrand dem Betrag nach größer als  $1 \text{ N/mm}^2$  ist. Diese Bedingung wird im Programm ebenfalls berücksichtigt.

ÖNORM B 1992-1-1:

Der Wert wird mit  $\sigma_{ct,p} = 0,0 \text{ N/mm}^2$  festgelegt.

SS EN 1992-1-1, § 21:

Der Wert wird zu  $\sigma_{ct,p} = f_{ctk} / \zeta$  mit dem Sicherheitsfaktor  $\zeta$  nach Tabelle D-3 festgelegt.

Im Programm wird  $f_{ctk} = f_{ctk;0,05}(t) = 0,7 \cdot f_{ctm}(t) = 0,7 \cdot f_{ct,eff}$  mit  $f_{ct,eff}$  nach Gl. (7.1) angenommen.

## Berechnung der Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch direkte Berechnung nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.4, für alle Querschnitte, in denen unter der Einwirkungskombination gemäß Expositionsklasse nach Tabelle 7.1N Zugspannungen im Zustand I auftreten. Der Stabdurchmesser  $\phi$  ( $d_s$  im Dialog) der Betonstahlbewehrung und die maßgebende Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  werden im Querschnittsdialog vorgegeben.

SS EN 1992-1-1, § 20:

Der Nachweis erfolgt für die quasi-ständige Kombination.

Die Durchführung des Nachweises gliedert sich programmseitig in folgende Schritte:

- Dehnungszustand II unter der Nachweiskombination mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 3.2 ermitteln. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden dabei alle im Verbund liegenden Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt.
- Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,eff}$  nach Bild 7.1 bestimmen (s. nächster Abschnitt), Betonstahllagen und Spannstahllagen innerhalb  $A_{c,eff}$  ermitteln.

- Bewehrungsgrad berechnen:

$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 \cdot A_p') / A_{c,eff} \quad (7.10)$$

$$\rho_{tot} = (A_s + A_p') / A_{c,eff}$$

$\xi_1$  Verbundbeiwert lt. Benutzervorgabe.

$A_s, A_p'$  Betonstahl, Spannstahl innerhalb  $A_{c,eff}$ .

- Für jede Betonstahllage einzeln bestimmen:

### Differenz der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = [\sigma_s - k_t \cdot f_{ct,eff} / \rho_{p,eff} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})] / E_s \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (7.9)$$

Dabei ist

$$\alpha_e = E_s / E_{cm}$$

$\sigma_s$  die Betonstahlspannung aus dem Dehnungszustand II.

DIN EN 1992-1-1:

$$\sigma_s = \sigma_{s2} + 0,4 f_{ct,eff} (1/\rho_{p,eff} - 1/\rho_{tot})$$

$\sigma_{s2}$  = Betonstahlspannung aus Dehnungszustand II

$f_{ct,eff}$  die wirksame Betonzugfestigkeit gemäß Vorgabe.

$k_t$  der Faktor für die Dauer der Lasteinwirkung:

0,6 bei kurzzeitiger und 0,4 bei langfristiger Lasteinwirkung.

**Maximaler Rissabstand**

$$s_{r,\max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi / \rho_{p,\text{eff}} \quad (7.11)$$

Dabei ist

$\phi$  der Stabdurchmesser gemäß Eingabe.

$c$  die Betondeckung bezogen auf die Längsbewehrung. Diese wird im Programm zu  $d_1 - \phi / 2$  angenommen, wobei  $d_1$  der kleinste Achsabstand der Betonstahlbewehrung vom Querschnittsrand innerhalb  $A_{c,\text{eff}}$  ist.

$k_1$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung. Er wird im Programm zu 0,8 angenommen, dem empfohlenen Wert für gute Verbundeigenschaften.

$k_2$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung:  
0,5 für Biegung; 1,0 für reinen Zug.

$k_3, k_4$  Die empfohlenen landesspezifischen Werte sind  $k_3 = 3,4$  und  $k_4 = 0,425$ .

DIN EN 1992-1-1:

$$k_1 \cdot k_2 = 1, k_3 = 0 \text{ und } k_4 = 1 / 3,6$$

$$s_{r,\max} \leq \sigma_s \cdot \phi / (3,6 \cdot f_{ct,\text{eff}})$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$k_3 = 0 \text{ und } k_4 = 1 / (3,6 \cdot k_1 \cdot k_2) \leq \rho_{p,\text{eff}} \cdot \sigma_s / (3,6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot f_{ct,\text{eff}}) \quad (22AT)$$

$$s_{r,\max} = \phi / (3,6 \cdot \rho_{p,\text{eff}}) \leq \sigma_s \cdot \phi / (3,6 \cdot f_{ct,\text{eff}}) \quad (23AT)$$

SS EN 1992-1-1, § 22:

$$k_3 = 7 \phi / c$$

Wenn im Querschnittsdialog der Rissabstand vorgegeben wurde, ersetzt dieser den Wert nach Gleichung (7.11). Damit lassen sich die Besonderheiten der Gleichungen (7.13) und (7.14) sowie der Absätze (4) und (5) des Kapitels 7.3.4 berücksichtigen.

**Rechenwert der Rissbreite**

$$w_k = s_{r,\max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (7.8)$$

Im Protokoll wird die Lage mit der größten rechnerischen Rissbreite nachgewiesen.

- Bei vollständig gezogenem Querschnitt erfolgt die Untersuchung für jede der beiden effektiven Zugzonen getrennt. Das Maximum wird im Protokoll ausgegeben.

Falls der Nachweis der Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite nicht gewählt ist, ermittelt das Programm automatisch eine zur Einhaltung der Rissbreite erforderliche Rissbewehrung. Dazu erfolgt eine Bemessung mit der für die Berechnung der Rissbreite maßgebenden Nachweiskombination. Die so ermittelte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Die Rissbreite wird dann für die endgültige Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis) nachgewiesen und für die graphische Darstellung gespeichert.

**Ermittlung des Wirkungsbereichs  $A_{c,\text{eff}}$** 

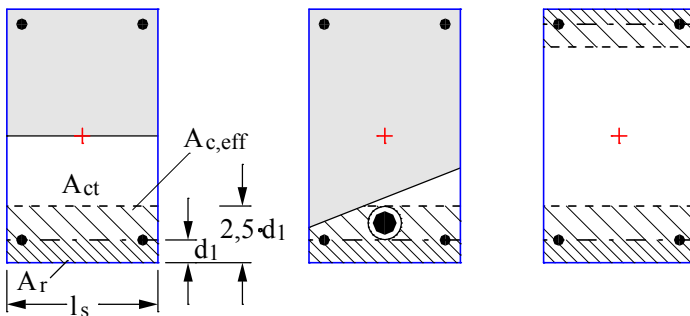
Der Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,\text{eff}}$  definiert nach EN 1992-1-1, Bild 7.1, den Bereich eines rechteckigen, einachsig beanspruchten Betonquerschnitts, in dem die Modellannahmen nach Heft 466 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) anwendbar sind. Die Übertragung dieses Modells auf beliebige Querschnitte und Beanspruchungssituationen ist programmseitig möglich, liegt jedoch im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders.

Bei der Bestimmung von  $A_{c,\text{eff}}$  wird im Programm folgendermaßen vorgegangen:

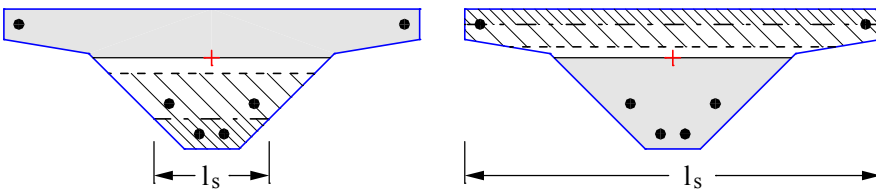
- Zugzone  $A_{ct}$  im Zustand I ermitteln, bei Berechnung der Mindestbewehrung mit der zum Erstriss führenden Beanspruchung, bei Berechnung der Rissbreite mit der Nachweiskombination gemäß Expositionsklasse.
- Schwerelinie der Bewehrung als Regressionsgrade durch die Betonstahllagen in der Zugzone bestimmen. Im Ebenen Stabwerk und bei Flächenelementen wird eine horizontale Linie durch den Schwerpunkt der gezogenen Bewehrungslagen angenommen.
- Abgeschnittene Restfläche  $A_r$  bis zum Rand und Summe der Schnittlängen  $l_s$  ermitteln. Der mittlere Randabstand wird dann zu  $d_1 = A_r / l_s$  angenommen, allerdings nicht kleiner als der kleinste Randabstand der Betonstahllagen in der Zugzone.

- Schwerlinie um den Betrag  $1,5 \cdot d_1$  parallel verschieben. Mit  $h - d = d_1$  ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß 7.3.2(3) zu  $h_{c,ef} = 2,5 \cdot (h - d) \leq h / 2$ .  
Dieser Wert wird gemäß DIN EN 1992-1-1 bzw. ÖNORM B 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2(3), auf  $(h - x) / 2$  begrenzt ( $x$  = Druckzonenhöhe im Zustand I).
- Das sich so ergebende Polygon wird mit der Zugzone verschritten und definiert dann den Wirkungsbereich  $A_{c,eff}$ .
- Wenn alle Betonstahllagen des Querschnitts gezogen sind, werden zwei Zonen ermittelt, und zwar eine für die Lagen oberhalb des Schwerpunkts und eine zweite für die Lagen unterhalb des Schwerpunkts. Die Fläche jeder Zone wird auf  $A_c / 2$  begrenzt.
- DIN EN 1992-1-1 und ÖNORM B 1992-1-1:  
Falls im Querschnittsdialog die Mindestbewehrung für dickere Bauteile unter zentrischem Zwang gewählt wurde, ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß Bild NA.7.1 d) bzw. Gl. (17AT) zu  $h_{eff} \geq 2,5 d_1$ .

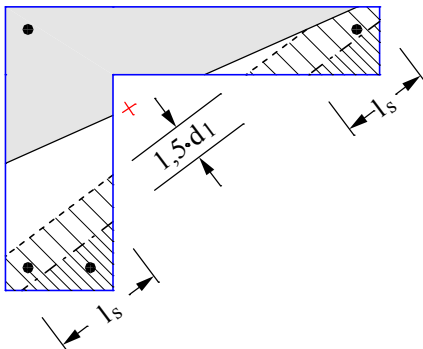
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die vom Programm ermittelten Wirkungsbereiche in typischen Situationen. Der letzte Fall (Randbalken) weicht von den Modellannahmen in Heft 466 jedoch soweit ab, dass eine Anwendung fragwürdig ist.



Wirkungsbereich der Bewehrung am Rechteckquerschnitt unter einachsiger Biegung, Normalkraft mit Doppelbiegung und zentrischem Zug



Wirkungsbereich der Bewehrung an einem Brückenquerschnitt unter einachsiger Biegung



Wirkungsbereich der Bewehrung an einem Randbalken unter einachsiger Biegung

## Begrenzung der Verformungen

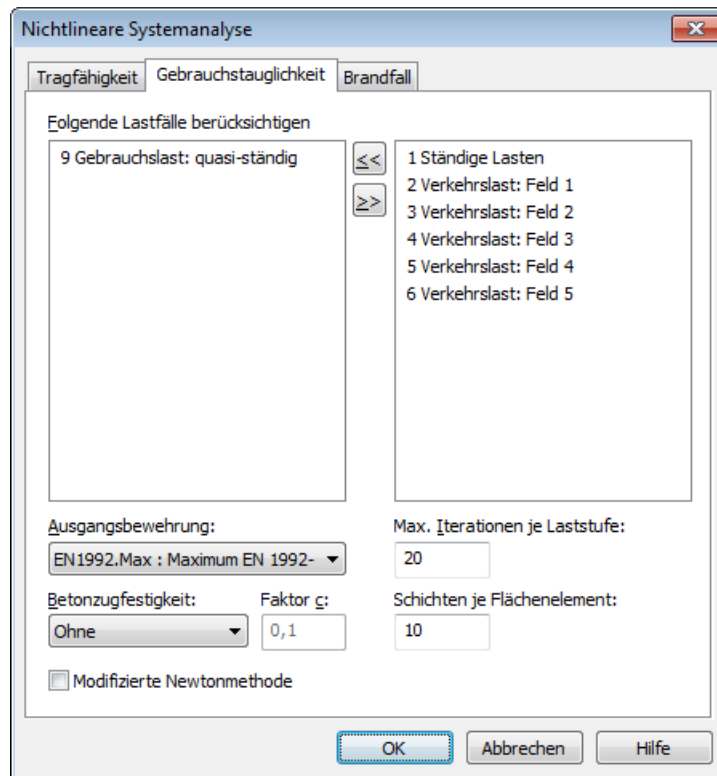
Nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.4.1, dürfen die Verformungen eines Bauteils oder Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild beeinträchtigen. Dazu soll gemäß Absatz (4) der Durchhang eines Balkens, einer Platte oder eines Kragarms unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination  $1/250$  der Stützweite nicht überschreiten. Zur Vermeidung von Schäden an angrenzenden Bauteilen soll deren Verformung nach Absatz (5) auf  $1/500$  der Stützweite begrenzt werden.

Eine konkrete Berechnungsmethode zur direkten Berechnung der Verformungen nach Kapitel 7.4.3 ist in der Norm nicht angegeben.

Im Programmsystem InfoCAD kann ein wirklichkeitsnaher Nachweis im Rahmen der Nichtlinearen Systemanalyse für Stab- und Schalentragwerke unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten geführt werden. Der Widerstand von im Verbund liegenden Spanngliedern geht z.Z. nicht in die Berechnung ein.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Definition von Nachweissituationen über die Funktion *Lastgruppe* im Belastungsdialog durch Zusammenstellung der maßgebenden Einzellastfälle. Dabei sind die veränderlichen Lasten mit den Kombinationsbeiwerten  $\psi_2$  für die quasi-ständige Kombination zu wichten.
- Auswahl der Nachweislastfälle im Dialog *Nichtlineare Systemanalyse / Gebrauchstauglichkeit* der Berechnungseinstellungen für die FEM- bzw. Stabwerksberechnung.
- Einstellen der im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Bewehrung im Auswahlfeld *Ausgangsbewehrung* (Maximum aus Biegung, Robustheit, Rissesicherung und Ermüdung).
- Ausführen der FEM- bzw. Stabwerksberechnung zur Ermittlung der Verformungen im Zustand II.
- Überprüfung der graphisch oder tabellarisch wiedergegebenen Systemverformungen.



Eine ausführliche Beschreibung der Nichtlinearen Systemanalyse ist dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Die sich ergebende Biege-, Robustheits- und Rissbewehrung, das resultierende Maximum sowie die Querkraft- und Torsionsbewehrung werden ebenfalls für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt.

Im Protokoll werden zu jedem Berechnungsort die Bemessungsschnittgrößen und erforderlichen Bewehrungen bzw. nachgewiesenen Spannungen oder Rissbreiten ausgegeben. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte werden als Warnungen gemeldet und am Nachweisort gekennzeichnet. Das ausführliche Protokoll dokumentiert zusätzlich die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen.

### Spanngliedreaktionen

$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$d_p, d_{p,min}$	Tiefe der Spannglieder bzw. Hüllrohre in der Betondruckzone im Nachweis der Dekompression [mm].

### Spannungen bei Stäben und Bemessungsobjekten

$\sigma_x$	Längsspannungen in den Nachweisen der Dekompression und der Betondruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_s, \Delta\sigma_s$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd}, \Delta\sigma_{cd}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,y}, \Delta\sigma_{sb,z}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus $Q_y$ und $Q_z$ [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,T}, \Delta\sigma_{sl,T}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus Torsion und für Torsionslängsbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Spannungen bei Flächenelementen

$\sigma_r$	Betonspannung in Spanngliedrichtung im Nachweis der Dekompression [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sx}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in x-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sy}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd,x}, \Delta\sigma_{cd,x}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck in
$\sigma_{cd,y}, \Delta\sigma_{cd,y}$	x- und y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{s,b}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Biegebewehrung

$A_s$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> ] bei Stäben und Bemessungsobjekten.
$a_{sx}, a_{sy}$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Flächenelementen in x- und y-Richtung.
$a_{s\phi}$	Meridianbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Rotationsschalenelementen.
$a_{s0}$	Ringbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Rotationsschalenelementen.

### Bewehrung aus Querkraft

$a_{sbx}, a_{sby}, a_{sb}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_x, q_y$ und $q_r$ .
$A_{sb,y}, A_{sb,z}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] von Stäben und Bemessungsobjekten aus $Q_y$ und $Q_z$ .
$A_{sl}$ für $a_{sb}=0$	Längsbewehrung [cm <sup>2</sup> ] von Flächenelementen.
$\Delta F_{tdy}, \Delta F_{tdz}$	Zusätzliche Zugkraft [kN] in der Längsbewehrung infolge Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .

### Torsionsbewehrung

$A_{sb,T}$	Torsionsbügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] von Stäben und Bemessungsobjekten aus $M_x$ .
$A_{sl,T}$	Torsionslängsbewehrung [cm <sup>2</sup> ] von Stäben und Bemessungsobjekten aus $M_x$ .

**Bemessungswerte**

$V_{Rd,ct}$ $v_{Rd,ct}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft ohne Schubbewehrung [kN bzw. kN/m].
$v_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Flächenelementen [kN/m].
$V_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Stäben und Bemessungsobjekten [kN].
$T_{Rd,max}$	Bemessungswert des maximal aufnehmbaren Torsionsmomentes [kNm].
$Q/V_{Rd} + M_x/T_{Rd}$	Bei Kompakt- und Kastenquerschnitten: $Q/V_{Rd,max} + M_x/T_{Rd,max}$ DIN EN 1992-1-1: Bei Kompaktquerschnitten: $(Q/V_{Rd,max})^2 + (M_x/T_{Rd,max})^2$ ÖNORM B 1992-1-1: Bei Vollquerschnitten: $(Q/V_{Rd,max})^2 + (M_x/T_{Rd,max})^2$

**Rissbreiten**

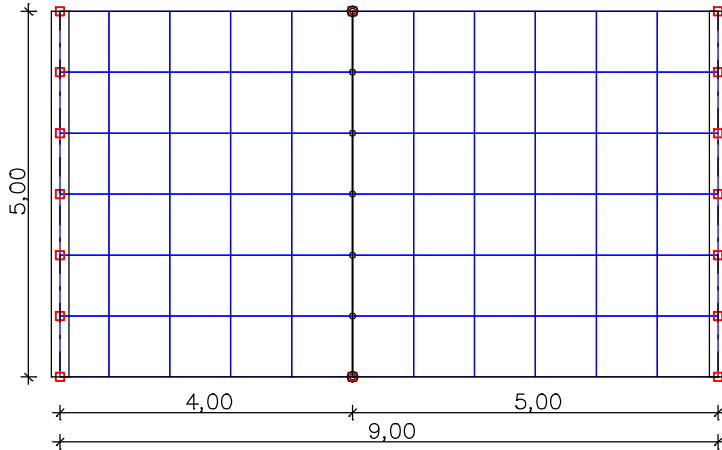
$w_{k,oben}$	Berechnete Rissbreite an der Ober- und Unterseite des Querschnitts,
$w_{k,unten}$	bei Flächenelementen jeweils getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y.

## Beispiele

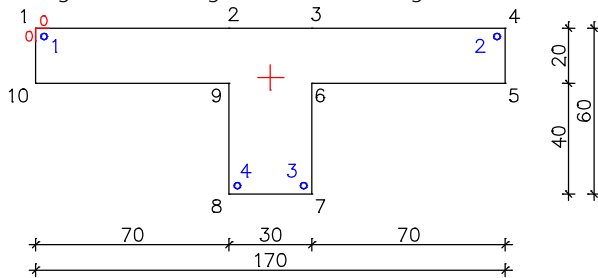
### Platte mit Unterzug

In diesem Beispiel wird eine Rechteckplatte ( $d = 20$  cm, C30/37-EN, BSt 500 S, Expositionsklasse XC2) mit einem Unterzug untersucht. Die gelenkig gelagerte Platte ist mit Eigenlast und einer Verkehrslast von  $10$  kN/m<sup>2</sup> belastet.

Die Nachweise werden für alle möglichen Kombinationen von Lastfällen geführt. Diese Methode wird in den Berechnungseinstellungen gewählt, ist aber bei einer größeren Anzahl von Lastfällen sehr zeitaufwendig.



Das nachfolgende Bild zeigt die Abmessungen des Unterzuges. Der Achsabstand des Betonstahls vom Querschnittsrand beträgt  $3$  cm. Die Eigenlast des Unterzuges wird um seinen Plattenanteil reduziert.



Bemessungsvorgaben und Betonstahlbeschreibung der Platte (Querschnitt 1):

- Randabstand des Betonstahls für x- und y-Richtung der oberen (1.) und unteren (2.) Lage:  $0,03$  m
- Biegebemessungsmodus: *Standard*
- Stahlgüte: *500S*
- Nutzhöhe:  $0,17$  m
- Druckstrebenneigung  $\cot \Theta$ :  $1,0$
- Biegezugbewehrung  $A_{sI}$  für die Querkraftbemessung:  $1,88$  cm<sup>2</sup>

Bemessungsvorgaben des torsionsweichen Unterzuges (Querschnitt 2):

- Biegebemessungsmodus: *Standard*
- Stahlgüte der Bügel: *500S*
- Schubquerschnitt:  
Breite:  $0,30$  m  
Nutzhöhe:  $0,57$  m
- Druckstrebenneigung  $\cot \Theta$ :  $1,0$
- Biegezugbewehrung  $A_{sI}$  für die Querkraftbemessung:  $2,90$  cm<sup>2</sup>



**EN 1992-1-1 Einwirkungen****Standard Bemessungsgruppe****G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lastfälle

1 Eigenlast

**QN - Nutzlast, Verkehrslast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten

Nutzlasten - Kategorie A: Wohngebäude

Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,7 / 0,5 / 0,3

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

2 Verkehr Feld 1

3 Verkehr Feld 2

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

G Eigenlast

QN Nutzlast, Verkehrslast

**1. Seltene (charakteristische) Situation**

Endzustand

G Eigenlast

QN Nutzlast, Verkehrslast

**1. Quasi-ständige Situation**

Endzustand

G Eigenlast

QN Nutzlast, Verkehrslast

**Bemessungsvorgaben**

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung M R B Q T	Ermüd. S P C	Riss-br. x	De-komp. .	Spannungen Druck S P
1	XC4	Nicht vorgesp.	x x x x .	. . .	x	.	x x .
2	XC4	Nicht vorgesp.	x x x x .	. . .	x	.	x x .

(M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.

(R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.

(B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.

(Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.

(T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.

(S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.

(P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.

(C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
(ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.

fyk Stahlgüte der Bügel.

Theta Neigung der Betondruckstreben.

Pl. Balken werden wie Platten bemessen.

Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.

Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh-dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Bild 6.3 vorh. max	Abm. Vor-spg.
1	C30/37-EN	.	ST	500	1,00	.	1,88 0,00	.
2	C30/37-EN	.	ST	500	1,00	.	2,90 .	.

**Schubquerschnitte**

bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d.  
 z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
 tef Wanddicke des Torsionskastens.  
 K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl. (6.29).

Qu.	Breite [m]		Nutzbreite		Höhe [m]		Nutzhöhe		Torsionsquerschn. [m]			
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h	h.nom	d [m]	kd	z1	z2	tef	K.
1	1,000	.	.	.	0,200	.	0,170	0,90	.	.	.	.
2	0,300	.	0,270	0,90	0,600	.	0,570	0,90	0,540	0,240	0,060	.

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
 Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
 k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
 kt Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung bei Berechnung der Rissbreite.  
 Faktor Abminderungsfaktor für fctm nach Kap. 7.3.2 (As,min) bzw. 7.3.4 (wk).  
 sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (7.11).

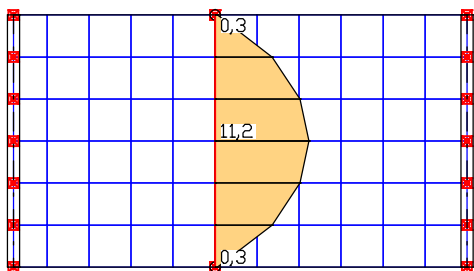
Qu.	wmax	ds	Beiwerte			sr,max	fctm-Faktor		Kombination für Nachweis	
	[mm]	[mm]	Xil	k	kt	[mm]	As,min	wk	As,min	wk
1	0,30	10,0	.	1,00	0,4	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse
2	0,30	10,0	.	1,00	0,4	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

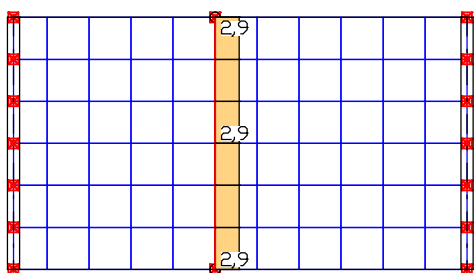
Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.  
 Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.  
 (CK), (QK) Charakteristische, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	fck(t)	zul.sigma.c(t)	zul.sigma.c	zul.sigma.s	Dekompression
	[MN/m <sup>2</sup> ]	(CK, QK)	(CK)	(CK)	
1	.	.	0,60 fck	0,80 fyk	.
2	.	.	0,60 fck	0,80 fyk	.

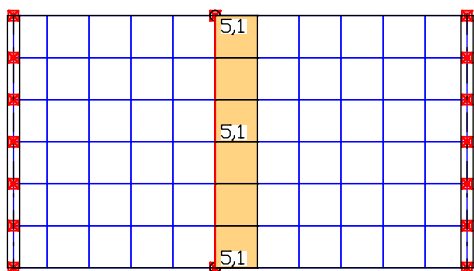
In den nachfolgenden Abbildungen sind die ermittelten Bewehrungen dargestellt.



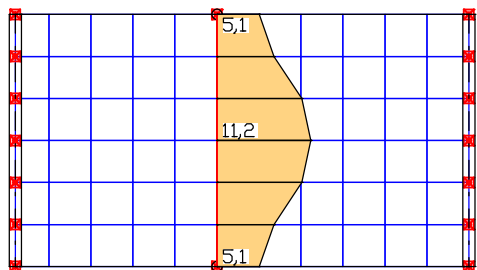
Längsbewehrung der Stäbe im Grenzzustand der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>]



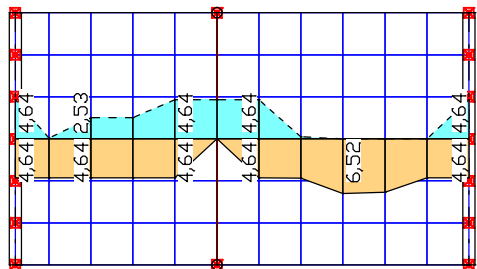
Längsbewehrung der Stäbe zur Sicherstellung der Robustheit (Duktilität) [cm<sup>2</sup>]



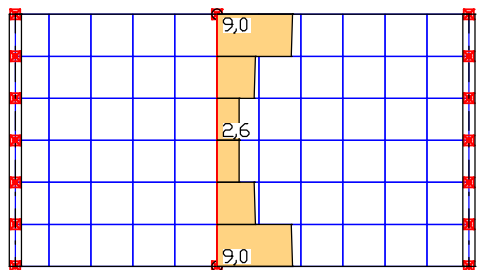
Längsbewehrung der Stäbe zur Begrenzung der Rissbreite [cm<sup>2</sup>]



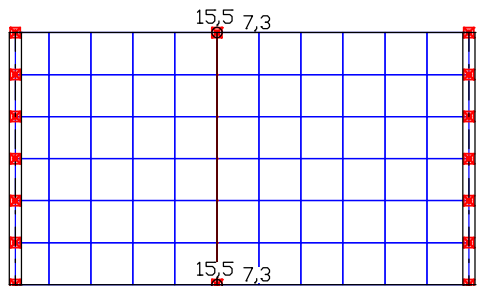
Maximale Längsbewehrung der Stäbe [cm²]



Maximale Plattenbewehrung in Schnittrichtung aus den Nachweisen der Robustheit (Duktilität), der Rissbreite und der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit [cm²/m]



Querkraftbewehrung der Stäbe [cm²/m]



An den Knoten gemittelte Querkraftbewehrung der Platte [cm²/m²]

Nachfolgend ist für die Feldmitte des Unterzuges ein Auszug des ausführlichen Protokolls wiedergegeben.

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach EN 1992-2, 6.1 (109) (Charakt. K.)
  - f<sub>ctm</sub> Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit [MN/m²]
  - z<sub>s,o/u</sub> Hebelarm der inneren Kräfte oben/unten mit z<sub>s</sub>=0,9\*d [m]
  - f<sub>yk,o/u</sub> Festigkeit der Längsbewehrung oben/unten [MN/m²]
  - max Sc Maximale Betonrandspannung aus Charakt. K. [MN/m²]
- (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach 7.3.2 zur Begrenzung der Rissbreite
  - Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert
  - w<sub>max</sub> Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]
  - d<sub>s</sub> Größter vorhandener Stabdurchmesser [mm]
  - k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen
  - f<sub>ct,eff</sub> Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung [MN/m²]
  - k<sub>c</sub> Beiwert zur Berücksichtig. der Spannungsverteilung in der Zugzone gemäß Gl. (7.3), für Rechteckqu. gemäß Gl. (7.2)
  - max Sc Maximale Betonrandspannung aus Einwirkungskombination [MN/m²]
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit
  - Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert
  - In Querschnittsteilen nach 6.1.(5) wird die Betonstauchung nicht begrenzt
  - Die Mindestlängsbewehrung nach 9.2.1.1 und 9.3.1.1 wird nicht ermittelt
  - Bei Druckgliedern wird die Mindestbewehrung nach 9.5.2 berücksichtigt
  - f<sub>ck</sub> Betonfestigkeit für Bemessung [MN/m²]

**Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - C30/37-EN  
 Stahl 2; Bemessungsmodus: Standard  
 (M) fctm=2,9; zs,o/u=0,513/0,513; fyk,o/u=500/500  
 (R) wmax=0,3; ds=10; k=1; fct,eff=2,9  
 (B) fck=30

Querschnittswerte	A [m²]	ys [m]	zs [m]	Iy [m4]	Iz [m4]	Iyz[m4]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
1	: 0,00	69,95	0,00
2	: 0,00	196,53	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	: L1
2	: L1+L2+L3

**1. Quasi-ständige Kombination (QK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
1	: 0,00	69,95	0,00
2	: 0,00	107,92	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	: L1
2	: L1+0,30*L2+0,30*L3

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	: 0,00	284,31	0,00
5	: 0,00	69,95	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: 1,35*L1+1,50*L2+1,50*L3
5	: L1

**Nachweis der Längsbewehrung**

Bewehrung	Nx	My	Mz	max Sc	kc	Ap'	erf.As	Situation
Lage Typ	[kN]	[kNm]	[kNm]	[MN/m²]		[cm²]	[cm²]	
1	M	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	CK.1,1
	R	0,00	69,95	0,00	2,75	.	0,00	QK.1,1
	B	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	SK.1,5
2	M	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	CK.1,1
	R	0,00	69,95	0,00	2,75	.	0,00	QK.1,1
	B	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	SK.1,5
3	M	0,00	196,53	0,00	7,73	.	1,44	CK.1,2
	R	0,00	107,92	0,00	4,25	0,50	2,53	QK.1,2
	B	0,00	284,31	0,00	.	.	5,60	SK.1,2
4	M	0,00	196,53	0,00	7,73	.	1,44	CK.1,2
	R	0,00	107,92	0,00	4,25	0,50	2,53	QK.1,2
	B	0,00	284,31	0,00	.	.	5,60	SK.1,2

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach Gl. (9.5N) wird berücksichtigt.

bw	Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus Qz und Mx [m]
bn	Statisch wirksame Breite zur Schubbemessung für Qy [m]
kb	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn
h	Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus Qy und Mx [m]
d	Statisch wirksame Höhe zur Schubbemessung für Qz [m]
kd	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d
Neigung	Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Längsachse
Asl vorh.	Anrechenbare Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm²]
Qy, Qz	Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]
VRdc	Aufnehmbare Querkraft ohne Querkraftbew. nach 6.2.2 (1) [kN]
VRdmax	Aufnehmbare Querkraft der Druckstreben nach 6.2.3 (3) [kN]
z	Innerer Hebelarm z=kb*bn bzw. z=kd*d [m]
Asb.y,z	Erf. Bügelbewehrung aus Qy bzw. Qz [cm²/m]
Asl	Erf. Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm²] für erf. Asb
Delta Ftd	Zugkraftanteil in der Längsbew. infolge Querkraft gemäß Gl. (6.18)

**Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - C30/37-EN  
 bw/bn/kb=0,3/0,27/0,9; h/d/kd=0,6/0,57/0,9  
 fyk=500; Asl vorh./max=2,9/0

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Mx[kNm]	Qy[kN]	Qz[kN]
2	: 0,00	284,31	0,00	0,00	0,00	-30,79

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: 1,35*L1+1,50*L2+1,50*L3

**Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit**

Einwirkung	z	Nei- gung	Q/ VRdc	Asb.y [cm <sup>2</sup> /m]	Asb.z [cm <sup>2</sup> /m]	Asb.T [cm <sup>2</sup> /m]	Asl.T [cm <sup>2</sup> ]	Asl [cm <sup>2</sup> ]	Situation
max	[m]								
Qy	: 0,24	1,00	0,00	0,00	.	.	.	2,90	-, -
Qz	: 0,51	1,00	0,47	.	2,63	.	.	2,90	SK.1,2

Einwirkung	z	Nei- gung	Qy/ VRdmax	Qz/ VRdmax	Mx/ TRdmax	Q/VRd+ Mx/TRd	Delta [kN]	Ftd [kN]	Situation
max	[m]								
Qy	: 0,24	1,00	0,00	.	.	.	.	0,00	-, -
Qz	: 0,51	1,00	.	0,04	.	.	.	15,40	SK.1,2

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.

(CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

wmax	Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]
ds	Größter vorhandener Stabdurchmesser [mm]
fct,eff	Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.c	Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m <sup>2</sup> ]
wk	Rechenwert der Rissbreite nach 7.3.4 [mm]
sr,max	Vorgegebener / berechneter max. Rissabstand nach 7.3.4 (3) [mm]
Ac,eff	Wirkungsbereich der Bewehrung [m <sup>2</sup> ] gem. Bild 7.1
As,eff	Betonstahl innerhalb Ac,eff [cm <sup>2</sup> ]
Ap,eff	Im Verbund liegender Spannstahl innerhalb Ac,eff [cm <sup>2</sup> ]
Sigma.s	Betonstahlspannung im Zustand II [MN/m <sup>2</sup> ]
kt	Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung nach 7.3.4 (2)

**Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)

Querschnitt 2: Polygon - C30/37-EN

wmax=0,3; ds=10; fct,eff=2,9; kt=0,4

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

**1. Quasi-ständige Kombination (QK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
2	: 0,00	107,92	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: L1+0,30*L2+0,30*L3

**Nachweis der Rissbreite für Bewehrungslage 3 (unten)**

Nx	: 0,00 kN	As,eff	: 11,19 cm <sup>2</sup>
My	: 107,92 kNm	Ap,eff	: . cm <sup>2</sup>
Mz	: 0,00 kNm	Ac,eff	: 0,023 m <sup>2</sup>
Sigma.c	: 4,25 MN/m <sup>2</sup>	Sigma.s	: 175,61 MN/m <sup>2</sup>
Situation	: QK.1,2	sr,max	: 119,23 mm
		wk	: 0,09 zul. 0,30 mm

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert fctm überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.

fck	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.x,min	Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.x,zul	= 0,60*fck für Charakt. K. (CK) nach 7.2 (2)
oben, unten	Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

**Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)

Querschnitt 2: Polygon - C30/37-EN

0,6\*fck=18

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	: 0,00	69,95	0,00
2	: 0,00	196,53	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	: L1
2	: L1+L2+L3

**Nachweis der Betondruckspannungen für die Charakteristische (seltene) Kombination**

Seite	Qu.- Pkt.	min [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	Zustand	Situation
oben	1 (II)	-6,58	-18,00	End	CK.1,2		
unten	7 (II)	0,00	-18,00	End	CK.1,1		

**Nachweis der Stahlspannungen**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nr. der Lage, Charakt. K. (CK)  
 fck Betonfestigkeit zur Ermittlung des Dehnungszustands [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.s,zul = 0,80 \* fyk bzw. 1,0 \* fyk (CK) nach 7.2 (5)

**Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - C30/37-EN  
 fck=30; Stahl 2; 0,8\*fyk,o/u=400/400

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G+QN, Endzustand**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	0,00	69,95	0,00
2	0,00	196,53	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	L1
2	L1+L2+L3

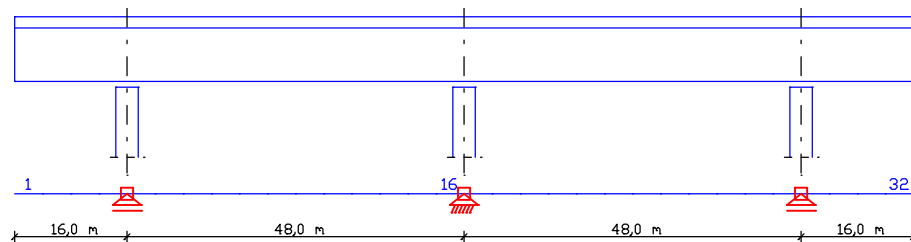
**Nachweis der Stahlspannungen**

Stahl Typ	Nr.	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	As [cm <sup>2</sup> ]	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	Situation
S	1	0,00	69,95	0,00	0,00	.	400,00	CK.1,1
S	2	0,00	69,95	0,00	0,00	.	400,00	CK.1,1
S	3	0,00	196,53	0,00	5,60	319,92	400,00	CK.1,2
S	4	0,00	196,53	0,00	5,60	319,92	400,00	CK.1,2

**Vorgespannte Dachkonstruktion**

In diesem Beispiel wird eine weitgespannte Dachkonstruktion einer Eingangshalle behandelt, die als Durchlaufträger über zwei Felder mit beidseitigem Kragarm ausgebildet wird. Als Querschnitt wird ein Plattenbalken gewählt. In der folgenden Abbildung ist das System in Längs- und Querschnitt dargestellt.

Die Dachkonstruktion erhält in Längsrichtung eine beschränkte Vorspannung mit nachträglichem Verbund. In Querrichtung wird aus wirtschaftlichen Gründen auf die Anordnung einer Vorspannung verzichtet. Die Konstruktion wird für die Expositionsklasse XC1 ausgelegt. Bei dieser ist nach EN 1992-1-1, Tabelle 7.1N kein Nachweis der Dekompression erforderlich.

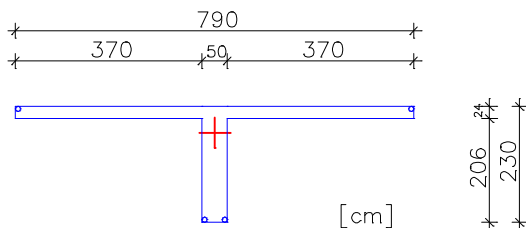


Statisches System und Abmessungen (Längs- und Querschnitt)

**Material**

Beton C45/55-EN  
 Betonstahl BSt 500, Achsabstand vom Rand 5 cm

**Querschnitt**



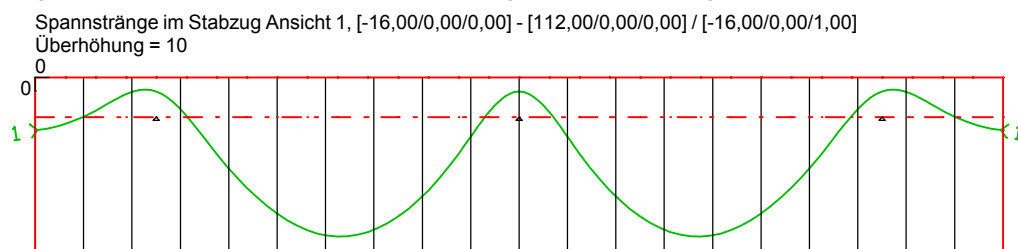
### Spannstahl und Spannverfahren

Spannstahlgüte	St 1500/1770
Zulassung des Spannverfahrens	EC2
Anzahl der Spannlieder im Bündel	4
Querschnittsfläche $A_p$	1800 mm <sup>2</sup>
E-Modul des Spannstahls	195000 MN/m <sup>2</sup>
0,1%-Dehngrenze (Streckgrenze) des Spannstahls $f_{p0,1k}$	1500 MN/m <sup>2</sup>
Zugfestigkeit des Spannstahls $f_{pk}$	1770 MN/m <sup>2</sup>
Zulässige Vorspannkraft eines Spannlieds $P_{m0}$	2295 kN
Reibungsbeiwerte beim Anspannen und Nachlassen $\mu$	0,2
Ungewollter Umlenkwinkel eines Spannlieds $\beta'$	0,3 °/m
Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker	6 mm
Hüllrohrdurchmesser $d_h$	82 mm

### Streufraktoren der internen Vorspannung

Bauzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,9
Endzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,9

Die Spannliedführung kann der nächsten Abbildung entnommen werden. Es werden 4 Bündelspannlieder angeordnet, die über die gesamte Trägerlänge durchlaufen und an beiden Trägerenden angespannt werden. Spannverfahren, Spannweisung und Spannkraftverlauf für einen Spannstrang sind ebenfalls dargestellt.



Spannstrangordinaten zv [cm] an den Stützstellen

xv	0,00	6,40	12,80	19,20	25,60	32,00	38,40	44,80	51,20	57,60	64,00	70,40	76,80	83,20	89,60	96,00	102,40	108,80	115,20	121,60	128,00
1	70,0	52,0	19,2	42,0	120,2	180,1	208,8	201,5	157,4	78,3	18,5	78,3	157,4	201,5	208,8	180,1	120,2	42,0	19,2	52,0	70,0

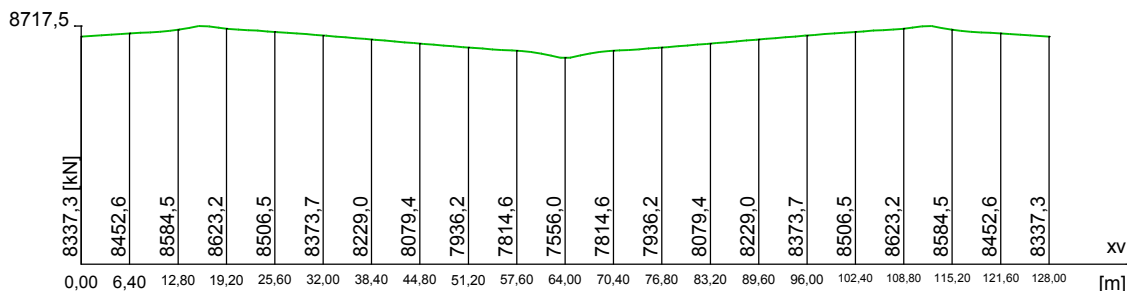
Spannkraftverlauf Spannstrang 1 (4 Spannlied(er), l = 128,41 m)

Spannverfahren 1 - Beispiel. Zulassung nach EC2.

$P_{m0} = 2295,0$  kN,  $A_p = 1800,0$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_a = 0,20$ , Winkel  $\beta' = 0,30$  °/m  
E-Modul = 195000 MN/m<sup>2</sup>,  $A_h = 5281,0$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_n = 0,20$ , Schlupf = 6,00 mm

Spannweisung 1 - Beispiel

Spannanker	:	Anfang	Ende
Bez. Spannkraft	:	1,000	1,000
Spannkraft [kN]	:	2295,0	2295,0
Längung [mm]	:	694,5	72,8



Spannliedführung und Spannkraftverlauf im Längsschnitt (4 Spannlieder)

### Lasten

Lastfall 1	Eigenlast (G1).
Lastfall 2	Ausbaulasten $q=11,06$ kN/m (G2).
Lastfall 3	Verkehrslast (Schneelast) $q=7,90$ kN/m (Q).
Lastfall 10	Vorspannung (P).
Lastfall 15	Kriecherzeugende Dauerlast: $G1+P+G2$
Lastfall 20	Kriechen und Schwinden (CSR). Beiwerte: $\varphi_{t_{\infty}} = 2,55$ ; $\rho = 0,8$ ; $\epsilon_{t_{\infty}} = -24,8 \cdot 10^{-5}$ Kriecherzeugender Dauerlastfall: 15 Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl wird berücksichtigt.

### EN 1992-1-1 Einwirkungen

#### Standard Bemessungsgruppe

##### G - Eigenlast

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1,35 / 1$

##### Lastfälle

1 Eigenlast

##### G - Ausbaulasten

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1,35 / 1$

##### Lastfälle

2 Ausbaulasten

##### P - Vorspannung

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1 / 1$

##### Lastfälle interne Vorspannung

10 Vorspannung

##### CSR1 - Kriechen, Schwinden, Relaxation

Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 4,5 %.

##### Lastfälle

20 Kriechen und Schwinden

##### QS - Schnee- und Eislast

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1,5 / 0$

Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für: Hochbauten  
 Schneelasten - Orte in CEN-Mitgliedsstaaten über 1000 m ü. NN  
 $\psi_0 / \psi_1 / \psi_2 = 0,7 / 0,5 / 0,2$

##### Lastfälle 1. Variante, inklusiv

3 Schneelast

Im vorliegenden Beispiel werden alle möglichen Kombinationen von Lastfällen gebildet und bemessen. Diese Methode wird in den Berechnungseinstellungen gewählt, ist aber bei einer größeren Anzahl von Lastfällen sehr zeitaufwendig.

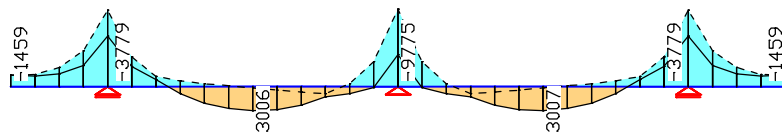
Nachfolgend ist beispielhaft der Verlauf der Biegemomente  $M_y$  für die Bemessungssituationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit dargestellt.



### 1. Ständige und vorübergehende Situation - Bauzustand

Bauzustand - Unverpresst

G Eigenlast  
P Vorspannung

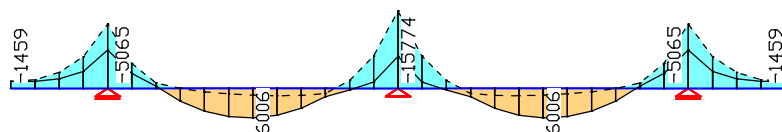


Biegemoment  $M_y$  [kNm]

### 2. Ständige und vorübergehende Situation - t0

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
QS Schnee- und Eislast

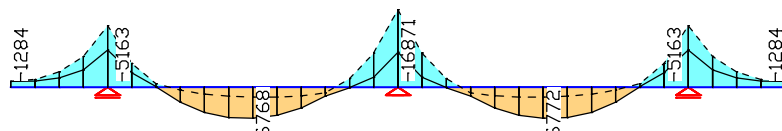


Biegemoment  $M_y$  [kNm]

### 3. Ständige und vorübergehende Situation - too

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
CSR1 Kriechen, Schwinden, Relaxation  
QS Schnee- und Eislast



Biegemoment  $M_y$  [kNm]

#### Bemessungsvorgaben

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung	Ermüd.	Riss-	De-	Spannungen
			M R B Q T	S P C	br.	komp.	Druck S P
1	XC1	Nachtr. Verbund	x x x x .	. . .	x	.	x x x

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

#### Streuung der Wirkungen aus Vorspannung

Die Streuung der Vorspannung wird bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:  
 - Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen  
 - Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite, Nachweis der Rissbreite  
 - Nachweis der Stahlspannungen  
 Alle anderen Nachweise benutzen den Mittelwert  $P_{m,t}$  der Vorspannung.

Qu.	Vorspannung des Bauteils	Bauzustand	Endzustand
		r.sup r.inf	r.sup r.inf
1	Nachtr. Verbund	1,10 0,90	1,10 0,90

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
(ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.
- rho.w Faktor für Mindestbewehrungsgrad rho.w,min nach Kap. 9.3.2(2).
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh- dichte [kg/m³]	Bem.	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Bild 6.3 vorh. max	Fak. rho.w	Red. Vor- spg.
1	C45/55-EN	.	ST	500	2,50	.	0,00	1,00	.

**Schubquerschnitte**

- bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d.
- z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.
- tef Wanddicke des Torsionskastens.
- K. Kastquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl.(6.29).

Qu.	Breite [m]	Nutzbreite	Höhe [m]	Nutzhöhe	Torsionsquerschn. [m]							
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h	h.nom	d [m]	kd	z1	z2	tef	K.
1	0,500	0,500	0,450	0,90	2,300	2,300	2,250	0,90	2,200	0,400	0,100	.

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

- ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.
- Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.
- k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.
- kt Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung bei Berechnung der Rissbreite.
- Faktor Abminderungsfaktor für fctm nach Kap. 7.3.2 (As,min) bzw. 7.3.4 (wk).
- sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (7.11).

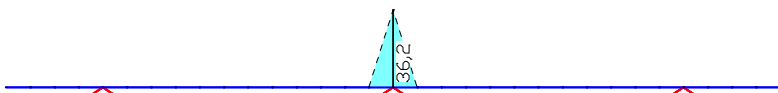
Qu.	wmax [mm]	ds [mm]	Beiwerte Xil	k	kt	sr,max [mm]	fctm-Faktor As,min	wk	Kombination für Nachweis As,min	wk
1	0,20	20,0	0,27	1,00	0,4	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

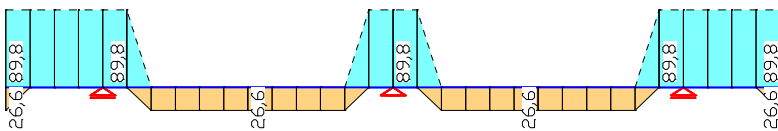
- fck(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
- Sigma.c(t) Betondruckspannung zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
- Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.
- Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.
- (CK), (QK) Charakteristische, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	fck(t) [MN/m²]	zul.sigma.c(t) (CK, QK)	zul.sigma.c (CK) (QK)	zul.sigma.s (CK) (QK)	Dekompression Spannung
1	45,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,80 fyk	.

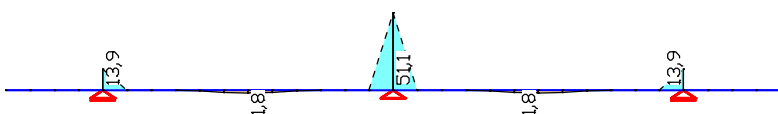
Den Verlauf der erforderlichen Biege- und Schubbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen.



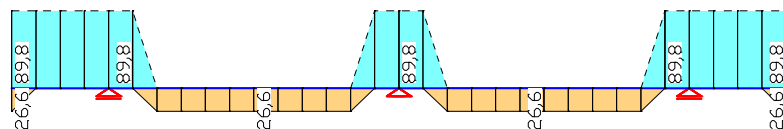
Längsbewehrung  $A_s$  aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit [cm²] (obere Bewehrung strichliert).



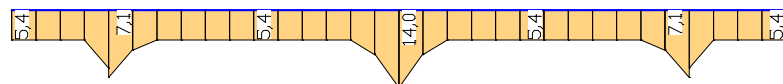
Mindestbewehrung  $A_s$  zur Sicherstellung der Robustheit (Duktilität) [cm²] (obere Bewehrung strichliert).



Bewehrung  $A_s$  zur Begrenzung der Rissbreite [cm²] (obere Bewehrung strichliert).



Umhüllende Längsbewehrung  $A_s$  aus den Nachweisen [cm<sup>2</sup>]  
(obere Bewehrung strichliert).



Querkraftbewehrung  $A_{sb,z}$  in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>/m].

Auf den folgenden Seiten ist das ausführliche Nachweisprotokoll für Stab 16 am Ort 2 (Mittelstütze) in Auszügen wieder gegeben.

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach EN 1992-2, 6.1 (109) (Charakt. K.)
  - fctm Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit [MN/m<sup>2</sup>]
  - zs,o/u Hebelarm der inneren Kräfte oben/unten mit zs=0,9\*d [m]
  - fyk,o/u Festigkeit der Längsbewehrung oben/unten [MN/m<sup>2</sup>]
  - max Sc Maximale Betonrandspannung aus Charakt. K. [MN/m<sup>2</sup>]  
ohne den statisch bestimmten Anteil aus Vorspannung
- (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach 7.3.2 zur Begrenzung der Rissbreite  
Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert
  - wmax Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]
  - ds Größter vorhandener Stabdurchmesser [mm]
  - k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen
  - fct,eff Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung [MN/m<sup>2</sup>]
  - kc Beiwert zur Berücksichtig. der Spannungsverteilung in der Zugzone gemäß Gl. (7.3), für Rechteckqu. gemäß Gl. (7.2)
  - Ap' Teil der Spannstahlfläche  $\chi_{l1} \cdot A_p$ , um den erf.As verringert wurde
  - $\chi_{l1}$  Verbundbeiwert für Spannstahl gemäß Gl. (7.5)
  - max Sc Maximale Betonrandspannung aus Einwirkungskombination [MN/m<sup>2</sup>]
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit  
Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert  
In Querschnittsteilen nach 6.1.(5) wird die Betonstauchung nicht begrenzt  
Die Mindestlängsbewehrung nach 9.2.1.1 und 9.3.1.1 wird nicht ermittelt  
Bei Druckgliedern wird die Mindestbewehrung nach 9.5.2 berücksichtigt
  - fck Betonfestigkeit für Bemessung [MN/m<sup>2</sup>]
  - N0, M0 Statisch bestimmter Anteil der Spannstränge im Verbund [kN, kNm]
  - fp0,1k Charakteristischer Wert der 0,1%-Dehngrenze des Spannstahls [MN/m<sup>2</sup>]
  - fpk Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Spannstahls [MN/m<sup>2</sup>]

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
Stahl 1; Bemessungsmodus: Standard  
(M) fctm=3,8; zs,o/u=2,025/2,025; fyk,o/u=500/500  
(R) wmax=0,2; ds=20; k=1; fct,eff=3,8;  $\chi_{l1}$ =0,27  
r.sup/inf(Bau)=1,1/0,9; r.sup/inf(End)=1,1/0,9  
(B) fck=45

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz[m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2596	9,8822	0,0000

**Spannstränge im Verbund**

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1500	1770	3,950	0,185	7200	82	7555,99	0,00

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 1 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
1	-7555,93	-4040,19	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	L1+L10

**2. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,69	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6823,71 kN; My0=2320,06; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6714,14	-9384,61	0,00	109,56	-11704,67	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	L1+L2+0,96*L10+L20+L3

**1. Häufige Kombination (HK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Häufige Kombination (HK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Häufige Kombination (HK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6042,73	-9624,61	0,00 r.inf

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	L1+L2+0,96*L10+L20+0,50*L3

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-7555,93	-4040,19	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	L1+L10

**2. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,69	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6823,71 kN; My0=2320,06; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6714,14	-16871,48	0,00	109,56	-19191,54	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	1,35*L1+1,35*L2+0,96*L10+L20+1,50*L3

**Nachweis der Längsbewehrung**

Charakt. K.: max Sc = 1,63 < 3,80 MN/m<sup>2</sup> => keine Mindestrissbewehrung erf.

Bewehrung Lage	Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	max Sc [MN/m <sup>2</sup> ]	kc	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	Situation
1	M	109,56	-11704,67	0,00	4,93	.	.	44,91	CK.3,2
	R	-6042,73	-9624,61	0,00	.	.	.	25,54!	HK.3,2
	B	-6714,14	-16871,48	0,00	.	.	.	18,11	SK.3,2
2	M	109,56	-11704,67	0,00	4,93	.	.	44,91	CK.3,2
	R	-6042,73	-9624,61	0,00	.	.	.	25,54!	HK.3,2
	B	-6714,14	-16871,48	0,00	.	.	.	18,11	SK.3,2
3	M	0,06	-6609,23	0,00	.	.	.	0,00	CK.1,1
	R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	.	0,00	-, -
	B	-7555,93	-4040,19	0,00	.	.	.	0,00	SK.1,2
4	M	0,06	-6609,23	0,00	.	.	.	0,00	CK.1,1
	R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	.	0,00	-, -
	B	-7555,93	-4040,19	0,00	.	.	.	0,00	SK.1,2

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach Gl. (9.5N) wird berücksichtigt.

Ac	Querschnittsfläche zur Berechn. der Betonspannung aus Längskraft [m <sup>2</sup> ]
bw	Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus Qz und Mx [m]
bw.nom	Nennwert der Breite nach Abzug der Hüllrohrdurchmesser [m]
bn	Statisch wirksame Breite zur Schubbemessung für Qy [m]
kb	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn
h	Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus Qy und Mx [m]
h.nom	Nennwert der Höhe nach Abzug der Hüllrohrdurchmesser [m]
d	Statisch wirksame Höhe zur Schubbemessung für Qz [m]
kd	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d
Neigung	Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Längsachse
Asl vorh.	Anrechenbare Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm <sup>2</sup> ]
rhov,min	Mindestbewehrungsgrad der Querkraftbewehrung gem. Gl. (9.5N)
Qy, Qz	Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]
VRdc	Aufnehmbare Querkraft ohne Querkraftbew. nach 6.2.2 (1) [kN]
VRdmax	Aufnehmbare Querkraft der Druckstreben nach 6.2.3 (3) [kN]
z	Innerer Hebelarm z=kb*bn bzw. z=kd*d [m]
Asb.y,z	Erf. Bügelbewehrung aus Qy bzw. Qz [cm <sup>2</sup> /m]
Asl	Erf. Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm <sup>2</sup> ] für erf. Asb
Delta Ftd	Zugkraftanteil in der Längsbew. infolge Querkraft gemäß Gl. (6.18)

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
 bw/bw.nom/bn/kb=0,5/0,5/0,45/0,9; h/h.nom/d/kd=2,3/2,3/2,25/0,9  
 Ac=2,926; fyk=500; Asl vorh./max=0/0; rhov,min=1\*(0,08\*fck<sup>2/3</sup>/fyk)

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen							
Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]	
2	-7555,93	-15774,10	0,00	0,00	0,00	-3029,62	

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	1,35*L1+1,35*L2+L10+1,50*L3

**3. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen							
Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]	
2	-6714,14	-16871,48	0,00	0,00	0,00	-3073,60	

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	1,35*L1+1,35*L2+0,96*L10+L20+1,50*L3

**Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit**

Einwirkung	z	Nei-	Q/	Asb.y	Asb.z	Asb.T	Asl.T	Asl	Situation
max	[m]	gung	VRdc	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	
Qy	: 0,41	2,50	0,00	0,00	.	.	.	0,00	SK.2,2
Qz	: 2,02	2,50	3,95	.	13,96	.	.	0,00	SK.3,2

Einwirkung	z	Nei-	Qy/	Qz/	Mx/	Q/VRd+	Delta Ftd	Situation
max	[m]	gung	VRdmax	VRdmax	TRdmax	Mx/TRd	[kN]	
Qy	: 0,41	2,50	0,00	.	.	.	0,00	SK.2,2
Qz	: 2,02	2,50	.	0,55	.	.	3842,00	SK.3,2

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.  
 Maßgebend ist die endgültige Längsbewehrung als Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung inklusive einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis.

(CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

wmax	Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]
ds	Größter vorhandener Stabdurchmesser [mm]
fct,eff	Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.c	Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m <sup>2</sup> ]
wk	Rechenwert der Rissbreite nach 7.3.4 [mm]
sr,max	Vorgegebener / berechneter max. Rissabstand nach 7.3.4 (3) [mm]
Ac,eff	Wirkungsbereich der Bewehrung [m <sup>2</sup> ] gem. Bild 7.1
As,eff	Betonstahl innerhalb Ac,eff [cm <sup>2</sup> ]
Ap,eff	Im Verbund liegender Spannstahl innerhalb Ac,eff [cm <sup>2</sup> ]
Sigma.s	Betonstahlspannung im Zustand II [MN/m <sup>2</sup> ]
kt	Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung nach 7.3.4 (2)
Xil	Verbundbeiwert für Spannstahl gemäß Gl. (7.5)

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
 wmax=0,2; ds=20; fct,eff=3,8; kt=0,4; Xil=0,27  
 r.sup/inf (Bau)=1,1/0,9; r.sup/inf (End)=1,1/0,9

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2596	9,8822	0,0000

**Spannstränge im Verbund**

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1500	1770	3,950	0,185	7200	82	7555,99	0,00

**1. Häufige Kombination (HK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Häufige Kombination (HK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Häufige Kombination (HK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,69	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat.best.Anteil (P+CSR)\*r.inf: Nx0=-6141,34 kN; My0=2088,05; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6042,73	-9624,61	0,00	98,60	-11712,67	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	L1+L2+0,96*L10+L20+0,50*L3

**Nachweis der Rissbreite für Bewehrungslage 1 (oben)**

Nx	: -6042,73 kN	As,eff	: 89,82 cm <sup>2</sup>
My	: -9624,61 kNm	Ap,eff	: 0,00 cm <sup>2</sup>
Mz	: 0,00 kNm	Ac,eff	: 0,987 m <sup>2</sup>
Sigma.c	: 1,96 MN/m <sup>2</sup>	Sigma.s	: 68,27 MN/m <sup>2</sup>
Situation	: HK.3,2	sr,max	: 509,64 mm
		wk	: 0,10 zul. 0,20 mm

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert fctm überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.

fck	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons [MN/m <sup>2</sup> ]
fck(t)	Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung (Situation G+P) nach 5.10.2.2 (5) [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.x,min	Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m <sup>2</sup> ]
Sigma.x,zul	= 0,60*fck für Charakt. K. (CK) nach 7.2 (2)
oben, unten	Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
 0,6\*fck=27; 0,45\*fck(t)=20,25  
 r.sup/inf(Bau)=1,1/0,9; r.sup/inf(End)=1,1/0,9

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2596	9,8822	0,0000

**Spannstränge im Verbund**

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1500	1770	3,950	0,185	7200	82	7555,99	0,00

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
1	-8311,52	-2805,65	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	L1+L10

**2. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,69	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat.best.Anteil (P+CSR)\*r.inf: Nx0=-6141,34 kN; My0=2088,05; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 4 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6042,73	-10509,41	0,00	98,61	-12597,47	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz Kombination  
2 : L1+L2+0,96\*L10+L20+L3

#### Nachweis der Betondruckspannungen für die Charakteristische (seltene) Kombination

Seite	Qu.-Pkt.	min Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	Zustand	Situation
oben	2 (I)	-1,68	-20,25	Bau	CK.1,1
unten	9 (I)	-16,88	-27,00	End	CK.3,2

#### Nachweis der Stahlspannungen

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Spannstränge ohne Verbund bzw. Situationen vor dem Verpressen wird die Spannstrahlspannung gemäß Gl. (5.43) nachgewiesen.

Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nr. der Lage, Charakt. K. (CK)  
 Typ P Spannstrahl, Nr. des Spannstrangs, Charakt. K. (CK)  
 N0, M0 Statisch bestimmter Anteil der Spannstränge im Verbund [kN, kNm]  
 fck Betonfestigkeit zur Ermittlung des Dehnungszustands [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.s,zul = 0,80 \* fyk bzw. 1,0 \* fyk (CK) nach 7.2 (5)  
 Sigma.p,zul = 0,75 \* fpk nach 7.2 (5)

#### Ort 2

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
 fck=45; Stahl 1; 0,8\*fyk,o/u=400/400

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2596	9,8822	0,0000

#### Spannstränge im Verbund

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1500	1770	3,950	0,185	7200	82	7555,99	0,00

#### 1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 1 Schnittkraftsätzen  
 Satz Nx[kN] My[kNm] Mz[kNm]  
 1 : -7555,93 -4040,19 0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze  
 Satz Kombination  
 1 : L1+L10

#### 2. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

#### 3. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen  
 Nr. CSR[%] Nr. CSR[%] Nr. CSR[%] Nr. CSR[%] Nr. CSR[%]  
 1 9,69 -.- -.- -.- -.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6823,71 kN; My0=2320,06; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen  
 Betonschnittgrößen Verbundschnittgrößen  
 Satz Nx[kN] My[kNm] Mz[kNm] Nx[kN] My[kNm] Mz[kNm]  
 2 : -6714,14 -9384,61 0,00 109,56 -11704,67 0,00

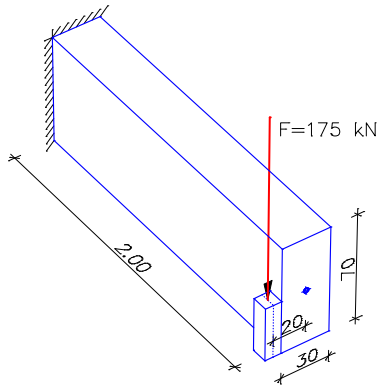
Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze  
 Satz Kombination  
 2 : L1+L2+0,96\*L10+L20+L3

#### Nachweis der Stahlspannungen

Stahl Typ	Nr.	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	As [cm <sup>2</sup> ]	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	Situation
S	1	-6714,14	-9384,61	0,00	44,91	43,29	400,00	CK.3,2
S	2	-6714,14	-9384,61	0,00	44,91	43,28	400,00	CK.3,2
S	3	-7555,93	-4040,19	0,00	0,00	.	400,00	CK.1,1
S	4	-7555,93	-4040,19	0,00	0,00	.	400,00	CK.1,1
P	1	.	.	.	72,00	1049,44	1275,00	CK.1,--

# Torsionsbalken

Der dargestellte Kragarm wird durch eine exzentrisch angreifende Last  $F = 175 \text{ kN}$  beansprucht. Die erforderliche Schub-, Torsionslängs- und Bügelbewehrung sind im nachfolgenden Protokoll aufgeführt.



Systemzeichnung

## Bemessung nach EN 1992-1-1:2010

### Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung

M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
 (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.  
 fyk Stahlgüte der Bügel.  
 Theta Neigung der Betondruckstreben.  
 Pl. Balken werden wie Platten bemessen.  
 Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.  
 Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu. Beton	Roh- dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Bild 6.3 vorh. max	Abm. Vor- spg.
1 C35/45-EN	.	.	500	1,00	.	0,00	.

### Schubquerschnitte

bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d.  
 z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
 tef Wanddicke des Torsionskastens.  
 K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl.(6.29).

Qu.	Breite [m]	Nutzhöhe	Nutzhöhe	Torsionsquerschn. [m]
bw	bw.nom	bn [m]	kd	z1 z2 tef K.
1	0,300	.	0,245 0,90	0,700 . 0,645 0,90 0,590 0,190 0,110 .

### Nachweis der Schubbewehrung

Der Mindestbewehrungsgrad nach Gl. (9.5N) wird berücksichtigt.

bw Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus  $Q_z$  und  $M_x$  [m]  
 bn Statisch wirksame Breite zur Schubbemessung für  $Q_y$  [m]  
 kb Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn  
 h Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus  $Q_y$  und  $M_x$  [m]  
 d Statisch wirksame Höhe zur Schubbemessung für  $Q_z$  [m]  
 kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d  
 z1, z2 Höhe und Breite der Kernquerschnittsfläche  $A_k$  für Torsion [m]  
 tef Wanddicke des Ersatzhohlquerschnittes für Torsion [m]  
 Neigung Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Längsachse  
 Asl vorh. Anrechenbare Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm²]  
 $Q_y, Q_z$  Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]  
 VRdc Aufnehmbare Querkraft ohne Querkraftbew. nach 6.2.2 (1) [kN]  
 VRdmax Aufnehmbare Querkraft der Druckstreben nach 6.2.3 (3) [kN]  
 z Innerer Hebelarm  $z = kb \cdot bn$  bzw.  $z = kd \cdot d$  [m]  
 Asb.y,z Erf. Bügelbewehrung aus  $Q_y$  bzw.  $Q_z$  [cm²/m]  
 Asl Erf. Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 [cm²] für erf. Asb  
 Delta Ftd Zugkraftanteil in der Längsbew. infolge Querkraft gemäß Gl. (6.18)  
 $M_x$  Bemessungstorsionsmoment [kNm]  
 TRdmax Maximal aufnehmbares Torsionsmoment nach 6.3.2 (4) [kNm]  
 Asb.T Erf. Bügelbewehrung aus Torsion [cm²/m]  
 Asl.T Erf. Längsbewehrung aus Torsion [cm²]  
 fctd Bemessungswert der Betonzugfestigkeit für TRd,c in Gl. (6.31) [MN/m²]

### Ort 1

Stab 1,  $x = 0,00 \text{ m}$  (Stablänge 2,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C35/45-EN  
 Kompaktquerschnitt  $z1/z2=0,59/0,19$ ;  $tef=0,11$ ;  $fctd=1,49333$



1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G, Endzustand

Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]
Nx-	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Nx+	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
My-	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25
My+	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Mz-	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Mz+	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Mx-	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Mx+	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25
Qy-	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Qy+	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Qz-	0,00	-350,00	0,00	35,00	0,00	175,00
Qz+	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25

Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit

Einwirkung	z	Nei-	Q/	Asb.y	Asb.z	Asb.T	Asl.T	Asl	Situation
max, zug.	[m]	gung	VRdc	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	
Qy, Mx	: 0,22	1,00	0,00	0,00	.	3,59	5,60	0,00	-, -
Mx, Qy	: 0,22	1,00	0,00	0,00	.	4,85	7,56	0,00	SK.1, Qz+
Qz, Mx	: 0,58	1,00	3,04	.	9,36	4,85	7,56	0,00	SK.1, Qz+
Mx, Qz	: 0,58	1,00	3,04	.	9,36	4,85	7,56	0,00	SK.1, Qz+

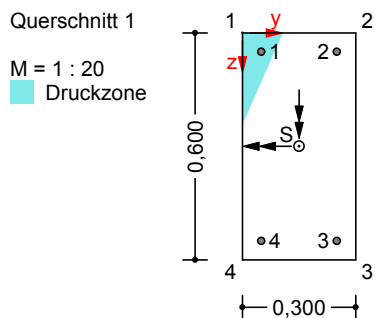
  

Einwirkung	z	Nei-	Qy/	Qz/	Mx/	Q/VRd+	Delta	Ftd	Situation
max	[m]	gung	VRdmax	VRdmax	TRdmax	Mx/TRd	[kN]		
Qy	: 0,22	1,00	0,00	.	.	.	0,00	-, -	
Qz	: 0,58	1,00	.	0,23	.	.	118,13	SK.1, Qz+	
Mx	:	1,00	.	.	0,32	.	.	SK.1, Qz+	
Qy "+" Mx	: 0,22	1,00	0,00	.	0,32	0,32	.	SK.1, Qz+	
Qz "+" Mx	: 0,58	1,00	.	0,23	0,32	0,54	.	SK.1, Qz+	

## Einzelbemessung Stahlbeton

Ein einfacher Rechteckquerschnitt wird unter Biegung und Normalkraft bemessen.

### Pos. 1 - Stahlbeton-Biegebemessung nach EN 1992-1-1: 2010



Einwirkung N = 10,00 kN; My = 67,50; Mz = 27,00 kNm  
 Widerstand N = 10,00 kN; My = 67,50; Mz = 27,00 kNm  
 Kraftsystem ys / zs = 0,150 / 0,300 m  
 Festigkeit C25/30-EN; gamma.c = 1,50; gamma.s = 1,15  
 Bemessungsart Standard  
 Bewehrung 3,51 cm<sup>2</sup>; 0,19 %; Betonfläche = 1800,00 cm<sup>2</sup>  
**Achtung Die Betonstauchung kann nicht nach Abschnitt 6.1 (5) überprüft werden.  
 Die Bewehrung enthält keine Mindestbewehrung nach Abs. 9.2.1.1 (9.1N).**

Betonquerschnitt	Punkt	y [m]	z [m]	eps[%]	sigma[MPa]	Innere Kräfte	y [m]	z [m]	F [kN]
1	0,000	0,000	-3,50	-16,67	Druck	0,030	0,069	-145,43	
2	0,107	0,000	0,00	0,00	Zug	0,212	0,518	155,43	
3	0,300	0,000	6,31	0,00	Hebelarm	0,181	0,449		
4	0,300	0,600	14,98	0,00					
	0,000	0,600	5,18	0,00					
	0,000	0,242	0,00	0,00					

Betonstahl	Punkt	y [m]	z [m]	d1 [m]	Es, fs [MPa]	Zv0 [kN]	eps[%]	sigma[MPa]	As [cm <sup>2</sup> ]
1	0,050	0,050	0,050	200000	500	0,0	-1,14	-228,48	0,00
2	0,250	0,050	0,050	200000	500	0,0	5,40	437,85	0,23
3	0,250	0,550	0,050	200000	500	0,0	12,63	444,74	2,60
4	0,050	0,550	0,050	200000	500	0,0	6,09	438,51	0,68

## Einzelbemessung Spannbeton

In diesem Beispiel soll das Ergebnis der Spannbetonbemessung nach EN 1992-1-1 des Beispiels *Vorgespannte Dachkonstruktion* mit der Einzelbemessung nach EN 1992-1-1 nachvollzogen werden.

Aus dem ausführlichen Nachweisprotokoll für Stab 16 am Ort 2 (Mittelstütze) des Beispiels können die nachweisrelevanten Werte entnommen werden.

### Ort 2

Stab 16,  $x = 4,00$  m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - C45/55-EN, 1 Spannstrang im Verbund  
 Stahl 1; Bemessungsmodus: Standard

#### Spannstränge im Verbund

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1500	1770	3,950	0,185	7200	82	7555,99	0,00

### 3. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,69	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR):  $N_{x0} = -6823,71$  kN;  $M_{y0} = 2320,06$ ;  $M_{z0} = 0,00$  kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
2	-6714,14	-16871,48	0,00	109,56	-19191,54	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: 1,35*L1+1,35*L2+0,96*L10+L20+1,50*L3

#### Nachweis der Längsbewehrung

Charakt. K.:  $\max Sc = 1,63 < 3,80$  MN/m<sup>2</sup> => keine Mindestribbewehrung erf.

Bewehrung Lage	Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	max Sc [MN/m <sup>2</sup> ]	kc	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	Situation
1	B	-6714,14	-16871,48	0,00	.	.	.	18,11	SK.3,2
2	B	-6714,14	-16871,48	0,00	.	.	.	18,11	SK.3,2
3	B	-7555,93	-4040,19	0,00	.	.	.	0,00	SK.1,2
4	B	-7555,93	-4040,19	0,00	.	.	.	0,00	SK.1,2

## Berechnungsablauf im Nachweisprogramm:

- Der statisch bestimmte Anteil aus Vorspannung und Kriechen & Schwinden ((P + CSR) · cos α · Schwerpunktsabstand) wird von den Betonschnittgrößen abgezogen.
- Damit erhält man die Verbundschnittgrößen (statisch unbestimmter Anteil aus P + CSR zuzüglich den Schnittgrößen aus äußerer Last).
- Bemessen wird mit den Verbundschnittgrößen. Dabei wird der Spannstahl mit den Spannkraftverlusten aus CSR auf der Widerstandsseite berücksichtigt.

## Einzelbemessung nach EN 1992-1-1

- Für die Einzelbemessung wird ein neuer Querschnitt mit einer zusätzlichen Stahllage am Ort des Spannstrangs benötigt. Hierfür wird zunächst Querschnitt 1 zu Querschnitt 2 kopiert.
- Anschließend wird die neue Stahllage in Querschnitt 2 ergänzt. Die Werte für  $E$ ,  $f_{yk} = f_{p0,1k}$ ,  $y$ ,  $z$  und  $A_s = A_p$  sind am Nachweisort protokolliert. Als Vorspannkraft  $Z_{v0}$  wird der Betrag des im Protokoll ausgewiesenen **statisch bestimmten** Anteils  $N_{x0}$  eingegeben.

### Betonstahl Stäbe 2

	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fyk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	As [cm <sup>2</sup> ]	Zv0 [kN]
1	210000	500	0,050	0,050	0,000	0,00
2	210000	500	7,850	0,050	0,000	0,00
3	210000	500	4,150	2,250	0,000	0,00
4	210000	500	3,750	2,250	0,000	0,00
5	195000	1500	3,950	0,185	72,000	6823,71

Der E-Modul wird nur für vorgespannte Stahllagen benutzt.

y, z Koordinaten des Betonstahls

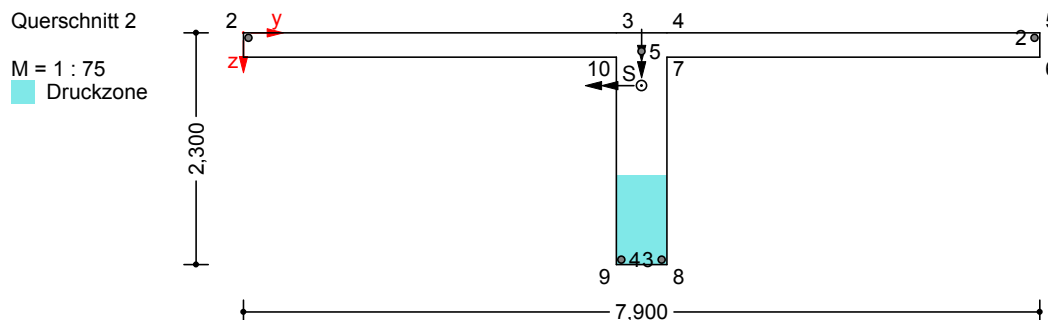
As Grundbewehrung

Zv0 Vorspannkraft einer vorgespannten Stahllage

3. Für die Einzelbemessung werden die Verbundchnittgrößen mit dem **statisch unbestimmten** Anteil aus P+CSR benötigt. Diese können ebenfalls dem Protokoll entnommen werden.

Einzelbemessung nach EN 1992-1-1 [EBEM_EN1992]						
	Quer-schnitt	Kombi-nation	Nsd [kN]	Mysd [kNm]	Mzsd [kNm]	Modus
1	2	0	109,56	-19191,54	0,00	Standard
2						

**Pos. 1 - Stahlbeton-Biegebemessung nach EN 1992-1-1: 2010**



Einwirkung N = 109,56 kN; My = -19191,54; Mz = 0,00 kNm  
 Widerstand N = 109,56 kN; My = -19191,54; Mz = 0,00 kNm  
 Kraftsystem ys / zs = 3,950 / 0,525 m  
 Festigkeit C45/55-EN; gamma.c = 1,50; gamma.s = 1,15  
 Bemessungsart Standard  
 Bewehrung 108,24 cm<sup>2</sup>; 0,37 %; Betonfläche = 29260,00 cm<sup>2</sup>  
**Achtung Die Betonstauchung kann nicht nach Abschnitt 6.1 (5) überprüft werden. Die Bewehrung enthält keine Mindestbewehrung nach Abs. 9.2.1.1 (9.1N).**

Betonquerschnitt Punkt	y [m]	z [m]	eps[‰]	sigma[MPa]	Innere Kräfte	y [m]	z [m]	F [kN]
1	-0,000	0,240	4,56	0,00	Druck	3,950	1,928	-10868,30
2	0,000	0,000	5,49	0,00	Zug	3,950	0,165	10977,86
3	3,700	0,000	5,49	0,00	Hebelarm	0,000	1,762	
4	4,200	0,000	5,49	0,00				
5	7,900	0,000	5,49	0,00				
6	7,900	0,240	4,56	0,00				
7	4,200	0,240	4,56	0,00				
	4,200	1,405	0,00	0,00				
8	4,200	2,300	-3,50	-30,00				
9	3,700	2,300	-3,50	-30,00				
	3,700	1,405	0,00	0,00				
10	3,700	0,240	4,56	0,00				

Betonstahl Punkt	y [m]	z [m]	d1 [m]	Es,fyk [MPa]	Zv0 [kN]	eps[‰]	sigma[MPa]	As [cm <sup>2</sup> ]	
1	0,050	0,050	0,050	200000	500	0,0	5,30	437,76	18,12
2	7,850	0,050	0,050	200000	500	0,0	5,30	437,76	18,12
3	4,150	2,250	0,050	200000	500	0,0	-3,30	-435,86	0,00
4	3,750	2,250	0,050	200000	500	0,0	-3,30	-435,86	0,00
5	3,950	0,185	0,185	195000	1500	6823,7	4,77	1304,35	72,00

## Literaturhinweise

DIN EN 1990/NA:2010/A1:2012-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.

DIN EN 1992-1-1/NA:2013/A1:2015-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2015.

EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1991-1-1:2002

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.  
Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2002.

EN 1992-1-1:2004/A1:2014

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2014.

EN 1992-2:2005/AC:2008

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2008.

EN 1998-1:2004

Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben –  
Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2006.

Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.

Eurocode 2 für Deutschland.  
DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang.  
Kommentierte Fassung. 1. Auflage 2012. Berichtigungen, Ergänzungen, Austauschseiten September 2013.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.

Heft 466 - Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton.

Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 1996.

Heft 600 Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2).

Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.

ÖNORM B 1990-1:2013-01

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 und nationale Ergänzungen.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2013.

## ÖNORM B 1992-1-1:2011-12

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau.  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2011.

## SS EN 1990:2011-04

Anwendung der SS EN 1990.  
Gesetzblatt des Zentralamts für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Karlskrona 2011.

## SS EN 1992-1-1:2011-04

Anwendung der SS EN 1992-1-1.  
Gesetzblatt des Zentralamts für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Karlskrona 2011.

## Zilch, K.; Rogge, A.

Bemessung der Stahlbeton- und Spannbetonbauteile nach DIN 1045-1.  
Beton-Kalender 2002, Bd. 1, S. 217-359.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2002.

## Zilch, K.; Zehetmaier, G.

Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1.  
Springer-Verlag, Berlin 2006.

# SIA 262 Bemessung

## Grundlagen

Die Stahlbeton- und Spannbetonbemessung nach SIA 262:2013 ist anwendbar für alle Tragwerke des Hoch- und Brückenbaus. Als Tragwerksmodelle sind Stab-, Flächen- und Volumentragwerke zugelassen. Der Nachweis vorgespannter Tragwerke ist nur innerhalb des FEM-Moduls möglich.

Innerhalb eines Tragwerksmodells sind verschiedenartige Bauteile kombinierbar:

- Nicht vorgespannte Bauteile
- Vorgespannte Bauteile mit nachträglichem Verbund
- Vorgespannte Bauteile ohne Verbund
- Bauteile mit externer Vorspannung
- Bauteile in Mischbauweise

Die Bemessung erfolgt im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle den Einwirkungen nach SIA 260 zuzuordnen. In den gewünschten Bemessungssituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente.

Die Dialoge zu den Einwirkungen und zur Nachweisauswahl werden über die Berechnungseinstellungen aufgerufen. Die detaillierten Nachweisp Vorgaben und Bewehrungsangaben sind im Rahmen der Querschnittsdefinition einzugeben.

Die Nachweise sind auf Elemente mit den Materialien *SC12/15* bis *SC50/60*, *SLC12/13* bis *SLC50/55* und *SCX* beschränkt.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden alle Nachweise am Polygonquerschnitt geführt. Allgemeine Hinweise zur Anwendung von Bemessungsobjekten sind dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

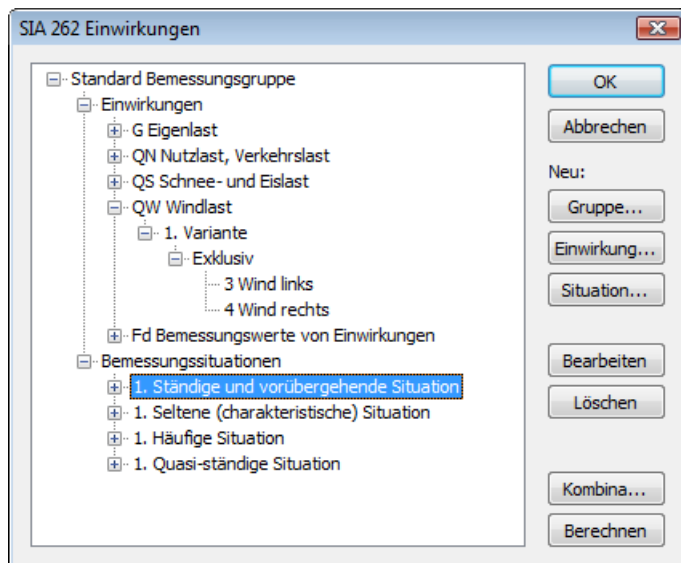
Im Ordner *SIA 262 Bemessung* der Datenbasis ist zusätzlich eine Einzelbemessung für frei definierte Polygonquerschnitte oder Verbundquerschnitte möglich.

## Eingaben

### Einwirkungen und Bemessungssituationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchung werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden die gewünschten Bemessungssituationen.

Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



**Einwirkung...**

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Einwirkungen:

- Ständige Einwirkungen (G, GE, GH)
- Vorspannung (P)
- Kriechen und Schwinden, Relaxation (CSR1, CSR2)  
Diese Einwirkungen stehen nur zur Auswahl, wenn bereits eine Einwirkung P definiert ist. Sie werden in den Kombinationen zusammen mit P wie eine einzige Einwirkung behandelt.
- Veränderliche Einwirkungen (QN, QS, QW, QT, QH, QD)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)
- Einwirkungen infolge Erdbeben (AE)
- Bemessungswerte von Einwirkungen (Fd)  
In diesen Einwirkungen sind die Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte bereits enthalten. Sie werden exklusiv kombiniert.
- Zyklische Ermüdungseinwirkungen (Qfat)

**Gruppe...**

Startet den Dialog zur Eingabe einer neuen Bemessungsgruppe. Optional können für bestimmte Bauteile (Querschnitte) eigene Einwirkungen und Bemessungssituationen definiert werden.

**Situation...**

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Bemessungssituationen. Zur Steuerung der Nachweise ist die Situation als Bau- oder Endzustand einzuordnen. Für Spannbetongtragwerke mit nachträglichem Verbund lässt sich festlegen, dass die Spannglieder noch unverpresst sind.

**Bearbeiten**

Öffnet den Bearbeitungsdialog der markierten Einwirkung oder Situation.

**Löschen**

Entfernt die markierte Einwirkung oder Situation.

**Kombinationen...**

Startet den Dialog mit den ersten 999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung oder für die nichtlineare Analyse nutzen.

**Berechnen**

Berechnet die definierten Bemessungssituationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Situationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls. Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Verwendung der Situationen in den verschiedenen Nachweisen dargestellt. Die Ziffern verweisen auf die Kapitel der SIA 262.

Situation	Tragfähigkeit	Kapitel	Gebrauchstauglichkeit	Kapitel
Ständig, vorübergehend	Längsbewehrung	4.3.2		
Außergewöhnlich	Querbewehrung	4.3.3		
Erdbeben	Torsionsbewehrung	4.3.5		
Charakteristisch (selten)			Verhindern spröden Versagens	4.4.2
Häufig			Begrenzung der Rissbreite	4.4.2
Quasi-ständig			Betondruckspannungen	3.1.2.6.3 4.1.5.2.4
			Begrenzung der Rissbreite	4.4.2
Ermüdung	Ermüdung Betonstahl	4.3.8		
	Ermüdung Spannstahl	4.3.8		
	Ermüdung Beton	4.3.8		

## Definition einer Einwirkung

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Dialogfeld zur Eingabe einer veränderlichen Einwirkung. Die Dialogfelder für die weiteren Einwirkungsarten sehen entsprechend aus.

### Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

### Gamma.sup, Gamma.inf

Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{sup}$  und  $\gamma_{inf}$ .

### Kombinationsbeiwerte psi für:

Eingabefelder zur Auswahl der Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen. Die Schaltfläche ermöglicht die Einsicht und Änderung der gewählten Kombinationsbeiwerte  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  und  $\psi_2$ .

### Lastfälle

Liste der möglichen Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen. Die Auswahl geschieht durch Markieren und Betätigung der entsprechenden Schaltfläche oder Drag & Drop.

### Mehrfachauswahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

### Exklusive Varianten

Veränderliche Einwirkungen können aus mehreren exklusiven Varianten bestehen, die sich gegenseitig ausschließen. Die Varianten selber enthalten inklusive und exklusive Anteile. Mit den Schaltflächen oder können Einwirkungsvarianten hinzugefügt oder gelöscht werden.

### Inklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

### Exklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

### Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls

Der Spannkraftverlust wird als konstante prozentuale Minderung der Vorspannung definiert.

### CS als konstante Minderung der Vorspannung

Alternativ zur Definition von Lastfällen kann der Einfluss des Kriechens und Schwindens (CS) durch eine konstante



prozentuale Minderung der Vorspannung berücksichtigt werden.

### Interne Vorspannung

Gewählte Lastfälle, welche die interne Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

### Externe Vorspannung

Gewählte Lastfälle, welche die externe Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

## Teilsicherheitsbeiwerte

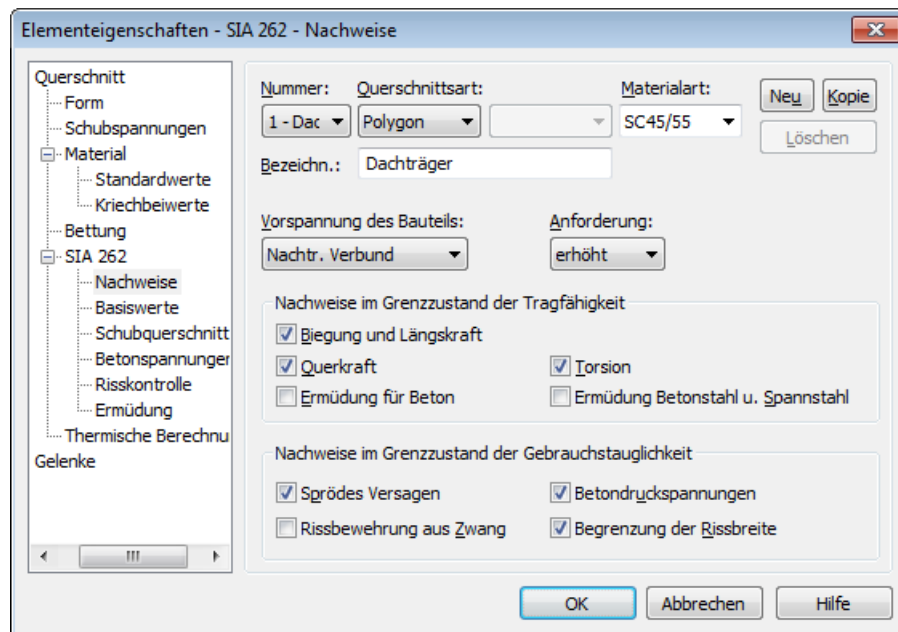
Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen werden innerhalb der Definition der Einwirkungen entsprechend SIA 260, Tabelle 1, festgelegt und können bei Bedarf geändert werden. Für die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe werden die Werte nach SIA 262, Ziffer 2.3.2.5, verwendet.

## Querschnittseingaben

Die Querschnittseingaben umfassen alle spezifischen Festlegungen für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Eine Übersicht der Bemessungsvorgaben kann im Abschnitt *SIA 262 Bemessung* der Datenbasis aufgerufen werden.

## Nachweise

Im nachfolgenden Dialog wird festgelegt, welche Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für den Querschnitt vorgesehen sind. In den Berechnungseinstellungen kann diese Auswahl für das gesamte Tragwerk übersteuert werden.



### Vorspannung des Bauteils

Die Art der Vorspannung kann für jeden Querschnitt getrennt gewählt werden:

- *Nicht vorgespannt*
- *Nachträglicher Verbund*
- *Ohne Verbund*
- *Extern*
- *Mischbauweise*

### Anforderung

Durch Auswahl der Anforderung bezüglich Rissbildung werden die Einwirkungen und Stahlspannungsgrenzen zur Begrenzung der Rissbreite nach SIA 262, Tabelle 17 und Figur 31, festgelegt.

## Basiswerte

Die Basiswerte gelten für alle Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

### Bemessungsmodus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach SIA 262, Ziffer 5.5.4, durchgeführt.

### Reduktionsfaktor der Vorsp. für sprödes Versagen

Für die Anordnung der Robustheitsbewehrung sind programmseitig die Vorschriften der EN 1992-2, Kapitel 6.1(110), maßgebend. Danach soll bei Ermittlung der Zugzone die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung unberücksichtigt bleiben. Da diese bei Flächentragwerken nicht bestimmbar ist, kann ersatzweise die Vorspannung mit einem Reduktionsfaktor abgemindert werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes liegt im Ermessen des Anwenders.

### Stahlgüte der Bügel

Stahlgüte für Bügel und Längsbewehrung aus Querkraft in MN/m<sup>2</sup>.

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe für die Schubbemessung von Flächenquerschnitten [m].

### Bemessung wie Platten

Stäbe werden wie Platten behandelt.

### Dehnung eps.v für Platten

- *Grundwert*: Dehnung  $\varepsilon_v$  nach Ziffer 4.3.3.2.2 zur Berechnung der aufnehmbaren Querkraft ohne Querkraftbewehrung [%<sub>0</sub>].
- *Größtkorn Dmax*: Größtkorn des Betons zur Berechnung von  $k_g$  nach Gleichung (37).
- *Längsbewehrung ist abgestuft*: Schalter zur Erhöhung von  $\varepsilon_v$  nach Ziffer 4.3.3.2.3.

### Druckfeldneigung Alpha [°]

Neigung des Betondruckfeldes entsprechend Ziffer 4.3.3.2.

### Beiwert kc für Druckfestigkeit

Beiwert für die Betondruckfestigkeit nach Ziffer 4.2.1.7.

## Schubquerschnitt

Bei Polygonquerschnitten werden für die Querkraft- und Torsionsbemessung nach SIA 262 zusätzliche Querschnittsabmessungen benötigt. Diese werden nachfolgend erläutert. Bei Querschnitten mit interner Vorspannung oder vom Rechteck abweichender Form sollten die vom Programm vorgeschlagenen Abmessungen überprüft werden.

### Breite

Querschnittsbreite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Höhe

Querschnittshöhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Nutzbreite

Statisch wirksame Breite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nom. Breite, Nom. Höhe

Die nominelle Breite bzw. Höhe intern vorgespannter Bauteile gemäß SIA 262, Ziffer 4.3.3.3.5, zur Berücksichtigung der Hüllrohrdurchmesser bei der Berechnung des Bemessungswertes der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,c}$ .

### Faktor kb, Faktor kd

Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzbreite  $b_n$  bzw. Nutzhöhe  $d$  im Nachweis der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  bzw.  $Q_z$ .

### tk

Die effektive Wandstärke des Torsionsquerschnitts [m].

### Kernquerschnitt $A_k = z_1 * z_2$

Abmessungen des Kernquerschnitts für die Berechnung der Torsionsbewehrung [m].

## Betonspannungen

Elementeigenschaften - SIA 262 - Betonspannungen

Querschnitt  
 Form  
 Schubspannungen  
 Material  
 Standardwerte  
 Kriechbeiwerte  
 Bettung  
 SIA 262  
 Nachweise  
 Basiswerte  
 Schubquerschnitt  
 Betonspannungen  
 Risskontrolle  
 Ermüdung  
 Thermische Berechnung  
 Gelenke

Nummer: 1 - Dac    Querschnittsart: Polygon    Materialart: SC45/55    Neu    Kopie  
 Löschen

Bezeichn.: Dachträger

Quasi-ständige Kombination    Zum Zeitpunkt t der Vorspannung

zul sigma.c:    zul sigma.c(t):    Betonfestigkeit fck(t) [MN/m²]:  
 0,45 fck     0,45 fck(t)    45  
 0,60 fck(t)

OK    Abbrechen    Hilfe

### zul sigma.c

Nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.6.3, ist für Betonspannungen  $\sigma_c > 0,45 f_{ck}$  der Einfluss des Beanspruchungsniveaus auf das Kriechen zu berücksichtigen. Die Einhaltung dieser Spannungsgrenze wird in Anlehnung an EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2(3), für die quasi-ständige Kombination überprüft.

### zul sigma.c(t)

Zulässige Betonspannung  $\sigma_c(t)$  zum Zeitpunkt t der Einleitung der Vorspannung gemäß SIA 262, Ziffer 4.1.5.2.4, Gleichung (23). Übersteigt die Betondruckspannung den Wert  $0,45 \cdot f_{ck}(t)$ , so ist auch hier die Nichtlinearität des Kriechens gemäß Ziffer 3.1.2.6.3 zu berücksichtigen. Der Zeitpunkt der Eintragung der Vorspannung wird im Programm bei der Bemessungssituation „G+P“ angenommen.

### fck(t)

Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung gemäß Ziffer 4.1.5.2.4 [MN/m²].

## Risskontrolle

Die Vorgaben gelten für den Nachweis gegen sprödes Versagen, die Berechnung der Rissbewehrung und die Begrenzung der Rissbreite.

### Zugfestigkeit $f_{ctd}$

Die Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  kann entweder nach SIA 262, Gleichung (98), oder nach Gleichung (100) berechnet werden.

### Faktor $k_t$

Abminderungsfaktor  $k_t$  zur Berücksichtigung der Zuggurtabmessung  $t$  nach Gleichung (99).

### Zwangseinwirkung für Rissbewehrung

Wahl der Zugzone nach Ziffer 4.4.2.3.6 zur Verteilung der Rissbewehrung bei Zwangseinwirkung.

### Spannstahl anrechnen

Im Verbund liegender Spannstahl in der Zugzone wird gemäß Ziffer 4.4.2.3.10 berücksichtigt.

### Max. Stababstand $s$ nach Fig. 31 [mm]

Größter vorhandener Stababstand der Betonstahlbewehrung zur Ermittlung der Spannungsgrenzen nach Figur 31.

## Ermüdung

Elementeigenschaften - SIA 262 - Ermüdung

Querschnitt  
 Form  
 Schubspannungen  
 Material  
 Standardwerte  
 Kriechbeiwerte  
 Bettung  
 SIA 262  
 Nachweise  
 Basiswerte  
 Schubquerschnitt  
 Betonspannung  
 Risskontrolle  
 Ermüdung  
 Thermische Berechnung  
 Gelenke

Nummer: 1 - Dac    Querschnittsart: Polygon    Materialart: SC45/55    Neu    Kopie  
 Löschen

Bezeichn.: Dachträger

Betonstahl, Spannstahl

Längsbew.	Schubbew.	Spannstahl
dSigma.sd,fat: 145	dSigma.bd,fat: 65	dSigma.pd,fat: 95 MN/m <sup>2</sup>

Erhöhungsfaktor  $k_{xi}$ : 1

Bemessungsvarianten einschränken

OK    Abbrechen    Hilfe

### $d\sigma_{sd,fat}$ , $d\sigma_{bd,fat}$ , $d\sigma_{pd,fat}$

Bemessungswerte der Ermüdungsfestigkeit für Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl nach SIA 262, Tabelle 13. Für die Schubbewehrung wird zur Berechnung des Beiwerts  $k_{\sigma}$  nach Gleichung (85) der Biegerollendurchmesser zu  $d_1 = 4 \varnothing_s$  angenommen.

### Erhöhungsfaktor $k_{xi}$

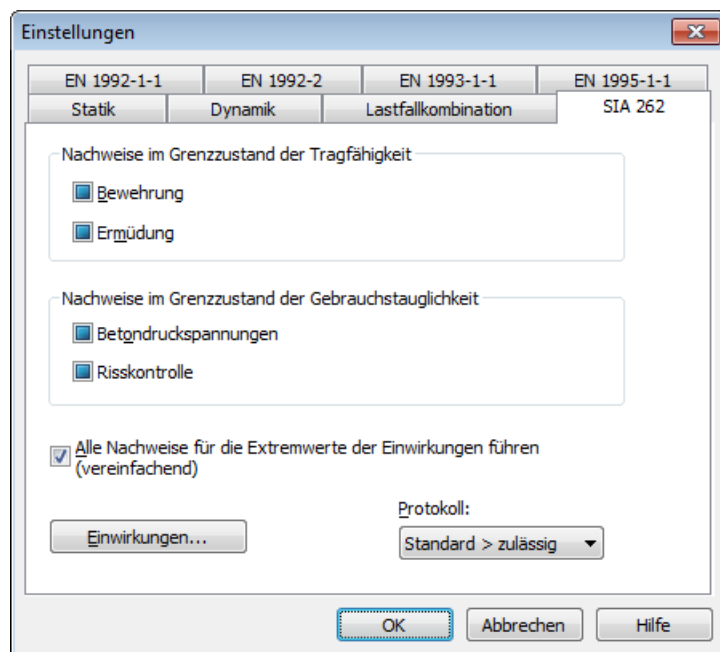
Erhöhungsfaktor  $k_{xi}$  für die Betonstahlspannung der Längsbewehrung. Er dient zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl gemäß Ziffer 4.3.8.1.4.

### Bemessungsvarianten einschränken

Bei Flächenelementen können die Varianten zur Ermittlung der Schwingbreite auf korrespondierende Sätze von Bemessungsschnittgrößen beschränkt werden. Eine nähere Erläuterung ist im Kapitel „Nachweise gegen Ermüdung / Besonderheit bei Flächentragwerken“ zu finden.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *SIA262* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Nachweisauswahl

Bei der Nachweisauswahl sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Der Nachweis wird gemäß Einstellung im Querschnittsdialog geführt (s. Querschnittseingaben).
- Der Nachweis wird für alle Querschnitte des Tragwerks geführt.
- Der Nachweis wird für keinen Querschnitt des Tragwerks geführt.

Zugehörige Querschnittseinstellungen werden dabei folgendermaßen zusammengefasst:

Bewehrung	Biegung und Längskraft Querkraft Torsion
Ermüdung	Ermüdung für Beton Ermüdung für Betonstahl und Spannstahl
Risskontrolle	Sprödes Versagen Rissbewehrung aus Zwang Begrenzung der Rissbreite

Mit der Funktion *Bemessungsvorgaben* im Ordner *SIA 262 Bemessung* der Datenbasis kann eine Nachweisübersicht angezeigt werden.

### Alle Nachweise für die Extremwerte der Einwirkungen führen (vereinfachend)

Bei gesetzter Auswahl werden für jede Schnittkraftkomponente die minimalen und maximalen Werte gebildet. Mit diesen sowie den zugehörigen Werten wird dann die Bemessung durchgeführt. Alternativ werden alle möglichen Kombinationen von Lastfällen gebildet und bemessen. Dies ist bei einer größeren Anzahl von Lastfällen zeitaufwendig.

### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

### Protokoll

- *Nicht erstellen*: Vom Nachweisprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Protokoll mit tabellarischer Ausgabe der Ergebnisse.
- *Ausführlich*: Zusätzliche Ausgabe der maßgebenden Kombinationsschnittgrößen an den Nachweisorten.
- *Standard > zulässig*: Beschränkung des Standardprotokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.
- *Ausführlich > zulässig*: Beschränkung des ausführlichen Protokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.

## Einzelbemessung

Mit der Einzelbemessung lassen sich unabhängig vom Gesamtsystem einzelne Querschnittspolygone mit vorgegebenen Schnittgrößen untersuchen. Die Eingabetabelle befindet sich im Ordner *SIA 262 Bemessung* der Datenbasis.

### Querschnitt

Nummer des zu bemessenden Querschnitts.

### Beton

Betonklasse SC12/15, ... SC50/60 oder LSC12/13, ... LSC50/55

### Rohdichte

Rohdichte des Leichtbetons [kg/m<sup>3</sup>].

### Kombination

Bemessungssituation nach SIA 261, Ziffer 4.4.3.4 oder 4.4.3.5:

- 0: Ständige und vorübergehende Bemessungssituation
- 1: Außergewöhnliche Bemessungssituation

### Nsd, Mysd, Mzsd

Schnittgrößen, für welche bemessen wird.

### Modus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach SIA 262, Ziffer 5.5.4 durchgeführt.
- *Dehnungen*: Dehnungszustand für vorhandene Betonstahllagen ermitteln.
- *Inaktiv*: Bemessung inaktiv.

Die Berechnung wird bei geöffneter Eingabetabelle mit dem Menüpunkt *Einzelbemessung* oder mit der *Seitenansicht* ausgeführt.



## Durchstanznachweis

Nach der Auswahl eines Nachweisknotens werden die maßgebenden Nachweisdaten in einem Dialogfeld präsentiert. Dieses gliedert sich in drei Dialogseiten.

### 1a. Eingabedaten, Stütze

Es sind die Stützenformen *Rechteck* und *Rund*, mit den Standpunkten *Innen*, *Rand parallel zu x*, *Rand parallel zu y* und *Ecke* vorgesehen. Bei der Neueingabe werden die Abmessungen vorhandener Stützen vorgeschlagen. Die Randabstände  $a_x$  und  $a_y$  dienen zur Berechnung der Umfänge  $u_i$  der Nachweisschnitte.

### 1b. Eingabedaten, Platte

Dieser Abschnitt präsentiert die Materialeigenschaften, die vorhandene Biegewehrung, sowie weitere Beiwerte zur Berechnung der Durchstanzwiderstände.

### 1c. Eingabedaten, Einwirkung

Die Einwirkung kann entweder als Auflagerkraft aus einer vorausgegangenen Bemessung nach SIA 262 übernommen, oder direkt eingegeben werden. Etwaige mittlere Bodenpressungen  $\sigma_0$  vermindern den Bemessungswert der Querkraft.

## 2. Öffnung

Diese Dialogseite dient zur Definition der Öffnungsgeometrie und ihrer Lage.

## 3. Ergebnisse

Diese Dialogseite zeigt die berechneten Durchstanzwiderstände, die eventuell erforderliche Durchstanzbewehrung und die Mindestbiegebewehrung.

### Beispiel

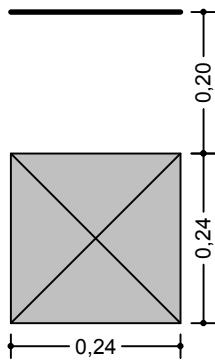
### Durchstanznachweis Knoten 146

Der Nachweis wird nach SIA 262:2013 geführt.

#### 1. Abmessungen, Lage und Material

Rechteckstütze mit der Breite  $b_x = 0,24$  m und der Höhe  $b_y = 0,24$  m

Lage: Rand parallel zur x-Achse; Randabstand  $a_y = 0,20$  m



Statische Höhe  $d_v = 0,200$  m

Kritischer Rundschnitt  $u = 1,43$  m (Abstand =  $0,10$  m);  $A_{crit} = 0,23$  m<sup>2</sup>

Vorh. Längsbewehrung  $a_{sx} / a_{sy} = 5,00 / 5,00$  cm<sup>2</sup>/m

Nutzhöhe der Platte  $d_x / d_y = 0,200 / 0,200$  m;  $d = (d_x + d_y)/2 = 0,200$  m

Spannweiten  $l_x / l_y = 8,00 / 7,00$  m

Bügelneigung  $\alpha = 90,0^\circ$

Beton: SC20/25;  $D_{max} = 32$  mm

$$\tau_{cd} = 0,3 \cdot \eta_t \cdot \sqrt{f_{ck}} / \gamma_c = 0,3 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{20,00} / 1,50 = 0,89 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{bd} = 1,4 \cdot f_{ctm} / \gamma_c = 2,05 \text{ N/mm}^2$$

Betonstahl: B500B

$$E_s = 205000 \text{ N/mm}^2; f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s = 500,00 / 1,15 = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

Einsturzsicherung nach Figur 26

$$\beta = 0^\circ; d_{int} = 0,170 \text{ m}; s_{int} = 0,40 \text{ m}$$

## 2. Einwirkung: 1.Ständige und vorübergehende Situation

$$V_d = 587,00 \text{ kN}; M_d = 0,00 \text{ kNm}$$

## 3. Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung

Beiwert  $k_e$  nach Ziffer 4.3.6.2.4

$$e_u = 0; k_e = 1$$

Abstand  $r_s$  nach Ziffer 4.3.6.4.4

$$r_{s,x} = 0,22 \cdot l_x = 1,76 \text{ m}; r_{s,y} = 0,22 \cdot l_y = 1,54 \text{ m}$$

$$b_s = \min(1,5 \cdot \sqrt{r_{s,x} \cdot r_{s,y}}; l_{min}) = 2,47 \text{ m}$$

Biegesteifigkeit und Vergleichsmoment nach Ziffer 4.3.6.4.7

$$m_{Rd,x} = 43,61 \text{ kNm}; m_{Rd,y} = 43,61 \text{ kNm}$$

$$m_{sd,x} = \max(V_d \cdot (1/8 + |e_u| / 2b_s); V_d / 4) = 146,75 \text{ kNm}$$

$$m_{sd,y} = V_d \cdot (1/8 + |e_u| / b_s) = 73,38 \text{ kNm}$$

Plattenrotation  $\psi$  nach Ziffer 4.3.6.4.1 in Näherungsstufe 2

$$\psi_x = 1,5 \cdot r_{s,x} / d \cdot f_{sd} / E_s \cdot (m_{sd,x} / m_{Rd,x})^{3/2} = 0,17$$

$$\psi_y = 1,5 \cdot r_{s,y} / d \cdot f_{sd} / E_s \cdot (m_{sd,y} / m_{Rd,y})^{3/2} = 0,05$$

$$\psi = \max(\psi_x; \psi_y) = 0,17$$

Beiwert  $k_r$  nach Ziffer 4.3.6.3.2

$$k_g = 48 / (16 + D_{max}) = 1,00$$

$$k_r = \min(1 / (0,45 + 0,18 \cdot \psi \cdot d \cdot k_g); 2) = 2,00$$

Durchstanzwiderstand nach Ziffer 4.3.6.3.1

$$V_{Rd,c} = k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot k_e \cdot u = 513,10 \text{ kN}$$

$$V_d / V_{Rd,c} = 587,00 / 513,10 = 1,14 > 1 \quad \Rightarrow \text{Durchstanzbewehrung erforderlich!}$$

#### 4. Durchstanzbewehrung rechtwinklig zur Plattenebene

Bemessungsquerkraft nach Ziffer 4.3.6.5.2

$$V_{d,s} = \max(V_d - V_{Rd,c}; V_d / 2) = 293,50 \text{ kN}$$

Durchstanzbewehrung nach Ziffer 4.3.6.5.4

$$V_{Rd,s} = A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{sd} \cdot \sin 90^\circ$$

$$\varnothing_{sw} = 16 \text{ mm nach Tabelle 20}$$

$$\sigma_{sd} = \min(E_s \cdot \psi / 6 \cdot (1 + f_{bd} / f_{sd}) \cdot d / \varnothing_{sw}); f_{sd}) = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{sw} = V_{d,s} / k_e / \sigma_{sd} = 6,75 \text{ cm}^2$$

Bewehrungsanordnung nach Ziffer 5.5.3.8, Figur 39 und Tabelle 20

- Die Durchstanzbewehrung muss aus mindestens zwei Reihen bestehen
- Die erste Reihe sollte mindestens 0,07 m vom Rand der gestützten Fläche entfernt sein
- Der radiale Abstand der Bewehrungsreihen darf 0,07 m nicht überschreiten
- Die äusserste Reihe sollte 0,14 m vom Rand der gestützten Fläche entfernt sein
- Der tangentielle Abstand der Bewehrungselemente darf in der zweiten Reihe 0,30 m nicht überschreiten

Nachweis der Betondruckdiagonalen an der gestützten Fläche nach Ziffer 4.3.6.5.7

$$V_{Rd,c} = \min(2 \cdot k_r; 3,5) \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot k_e \cdot u = 897,93 \text{ kN}$$

$$V_d / V_{Rd,c} = 587,00 / 897,93 = 0,65 \leq 1 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erfüllt!}$$

Durchstanznachweis ausserhalb der verstärkten Zone nach Ziffer 4.3.6.5.9 und Figur 25

Rundschnitt  $u_{out} = 1,87 \text{ m}$ ; Abstand = 0,24 m

Die statische Höhe wird zu  $d_v = 0,20 \text{ m}$  angenommen

$$V_{Rd,c,out} = k_r \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \cdot k_e \cdot u_{out} = 670,46 \text{ kN}$$

$$V_d / V_{Rd,c,out} = 587,00 / 670,46 = 0,88 \leq 1 \quad \Rightarrow \text{Nachweis erfüllt!}$$

#### 5. Sicherung gegen Totaleinsturz

Nachweisschnitt nach Figur 26:  $u_{int} = s_{int} + \pi / 2 \cdot d_{int} = 0,67 \text{ m}$

$k_\beta = 0,37$  nach Tabelle 12 für Duktilitätsklasse B

Restwiderstand im Nachweisschnitt nach Ziffer 4.3.6.7.2

$$V_{Rd,res} = A_s \cdot f_{sd} \cdot k_\beta \leq 1,7 \cdot \tau_{cd} \cdot d_{int} \cdot u_{int}$$

$$A_s = \min(V_d; 1,7 \cdot \tau_{cd} \cdot d_{int} \cdot u_{int}) / (f_{sd} \cdot k_\beta) = 10,72 \text{ cm}^2$$

## Vorgespannte Tragwerke

### Interne Vorspannung

Bei interner Vorspannung werden die Spannstränge einschließlich der Spannverfahren und Spannweisungen über die Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs eingegeben und durch Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* bei der FEM-Berechnung berücksichtigt. Näheres dazu ist dem Handbucheil *Spannbeton* zu entnehmen.

Die Unterscheidung zwischen Vorspannung mit und ohne Verbund erfolgt in den Querschnittseingaben und den Vorgaben für den Lastfall *Kriechen und Schwinden*.

### Externe Vorspannung, Mischbauweise

Externe Vorspannung lässt sich durch direkte Eingabe der äußeren Kräfte berücksichtigen. Bei Mischbauweise sind die zusätzlichen im Verbund liegenden Spannglieder wie oben beschrieben einzugeben.

### Kriechen und Schwinden

Die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens erfolgt ebenso wie bei der Vorspannung durch einen entsprechenden Lastfall (Lastart *Kriechen und Schwinden*) in der FEM-Berechnung. Dabei ist neben dem kriecherzeugenden Dauerlastfall anzugeben, ob die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden soll. Diese Option ist nur bei im Verbund liegenden Spanngliedern sinnvoll.

Die Eingabe der maßgeblichen Kriech- und Schwindbeiwerte für die Berechnung des Lastfalls *Kriechen und Schwinden* erfolgt im Querschnittsdialog.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1+\rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \varphi \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,S})$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_b(t)$       Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $E_b$             E-Modul des Betons.
- $\rho$              Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt  $t$  (i. d. R.  $\rho = 0,80$ ).
- $\varphi$              Kriechbeiwert für den Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_b(t)$       Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_{b,0}$         Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.
- $\varepsilon_{b,s}$         Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben. Sofern im Lastfall gewählt, werden im Weiteren die resultierenden Spannungsänderungen im Spannstahl ermittelt. Ein eventueller Einfluss aus der Relaxation des Spannstahls bleibt dabei unberücksichtigt. Nach Zilch/Rogge (2002, S. 256) lässt sich dieser getrennt berechnen (s. nächster Abschnitt) und mit den Änderungen aus Kriechen und Schwinden zu den gesamten zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenfassen:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \Delta\sigma_{pr} + E_p \cdot \Delta\varepsilon_{cpt}$$

mit

- $\Delta\sigma_{pr}$         Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls.
- $\Delta\varepsilon_{cpt}$         Dehnungsänderung des Betons aus Kriechen und Schwinden.
- $E_p$             E-Modul des Spannstahls.

## Relaxation des Spannstahls

Nach SIA 262, Ziffer 3.3.2.7.1, sind die Bemessungswerte der Spannungsverluste infolge Relaxation des Spannstahls für eine Dauer von 1000 h Figur 8 zu entnehmen. Langzeitwerte der Spannungsverluste ergeben sich durch Multiplikation dieser Werte mit dem Faktor 3.

Die Spannkraftverluste werden in den Einwirkungen CSR des Dialogs *SIA 262 Einwirkungen* definiert.

## Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Es stehen folgende Nachweise zur Verfügung:

- Biegung und Biegung mit Normalkraft (SIA 262, Kapitel 4.3.2)
- Querkraft (Kapitel 4.3.3)
- Torsion und kombinierte Beanspruchung (Kapitel 4.3.5)
- Durchstanzen (Kapitel 4.3.6)
- Ermüdung (Kapitel 4.3.8)

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach SIA 260, Kapitel 4.4.3, berücksichtigt:

- Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen

$$E_d = E\{\gamma_G \cdot G_k, \gamma_P \cdot P_k, \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}, \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (16)$$

- Außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$E_d = E\{G_k, P_k, A_d, \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (17)$$

- Bemessungssituationen infolge Erdbeben ( $A_E$ ) nach SIA 261, Ziffer 16.1.4.

$$E_d = E\{G_k, P_k, A_E, \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\}$$

- Ermüdungskombination gemäß SIA 262, Kapitel 4.3.8 in Verbindung mit EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.3, Gleichung (6.68)

$$E_d = E\{G_k, P_k, \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}, \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}, Q_{fat}\} \quad (6.68)$$

Dabei sind  $Q_{k,1}$  und  $Q_{k,i}$  nicht-zyklische, nicht-ständige Einwirkungen und  $Q_{fat}$  die zyklische Einwirkung aus dem maßgebenden Ermüdungslastmodell.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

## Spannungs-Dehnungslinien

Bei der Querschnittsbemessung kommen die folgenden Kennlinien zur Anwendung:

- Beton: Parabel-Rechteck-Diagramm nach SIA 262, Figur 12 und Gleichung (28). Der Beiwert  $\eta_t$  in Gleichung (2) und (3) zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer auf die Betonfestigkeit wird gemäß Ziffer 4.2.1.3 zu  $\eta_t = 1$  angenommen.
- Betonstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Figur 16, mit ansteigendem oberem Ast und  $k_s = 1,05$ .
- Spannstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Figur 17, mit horizontalem oberem Ast gemäß Ziffer 4.2.3.5.

Der Nachweis gegen Ermüdung erfolgt gemäß Ziffer 4.3.8.1.3 im gerissenen Zustand mit linearer Spannungs-Dehnungslinie für den Beton.

## Bemessung für Biegung und Biegung mit Normalkraft

Die Bemessung für Biegung und Biegung mit Normalkraft erfolgt mittels einer detaillierten Querschnittsanalyse entsprechend SIA 262, Ziffer 4.3.2.3, wobei der Beiwert für die Betondruckfestigkeit zu  $k_c = 1,0$  angenommen wird.

Vereinfachend wird dabei für alle Betonstahlsorten mit  $k_s = 1,05$  und  $\varepsilon_{ud} = 0,020$  gerechnet. Es werden Platten-, Scheiben- und Schalenelemente mit rechtwinkliger oder schiefwinkliger Bewehrung sowie Stäbe bemessen. Die Bemessungsschnittgrößen berechnen sich analog zur Bemessung nach DIN 1045-1. Für jede Schnittkraftkombination wird die erforderliche Bewehrung, aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen am Stahlbetonquerschnitt, iterativ ermittelt. Das endgültige Resultat ergibt sich aus dem Extremwert aller berechneten Bewehrungen.

Der Anwender steuert durch die Vorgabe der Bewehrungsgeometrie und die Auswahl eines von drei Bemessungsmodi das Ergebnis der Bemessung:

### Modus Standard

Dies ist der Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Längskraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Die Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich eingelegt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird bei Überschreitung der zur Festigkeit  $f_{sd}$  des Stahls gehörenden Stahldehnung  $\varepsilon_{sd}$  Druckbewehrung ermittelt.

### Modus Symmetrisch

Im Gegensatz zur Standardbemessung wird in allen Dehnungsbereichen, falls erforderlich, die Bewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen bestimmten Bewehrungslagen bleiben erhalten.

### Modus Druckglied

Die Bemessung wird symmetrisch durchgeführt. Zusätzlich wird die nach Kapitel 5.5.4.2 der Norm verlangte Mindestbewehrung von 0,6% ermittelt. Dabei wird immer mit der Gesamtfläche des Betonquerschnitts gerechnet.

## Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft umfasst die Ermittlung der Querkraftbewehrung und den Nachweis des Widerstands des Betondruckfelds nach SIA 262, Kapitel 4.3.3. Es gelten folgende Besonderheiten:

- Die Neigung der Schrägzugbewehrung wird mit  $90^\circ$  angenommen.
- In der berechneten Bügelbewehrung ist die Mindestbewehrung nach Ziffer 5.5.2.2 enthalten.
- Platten- und Schalenelemente werden für die Querkraft  $q_r = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$  bemessen.
- Es erfolgt **keine** Einschränkung der Nachweisorte nach Ziffer 4.3.3.2.1 oder 4.3.3.4.1 sowie **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten nach Ziffer 4.3.3.2.7.
- Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die maßgebenden Werte des Ersatzrechtecks, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert. Die Beiwerte zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe und Nutzhöhe nach Ziffer 4.3.3.4.2 sind ebenfalls vorzugeben.
- Bei Flächenelementen wird generell mit dem Hebelarm  $z = 0,9 d$  gerechnet.
- Der Beiwert  $k_c$  für die Betondruckfestigkeit wird gemäß Benutzervorgabe berücksichtigt.

Verwendete Formeln aus der Norm:

### 4.3.3.2 Bauteile ohne Querkraftbewehrung

4.3.3.2.1 Querkraftwiderstand von Platten ohne Querkraftbewehrung

$$v_{Rd} = k_d \tau_{cd} d_v \quad (35)$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v d k_g} \quad (36)$$

$$k_g = \frac{48}{16 + D_{\max}} \quad (37)$$

$D_{\max}$  Grösstkorndurchmesser im Beton [mm].  $D_{\max} = 0$  bei Leichtbeton.

$\tau_{cd}$  Bemessungswert der Schubspannungsgrenze.

$$\tau_{cd} = \frac{0,3 \eta_r \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \quad (3)$$

$d$  Statische Höhe, mittlere statische Höhe bei mehreren Bewehrungslagen [mm].

$d_v$  Wirksame statische Höhe für die Aufnahme der Querkraft. Sie wird zu  $d_v = d$  angenommen.

$\eta_t$  Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer auf die Betonfestigkeit. Er wird gemäss Ziffer 4.2.1.3 zu  $\eta_t = 1$  angenommen.

4.3.3.2.2 Falls die Biegebewehrung im elastischen Zustand verbleibt:

$$\varepsilon_v = \frac{f_{sd}}{E_s} \frac{m_d}{m_{Rd}} \quad (38)$$

Falls plastische Verformungen der Biegebewehrung nicht auszuschliessen sind:

$$\varepsilon_v = 1,5 \frac{f_{sd}}{E_s} \quad (39)$$

$m_d$  Bemessungswert des Biegemoments.

$m_{Rd}$  Bemessungswert des Biegewiderstandes.

4.3.3.2.3 Die Dehnung  $\varepsilon_v$  ist um 50% vergrössern, falls die Längsbewehrung im Nachweisbereich abgestuft ist.

4.3.3.2.4 Die Dehnung  $\varepsilon_v$  ist mit  $1/(\sin^4 \vartheta + \cos^4 \vartheta)$  zu vergrössern, wobei  $\vartheta$  den Winkel zwischen der Hauptbewehrung und der Hauptrichtung der Querkraft ( $\arctan q_y / q_x$ ) darstellt.

### 4.3.3.3 Bauteile mit Querkraftbewehrung

4.3.3.4.3 Widerstand einer vertikalen Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,s} = A_{sw} / s \cdot z \cdot f_{sd} \cot \alpha \quad (43)$$

4.3.3.3.2 Die Druckfeldneigung kann innerhalb der folgenden Grenzen frei gewählt werden:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 45^\circ \quad (40)$$

Die minimale Druckfeldneigung  $\alpha_{\min}$  beträgt:

-  $\alpha_{\min} = 30^\circ$  im Normalfall

-  $\alpha_{\min} = 25^\circ$  wenn im Steg eine bedeutende Drucknormalkraft wirkt

-  $\alpha_{\min} = 40^\circ$  wenn im Steg eine Zugnormalkraft wirkt oder im betrachteten Trägerabschnitt plastische Gurtverformungen zu erwarten sind.

4.3.3.4.6 Widerstand des Betondruckfelds

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (45)$$

$k_c$  Beiwert zur Bestimmung der Betonfestigkeit nach Ziffer 4.2.1.7.

4.3.3.4.12 Längszugkraft infolge Querkraft

$$F_{tVd} = V_d (\cot \alpha - \cot \beta) \quad (50)$$

$\beta$  Neigung der Bügelbewehrung (hier  $90^\circ$ ).

$F_t = 0,5 \cdot |V_d| \cot \alpha$  (zusätzliche Zugkraft in der Längsbewehrung)

5.5.2.2 Mindestbügelbewehrung von Balken

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s b_w} \geq 0,001 \sqrt{\frac{f_{ck}}{30}} \frac{500}{f_{sk}} \quad (110)$$

5.5.3.4 Bei Platten hat der Bewehrungsgehalt ebenfalls die Bedingung nach Gleichung (110) zu erfüllen, wenn Querkraftbewehrung angeordnet wird.

## Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung

Die Bemessung für Torsion erfolgt nach SIA 262, Kapitel 4.3.5. Es wird die Bügelbewehrung, die Längsbewehrung und der Widerstand des Betondruckfelds ermittelt. Bei gleichzeitig wirkender Querkraft- und Torsionsbeanspruchung wird, in Interpretation der Norm, die kombinierte Ausnutzung des Betondruckfelds

$$\frac{V_d}{V_{Rd,c}} + \frac{T_d}{T_{Rd,c}}$$

nachgewiesen. Der zu Grunde liegende ideale Hohlquerschnitt wird, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert.

Verwendete Formeln aus der Norm:

### 4.3.5 Torsion und kombinierte Beanspruchung

#### 4.3.5.2 Äquivalente Scheibenkräfte

$$V_{d,i} = \frac{T_d}{2A_k} z_i \quad (54)$$

$V_{d,i}$  Bemessungswert der Querkraft in der Scheibe  $i$ .

$T_d$  Bemessungswert des Torsionsmomentes.

$A_k$  Querschnittfläche entsprechend Figur 19.

$z_i$  Hebelarm der Längskräfte in der Scheibe  $i$ .

#### 4.3.5.3 Mitwirkende Scheibendicke von Vollquerschnitten

$$t_k \leq d_k / 8 \quad (55)$$

$d_k$  Maximaler Durchmesser, welcher der Fläche  $A_k$  einbeschrieben werden kann.

## Durchstanzen

Der Nachweis der Tragsicherheit gegenüber Durchstanzen wird nach SIA 262, Kapitel 4.3.6, geführt. Es wird die notwendige Durchstanzbewehrung und die Längsbewehrung zur Einsturzicherung ermittelt.

Es gelten folgende Besonderheiten:

- Der Faktor  $k_e$  wird nach Abschnitt 4.3.6.2.4 ermittelt.
- Die mittlere statische Höhe  $d$  ergibt sich aus den Eingabeparametern  $d_x$  und  $d_y$  zu  $d = (d_x + d_y) / 2$ . Die wirksame statische Höhe  $d_v$  für die Aufnahme der Querkraft nach Ziffer 4.3.6.2.1 ist vom Benutzer vorzugeben.
- Die Einwirkung kann entweder direkt eingegeben oder aus den berechneten Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit übernommen werden. In diesem Fall wird für die jeweilige Einwirkungskombination für  $V_d$  die maximale Auflagerkraft  $R_z$  eingesetzt. Das Moment zur Berücksichtigung der Lastexzentrizität  $M_d$  ergibt sich aus den Auflagermomenten  $M_x$  und  $M_y$  zu  $M_d = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ . Daher ist auf eine entsprechende Ausrichtung des Lagers zu achten. Die ungünstigste Kombination wird protokolliert.
- Nach Ziffer 4.3.6.2.6 dürfen bei der Ermittlung des Bemessungswerts der Querkraft  $V_d$  Sohldruckspannungen im Nachweisschnitt in Abzug gebracht werden. Durch Eingabe des Wertes  $\sigma_0$  im Durchstanzdialog wird dies berücksichtigt.

Der Durchstanznachweis ist erbracht wenn gilt:

$$V_d \leq V_{Rd}$$

Verwendete Formeln:

#### 4.3.6.2.4 Abminderungsbeiwert für den Umfang des Nachweisschnitts

$$k_e = \frac{1}{1 + \frac{e_u}{b}} \quad (56)$$

$e_u$  Lastexzentrizität der Stütze mit:

$$e_u = |M_d / V_d|$$



$M_d$  Moment zur Berechnung der Lastexzentrizität.  
 $b$  Durchmesser eines flächengleichen Kreises zu der Fläche der Stütze.

#### 4.3.6.3.1 Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung

$$V_{Rd,c} = k_r \tau_{cd} d_v u \quad (57)$$

mit

$\tau_{cd}$  Bemessungswert der Schubspannungsgrenze

$$\tau_{cd} = \frac{0,3 \eta_t \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \quad (3)$$

$d_v$  Wirksame statische Höhe.

$u$  Umfang des Nachweisschnitts nach Figur 21 und 22.

$\eta_t$  Beiwert zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer auf die Betonfestigkeit. Er wird gemäss Ziffer 4.2.1.3 zu  $\eta_t = 1$  angenommen.

$$4.3.6.3.2 \quad k_r = \frac{1}{0,45 + 0,18 \psi d k_g} \leq 2 \quad (58)$$

mit

$$4.3.6.4.1 \quad \psi = 1,5 \frac{r_s}{d} \frac{f_{sd}}{E_s} \left( \frac{m_{sd}}{m_{Rd}} \right)^{3/2} \quad (59)$$

$r_s$  Radialer Abstand zwischen Stützenachse und Nullpunkt des Moments gemäss Ziffer 4.3.6.4.4:  
 $r_s = \text{Maximum} (0,22 l_x; 0,22 l_y)$

$d$  Mittlere statische Höhe.

$f_{sd}$  Bemessungswert der Fließgrenze von Betonstahl.

$E_s$  Elastizitätsmodul des Betonstahls.

$m_{sd}$  Mittleres Moment im Stützstreifen, ermittelt für Näherungsstufe 2 gemäss Ziffer 4.3.6.4.7 mit Gleichungen (61) bis (64).

$m_{Rd}$  Mittelwert des Biege widerstandes im Stützstreifen.

$k_g$  Beiwert zur Berücksichtigung des Größtkorndurchmessers nach Ziffer 4.3.3.2.1.

#### 4.3.6.5.4 Durchstanzwiderstand mit Durchstanzbewehrung

$$V_{Rd,s} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{sd} \sin \beta \quad (67)$$

mit

$A_{sw}$  Fläche der Durchstanzbewehrung.

$\sigma_{sd}$  Bemessungswert der Spannung in der Durchstanzbewehrung

$$\sigma_{sd} = \frac{E_s \Psi}{6} \left( 1 + \frac{f_{bd}}{f_{sd}} \frac{d}{\varnothing_{sw}} \right) \leq f_{sd} \quad (68)$$

mit

$f_{bd}$  Bemessungswert der Verbundspannung

$$f_{bd} = \frac{1,4 f_{ctm}}{\gamma_c} \quad (103)$$

$\varnothing_{sw}$  Durchmesser der Durchstanzbewehrungselemente. Programmseitig wird der Grenzwert nach Tabelle 20 angesetzt.

4.3.6.5.2 Die Durchstanzbewehrung wird mit folgender Querkraft bemessen

$$V_{d,s} = V_d - V_{Rd,c} \quad (65)$$

$$V_{d,s} \geq V_d / 2 \quad (66)$$

4.3.6.5.7 Bruchwiderstand der Betondruckdiagonalen

$$V_{Rd,c} = 2 k_r \tau_{cd} d_v u \leq 3,5 \tau_{cd} d_v u \quad (67)$$

4.3.6.5.9 Für die Ermittlung der Größe des Bereichs mit Durchstanzbewehrung wird ein zusätzlicher Nachweis am Rundschnitt  $u_{\text{out}}$  geführt.

$$V_d \leq V_{\text{Rd,c,out}}$$

$$V_{\text{Rd,c,out}} = k_r \tau_{\text{cd}} d_v u_{\text{out}}$$

Für die wirksame statische Höhe  $d_v$  wird vereinfachend der zu Ziffer 4.3.6.2.1 eingegebene Wert angesetzt.

#### 4.3.6.7 Sicherung gegen Totaleinsturz

Ermittlung der erforderlichen Längsbewehrung auf der Biegedruckseite der Platte.

$$V_{\text{Rd,res}} = \sum (A_s f_{\text{sd}} k_{\beta}) \leq 1,7 \tau_{\text{cd}} d_{\text{int}} u_{\text{int}} \quad (70)$$

$$u_{\text{int}} = \sum (s_{\text{int}} + \pi/2 d_{\text{int}}) \quad (71)$$

mit

$d_{\text{int}}$  Abstand zwischen Biegebewehrung und Bewehrung gegen Totaleinsturz gemäss Figur 26.

$s_{\text{int}}$  Abstand der äusseren Bewehrungsseisen gemäss Figur 26.

$k_{\beta}$  Beiwert gemäss Tabelle 12.

## Nachweise gegen Ermüdung

### Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl

Der Ermüdungsnachweis wird nach SIA 262, Kapitel 4.3.8, geführt. Die Ermittlung der Stahlspannungen erfolgt für Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft sowie für Spannstahl in Stäben und Bemessungsobjekten unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Schub- und Längsbewehrung aus Querkraft und Torsion werden die Spannungen gemäß Ziffer 4.3.8.1.7 auf der Grundlage eines Fachwerkmodells mit der Druckstrebenneigung  $\tan \alpha_{\text{fat}} = \sqrt{\tan \alpha} \leq 1$  berechnet.

Spannstahlspannungen in Flächenelementen werden am ungerissenen Betonquerschnitt ermittelt. Für Spannglieder ohne Verbund und externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

Der Nachweis erfolgt für die Dauerfestigkeit nach Ziffer 4.3.8.2.3, Gleichung (86):

$$\Delta\sigma_{\text{sd}}(Q_{\text{fat}}) \leq \Delta\sigma_{\text{sd,D}} \quad (86)$$

mit

$$\Delta\sigma_{\text{sd,D}} \cong 0,8 \cdot \Delta\sigma_{\text{sd,fat}} \quad (86)$$

$\Delta\sigma_{\text{sd}}(Q_{\text{fat}})$  Spannungsdifferenz für Ermüdungseinwirkung  $Q_{\text{fat}}$ .

$\Delta\sigma_{\text{sd,fat}}$  Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit nach Tabelle 13.

Zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Betonstahl und Spannstahl werden die Spannungen im Betonstahl bei Spanngliedern im Verbund mit dem Faktor  $k_{\xi}$  nach Gleichung (81) erhöht.

Die Werte für  $\Delta\sigma_{\text{sd,fat}}$  und  $k_{\xi}$  werden vom Benutzer im Querschnittsdialog vorgegeben.

#### Berechnungsmethode

Als vorhandene Längsbewehrung wird das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung angenommen. Falls damit die Beanspruchung aus der Ermüdungseinwirkung im Zustand II nicht aufnehmbar ist, wird mit der vorhandenen Bewehrung und den Nachweisschnittgrößen eine erneute Bemessung durchgeführt.

Die sich aus dem Dehnungszustand im Zustand II bzw. am Fachwerkmodell ergebende maximale Spannungsschwingbreite je Stahllage wird für jede Nachweissituation getrennt ermittelt. Durch Multiplikation mit dem Beiwert  $k_{\xi}$  wird die Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{\text{sd}}$  erhalten. Wenn diese bei Längs- oder Schubbewehrung die zulässige Spannungsschwingbreite nach Gleichung (86) übersteigt, wird die erforderliche Bewehrung solange iterativ erhöht, bis der Nachweis für alle Situationen erfüllt ist. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* wird die Längsbewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Die für den Nachweis maßgebliche, gegebenenfalls erhöhte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll ausgegeben und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Druckbeanspruchung erfolgt für Biegung und Längskraft am gerissenen Querschnitt. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis für Betonstahl berücksichtigt. Druckstreben von querkräftbeanspruchten Bauteilen werden nicht untersucht.

Der Nachweis gilt nach Ziffer 4.3.8.3.1 als erbracht, wenn Gleichung (91) eingehalten wird:

$$|\sigma_{cd}|_{\max} \leq 0,5 k_c f_{cd} + 0,45 |\sigma_{cd}|_{\min} \leq 0,9 k_c f_{cd} \quad (91)$$

mit

$|\sigma_{cd}|_{\max}$ ,  $|\sigma_{cd}|_{\min}$  Bemessungswerte der maximalen und minimalen Betondruckspannung für die Ermüdungseinwirkung  $Q_{fat}$ . Im Fall von Zugspannungen ist  $|\sigma_{cd}|_{\min}$  zu Null anzunehmen.

$k_c$  Der Reduktionsbeiwert für die Betondruckfestigkeit wird nach Ziffer 4.2.1.7 zu  $k_c = 1,0$  angenommen.

## Besonderheit bei Flächentragwerken

Bei Flächentragwerken kann der Dehnungszustand am gerissenen Betonquerschnitt unter allgemeiner Beanspruchung nicht eindeutig ermittelt werden. Die Bemessung erfolgt deshalb getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y mit den oben näher erläuterten Bemessungsschnittgrößen nach Wolfensberger/Thürlimann bzw. nach Rüsç. Mit der so ermittelten Bewehrung kann die Tragfähigkeit als gesichert angenommen werden.

Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite für Betonstahl und Beton kann diese Methode im Fall von Drill- oder Scherbeanspruchungen zu unrealistischen Ergebnissen führen, wie am folgenden Beispiel deutlich wird:

Gegeben seien zwei identische Sätze von Plattenschnittgrößen:

Satz	$m_x$ [kNm/m]	$m_y$ [kNm/m]	$m_{xy}$ [kNm/m]
1	300	200	100
2	300	200	100

Daraus folgen nach Wolfensberger/Thürlimann als Bemessungsvarianten für die x-Richtung:

Satz	Variante	$m$ [kNm/m]
1	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$
2	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$

Die Drillmomente erzeugen eine Variation der Bemessungsmomente und damit rein rechnerisch eine Spannungsschwingbreite. Im Ermüdungsnachweis könnte dadurch eine Bewehrungserhöhung aufgrund scheinbarer Überbeanspruchung notwendig werden. Bei Bemessungsnormalkräften gilt dies für die Scherkräfte sinngemäß.

Mit der Benutzerauswahl **Bemessungsvarianten einschränken** im Querschnittsdialog lässt sich der beschriebene Effekt vermeiden. In diesem Fall werden bei der Ermittlung der Schwingbreite nur noch die korrespondierenden Varianten verglichen, im Beispiel also nur die jeweils ersten und die jeweils zweiten Varianten der beiden Sätze. Bei konstanter Beanspruchung wird somit die Schwingbreite korrekt zu Null ermittelt.

**Diese Alternative kann allerdings nicht sicherstellen, dass immer alle denkbaren Spannungsschwankungen erfasst werden. Die Ergebnisse sind deshalb mit besonderer Aufmerksamkeit zu bewerten. Im ausführlichen Protokoll werden dazu die für den Nachweis maßgeblichen Varianten und Bemessungsschnittgrößen angegeben.**

Bei Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Rüsç für schiefwinklige Bewehrung gelten die dargestellten Zusammenhänge entsprechend.

## Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

Im einzelnen werden folgende Nachweise geführt:

- Begrenzung der Betondruckspannungen (SIA 262, Ziffer 3.1.2.6.3 bzw. 4.1.5.2.4).
- Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen (Robustheitsbewehrung)(Kapitel 4.4.2).
- Rissbewehrung bei Zwangsbeanspruchung (Kapitel 4.4.2).
- Begrenzung der Rissbreite (Kapitel 4.4.2).

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach SIA 260, Ziffer 4.4.4.4 berücksichtigt:

- Seltene Situationen  

$$E_d = E\{G_k, P_k, Q_{k,1}, \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (20)$$

- Häufige Situationen  

$$E_d = E\{G_k, P_k, \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}, \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (21)$$

- Quasi-ständige Situationen  

$$E_d = E\{G_k, P_k, \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (22)$$

## Begrenzung der Betondruckspannungen

Der Nachweis der Betondruckspannungen erfolgt im Zustand I. Bei Flächenelementen werden die Betonspannungen am Bruttoquerschnitt berechnet. Bei Stäben und Bemessungsobjekten erfolgt die Berechnung der Biegespannung

- ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
- mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
- mit internen Spanngliedern im Verbund für die Situationen vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.

Nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.6.3, ist für Betonspannungen  $\sigma_c > 0,45 f_{ck}$  der Einfluss des Beanspruchungsniveaus auf das Kriechen zu berücksichtigen. Wenn im Querschnittsdialog ausgewählt, wird diese Spannungsgrenze in Anlehnung an EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2(3), für die quasi-ständige Kombination überprüft.

In Spannbetonbauteilen darf nach SIA 262, Ziffer 4.1.5.2.4, beim und unmittelbar nach dem Spannen die Betondruckspannung an keiner Stelle des Tragwerks ausserhalb des Verankerungsbereichs größer  $0,6 f_{ck}(t)$  sein. Übersteigt die Betondruckspannung zudem den Wert von  $0,45 f_{ck}(t)$ , ist die Nichtlinearität des Kriechens zu berücksichtigen. Dabei bezeichnet  $f_{ck}(t)$  den charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  des Spannens.

Im Programm wird der Zeitpunkt des Spannens bei der Situation G1+P angenommen. Falls eine quasi-ständige Situation G1+P definiert ist, wird für diese Situation die Betonspannung je nach Benutzervorgabe gegen den Grenzwert  $0,45 f_{ck}(t)$  oder  $0,60 f_{ck}(t)$  geprüft. Der Wert für  $f_{ck}(t)$  wird ebenfalls im Dialog festgelegt.

## Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen

SIA 262, Kapitel 4.4.2, gibt vor, dass durch Einlegen einer Mindestbewehrung ein sprödes Versagen des Betons in der Zugzone verhindert werden soll. Die Mindestbewehrung (Robustheitsbewehrung) wird für das Rissmoment mit den Bemessungswerten für die Betonzugfestigkeit  $f_{ctd}$  und die Stahlfestigkeit  $f_{sd}$  berechnet:

$$A_s = M_{cr} / (f_{sd} \cdot z)$$

mit

$M_{cr}$  Rissmoment, bei dem ohne Wirkung der Vorspannung am Querschnittsrand eine Zugspannung in Höhe von  $f_{ctd}$  auftritt.

$z$  Hebelarm der inneren Kräfte.

Das Rissmoment ergibt sich zu  $M_{cr} = W_c \cdot f_{ctd}$ , der Hebelarm  $z$  der inneren Kräfte wird vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Nach Ziffer 4.4.2.3.6 ist die Mindestbewehrung in die Zugzone der Bauteile einzulegen. Zur Ermittlung der Zugzone wird in Anlehnung an EN 1992-2, Abschnitt 6.1(110), die seltene Einwirkungskombination herangezogen. Dabei

soll die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung berücksichtigt, die statisch bestimmte Wirkung jedoch vernachlässigt werden. Im Programm werden alle Spannungen am Bruttoquerschnitt ermittelt. Die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung kann nur bei Stäben und Bemessungsobjekten in Abzug gebracht werden. Bei Flächenelementen wird die Vorspannung ersatzweise mit dem Reduktionsfaktor gemäß Benutzervorgabe abgemindert.

Die ermittelte Bewehrung wird gleichmäßig auf die in der Zugzone liegenden Bewehrungslagen verteilt. Im Bemessungsmodus *Symmetrisch* erhalten die übrigen Lagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten. Für Querschnitte mit Bemessungsmodus *Druckglied* wird keine Robustheitsbewehrung nachgewiesen, da bei der Bemessung für Biegung und Längskraft bereits Mindestdruckbewehrung ermittelt wird.

## Rissbewehrung bei Zwangsbeanspruchung

Nach SIA 262, Ziffer 4.4.2.3.7, kann die Begrenzung der Rissbreiten bei aufgezwungenen oder behinderten Verformungen durch Einlegen einer Mindestbewehrung erfolgen. Nach Ziffer 4.4.2.3.6 ist die Mindestbewehrung in die Zugzone der Bauteile einzulegen. Die Zugzone wird vom Benutzer durch Wahl einer Zwangseinwirkung (Zug oben/unten, zentrischer Zug) im Querschnittsdialog festgelegt.

Die Ermittlung der Mindestbewehrung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$A_s = k_s \cdot f_{ctd} \cdot A_{ct} / \sigma_{s,adm}$$

mit

$k_s$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor der Erstrissbildung.

$k_s = 1,0$  bei zentrischen Zwang

$k_s = 0,4$  bei Biegezwang von Rechteckquerschnitten, abgeleitet aus  
SIA D 0182, Gl. (10.7)

$k_s = 0,9 \cdot F_{cr} / A_{ct} / f_{ctd} \geq 0,5$  in allen anderen Fällen gemäß EN 1992-1-1, Gl. (7.3)

mit der Zugkraft  $F_{cr}$  im Zuggurt im Zustand I unmittelbar vor Rissbildung mit der Randspannung  $f_{ctd}$ . Die Zugkraft wird durch Integration der Zugspannungen innerhalb der Fläche  $A_{ct}$  gewonnen.

$f_{ctd}$  Bemessungswert der Betonzugfestigkeit. Je nach Auswahl im Querschnittsdialog kommt eine der folgenden Gleichungen zur Anwendung:

$$f_{ctd} = k_t \cdot f_{ctm} \quad (98)$$

$$f_{ctd} = k_t \cdot f_{ctk0,95} \quad (100)$$

mit

$$k_t = \frac{1}{1 + 0,5t} \quad (99)$$

$t$  kleinste Abmessung des betrachteten Zuggurts [m]. Für Platten- und Rechteckquerschnitte unter Biegebeanspruchung gilt  $t = h/3$ .

Der Beiwert  $k_t$  kann im Querschnittsdialog vorgegeben werden. Der Vorschlagswert ist  $k_t = 1,0$ .

$A_{ct}$  Fläche der Betonzugzone bei Erstrissbildung im Zustand I.

$\sigma_{s,adm}$  Betonstahlspannung nach Figur 31 in Abhängigkeit von der gewählten Anforderung (Tabelle 17) und dem Stababstand der Längsbewehrung.

Optional wird nach Benutzerauswahl der in der Zugzone und im Verbund liegende Spannstahl gemäß Ziffer 4.4.2.3.10 auf  $A_s$  angerechnet.

## Begrenzung der Rissbreite

Die Begrenzung der Rissbreite erfolgt durch Vergleich der vorhandenen Betonstahlspannungen mit den zulässigen Stahlspannungen nach SIA 262, Tabelle 17 und Figur 31. Die Betonstahlspannungen werden im Zustand II für das Maximum aus Robustheits-, Mindestriss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis ermittelt. In Abhängigkeit von der gewählten Anforderung dürfen die Betonstahlspannungen folgende Werte nicht überschreiten:

Anforderung	Einwirkungskombination	
	häufig	quasi-ständig
erhöht	$f_{sd} - 80 \text{ N/mm}^2$	-
hoch	$f_{sd} - 80 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{s,adm}$ aus Figur 31, Kurve C

Falls der Nachweis mit der vorhandenen Bewehrung nicht erbracht werden kann, wird die Rissbewehrung erhöht.

## Begrenzung der Verformungen

Nach SIA 262, Kapitel 4.4.3, dürfen die Verformungen eines Bauteils oder Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild beeinträchtigen. Dazu sind die Durchbiegungen auf die in der SIA 260 angegebenen Werte zu begrenzen.

Im Programmsystem InfoCAD kann ein wirklichkeitsnaher Nachweis im Rahmen der Nichtlinearen Systemanalyse für Stab- und Schalenträgerwerke unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten geführt werden. Der Widerstand von im Verbund liegenden Spanngliedern geht z.Zt. nicht in die Berechnung ein.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Definition von Nachweissituationen über die Funktion *Lastgruppe* im Belastungsdialog durch Zusammenstellung der maßgebenden Einzellastfälle. Dabei sind die veränderlichen Lasten mit den Kombinationsbeiwerten für die in der SIA 260 vorgegebene Kombination zu wichten.
- Auswahl der Nachweislustfälle im Dialog *Nichtlineare Systemanalyse / Gebrauchstauglichkeit* der Berechnungseinstellungen für die FEM- bzw. Stabwerksberechnung.
- Einstellen der im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Bewehrung im Auswahlfeld *Ausgangsbewehrung* (Maximum aus Biegung, Robustheit, Rissesicherung und Ermüdung).
- Ausführen der FEM- bzw. Stabwerksberechnung zur Ermittlung der Verformungen im Zustand II.
- Überprüfung der graphisch oder tabellarisch wiedergegebenen Systemverformungen.

Eine ausführliche Beschreibung der Nichtlinearen Systemanalyse ist dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Die sich ergebende Biege-, Mindest- und Rissbewehrung, das resultierende Maximum sowie die Querkraft- und Torsionsbewehrung werden ebenfalls für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt.

Im Protokoll werden zu jedem Berechnungsort die Bemessungsschnittgrößen und erforderlichen Bewehrungen bzw. nachgewiesenen Spannungen oder Rissbreiten ausgegeben. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte werden als Warnungen gemeldet und am Nachweisort gekennzeichnet. Das ausführliche Protokoll dokumentiert zusätzlich die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen.

### Spannungen bei Stäben und Bemessungsobjekten

$\sigma_x$	Längsspannungen im Nachweis der Betondruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_s, \Delta\sigma_s$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd}, \Delta\sigma_{cd}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,y}, \Delta\sigma_{sb,z}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus $Q_y$ und $Q_z$ [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,T}, \Delta\sigma_{sl,T}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus Torsion und für Torsionslängsbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

**Spannungen bei Flächenelementen**

$\sigma_{x'}, \sigma_y$	Längsspannungen in x- oder y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sx'}, \Delta\sigma_{sx}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in x-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sy'}, \Delta\sigma_{sy}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p', \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd,x'}, \Delta\sigma_{cd,x'}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck in
$\sigma_{cd,y'}, \Delta\sigma_{cd,y'}$	x- und y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{s,b}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

**Biegebewehrung**

$A_s$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> ] bei Stäben.
$a_{sx'}, a_{sy}$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Flächenelementen in x- und y-Richtung.
$a_{sq}$	Meridianbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Rotationsschalenelementen.
$a_{su}$	Ringbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Rotationsschalenelementen.

**Bewehrung aus Querkraft**

$a_{sb}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächen- und Rotationsschalenelementen.
$A_{sb,y}$	Bügelbewehrung von Stäben aus $Q_y$ [cm <sup>2</sup> /m].
$A_{sb,z}$	Bügelbewehrung von Stäben aus $Q_z$ [cm <sup>2</sup> /m].
$a_{sq}$	Längsbewehrung aus der Querkraftbemessung von Flächenelementen [cm <sup>2</sup> /m].
$A_{sl,y}$	Längsbewehrung von Stäben aus $Q_y$ [cm <sup>2</sup> ].
$A_{sl,z}$	Längsbewehrung von Stäben aus $Q_z$ [cm <sup>2</sup> ].

**Torsionsbewehrung**

$A_{sb}$	Bügelbewehrung von Stäben aus Torsion [cm <sup>2</sup> /m].
$A_{sl,T}$	Längsbewehrung von Stäben aus Torsion [cm <sup>2</sup> ].

**Bemessungswerte**

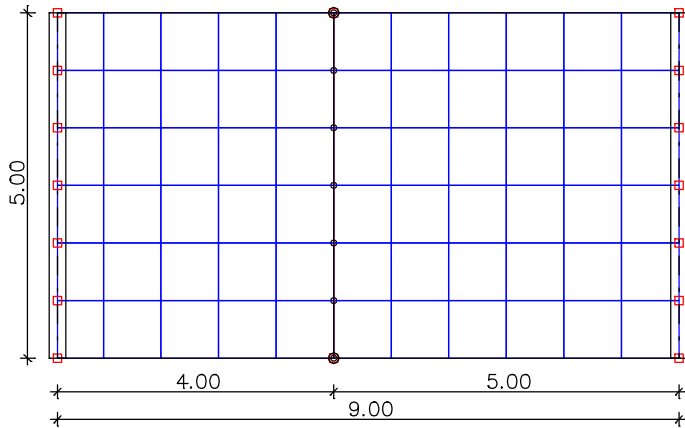
$V_{yRdc}$	Widerstand des Betondruckfelds bezüglich $Q_y$ [kN].
$V_{zRdc}$	Widerstand des Betondruckfelds bezüglich $Q_z$ [kN].
$Q/V_{Rdc} + M_x/T_{Rdc}$	Ausnutzung des Betondruckfelds infolge kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion.
$T_{Rdc}$	Widerstand des Betondruckfelds bezüglich $M_x$ [kNm].

## Beispiele

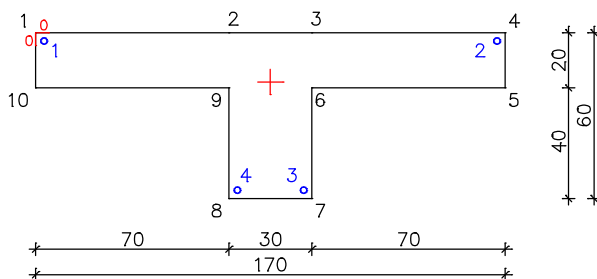
### Platte mit Unterzug

In diesem Beispiel wird eine Rechteckplatte ( $d = 20 \text{ cm}$ ,  $SC25/30$ ) mit einem Unterzug untersucht. Die gelenkig gelagerte Platte ist mit Eigenlast und einer Verkehrslast von  $10 \text{ kN/m}^2$  belastet.

Die erforderlichen Bemessungsvorgaben und die für die Platte und den Unterzug errechneten Bügelbewehrungen sind abgebildet.



Das nachfolgende Bild zeigt die Abmessungen des Unterzuges. Der Achsabstand des Betonstahls vom Querschnittsrand beträgt  $3 \text{ cm}$ . Die Eigenlast des Unterzuges wird um seinen Plattenanteil reduziert.



#### SIA 262 Einwirkungen

##### Standard Bemessungsgruppe

##### G - Eigenlast

$\text{Gamma.sup} / \text{gamma.inf} = 1,35 / 0,8$

Lastfälle

1 Eigenlast

##### QN - Nutzlast, Verkehrslast

$\text{Gamma.sup} / \text{gamma.inf} = 1,5 / 0$

Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für: Gebäude  
Nutzlasten - Kategorie A - Wohnflächen  
 $\text{Psi.0} / \text{Psi.1} / \text{Psi.2} = 0,7 / 0,5 / 0,3$

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

2 Verkehr Feld 1  
3 Verkehr Feld 2

#### 1. Ständige und vorübergehende Situation

Endzustand  
G - Eigenlast  
QN - Nutzlast, Verkehrslast

#### 1. Seltene (charakteristische) Situation

Endzustand  
G - Eigenlast  
QN - Nutzlast, Verkehrslast

#### 1. Häufige Situation

Endzustand  
G - Eigenlast  
QN - Nutzlast, Verkehrslast



**Bemessungsvorgaben**

Qu.	Vorspannung des Bauteils	Anforderung	Bewehrung	Ermüd.	Riss-	Beton-
			M R B Q T	S P C	breite	druck-
1	Nicht vorgespannt	erhöht	x + x x .	. . .	x	.
2	Nicht vorgespannt	erhöht	x + x x .	. . .	x	.

- (M) Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen (Robustheitsbewehrung).
- (R) Rissbewehrung aus Zwang (x), erf. Bewehrung aus Lasteinwirkung (+).
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Bewehrung gegen sprödes Versagen bei Flächenelementen.
- eta.t Beiwert für Betonfestigkeit nach 4.2.1.3.
- fsk Stahlgüte der Bügel [MN/m<sup>2</sup>].
- Alpha Neigung des Betondruckfelds [°].
- kc Reduktionsbeiwert für Betondruckfestigkeit nach 4.2.1.7.
- Platte Balken werden wie Platten bemessen.
- eps.v Grundwert der Dehnung nach 4.3.3.2.2 [o/oo].
- Dmax Größtkorn des Betons nach Gl. (37) [mm].
- Längsb. Die Längsbewehrung ist nach 4.3.3.2.3 abgestuft.

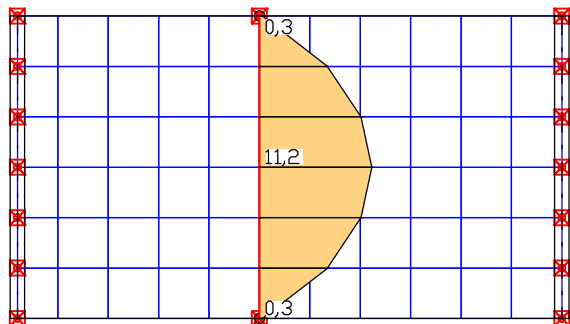
Qu. Beton	Bem. für M,N	Red. Vor-spg.	eta.t	fsk [MN/m <sup>2</sup> ]	Alpha [°]	kc	Bem. wie Platte	Grundwert eps.v	Dmax [mm]	Längsb. abgestuft
1	SC25/30	ST	. 1,00	500	45,00	0,55	.	3,00	32	.
2	SC25/30	ST	. 1,00	500	45,00	0,55	.	.	.	.

**Schubquerschnitte**

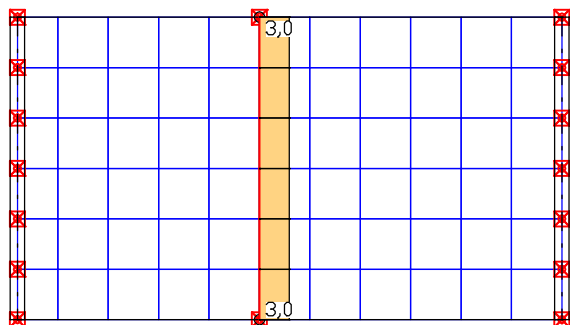
- bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
- h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
- kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d nach 4.3.3.4.2.
- z1, z2 Abmessungen des ideellen Hohlquerschnitts für Torsion nach 4.3.5.1.
- tk Wanddicke des Hohlquerschnitts.

Qu.	Breite [m]	Nutzbreite	Höhe [m]	Nutzhöhe	Torsionsquerschn. [m]
	bw	bn [m]	h	d [m]	z1 z2 tk
1	1,000	.	0,200	0,170	0,90 . .
2	0,300	0,270	0,600	0,570	0,90 0,540 0,240 0,060

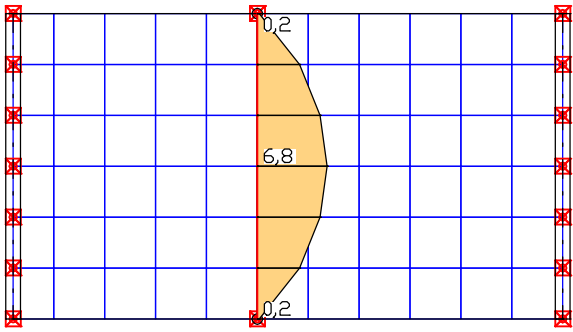
In den nachfolgenden Abbildungen sind die ermittelten Bewehrungen dargestellt.



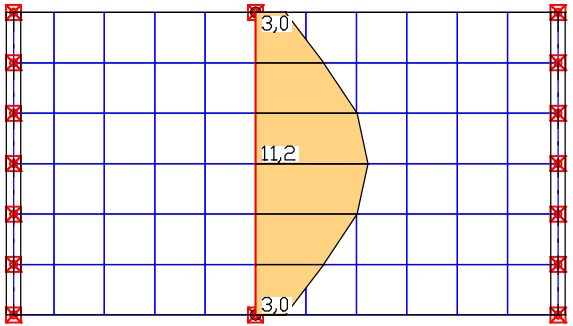
Längsbewehrung der Stäbe im Grenzzustand der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>]



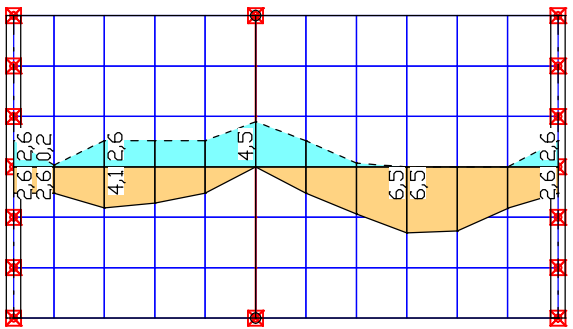
Längsbewehrung der Stäbe zur Sicherstellung der Robustheit [cm<sup>2</sup>]



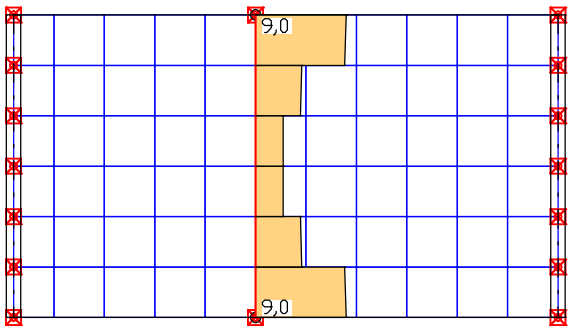
Längsbewehrung der Stäbe zur Begrenzung der Rissbreite [cm<sup>2</sup>]



Maximale Längsbewehrung der Stäbe [cm<sup>2</sup>]



Maximale Plattenbewehrung in Schnittrichtung aus den Nachweisen der Robustheit, der Rissbreite und der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>/m]



Querkraftbewehrung der Stäbe [cm<sup>2</sup>/m]

Nachfolgend ist für die Feldmitte des Unterzuges ein Auszug des ausführlichen Protokolls wiedergegeben.

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen (Robustheitsbewehrung), Charakt.K. fctd Bemessungswert der Betonzugfestigkeit nach Ziff. 4.4.1 [MN/m<sup>2</sup>]. z<sub>s,o/u</sub> Hebelarm der inneren Kräfte oben/unten [m]. s<sub>s,adm</sub> Zulässige Stahlspannung nach Fig. 31 [MN/m<sup>2</sup>]. max s<sub>c</sub> Maximale Betonrandspannung aus Charakt. K. [MN/m<sup>2</sup>].
- (R) Erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite. Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert. max.s Größter vorhandener Stababstand [mm].
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit. Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert. f<sub>ck</sub> Betonfestigkeit für Bemessung [MN/m<sup>2</sup>].

**Stab 70****Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - SC25/30  
 Stahl 2; Bemessungsmodus: Standard  
 (M) fctd=2,6; z<sub>s,o/u</sub>=0,513/0,513; Sigma.s,adm=435  
 (R) max.s=200  
 (B) fck=25

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	y <sub>s</sub> [m]	z <sub>s</sub> [m]	I <sub>y</sub> [m <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [m <sup>4</sup> ]	I <sub>yz</sub> [m <sup>4</sup> ]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G+QN, Endzustand**

## Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
Nx-	0,00	69,95	0,00
Nx+	0,00	69,95	0,00
My-	0,00	69,95	0,00
My+	0,00	196,53	0,00
Mz-	0,00	69,95	0,00
Mz+	0,00	69,95	0,00

**1. Häufige Kombination (HK.1): G+QN, Endzustand**

## Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
Nx-	0,00	69,95	0,00
Nx+	0,00	69,95	0,00
My-	0,00	69,95	0,00
My+	0,00	133,24	0,00
Mz-	0,00	69,95	0,00
Mz+	0,00	69,95	0,00

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QN, Endzustand**

## Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
Nx-	0,00	55,96	0,00
Nx+	0,00	55,96	0,00
My-	0,00	55,96	0,00
My+	0,00	284,31	0,00
Mz-	0,00	55,96	0,00
Mz+	0,00	55,96	0,00

**Nachweis der Längsbewehrung**

Bewehrung Lage Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	max Sc [MN/m <sup>2</sup> ]	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	Situation
1 M	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	CK.1, Nx-
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-, -
B	0,00	55,96	0,00	.	.	0,00	SK.1, Nx-
2 M	0,00	69,95	0,00	.	.	0,00	CK.1, Nx-
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-, -
B	0,00	55,96	0,00	.	.	0,00	SK.1, Nx-
3 M	0,00	196,53	0,00	7,73	.	1,48	CK.1, My+
R	0,00	133,24	0,00	.	.	3,42!	HK.1, My+
B	0,00	284,31	0,00	.	.	5,58	SK.1, My+
4 M	0,00	196,53	0,00	7,73	.	1,48	CK.1, My+
R	0,00	133,24	0,00	.	.	3,42!	HK.1, My+
B	0,00	284,31	0,00	.	.	5,58	SK.1, My+

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach 5.5.2.2 wird berücksichtigt.

bw Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus Q<sub>z</sub> [m]  
 bn Statisch wirksame Breite zur Schubbemessung für Q<sub>y</sub> [m]  
 kb Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn  
 h Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus Q<sub>y</sub> und M<sub>x</sub> [m]  
 d Statisch wirksame Höhe zur Schubbemessung für Q<sub>z</sub> [m]  
 kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d  
 fsk Festigkeit der Bügelbewehrung [MN/m<sup>2</sup>]  
 kc Reduktionsbeiwert für die Betondruckfestigkeit  
 Q<sub>y</sub>, Q<sub>z</sub> Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]  
 VRd Querkraftwiderstand ohne Querkraftbewehrung [kN]  
 VRdc Querkraftwiderstand des Betondruckfelds [kN]  
 z Innerer Hebelarm z=kb\*bn bzw. z=kd\*d  
 Alpha Druckfeldneigung [°]  
 Asb.y,z Erf. Bügelbewehrung aus Q<sub>y</sub>, Q<sub>z</sub> [cm<sup>2</sup>/m]  
 Asl.y,z Erf. Längsbewehrung aus Q<sub>y</sub>, Q<sub>z</sub> [cm<sup>2</sup>]

**Stab 70****Ort 1**

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - SC25/30  
 bw/bn/kb=0,3/0,27/0,9; h/d/kd=0,6/0,57/0,9  
 fsk=500; kc=0,55

1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QN, Endzustand

Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]
Nx- :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Nx+ :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
My- :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
My+ :	0,00	284,31	0,00	0,00	0,00	-30,79
Mz- :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Mz+ :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Mx- :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Mx+ :	0,00	94,43	0,00	0,00	0,00	-9,13
Qy- :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Qy+ :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41
Qz- :	0,00	284,31	0,00	0,00	0,00	-30,79
Qz+ :	0,00	55,96	0,00	0,00	0,00	-5,41

Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit

Qy	: 0,00 kN	Alpha	: 45,00 °
Qy/VyRdc	: 0,00	z	: 0,24 m
Situation	: -, -	erf.Asb.y	: 0,00 cm <sup>2</sup> /m
		erf.Asl.y	: 0,00 cm <sup>2</sup>
Qz	: -30,79 kN	Alpha	: 45,00 °
Qz/VzRdc	: 0,04	z	: 0,51 m
Situation	: SK.1, Qz-	erf.Asb.z	: 2,74 cm <sup>2</sup> /m
		erf.Asl.z	: 0,35 cm <sup>2</sup>

Nachweis der Rissbreiten

Der Nachweis erfolgt durch Begrenzung der Stahlspannung.

(HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

max.s Größter vorhandener Stababstand [mm]  
 Sigma.c Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.s Betonstahlspannung im Zustand II [MN/m<sup>2</sup>]

Stab 70

Ort 1

Stab 70, x = 0,00 m (Stablänge 0,83 m)  
 Querschnitt 2: Polygon - SC25/30  
 Anforderung: erhöht; max.s=200

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	0,460	0,850	0,178	0,0107	0,0828	0,0000

1. Häufige Kombination (HK.1): G+QN, Endzustand

Betonschnittgrößen

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
Nx- :	0,00	69,95	0,00
Nx+ :	0,00	69,95	0,00
My- :	0,00	69,95	0,00
My+ :	0,00	133,24	0,00
Mz- :	0,00	69,95	0,00
Mz+ :	0,00	69,95	0,00

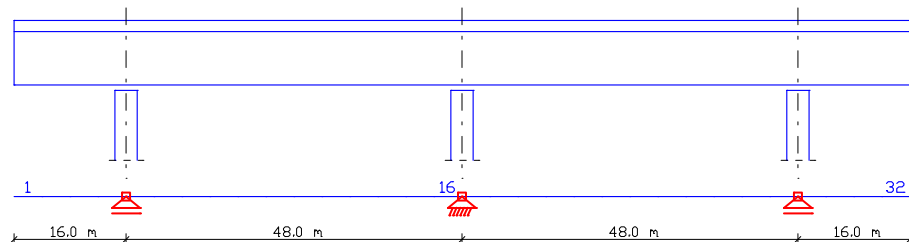
Nachweis der Rissbreite für Bewehrungslage 3 (unten) - Häufige Kombination

Nx [kN]	: 0,00	Sigma.c [MN/m <sup>2</sup> ]	: 5,24
My [kNm]	: 133,24	As [cm <sup>2</sup> ]	: 5,58
Mz [kNm]	: 0,00	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	: 218,56
Situation	: HK.1, My+		zul. 355,00

## Vorgespannte Dachkonstruktion

In diesem Beispiel wird eine weitgespannte Dachkonstruktion einer Eingangshalle behandelt, die als Durchlaufträger über zwei Felder mit beidseitigem Kragarm ausgebildet wird. Als Querschnitt wird ein Plattenbalken gewählt. In der folgenden Abbildung ist das System in Längs- und Querschnitt dargestellt.

Die Dachkonstruktion erhält in Längsrichtung eine beschränkte Vorspannung mit nachträglichem Verbund. In Querrichtung wird aus wirtschaftlichen Gründen auf die Anordnung einer Vorspannung verzichtet. Bezüglich Rissbildung gelten erhöhte Anforderungen.

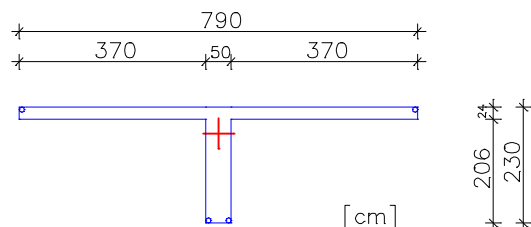


Statisches System und Abmessungen (Längs- und Querschnitt)

### Material

Beton SC45/55  
 Betonstahl BSt 500, Achsabstand vom Rand 5 cm

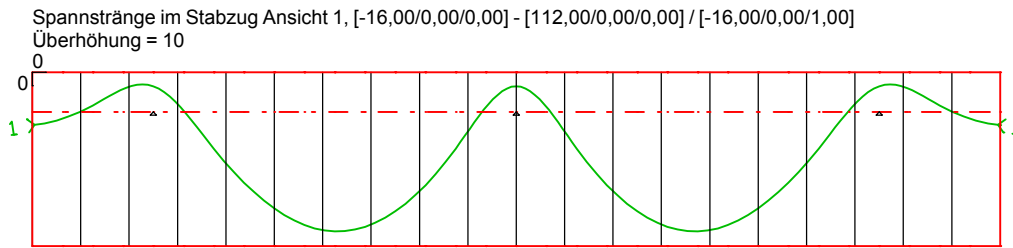
### Querschnitt



### Spannstahl und Spannverfahren

Spannstahlgüte	St 1520/1770
Zulassung des Spannverfahrens	SIA 262
Anzahl der Spannglieder im Bündel	4
Querschnittsfläche $A_p$	1800 mm <sup>2</sup>
E-Modul des Spannstahls	195000 MN/m <sup>2</sup>
0,1%-Dehngrenze (Streckgrenze) des Spannstahls $f_{p0,1k}$	1520 MN/m <sup>2</sup>
Zugfestigkeit des Spannstahls $f_{pk}$	1770 MN/m <sup>2</sup>
Zulässige Vorspannkraft eines Spannglieds $P_{m0}$	2230,2 kN
Reibungsbeiwerte beim Anspannen und Nachlassen $\mu$	0,2
Ungewollter Umlenkwinkel eines Spannglieds $\beta'$	0,3 °/m
Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker	6 mm
Hüllrohrdurchmesser $d_h$	82 mm

Die Spanngliedführung kann der nächsten Abbildung entnommen werden. Es werden 4 Bündelspannglieder angeordnet, die über die gesamte Trägerlänge durchlaufen und an beiden Trägerenden angespannt werden. Spannverfahren, Spann-anweisung und Spannkraftverlauf für einen Spannstrang sind ebenfalls dargestellt.



Spannstrangordinaten zv [cm] an den Stützstellen

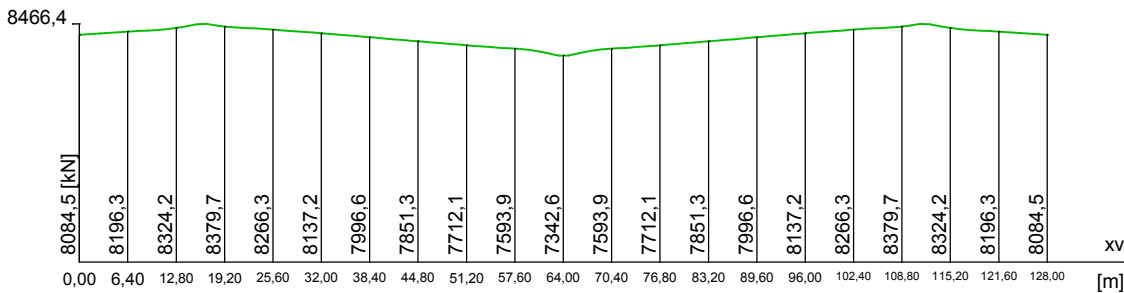
xv	0,00	6,40	12,80	19,20	25,60	32,00	38,40	44,80	51,20	57,60	64,00	70,40	76,80	83,20	89,60	96,00	102,40	108,80	115,20	121,60	128,00
1	70,0	52,0	19,2	42,0	120,2	180,1	208,8	201,5	157,4	78,3	18,5	78,3	157,4	201,5	208,8	180,1	120,2	42,0	19,2	52,0	70,0

Spannkraftverlauf Spannstrang 1 (4 Spannlied(er), l = 128,41 m)

Spannverfahren 1 - Beispiel. Zulassung nach SIA 262.  
 Pm0 = 2230,2 kN, Ap = 1800,0 mm<sup>2</sup>, ua = 0,20, Winkel β' = 0,30 °/m  
 E-Modul = 195000 MN/m<sup>2</sup>, Ah = 5281,0 mm<sup>2</sup>, μn = 0,20, Schlupf = 6,00 mm

Spannanweisung 1 - Beispiel

Spannanker : Anfang Ende  
 Bez. Spannkraft: 1,000 1,000  
 Spannkraft [kN]: 2230,2 2230,2  
 Längung [mm]: 674,9 70,8



Spannliedführung und Spannkraftverlauf im Längsschnitt (4 Spannlieder)

**Lasten**

- Lastfall 1 Eigenlast (G1).
- Lastfall 2 Ausbaulasten q=11,06 kN/m (G2).
- Lastfall 3 Verkehrslast (Schneelast) q=7,90 kN/m (Q).
- Lastfall 10 Vorspannung (P).
- Lastfall 15 Kriecherzeugende Dauerlast: G1+P+G2
- Lastfall 20 Kriechen und Schwinden (CSR).  
 Beiwerte:  $\varphi_{t_{\infty}} = 2,55$ ;  $\rho = 0,8$ ;  $\epsilon_{t_{\infty}} = -24,8 \cdot 10^{-5}$   
 Kriecherzeugender Dauerlastfall: 15  
 Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl wird berücksichtigt.

**SIA 262 Einwirkungen**

**Standard Bemessungsgruppe**

**G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 0,8

Lastfälle

1 Eigenlast

**G - Ausbaulasten**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 0,8

Lastfälle

2 Ausbaulasten

**QS - Schnee- und Eislast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Gebäude  
 Schneelasten  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 1 / 1 / 1

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

3 Schneelast

**P - Vorspannung**

Gamma.sup / gamma.inf = 1 / 1

Lastfälle interne Vorspannung

10 Vorspannung

**CSR1 - Kriechen, Schwinden, Relaxation**

Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 4,5 %.

Lastfälle

20 Kriechen und Schwinden

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Bauzustand - Unverpresst

G Eigenlast  
P Vorspannung

**2. Ständige und vorübergehende Situation - t0**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
QS Schnee- und Eislast

**3. Ständige und vorübergehende Situation - too**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
CSR1 Kriechen, Schwinden, Relaxation  
QS Schnee- und Eislast

**1. Seltene (charakteristische) Situation**

Bauzustand - Unverpresst

G Eigenlast  
P Vorspannung

**2. Seltene (charakteristische) Situation - t0**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
QS Schnee- und Eislast

**3. Seltene (charakteristische) Situation - too**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
CSR1 Kriechen, Schwinden, Relaxation  
QS Schnee- und Eislast

**1. Häufige Situation**

Bauzustand

G Eigenlast  
P Vorspannung

**2. Häufige Situation - t0**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
QS Schnee- und Eislast

**3. Häufige Situation - too**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
CSR1 Kriechen, Schwinden, Relaxation  
QS Schnee- und Eislast

**1. Quasi-ständige Situation**

Bauzustand

G Eigenlast  
P Vorspannung

**2. Quasi-ständige Situation - t0**

Endzustand

G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
QS Schnee- und Eislast

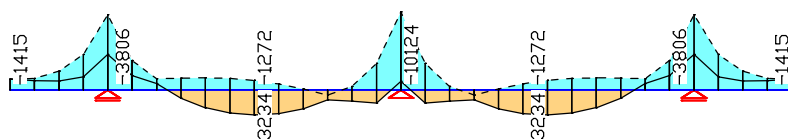
**3. Quasi-ständige Situation - too**

Endzustand

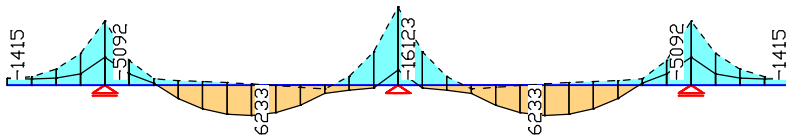
G Eigenlast  
G Ausbaulasten  
P Vorspannung  
CSR1 Kriechen, Schwinden, Relaxation  
QS Schnee- und Eislast

Im vorliegenden Beispiel werden alle möglichen Kombinationen von Lastfällen gebildet und bemessen. Diese Methode wird in den Berechnungseinstellungen gewählt, ist aber bei einer größeren Anzahl von Lastfällen sehr zeitaufwendig.

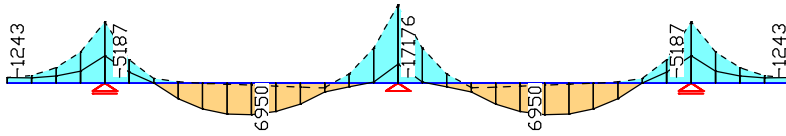
Nachfolgend ist beispielhaft der Verlauf der Biegemomente  $M_y$  für die Bemessungssituationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit dargestellt.



Biegemoment  $M_y$  [kNm] der 1. ständigen und vorübergehenden Situation



Biegemoment  $M_y$  [kNm] der 2. ständigen und vorübergehenden Situation



Biegemoment  $M_y$  [kNm] der 3. ständigen und vorübergehenden Situation

**Bemessung nach SIA 262 (2013)**

**Bemessungsvorgaben**

Qu.	Vorspannung des Bauteils	Anforderung	Bewehrung	Ermüd.	Riss-	Beton-
			M R B Q T	S P C	breite	drucksp.
1	Nachtr. Verbund	erhöht	x + x x .	. . .	x	x

- (M) Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen (Robustheitsbewehrung).
- (R) Rissbewehrung aus Zwang (x), erf. Bewehrung aus Lasteinwirkung (+).
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
(ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Bewehrung gegen sprödes Versagen bei Flächenelementen.
- eta.t Beiwert für Betonfestigkeit nach 4.2.1.3.
- fsk Stahlgüte der Bügel [MN/m<sup>2</sup>].
- Alpha Neigung des Betondruckfelds [°].
- kc Reduktionsbeiwert für Betondruckfestigkeit nach 4.2.1.7.
- Platte Balken werden wie Platten bemessen.
- eps.v Grundwert der Dehnung nach 4.3.3.2.2 [o/oo].
- Dmax Größtkorn des Betons nach Gl. (37) [mm].
- Längsb. Die Längsbewehrung ist nach 4.3.3.2.3 abgestuft.

Qu.	Beton	Bem. für M,N	Red. Vor- spg.	eta.t	fsk [MN/m <sup>2</sup> ]	Alpha [°]	kc	Bem. wie Platte	Grund- wert eps.v	Dmax [mm]	Längsb. abge- stuft
1	SC45/55	ST	.	1,00	500	45,00	0,55	.	.	.	.

**Schubquerschnitte**

- bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
  - h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
  - kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d nach 4.3.3.4.2.
  - z1, z2 Abmessungen des ideellen Hohlquerschnitts für Torsion nach 4.3.5.1.
  - tk Wanddicke des Hohlquerschnitts.
- | Qu. | Breite [m] | Nutzhöhe [m] | Höhe [m] | Nutzhöhe [m] | Torsionsquerschn. [m] |       |       |      |       |       |       |
|-----|------------|--------------|----------|--------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|     | bw         | bw.nom       | bn       | kb           | h                     | h.nom | d     | kd   | z1    | z2    | tk    |
| 1   | 0,500      | 0,500        | 0,450    | 0,90         | 2,300                 | 2,300 | 2,250 | 0,90 | 2,200 | 0,400 | 0,100 |

**Vorgaben für den Nachweis der Betondruckspannungen**

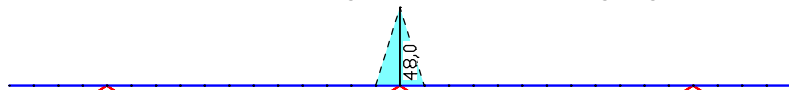
- Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.  
(QK) Quasi-ständige Kombination.
  - fck(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
  - Sigma.c(t) Betondruckspannung zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
- | Qu. | zul.sigma.c (QK) | fck(t) [MN/m <sup>2</sup> ] | zul.sigma.c(t) |
|-----|------------------|-----------------------------|----------------|
| 1   | 0,45 fck         | 45,00                       | 0,45 fck(t)    |

**Spannungsberechnung für Stäbe**

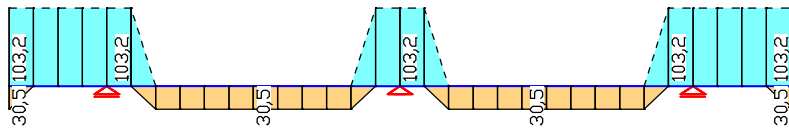
- Beim Nachweis der Robustheitsbewehrung erfolgt die Spannungsberechnung am Bruttoquerschnitt.
- Beim Nachweis der Rissbewehrung und der Rissbreite erfolgt die Ermittlung der Biegespannung am Bruttoquerschnitt.
- Beim Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen erfolgt die Berechnung der Biegespannung
  - ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern im Verbund vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.



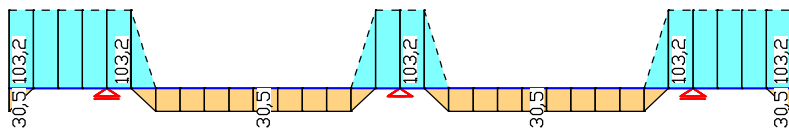
Den Verlauf der erforderlichen Biege- und Schubbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen.



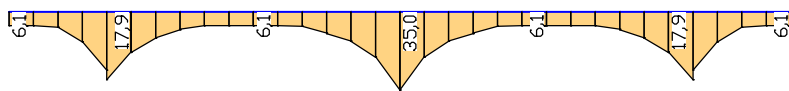
Längsbewehrung  $A_s$  aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>] (obere Bewehrung strichliert).



Mindestbewehrung  $A_s$  zur Verhinderung spröden Versagens (Robustheit) [cm<sup>2</sup>] (obere Bewehrung strichliert).



Umhüllende Längsbewehrung  $A_s$  aus den Nachweisen [cm<sup>2</sup>] (obere Bewehrung strichliert).



(Mindest-)Querkraftbewehrung  $A_{s,b,z}$  in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>/m].

Auf den folgenden Seiten ist das ausführliche Nachweisprotokoll für Stab 16 am Ort 2 (Mittelstütze) in Auszügen wiedergegeben.

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung gegen sprödes Versagen (Robustheitsbewehrung), Charakt.K. fctd Bemessungswert der Betonzugfestigkeit nach Ziff. 4.4.1 [MN/m<sup>2</sup>]. zs,o/u Hebelarm der inneren Kräfte oben/unten [m]. S.s,adm Zulässige Stahlspannung nach Fig. 31 [MN/m<sup>2</sup>]. max Sc Maximale Betonrandspannung aus Charakt. K. [MN/m<sup>2</sup>]. ohne den statisch bestimmten Anteil aus Vorspannung.
- (R) Erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite. Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert. max.s Größter vorhandener Stababstand [mm].
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit. Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert. fck Betonfestigkeit für Bemessung [MN/m<sup>2</sup>]. N0, M0 Statisch bestimmter Anteil der Spannstränge im Verbund [kN, kNm].

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - SC45/55, 1 Spannstrang im Verbund  
 Stahl 1; Bemessungsmodus: Standard  
 (M) fctd=3,8; zs,o/u=2,025/2,025; Sigma.s,adm=435  
 (R) max.s=200  
 (B) fck=45

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2597	9,8822	0,0000

**Spannstränge im Verbund**

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1520	1770	3,950	0,185	7200	82	7342,65	0,00

**1. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 1 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	-7342,59	-4388,77	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	L1+L10

**2. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Charakteristische (seltene) Kombination (CK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,63	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6635,18 kN; My0=2255,96; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6521,75	-9688,00	0,00	113,43	-11943,96	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: L1+L2+0,96*L10+L20+L3

**1. Häufige Kombination (HK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Häufige Kombination (HK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Häufige Kombination (HK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-7342,59	-1111,65	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: 0,80*L1+L10

**2. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,63	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6635,18 kN; My0=2255,96; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]	Nx[kN]	My[kNm]	Mz[kNm]
2	-6521,75	-17174,86	0,00	113,43	-19430,82	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	: 1,35*L1+1,35*L2+0,96*L10+L20+1,50*L3

**Nachweis der Längsbewehrung**

Bewehrung Lage Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	max Sc [MN/m <sup>2</sup> ]	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	Situation
1 M	113,43	-11943,96	0,00	5,03	.	51,62	CK.3,2
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-,-
B	-6521,75	-17174,86	0,00	.	.	24,00	SK.3,2
2 M	113,43	-11943,96	0,00	5,03	.	51,62	CK.3,2
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-,-
B	-6521,75	-17174,86	0,00	.	.	24,00	SK.3,2
3 M	0,06	-6885,27	0,00	.	.	0,00	CK.1,1
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-,-
B	-7342,59	-1111,65	0,00	.	.	0,00	SK.1,2
4 M	0,06	-6885,27	0,00	.	.	0,00	CK.1,1
R	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	-,-
B	-7342,59	-1111,65	0,00	.	.	0,00	SK.1,2

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach 5.5.2.2 wird berücksichtigt.

bw	Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus Qz [m]
bw.nom	Nennwert der Breite nach Abzug der Hüllrohrdurchmesser [m]
bn	Statisch wirksame Breite zur Schubbewehrung für Qy [m]
kb	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn
h	Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus Qy und Mx [m]
h.nom	Nennwert der Höhe nach Abzug der Hüllrohrdurchmesser [m]
d	Statisch wirksame Höhe zur Schubbewehrung für Qz [m]
kd	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d
fsk	Festigkeit der Bügelbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ]
kc	Reduktionsbeiwert für die Betondruckfestigkeit
Qy, Qz	Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]
VRd	Querkraftwiderstand ohne Querkraftbewehrung [kN]
VRdc	Querkraftwiderstand des Betondruckfelds [kN]
z	Innerer Hebelarm z=kb*bn bzw. z=kd*d
Alpha	Druckfeldneigung [°]
Asb.y,z	Erf. Bügelbewehrung aus Qy, Qz [cm <sup>2</sup> /m]
Asl.y,z	Erf. Längsbewehrung aus Qy, Qz [cm <sup>2</sup> ]

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - SC45/55, 1 Spannstrang im Verbund  
 bw/bw.nom/bn/kb=0,5/0,5/0,45/0,9; h/h.nom/d/kd=2,3/2,3/2,25/0,9  
 fsk=500; kc=0,55

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]
2	-7342,59	-16122,67	0,00	0,00	0,00	-3036,21

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	1,35*L1+1,35*L2+L10+1,50*L3

**3. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 8 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]
2	-6521,75	-17174,86	0,00	0,00	0,00	-3078,23

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	1,35*L1+1,35*L2+0,96*L10+L20+1,50*L3

**Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit**

Qy	: 0,00 kN	Alpha	: 45,00 °
Qy/VyRdc	: 0,00	z	: 0,41 m
Situation	: -, -	erf.Asb.y	: 0,00 cm <sup>2</sup> /m
		erf.As1.y	: 0,00 cm <sup>2</sup>
Qz	: -3078,24 kN	Alpha	: 45,00 °
Qz/VzRdc	: 0,42	z	: 2,02 m
Situation	: SK.3,2	erf.Asb.z	: 34,96 cm <sup>2</sup> /m
		erf.As1.z	: 35,40 cm <sup>2</sup>

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch Begrenzung der Stahlspannung.

(HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

max.s Größter vorhandener Stababstand [mm]  
 Sigma.c Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.s Betonstahlspannung im Zustand II [MN/m<sup>2</sup>]

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - SC45/55, 1 Spannstrang im Verbund  
 Anforderung: erhöht; max.s=200

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto:	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2597	9,8822	0,0000

**Spannstränge im Verbund**

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	fp0,1k [MN/m <sup>2</sup> ]	fpk [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1520	1770	3,950	0,185	7200	82	7342,65	0,00

**1. Häufige Kombination (HK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**2. Häufige Kombination (HK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Häufige Kombination (HK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	9,63	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Stat. best. Anteil (P+CSR): Nx0=-6635,18 kN; My0=2255,96; Mz0=0,00 kNm

Maßgebende Schnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Betonschnittgrößen			Verbundschnittgrößen		
	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
2	-6521,75	-9688,00	0,00	113,43	-11943,96	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
2	L1+L2+0,96*L10+L20+L3

**Nachweis der Rissbreite für Bewehrungslage 2 (oben) - Häufige Kombination**

Nx [kN]	: -6521,75	Sigma.c [MN/m <sup>2</sup> ]	: 1,82
My [kNm]	: -9688,00	As [cm <sup>2</sup> ]	: 51,62
Mz [kNm]	: 0,00	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	: 63,65 zul. 355,00
Situation	: HK.3,2		

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines ungerissenen Betonquerschnitts.

f<sub>ck</sub> Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons [MN/m<sup>2</sup>]  
 f<sub>ck</sub>(t) Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t  
 der Eintragung der Vorspannung (Situation G1+P) [MN/m<sup>2</sup>]  
 min Sigma.x Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 oben, unten Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

**Ort 2**

Stab 16, x = 4,00 m (Stablänge 4,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - SC45/55, 1 Spannstrang im Verbund  
 0,45\*f<sub>ck</sub>=20,25; 0,45\*f<sub>ck</sub>(t)=20,25

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz[m <sup>4</sup> ]
brutto:	2,926	3,950	0,525	1,2560	9,8822	0,0000
netto :	2,905	3,950	0,527	1,2535	9,8822	0,0000
ideell:	2,958	3,950	0,521	1,2597	9,8822	0,0000

**1. Quasi-ständige Kombination (QK.1): G.1+P, Bauzustand unverpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 1 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
1	-7342,59	-4388,77	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	L1+L10

**2. Quasi-ständige Kombination (QK.2): G.1+G.2+P+QS, Endzustand verpresst**

Kein Schnittkraftsatz dieser Situation war maßgebend.

**3. Quasi-ständige Kombination (QK.3): G.1+G.2+P+CSR1+QS, Endzustand verpresst**

Maßgebende Betonschnittgrößen aus 2 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
2	-6521,75	-9688,00	0,00

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

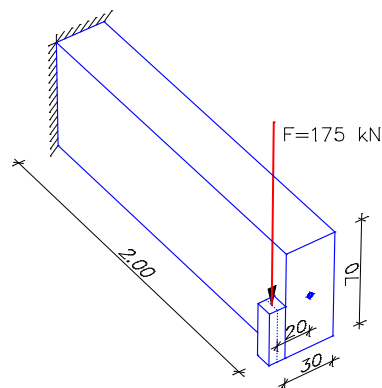
Satz	Kombination
2	L1+L2+0,96*L10+L20+L3

**Nachweis der Betondruckspannungen für die Quasi-ständige Kombination**

Seite	Qu.-Pkt.	min Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	Zustand	Situation
oben	2	-0,68	-20,25	Bau	QK.1,1
unten	9	-15,89	-20,25	End	QK.3,2

**Torsionsbalken**

Der dargestellte Kragarm wird durch eine exzentrisch angreifende Last F = 175 kN beansprucht. Die erforderliche Schub-, Torsionslängs- und Bügelbewehrung sind im nachfolgenden Protokoll aufgeführt.



Systemzeichnung

**SIA 262 Einwirkungen**

**Standard Bemessungsgruppe**

**G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 0,8

Lastfälle

-----  
 1 LAST

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

G - Eigenlast

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

M,N	Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
Red.	Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Bewehrung gegen sprödes Versagen bei Flächenelementen.
eta.t	Beiwert für Betonfestigkeit nach 4.2.1.3.
fsk	Stahlgüte der Bügel [MN/m <sup>2</sup> ].
Alpha	Neigung des Betondruckfelds [°].
kc	Reduktionsbeiwert für Betondruckfestigkeit nach 4.2.1.7.
Platte	Balken werden wie Platten bemessen.
eps.v	Grundwert der Dehnung nach 4.3.3.2.2 [o/oo].
Dmax	Größtkorn des Betons nach Gl. (37) [mm].
Längsb.	Die Längsbewehrung ist nach 4.3.3.2.3 abgestuft.

Qu.	Beton	Bem.	Red.	eta.t	fsk	Alpha	kc	Bem.	Grund-	Längsb.
		für	Vor-					wie	wert	abge-
		M,N	spg.		[MN/m <sup>2</sup> ]	[°]		Platte	eps.v	stuf
1	SC35/45	.	.	.	500	45,00	0,55	.	.	.

**Schubquerschnitte**

bw.nom	Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
h.nom	Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 4.3.3.3.5.
kb, kd	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d nach 4.3.3.4.2.
z1, z2	Abmessungen des ideellen Hohlquerschnitts für Torsion nach 4.3.5.1.
tk	Wanddicke des Hohlquerschnitts.

Qu.	Breite [m]	Nutzbreite	Höhe [m]	Nutzhöhe	Torsionsquerschn. [m]
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h
				h.nom	d [m]
				kd	z1
					z2
					tk
1	0,300	.	0,245	0,90	0,700
					0,645
					0,90
					0,595
					0,195
					0,105

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach 5.5.2.2 wird berücksichtigt.

bw	Wirksame Breite zur Berechnung der Schubspannungen aus Qz und Mx [m]
bn	Statisch wirksame Breite zur Schubbemessung für Qy [m]
kb	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus bn
h	Wirksame Höhe zur Berechnung der Schubspannungen aus Qy und Mx [m]
d	Statisch wirksame Höhe zur Schubbemessung für Qz [m]
kd	Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms aus d
z1, z2	Höhe und Breite der Kernquerschnittsfläche Ak für Torsion [m]
tk	Wanddicke des Ersatzhohlquerschnittes für Torsion [m]
fsk	Festigkeit der Bügelbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ]
kc	Reduktionsbeiwert für die Betondruckfestigkeit
Qy, Qz	Bemessungsquerkräfte in y- und z-Richtung [kN]
VRd	Querkraftwiderstand ohne Querkraftbewehrung [kN]
VRdc	Querkraftwiderstand des Betondruckfelds [kN]
z	Innerer Hebelarm z=kb*bn bzw. z=kd*d
Alpha	Druckfeldneigung [°]
Asb.y,z	Erf. Bügelbewehrung aus Qy, Qz [cm <sup>2</sup> /m]
Asl.y,z	Erf. Längsbewehrung aus Qy, Qz [cm <sup>2</sup> ]
Mx	Bemessungstorsionsmoment [kNm]
TRdc	Torsionswiderstand des Betondruckfelds [kNm]
Asb.T	Erf. Bügelbewehrung aus Torsion [cm <sup>2</sup> /m]
Asl.T	Erf. Längsbewehrung aus Torsion [cm <sup>2</sup> ]

**Stab 1****Ort 1**

Stab 1, x = 0,00 m (Stablänge 2,00 m)  
 Querschnitt 1: Polygon - SC35/45  
 bw/bn/kb=0,3/0,245/0,9; h/d/kd=0,7/0,645/0,9  
 fsk=500; kc=0,55  
 Ersatzhohlquerschnitt z1/z2=0,595/0,195; tk=0,105

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G, Endzustand****Betonschnittgrößen**

	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]
Nx-	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Nx+	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
My-	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25
My+	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Mz-	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Mz+	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Mx-	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Mx+	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25
Qy-	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Qy+	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Qz-	0,00	-280,00	0,00	28,00	0,00	140,00
Qz+	0,00	-472,50	0,00	47,25	0,00	236,25

**Nachweis der Schubbewehrung und der Druckstrebenfestigkeit**

Qy	: 0,00 kN	Alpha	: 45,00 °
Qy/VyRdc	: 0,00	z	: 0,22 m
Situation	: -, -	erf.Asb.y	: 0,00 cm <sup>2</sup> /m
		erf.As1.y	: 0,00 cm <sup>2</sup>
Qz	: 236,25 kN	Alpha	: 45,00 °
Qz/VzRdc	: 0,20	z	: 0,58 m
Situation	: SK.1,Qz+	erf.Asb.z	: 9,36 cm <sup>2</sup> /m
		erf.As1.z	: 2,72 cm <sup>2</sup>
Mx	: 47,25 kNm	Alpha	: 45,00 °
Q/VRdc+Mx/TRdc	: 0,50	erf.Asb.T	: 4,68 cm <sup>2</sup> /m
Situation	: SK.1,Qz+	erf.As1.T	: 7,40 cm <sup>2</sup>

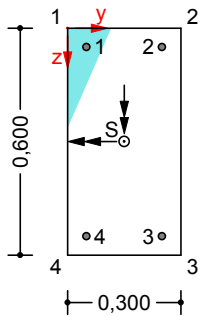
# Einzelbemessung

Ein einfacher Rechteckquerschnitt wird für Biegung und Normalkraft bemessen.

## Pos. 1 - Stahlbeton-Biegebemessung nach SIA 262

Querschnitt 1

M = 1 : 20  
 Druckzone



Einwirkung N = 10,00 kN; My = 67,50; Mz = 27,00 kNm  
 Widerstand N = 10,00 kN; My = 67,50; Mz = 27,00 kNm  
 Kraftsystem ys / zs = 0,150 / 0,300 m  
 Festigkeit SC20/25; gamma.c = 1,50; gamma.s = 1,15  
 Bemessungsart Standard  
 Bewehrung 3,63 cm<sup>2</sup>; 0,20 %; Betonfläche = 1800,00 cm<sup>2</sup>

Betonquerschnitt					Innere			
Punkt	y [m]	z [m]	eps[‰]	sigma[MPa]	Kräfte	y [m]	z [m]	F [kN]
1	0,000	0,000	-3,00	-13,33	Druck	0,034	0,078	-150,45
	0,115	0,000	0,00	0,00	Zug	0,210	0,512	160,45
2	0,300	0,000	4,80	0,00	Hebelarm	0,175	0,435	
3	0,300	0,600	11,64	0,00				
4	0,000	0,600	3,84	0,00				
	0,000	0,263	0,00	0,00				

Betonstahl									
Punkt	y [m]	z [m]	d1 [m]	Es, βs [MPa]	Zv0 [kN]	eps[‰]	sigma[MPa]	As [cm <sup>2</sup> ]	
1	0,050	0,050	0,050	205000 500	0,0	-1,13	-231,68	0,00	
2	0,250	0,050	0,050	205000 500	0,0	4,07	437,15	0,28	
3	0,250	0,550	0,050	205000 500	0,0	9,77	444,08	2,61	
4	0,050	0,550	0,050	205000 500	0,0	4,57	437,76	0,74	

## Literaturhinweise

Dokumentation SIA D 0181

Grundlagen der Projektierung von Tragwerken,  
Einwirkungen auf Tragwerke,  
Einführung in die Normen SIA 260 und 261,  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2003.

Dokumentation SIA D 0182

Betonbau, Einführung in die Norm SIA 262,  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2003.

Dokumentation SIA D 0240

Erhaltung von Tragwerken - Vertiefung und Anwendung  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2011.

EN 1992-1-1:2004/AC:2010

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1992-2:2005/AC:2008

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

SIA 260:2013 Bauwesen

Grundlagen der Projektierung von Tragwerken,  
Schweizer Norm SN 505 260,  
Eingetragene Norm der schweizerischen Normen-Vereinigung SNV,  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2013.

SIA 261:2003 Bauwesen

Einwirkungen auf Tragwerke,  
Schweizer Norm SN 505 261,  
Eingetragene Norm der schweizerischen Normen-Vereinigung SNV,  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2003.

SIA 262:2013 Bauwesen

Betonbau, Schweizer Norm SN 505 262,  
Eingetragene Norm der schweizerischen Normen-Vereinigung SNV,  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2013.

# DIN Fachbericht Brückennachweise

## Grundlagen

Die Brückennachweise nach den DIN Fachberichten 101 und 102 (nachfolgend mit FB 101 und FB 102 bzw. I und II abgekürzt) sind als Ergänzung zur FEM-Analyse 3D konzipiert. Sie sind anwendbar für Brückenbauwerke und andere Ingenieurbauwerke, soweit Einwirkungen aus Straßen- oder Eisenbahnverkehr zu berücksichtigen sind. Als Tragwerksmodelle sind Stab-, Flächen- und Volumentragwerke zugelassen. In den Berechnungseinstellungen kann gewählt werden, welche Fassung der Norm maßgebend ist:

- Ausgabe 2003-03
- Ausgabe 2009-03

Innerhalb eines Tragwerksmodells sind verschiedenartige Bauteile kombinierbar:

- Nicht vorgespannte Bauteile
- Vorspannte Bauteile mit nachträglichem Verbund
- Vorspannte Bauteile ohne Verbund
- Bauteile mit externer Vorspannung
- Bauteile in Mischbauweise

Die Durchführung der Nachweise erfolgt im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle und Lastmodellvarianten den Einwirkungsgruppen nach FB 101 zuzuordnen. In den gewünschten Nachweiskombinationen werden anschließend die Bemessungssituationen für die Bau- und Endzustände ausgewählt. Daraus ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente.

Die Dialoge zur Tragwerksart und Nachweisauswahl sowie zu den Lastmodellvarianten und Einwirkungen sind im Abschnitt *DIN Fachbericht Brückennachweise* der Datenbasis zusammengefasst. Die detaillierten Nachweisvorgaben und Bewehrungsangaben werden im Rahmen der Querschnittsdefinition eingegeben.

In Ergänzung zu FB 102, Abschnitt 3.1.4 werden alle Elemente mit den Materialien *C12/15* bis *C100/115* sowie *LC12/13* bis *LC60/66* nachgewiesen. Für die Klassen *LC12/13* bis *LC60/66* gelten die Vorschriften der DIN 1045-1, ab den Festigkeitsklassen *C55/67* und *LC55/60* findet Vorschrift 5.3.3 (9) der DIN 1045-1 Anwendung.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden alle Nachweise am Polygonquerschnitt geführt. Allgemeine Hinweise zur Anwendung von Bemessungsobjekten sind dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

Im Ordner *DIN 1045-1 Bemessung* der Datenbasis ist zusätzlich eine Einzelbemessung für frei definierte Polygonquerschnitte oder Verbundquerschnitte möglich.



## Eingaben

### Tragwerksart

Der Dialog zur Auswahl der Tragwerksart wird aus der Datenbasis oder über die Einstellungen im Berechnungsmenü aufgerufen. Beim Verkehrsweg kann zwischen Straße und Eisenbahn gewählt werden. Die Bauart ist derzeit auf Beton beschränkt.

### Lastmodell 1 für Straßenbrücken

Das Lastmodell 1 besteht nach FB 101, Abschnitt 4.3.2, aus zwei Teilen:

- Doppelachse (Tandemsystem TS)
- Gleichmäßig verteilte Flächenlast UDL

Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt. Da nicht in allen Fällen von vornherein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, können unterschiedliche Varianten von Laststellungen definiert werden.

Die Bearbeitung des Lastmodells 1 erfolgt über den Ordner *DIN Fachbericht Brückennachweise / Lastmodell 1* der Datenbasis. Mit der Option *Neu* des Kontextmenüs des Lastmodells 1 wird eine neue Variante von Laststellungen angelegt und der Eingabedialog gestartet.

Die angepassten Grundwerte des Tandemsystems ( $\alpha_{Qi} \cdot Q_{ik}$ ) und die Lastordinaten der UDL-Lasten ( $\alpha_{qi} \cdot q_{ik}$ ) werden mit dem Kontextmenüpunkt *Eigenschaften* des Lastmodells 1 eingestellt.

Stellung	Tandem-System (TS) alpha.Qi * Qik [kN]	Gleichlast (UDL) alpha.qi * qik [kN/m²]
Fahrstreifen 1	240	9
Fahrstreifen 2	160	2,5
Fahrstreifen 3	0	2,5
Andere Fahrstreifen		2,5
Verbleibende Fläche (qrk)		2,5

Bei der FEM-Berechnung werden alle vertikalen Lastanteile des Lastmodells 1 als Flächenlasten behandelt und in getrennten Lastfällen berechnet, um später die extremalen Reaktionen ermitteln zu können.

Mit der Option *Projizierte Lasten anwenden* werden die vertikalen Lasten auf die Elemente in globaler z-Richtung projiziert. Daher ist die Last über den Elementen anzuordnen (siehe *Freie Flächenlast n-Eck*). Es werden nur Elemente belastet, die nicht durch andere Elemente verdeckt werden. Dies gilt auch für eine teilweise Überdeckung.

#### Aus

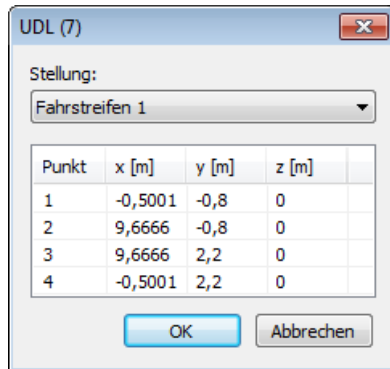
Beendet die Darstellung des Lastmodells 1.

### TS Neu

Eingabe einer neuen Stellung des Tandemsystems (siehe auch Tandemsystem). Die Stellungen des Tandemsystems schließen sich gegenseitig aus.

### UDL Neu

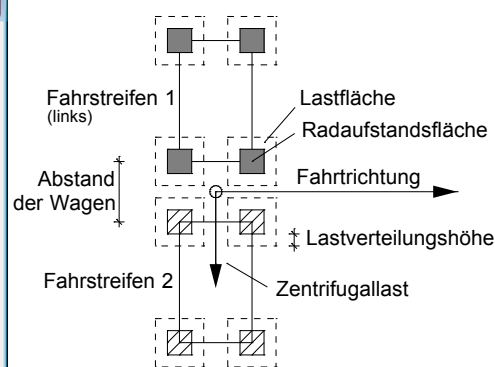
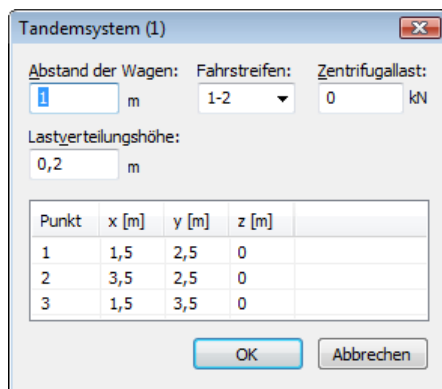
Fortlaufende Eingabe von vier- oder dreieckigen Lastflächen der UDL-Last. Die Teilflächen der UDL-Last können gleichzeitig wirken. Die Eingabe ist für UDL2 (Fahrstreifen 2) voreingestellt. Über das Kontextmenü der Lastfläche können andere Fahrstreifen oder eine Restfläche gewählt werden.



### UDL Gen

Generieren neuer Lastflächen der UDL-Last. Das viereckige Generierungsgebiet wird mit identischer Anzahl von Lastflächen auf den gegenüberliegenden Rändern eingeteilt.

## Tandemsystem des Lastmodells 1



Eingabedialog und Prinzipskizze des Tandemsystems im Lastmodell 1 nach FB 101.

### Abstand der Wagen

Abstand der Schwerpunkte der Radaufstandsflächen (siehe Abbildung).

### Fahrstreifen

Anordnung der Fahrstreifen von links nach rechts.

### Zentrifugallast

Lastgröße  $Q_t$  dieser Stellung des Tandemsystems. Sie wirkt senkrecht zur Fahrtrichtung. Ihre exzentrische Lage wird nicht erfasst.

### Lastverteilungshöhe

Ergibt in Verbindung mit den Radaufstandsflächen die Lastflächen des Tandemsystems (siehe Abbildung).

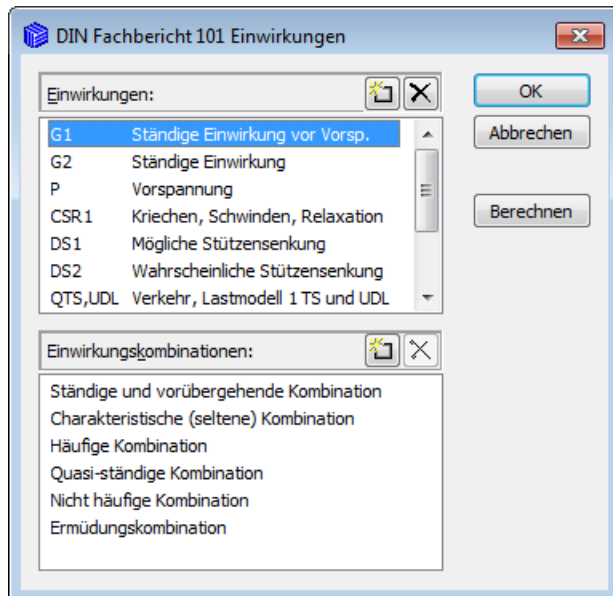
### Punkt

1. Bezugspunkt des Tandemsystems
2. Punkt der lokalen x-Achse (Fahrtrichtung)
3. Punkt in lokaler x-y Ebene

## Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die maßgeblichen Einwirkungskombinationen.

Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



### Einwirkungen

Liste der definierten Einwirkungen. Folgende Einwirkungen können definiert werden:

- G1 bis G9: Ständige Einwirkungen
- P: Vorspannung
- QTS,UDL: Verkehr, Lastmodell 1 TS und UDL
- QI: Verkehr, Bremsen und Anfahren
- Qt: Verkehr, Zentrifugallast
- T: Temperatur
- W: Wind
- DS1: Mögliche Stützensenkung
- DS2: Wahrscheinliche Stützensenkung
- CSR1, CSR2: Kriechen, Schwinden und Relaxation zu verschiedenen Zeitpunkten
- A: Außergewöhnliche Einwirkung
- E: Erdbeben
- Q1 bis Q9: Andere veränderliche Einwirkung
- Qfat: Zyklische Ermüdungseinwirkung

Die Einwirkungen DS1 und DS2 ebenso wie die Einwirkungen Q, T und W werden in den Bemessungssituationen nur berücksichtigt, wenn sie ungünstig wirken.

Die Einwirkungen QTS, QUDL, QI und Qt stehen nur bei Wahl des Verkehrswegs Straße zur Verfügung.

### Einwirkungskombinationen

Liste der definierten Einwirkungskombinationen.



Fügt eine neue Einwirkung bzw. Einwirkungskombination hinzu.



Entfernt die markierte Einwirkung bzw. Einwirkungskombination.

### Berechnen

Berechnet die definierten Einwirkungskombinationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Kombinationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls.

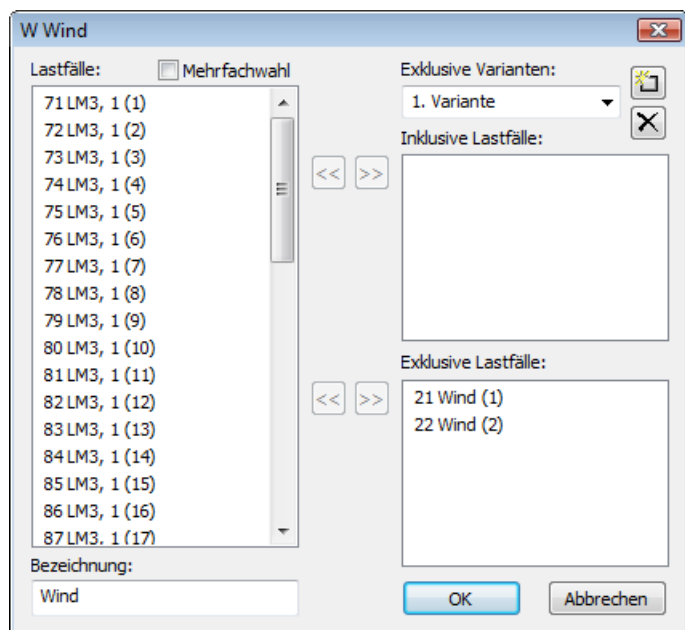
Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Verwendung der Kombinationen in den verschiedenen Nachweisen des Fachberichts 102 dargestellt.

Kombination	Tragfähigkeit	FB 102	Gebrauchstauglichkeit	FB 102
Ständig & vorüb. Außergewöhnlich Erdbeben	Längsbewehr.	4.3.1		
	Querbewehr.	4.3.2		
	Torsionsbewehr.	4.3.3		
Charakteristisch			Rissbewehrung Rissbreite Klasse A Betondruckspannungen Betonzugspannungen	4.4.2.2 4.4.2.4 4.4.1.1 4.4.0.3
Nicht häufig	Robustheitsbew.	4.3.1.3	Betondruckspannungen Betonstahlspannungen Dekompression Klasse A Rissbreite Klasse B	4.4.1.2 4.4.1.3 4.4.2.1 4.4.2.4
Häufig	Ermüdung, vereinfacht	4.3.7.4 4.3.7.5(101)	Hauptzugspannungen Dekompression Klasse B Rissbreite Klasse C, D	4.4.0.3 4.4.2.1 4.4.2.4
Quasi-ständig			Betondruckspannungen Spannstahlspannungen Dekompression Kl. C Dekompression Kl. D Rissbreite Klasse E Verformungen	4.4.1.2 4.4.1.4 4.4.2.1 ARS 6/09 4.4.2.4 4.4.3
Ermüdung	Beton Betonstahl Spannstahl	A.106.3.2 4.3.7.5 4.3.7.5		

### Definition einer Einwirkung

Die Zuordnung der Lastfälle zu den Einwirkungen geschieht nach Auswahl oder Neueingabe einer Einwirkung. Dabei stehen je nach Art der Einwirkung unterschiedliche Dialoge zur Verfügung, von denen nachfolgend ein Beispiel dargestellt ist. Die möglichen Dialogoptionen werden anschließend erläutert.



**Lastfälle**

Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen markieren, um sie der aktuellen Einwirkung hinzuzufügen.



**Mehrfachauswahl**

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

**Bezeichnung**

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

**Exklusive Varianten**

Eine exklusive Variante besteht aus inklusiven und exklusiven Anteilen. Die Varianten schließen sich gegenseitig aus. Mit den Schaltflächen  bzw.  können Einwirkungsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden.

**Inklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

**Exklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

**Bewegliche Lasten benutzen**

Die Einwirkungen des Lastmodells 1 können entweder mit Hilfe von *beweglichen Lasten* oder normalen Lastfällen erfasst werden. Die *beweglichen Lasten* werden über einen eigenen Dialog beschrieben (siehe Lastmodell 1). Bei der Verwendung von normalen Lastfällen wird vereinfachend angenommen, dass die vertikalen ( $Q_{T3}$ ) und horizontalen ( $Q_{T1}$ ) Einwirkungen des Tandemsystems unabhängig wirken.

**Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls**

Der Spannkraftverlust wird als konstante prozentuale Minderung der Vorspannung definiert.

**CS als konstante Minderung der Vorspannung**

Alternativ zur Definition von CS-Lastfällen kann der Einfluss des Kriechens und Schwindens durch eine konstante prozentuale Minderung der Vorspannung berücksichtigt werden.

**Interne Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die interne Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

**Externe Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die externe Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

## Definition einer Einwirkungskombination

Je nach gewähltem Nachweis sind unterschiedliche Einwirkungskombinationen erforderlich, die mit nachfolgendem Dialog eingegeben werden.

**Situationsbeiwerte:**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	Bau - Unverpr.	G1 + P
2)	End	G1 + G2 + P + CSR1 + DS1 + QK

**Sicherheitsbeiwerte:**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
P, CSR1	1	1
DS1, DS2	1	0
QTS, QUDL, QI	1,5	0
T	1,35	0
W	1,5	0

**Kombinationsbeiwerte:**

Variante	QTS	QUDL	QI	T	W
a)	1,0	1,0	0	0	0,5
b)	1,0	1,0	0	0,8	0
c)	0,75	0,4	0	1,0	0
d)	0	0	0	0	1,0
e)	0,75	0,4	1,0	0,8	0
f)	0,75	0,4	1,0	0	0,5

### Situationen

Liste der Bemessungs- bzw. Nachweissituationen. Jede Situation kann entweder für den Bau- oder den Endzustand gültig sein. Für Spannbetragwerke mit nachträglichem Verbund lässt sich festlegen, dass die Spannglieder noch unverpresst sind. Die Einwirkung QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte. Mit den Schaltflächen bzw. können Situationen hinzugefügt bzw. gelöscht werden. Durch Doppelklick auf eine Situation lässt sich diese nachträglich bearbeiten.

### Sicherheitsbeiwerte

Tabelle der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{sup}$  und  $\gamma_{inf}$  für die Einwirkungen. Die Werte nach FB 101, Tabelle C.1 (Straßenbrücken) werden vorgeschlagen.

### Kombinationsbeiwerte

Tabelle der Kombinationsbeiwerte für die veränderlichen Einwirkungen. Die Werte nach FB 101, Tabelle C.2 (Straßenbrücken) werden sinngemäß vorgeschlagen. Mit den Schaltflächen bzw. können Kombinationsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden. In der Berechnung werden ausschließlich die hier aufgeführten Varianten berücksichtigt.

### Standard

Die Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte werden mit den empfohlenen Werten belegt. Als Nachweissituation werden alle relevanten Einwirkungen im Endzustand ausgewählt.

## Querschnittseingaben

Die Querschnittseingaben umfassen alle spezifischen Festlegungen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Eine Übersicht der Bemessungsvorgaben kann im Abschnitt *DIN-Fachbericht Brückennachweise* der Datenbasis aufgerufen werden.

## Nachweise

Im nachfolgenden Dialog wird festgelegt, welche Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für den Querschnitt vorgesehen sind. In den Berechnungseinstellungen kann diese Auswahl für das gesamte Tragwerk übersteuert werden.

### Vorspannung des Bauteils

Die Art der Vorspannung kann für jeden Querschnitt getrennt gewählt werden:

- *Nicht vorgespannt*
- *Nachträglicher Verbund*
- *Ohne Verbund*
- *Extern*
- *Mischbauweise*

### Anforderungsklasse

Die Nachweisbedingungen für den Dekompressions- und Rissbreitennachweis sind in DIN FB 102, Tabelle 4.118, über die Anforderungsklassen A bis E festgelegt (II-4.4.0.3 (103)). Die Mindestanforderungsklasse ergibt sich in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung nach ARS 11/2003 bzw. 6/2009 für Straßenbrücken und Ril 804.4201 für Eisenbahnbrücken.

### Vorgespannter Kastenquerschnitt nach ARS

Mit diesem Schalter wird bei Straßenbrücken die Sonderregelung nach ARS 11/2003 bzw. 6/2009 für vorgespannte Kastenquerschnitte der Anforderungsklasse D gewählt. Danach ist abweichend von Tabelle II-4.118 auch hier der Nachweis der Dekompression für die quasi-ständige Einwirkungskombination zu führen.

### Robustheit

Dieser Nachweis ermittelt die Mindestbewehrung gegen ein Versagen ohne Vorankündigung nach II-4.3.1.3, die auch als Robustheitsbewehrung bezeichnet wird.

## Basiswerte

Die Basiswerte gelten für alle Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

### Bemessungsmodus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach FB 102, Abschnitt 5.4.1.2.1 durchgeführt.

### Alternative Betongüte

Wenn als Materialart *Beton* verwendet wird, ist dieser Wert erforderlich, um eine normengerechte Bemessung durchführen zu können.

### Reduktionsfaktor der Vorsp. für Robustheit

Für die Anordnung der Robustheitsbewehrung sind die Vorschriften des Abschnitts 4.3.1.3(108) maßgebend. Danach soll bei Ermittlung der Zugzone die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung unberücksichtigt bleiben. Da diese bei Flächentragwerken nicht bestimmbar ist, kann ersatzweise die Vorspannung mit einem Reduktionsfaktor abgemindert werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes liegt im Ermessen des Anwenders.

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe für die Schubbemessung von Flächenelementen [m].

### cot Theta, Methode

$\cot \Theta$  definiert die Neigung der Betondruckstreben gemäß FB 102, Abschnitt 4.3.2.4.4 (1)\*P. Das Programm schlägt den Wert 1 vor (45° Druckstrebenneigung). Davon abweichend kann der Anwender einen Wert zwischen 4/7 und 3 frei wählen (vgl. ARS 11/2003 (11) und Ril 804.4201 (10)). Die Vorgabe eines größeren Wertes hat in aller Regel eine geringere erforderliche Querkraftbewehrung  $A_{sw}$ , eine geringere aufnehmbare Querkraft  $V_{Rd,max}$  und ein größeres Versatzmaß  $a_1$  nach II-5.4.2.1.3 (3)\* zur Folge. Bei Längszugbelastung sollte gemäß Ausgabe 2009 der Wert  $\cot \theta = 1$  nicht unterschritten werden. Für den Nachweis stehen vier Berechnungsmethoden zur Auswahl:

- *Standard*: Der Eingabewert wird auf den nach FB 102, Gl. (4.122), für Querkraft, Torsion und kombinierte Beanspruchungen jeweils zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung).
- *Konstant*: Der Nachweis erfolgt ohne weitere Begrenzung mit dem für  $\cot \Theta$  eingegebenen Wert (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).
- *Std./45°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  nach FB 102, Gl. (4.122), begrenzt. Für Torsion wird gemäß FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2(3)\*P, vereinfachend eine konstante Druckstrebenneigung von 45° angenommen.
- *Std./30°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  nach FB 102, Gl. (4.122), begrenzt. Für Torsion wird eine konstante Druckstrebenneigung von 30° angenommen.



Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

### **Biegezugbew. Asl nach Abb. II-4.12**

Die anzurechnende Biegezugbewehrung nach FB 102, Abschnitt 4.3.2.3, Abb. 4.12 [cm<sup>2</sup>].

### **Asl automatisch erhöhen bis**

Bei Flächen kann optional ein Größtwert angegeben werden, bis zu dem das Programm automatisch den vorgenannten Eingabewert erhöht, um Bügelbewehrung zu vermeiden [cm<sup>2</sup>].

### **Stahlgüte der Bügel**

- *420S*: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1.
- *500S*: Betonstabstahl nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045-1, Tab.11.
- *500M*: Betonstahlmatten nach DIN 488 Teil 1 und DIN 1045-1, Tab.11.
- *Allgemein*: Frei definierbare Stahlgüte [MN/m<sup>2</sup>].

### **Faktor für min rho\_w**

Der Mindestbewehrungsgrad  $\min \rho_w$  richtet sich nach II-5.4.2.2 (4)\*P und wird über einen Faktor in Bezug auf die Grundwerte  $\rho$  nach Tab. 5.7 festgelegt. Der Faktor wird bei Stäben und Bemessungsobjekten mit 1 und bei Flächenelementen gem. II-5.4.3.3 (2)\*P mit 0,6 vorgeschlagen. Er kann zwischen 0 und 1,6, dem Sollwert für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt, frei gewählt werden.

### **Bemessung wie Platten**

Stäbe bzw. Bemessungsobjekte werden wie Platten behandelt, d.h. es wird gem. II-5.4.3.3 (2)\*P keine Mindestquerkraftbewehrung ermittelt, wenn rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist.

### **Verlegemaß $c_{v,l}$**

In Abschnitt II-4.3.2.4.2(2)\* (Ausgabe 2009) und Auslegung Nr. 24 des NABau wird der innere Hebelarm  $z$  auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,l} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,l}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,l}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Das Programm schlägt für  $c_{v,l}$  den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ , vor.

### **Getrennter Nachweis für x- und y-Richtung**

Nach Abschnitt II-4.3.2.2(5)\* (Ausgabe 2009) und Auslegung Nr. 76 des NABau darf bei zweiachsig gespannten Platten der Querkraftnachweis in den Spannrichtungen x und y getrennt geführt werden. Die problemgerechte Orientierung der Bewehrungsrichtungen obliegt dem Anwender.

### **Hebelarm aus Biegebemessung**

Normalerweise wird für den Querkraftnachweis bei Flächenelementen der Hebelarm  $z$  gemäß Abschnitt II-4.3.2.4.2(2)\* vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Alternativ kann der Hebelarm aus der Biegebemessung verwendet werden. Das Programm ermittelt an jedem Nachweisort für beide Bewehrungsrichtungen den größten Hebelarm je Nachweissituation und begrenzt ihn auf den Bereich  $0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$ . Beim Nachweis für die resultierende Querkraft  $q_T$  wird das Minimum aus  $z_x$  und  $z_y$  benutzt.

## Schubquerschnitt

Bei Polygonquerschnitten werden für die Querkraft- und Torsionsbemessung nach FB 102 zusätzliche Querschnittsabmessungen benötigt. Diese werden nachfolgend erläutert. Bei Querschnitten mit interner Vorspannung oder vom Rechteck abweichender Form sollten die vom Programm vorgeschlagenen Abmessungen überprüft werden.

### Breite

Querschnittsbreite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Höhe

Querschnittshöhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Nutzbreite

Statisch wirksame Breite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nom. Breite, Nom. Höhe

Die nominelle Breite bzw. Höhe intern vorgespannter Bauteile gemäß FB 102, Abschnitt 4.3.2.2 (8)P zur Berücksichtigung der Hüllrohrdurchmesser bei der Berechnung des Bemessungswertes der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$ .

### Faktor kb, Faktor kd

Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzbreite  $bn$  bzw. Nutzhöhe  $d$  im Nachweis der Quertragfähigkeit für  $Q_y$  bzw.  $Q_z$ .

### Hebelarm

Der Hebelarm  $z$  kann auf folgende Arten definiert werden:

- $kd * \text{Nutzhöhe}$ ,  $kb * \text{Nutzbreite}$ : Die Berechnung erfolgt mit den eingegebenen Größen.
- *aus Biegebemessung*: Das Programm ermittelt in der Biegebemessung an jedem Nachweisort den größten Hebelarm je Bemessungssituation. Dieser ist als Abstand zwischen den Schwerpunkten der Betondruck- und Stahlzugkräfte definiert.
- *NRR Gl. 12.16*: In der Biegebemessung wird entsprechend Gl. (12.16) der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken (NRR) ein mit dem Kraftzuwachs in den Spanngliedern gewichteter Hebelarm ermittelt. Am Nachweisort ist je Bemessungssituation das Maximum aus den Schnittkraftsätzen mit Spannstahl in der Zugzone II maßgebend. Wenn für alle Schnittkraftsätze der Spannstahl in der Druckzone liegt, wird der Hebelarm nach Gl. (12.16) zu  $z = z_s$  ermittelt.
- $0,9 * dp$ : Im Nachweis für  $Q_z$  wird der Hebelarm über die Nutzhöhe  $d_p$  der Spannglieder bestimmt. Dabei wird  $d_p$  als der über die Spanngliedflächen gewichtete Mittelwert am Nachweisort angenommen (vgl. Rossner/Graubner 2005, S. 252).

Der maßgebende Hebelarm wird gemäß FB 102, Abschnitt 4.3.2.4.2 (2)\*, auf den Bereich

$0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,I}; d - c_{v,I} - 30 \text{ mm})$  begrenzt und im ausführlichen Nachweisprotokoll dokumentiert.

**Kernquerschnitt  $A_k = z_1 \cdot z_2$** 

Abmessungen des Kernquerschnitts für die Berechnung der Torsionsbewehrung [m].

**teff**

Die effektive Wandstärke des Torsionsquerschnitts nach FB 102, Abb. 4.15 [m].

**Kastenquerschnitt**

Angabe zur Festlegung des Faktors  $\alpha_{c,red}$  in FB 102, Gl. (4.40), zur Bestimmung der Ausnutzung des Torsionsquerschnitts nach Gl. (4.47a) bzw. (4.47b) und zur Überprüfung der Hauptdruckspannungen gemäß II-4.3.3.2.2 (2).

**Betonspannungen**

The screenshot shows a software dialog box titled "Eigenschaften für Element 434 - DIN FB 102 - Betonspannungen". On the left is a tree view with categories like "Querschnitt", "Material", "Bettung", "DIN 1045-1", "DIN FB 102", "Nachweise", "Basiswerte", "Schubquerschnitt", "Betonspannung", "Rissbreiten", "Ermüdung", "Streufaktoren", and "Allgemein". The main area contains several input fields and checkboxes:

- Number:** 11 - Hz
- Querschnittsart:** Polygon
- Materialart:** C40/50
- Bezeichn.:** Hauptträger
- Nachweis der Betondruckspannungen:**
  - Nicht häufige K.:**  0,60 fck
  - Quasi-ständige K.:**  0,45 fck
  - Zum Zeitpunkt t der Vorspannung:**  0,45 f<sub>c(t)</sub>
  - Betonfestigkeit f<sub>c(t)</sub> [MN/m²]:** 40
- Nachweis der Dekompression:** Spannung: [dropdown]
- Nachweis der Hauptzugspannungen:**  Nur im Bereich von Längsdruckspannungen
- Vollquerschnitt A<sub>v</sub> für Längskraft [m²]:** 3,22625

**zul sigma.c**

Die Betondruckspannung  $\sigma_c$  ist in den Bau- und Endzuständen nach II-4.4.1.2 (103)P auf  $0,60 f_{ck}$  unter der nicht häufigen Kombination zu begrenzen. Die Grenze darf um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone z.B. durch Querbewehrung umschnürt ist. Falls die Gebrauchstauglichkeit durch Kriechen wesentlich beeinflusst wird, soll nach II-4.4.1.2 (104)\*P zusätzlich die Grenze  $0,45 f_{ck}$  unter der quasi-ständigen Kombination eingehalten werden.

**zul sigma.c(t)**

Zulässige Betondruckspannung  $\sigma_{c(t)}$  zum Zeitpunkt t der Einleitung der Vorspannung. Dabei bezeichnet  $f_{c(t)}$  den Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung gemäß II-4.4.1.2 (102)P. Übersteigt die Druckspannung den Wert  $0,45 f_{c(t)}$ , so soll nach der Norm die Nichtlinearität des Kriechens berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt der Eintragung der Vorspannung wird im Programm bei der Bemessungssituation G1+P angenommen.

**fc(t)**

Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung gemäß II-4.4.1.2 (102)P [MN/m²].

**Dekompression, Spannung**

Maßgebliche Spannung für den Dekompressionsnachweis bei Flächenelementen ( $\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$ ).

**Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruckspannungen**

Mit dieser Option lassen sich die Anwendungsvorschriften des Abschnitts II-4.4.0.3(6)P der Ausgabe 2009 nutzen. Diese lassen bei vorgespannten Eisenbahnbrücken zu, den Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen zu begrenzen, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

**Av**

Fläche des Vollquerschnitts zur Berechnung der Normalspannung aus Längskraft gemäß II-4.4.1.1 (109) [m<sup>2</sup>], wenn die Querschnittsabmessungen auf die mitwirkende Plattenbreite reduziert wurden. Falls alternativ der Querschnitt als Vollpolygon mit Angabe der mitwirkende Breite definiert wurde, ist die Eingabe von  $A_v$  gesperrt (s. auch Kapitel *Strukturbeschreibung/Polygonquerschnitt*).

**Rissbreiten**

Die Vorgaben gelten für die Berechnung der Mindestbewehrung und den Nachweis der Rissbreite.

**wk,zul**

Rechenwert der Rissbreite nach II-4.4.0.3 (103), Tabelle 4.118 [mm]. Das Programm schlägt den Tabellenwert vor, der sich aus der gewählten Anforderungsklasse und der Vorspannung des Bauteils ergibt. Nach Freischaltung des Eingabefeldes kann dieser Wert modifiziert werden.

**max. ds**

Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung nach II-4.4.2.2 (6)\* [mm].

**Beiwert xi1**

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  nach FB 102 Gl. (4.197) legt fest, in welchem Maße Spannstahl gemäß II-4.4.2.2 (7)\* auf die Mindestrissbewehrung angerechnet werden kann. Er geht ferner in die Berechnung des effektiven Bewehrungsgrads nach Gl. (4.200a) und damit in die direkte Berechnung der Rissbreite ein. Bei Flächenelementen ist die Eingabe gesperrt, da hier Spannstahl generell nicht angerechnet wird.

**Festlegung der Betonzugzone**

Die Festlegung der Zugbereiche, in denen risseverteilende Mindestbewehrung nach II-4.4.2.2 einzulegen ist, kann entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination (EK) oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen.

**Dickes Bauteil**

Gemäß Abschnitt II-4.4.2.2 (9) der Ausgabe 2009 darf bei dicken Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (4.197a) berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gl. (4.194) ergeben.

**Beiwert k**

Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Betonzugspannungen im Querschnitt nach II-4.4.2.2 (5)\*.

**Betonalter**

Über das Betonalter wird die effektive Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  nach II-4.4.2.2 (5)\* bestimmt, und zwar getrennt für die Berechnung der Mindestbewehrung und die Berechnung der Rissbreite.

## Nachweismethode

Der Nachweis der Rissbreite kann entweder durch direkte Berechnung nach Abschnitt II-4.4.2.4 oder vereinfacht durch Begrenzung der Stababstände mit Hilfe der Tabelle II-4.121 erfolgen. Die vereinfachte Methode liefert nach Auffassung von *Zilch* und *Rogge* (2002, S. 277) nur bei einlagiger Zugbewehrung mit  $d_1 = 4$  cm sichere Ergebnisse. Die Beurteilung dieser Voraussetzungen obliegt dem Anwender.

### $s_{r,max}$

Bei der Berechnung der Rissbreite wird der Rissabstand standardmäßig nach FB 102 Gl. (4.203) ermittelt. Alternativ kann vom Anwender eine Obergrenze für  $s_{r,max}$  [mm] vorgegeben werden, um z.B. die Besonderheiten der Gleichung (4.204) zu berücksichtigen.

### max. s

Größter vorhandener Stababstand der Betonstahlbewehrung für den vereinfachten Nachweis der Rissbreite [mm].

## Ermüdung

Eigenschaften für Element 425 - DIN FB 102 - Ermüdung

Querschnitt: 11 - Hz, Polygon, Materialart: C40/50, Bezeichn.: Hauptträger

Betonstahl, Spannstahl

Längsbew.	Schubbew.	Spannstahl
dSigma.Rsk,s: 175	dSigma.Rsk,b: 80	dSigma.Rsk,p: 120 MN/m <sup>2</sup>
Lambda.s: 1	Lambda.b: 1	Lambda.p: 1
Eta: 1	Faktor für Qfat: 1,4	

Beton

fcd,fat: 19 MN/m <sup>2</sup>
Lambda.c: 1
Abminderungsfaktor k0 für Vorspannung: 0,9

OK, Abbrechen, Hilfe

### $d\Sigma_{Rsk,s}$ , $d\Sigma_{Rsk,b}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}$  ( $N^*$ ) der Längsbewehrung und Schubbewehrung bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach II-4.3.7.8 [MN/m<sup>2</sup>]. Im Dialog wird der Wert nach Tabelle 4.117, Zeile 1, vorgeschlagen. Für die Schubbewehrung wird dabei der Biegerollendurchmesser zu  $d_{br} = 4 d_s$  angenommen.

### $d\Sigma_{Rsk,p}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}$  ( $N^*$ ) des Spannstahls bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach II-4.3.7.7 [MN/m<sup>2</sup>]. Im Dialog wird der Wert nach Tabelle 4.116, Zeile 4, vorgeschlagen.

### $\Lambda_{s,b,p}$

Korrekturbeiwert  $\lambda_s$  zur Ermittlung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  aus der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_s$  des Stahls gemäß II-A.106.2 (102)P und II-A.106.3.1 (101)P für Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl.

### $\Lambda_c$

Korrekturbeiwert  $\lambda_c$  zur Berechnung der schadensäquivalenten Betonspannungen gemäß II-A.106.3.2 (102) für Eisenbahnbrücken.

### Eta

Erhöhungsfaktor  $\eta$  für die Betonstahlspannung der Längsbewehrung. Er dient zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl gemäß II-4.3.7.3 (3)P.

**f<sub>cd,fat</sub>**

Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung nach II-4.3.7.4 (101)P und (102)P [MN/m<sup>2</sup>]. Im allgemeinen gilt:

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

mit

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{0,2(1-\sqrt{28/t_0})}, \quad t_0 = \text{Zeitpunkt der Erstbelastung des Betons.}$$

Im Dialog wird  $f_{cd,fat}$  für  $t_0 = 28$  und  $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_{c,fat}$  vorgeschlagen.

**k<sub>0</sub>**

Bei Stäben und Bemessungsobjekten ist der statisch bestimmte Anteil der Vorspannung abzumindern. Im Dialog wird der Grundwert 0,9 gemäß II-4.3.7.2 (103) P vorgeschlagen. An Spanngliedkopplungen ist der Grundwert weiter abzumindern.

**Vereinfachter Nachweis**

Im vereinfachten Nachweis ist gemäß II-4.3.7.2(103)P die häufige Kombination mit den für die Gebrauchsnachweise benutzten Verkehrslasten maßgebend. Der Nachweis für Beton richtet sich nach II-4.3.7.4, die zulässige Spannungsschwingbreite für Stahl wird im Dialog gemäß II-4.3.7.5(101) vorgeschlagen. Für Schubbewehrung wird dieser Wert wie in Tabelle 4.117 gemindert.

**Bemessungsvarianten einschränken**

Bei Flächenelementen können die Varianten zur Ermittlung der Schwingbreite auf korrespondierende Sätze von Bemessungsschnittgrößen beschränkt werden. Eine nähere Erläuterung ist im Abschnitt „Nachweise gegen Ermüdung / Besonderheit bei Flächentragwerken“ zu finden.

**Faktor für Q<sub>fat</sub>**

Erhöhungsfaktor für die in  $Q_{fat}$  definierte zyklische Ermüdungseinwirkung, der bei der Berechnung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  des Betonstahls und Spannstahls berücksichtigt wird. Damit lassen sich z.B. die Vorschriften für den Ermüdungsnachweis von Straßenbrücken nach II-A.106.2 (101)P anwenden.

**Streifaktoren**

Eigenschaften für Element 57 - DIN FB 102 - Streifaktoren

Querschnitt: Form, Material, Bettung, Betonstahl, DIN FB 102 (Nachweise, Basiswerte, Betonspannungen, Rissbreiten, Ermüdung, Streifaktoren), Allgemein

Nummer: 1, Querschnittsart: Fläche, Materialart: C40/50, Neu, Kopie, Löschen

Bezeichn.:  Es sind weitere Elemente betroffen.

Streifaktoren für die Wirkung aus interner Vorspannung in den Nachweisen der Dekompression, Rissbewehrung und Rissbreite.

	r.sup	r.inf
Bauzustand:	1,1	0,95
Endzustand:	1,1	0,9

OK, Abbrechen, Hilfe

Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft sind in II-2.5.4.2 (4) für den Endzustand angegeben. Sie variieren mit der Art der Vorspannung. Im Bauzustand dürfen geringere Streuungen gemäß II-4.4.2.1 (107)P angenommen werden. Im Dialog werden die Werte für girlandenförmig geführte Spannglieder mit nachträglichem Verbund vorgeschlagen.

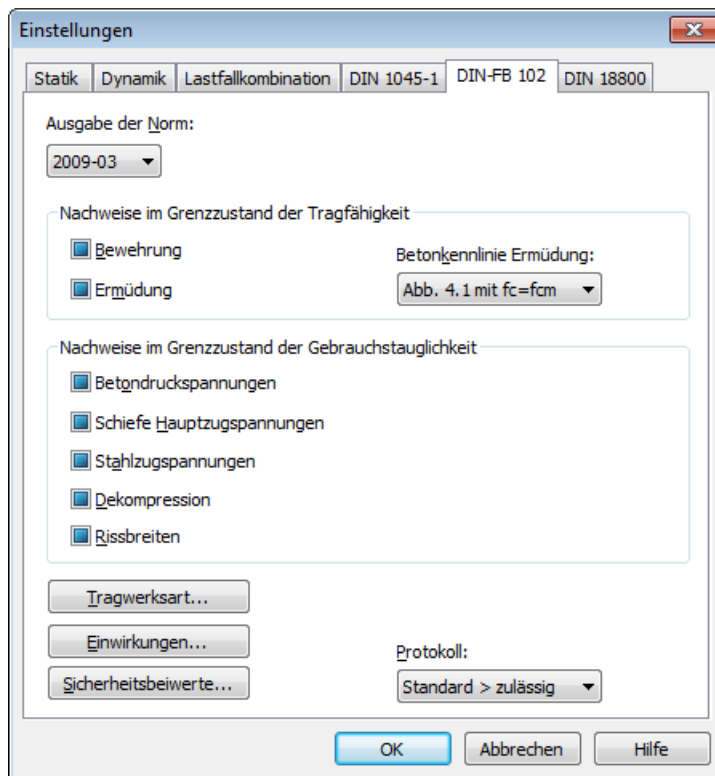
Die definierten Streifaktoren werden für die Wirkungen aus interner Vorspannung bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:

- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite
- Nachweis der Rissbreite
- Nachweis der Dekompression
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streifaktoren gemäß II-2.5.4.2 (4) mit  $r_{sup} = r_{inf} = 1$  angenommen.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *DIN-FB 102* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Ausgabe der Norm

Die gewählte Ausgabe kommt bei allen nachfolgenden Berechnungen zur Anwendung.

### Nachweisauswahl

Bei der Nachweisauswahl sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Der Nachweis wird gemäß Einstellung im Querschnittsdialog geführt (s. Querschnittseingaben).
- Der Nachweis wird für alle Querschnitte des Tragwerks geführt.
- Der Nachweis wird für keinen Querschnitt des Tragwerks geführt.

Zugehörige Querschnittseinstellungen werden dabei folgendermaßen zusammengefasst:

Bewehrung	Biegung und Längskraft Querkraft Torsion Robustheit
Ermüdung	Ermüdung für Beton Ermüdung für Betonstahl und Spannstahl
Rissbreiten	Mindest-Rissbewehrung Berechnung der Rissbreite

Mit der Funktion *Bemessungsvorgaben* im Ordner *DIN-Fachbericht Brückennachweise* der Datenbasis kann eine Nachweisübersicht angezeigt werden.

### Betonkennlinie Ermüdung

Für die Nachweise gegen Ermüdung kann die Kennlinie zur Berechnung der Betondruckspannungen ausgewählt werden.

### Tragwerksart...

Startet den Dialog zur Auswahl der Tragwerksart.

### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

**Sicherheitsbeiwerte...**

Startet den Dialog zur Änderung der Teilsicherheitsbeiwerte.

**Protokoll**

- *Nicht erstellen*: Vom Nachweisprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Protokoll mit tabellarischer Ausgabe der Ergebnisse.
- *Ausführlich*: Zusätzliche Ausgabe der maßgeblichen Kombinationsschnittgrößen an den Nachweisorten.
- *Standard* > *zulässig*: Beschränkung des Standardprotokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.
- *Ausführlich* > *zulässig*: Beschränkung des ausführlichen Protokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.

## Vorgespannte Tragwerke

### Interne Vorspannung

Bei interner Vorspannung werden die Spannstränge einschließlich der Spannverfahren und Spannanweisungen über die Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs eingegeben und durch Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* bei der FEM-Berechnung berücksichtigt. Näheres dazu ist dem Handbucheil *Spannbeton* zu entnehmen.

Die Unterscheidung zwischen Vorspannung mit und ohne Verbund erfolgt in den Querschnittseingaben und den Vorgaben für den Lastfall *Kriechen und Schwinden*.

### Externe Vorspannung, Mischbauweise

Externe Vorspannung lässt sich durch direkte Eingabe der äußeren Kräfte berücksichtigen. Bei Mischbauweise sind die zusätzlichen im Verbund liegenden Spannglieder wie oben beschrieben einzugeben.

### Streuung der Wirkungen aus Vorspannung

Die Berücksichtigung eventueller Streuungen der Vorspannkraft ist in II-2.5.4 geregelt. Für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt für den Bemessungswert der Vorspannkraft nach II-2.5.4.2 (6) P:

$$P_d = \gamma_P \cdot P_{m,t}$$

mit

$P_{m,t}$  Mittelwert der Vorspannkraft zur Zeit t inkl. Spannkraftverlusten aus Reibung, Ankerschlupf, Kriechen und Schwinden sowie Relaxation.

$\gamma_P$  Teilsicherheitsbeiwert der Vorspannkraft,  $\gamma_P = 1$  nach II-2.3.3.1 (101)P.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden in II-2.5.4.2 (3)P zwei charakteristische Werte der Vorspannkraft festgelegt:

$$P_{k,\text{sup}} = r_{\text{sup}} \cdot P_{m,t} \quad \text{Oberer charakteristischer Wert.}$$

$$P_{k,\text{inf}} = r_{\text{inf}} \cdot P_{m,t} \quad \text{Unterer charakteristischer Wert.}$$

Die Streufaktoren der internen Vorspannung werden im Querschnittsdialog getrennt für Bau- und Endzustände definiert. Sie kommen bei folgenden Nachweisen zur Anwendung:

- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.
- Nachweis der Dekompression.
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen.

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streufaktoren gemäß II-2.5.4.2 (4) mit  $r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1$  angenommen.



## Kriechen und Schwinden

Die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens erfolgt ebenso wie die Vorspannung durch Definition eines entsprechenden Lastfalls (Lastart *Kriechen und Schwinden*) in der FEM-Berechnung. Dabei ist neben dem kriecherzeugenden Dauerlastfall anzugeben, ob die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden soll. Diese Option ist nur bei im Verbund liegenden Spanngliedern sinnvoll.

Die Eingabe der maßgeblichen Kriech- und Schwindbeiwerte für die Berechnung des Lastfalls *Kriechen und Schwinden* erfolgt im Querschnittsdialog. Alternativ können dort die Beiwerte gemäß Heft 525, Abschnitt 9.1.4, berechnet werden.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1+\rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \rho \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,s})$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_b(t)$       Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $E_b$             E-Modul des Betons.
- $\rho$               Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt  $t$  (i.d.R.  $\rho = 0,80$ ).
- $\varphi$               Kriechbeiwert für den Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_b(t)$       Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_{b,0}$         Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.
- $\varepsilon_{b,s}$         Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben. Sofern im Lastfall gewählt, werden im weiteren die resultierenden Spannungsänderungen im Spannstahl ermittelt. Ein eventueller Einfluss aus der Relaxation des Spannstahls bleibt dabei unberücksichtigt. Nach Zilch/Rogge (2002, S. 256) lässt sich dieser getrennt berechnen (s. nächster Abschnitt) und mit den Änderungen aus Kriechen und Schwinden zu den gesamten zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenfassen:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \Delta\sigma_{pr} + E_p \cdot \Delta\varepsilon_{cpt}$$

mit

- $\Delta\sigma_{pr}$         Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls.
- $\Delta\varepsilon_{cpt}$       Dehnungsänderung des Betons aus Kriechen und Schwinden.
- $E_p$             E-Modul des Spannstahls.

## Relaxation des Spannstahls

Nach FB 102, Abschnitt 4.2.3.5.5 ist neben den Spannungsverlusten aus Kriechen und Schwinden des Betons die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  in den Spanngliedern an der Stelle x infolge Relaxation zu berücksichtigen. Diese darf für ein Verhältnis Ausgangsspannung zu charakteristischer Zugspannung ( $\sigma_{p0}/f_{pk}$ ) der bauaufsichtlichen Zulassung entnommen werden mit einer Ausgangsspannung von

$$\sigma_{p0} = \sigma_{pg0} - 0,3 \Delta\sigma_{p,csr} \tag{4.11}$$

mit

$\Delta\sigma_{p,csr}$  Spannungsänderung in den Spanngliedern aus Kriechen, Schwinden und Relaxation an der Stelle x zum Zeitpunkt t .

$\sigma_{pg0}$  Anfängliche Spannung in den Spanngliedern aus Vorspannung und ständigen Einwirkungen.

Da die gesamten Spannkraftverluste vorab nicht bekannt sind, ist der Eingangswert  $\Delta\sigma_{p,csr}$  für Gl. (4.11) zu schätzen und gegebenenfalls iterativ zu korrigieren (vgl. König et al. 2003, S. 38). Alternativ darf nach Fachbericht zur Vereinfachung und auf der sicheren Seite liegend der zweite Ausdruck in Gl. (4.11) vernachlässigt werden.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft Spannkraftverluste aus Relaxation.

Rechenwerte der Spannkraftverluste $\Delta\sigma_{pr}$ in % der Anfangsspannung $\sigma_{p0}$ für Spannstahlhlitzen St 1570 / 1770 mit sehr niedriger Relaxation							
$\sigma_{p0}/f_{pk}$	Zeitspanne nach dem Vorspannen in Stunden						
	1	10	200	1000	5000	$5 \cdot 10^5$	$10^6$
0,45							
0,50							
0,55						1,0	1,2
0,60					1,2	2,5	2,8
0,65				1,3	2,0	4,5	5,0
0,70			1,0	2,0	3,0	6,5	7,0
0,75		1,2	2,5	3,0	4,5	9,0	10,0
0,80	1,0	2,0	4,0	5,0	6,5	13,0	14,0

Für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 4227 ergibt sich im Beispiel für  $t = \infty$  bei der nach DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65, zulässigen Ausnutzung von 0,55 ein Spannungsverlust von etwa 1%, der in der Regel vernachlässigt werden kann.

Spannglieder mit neuer Zulassung dürfen nach Fachbericht 102, Abschnitt 4.4.1.4, bis zu 0,65 ausgenutzt werden. Daraus resultieren deutlich höhere, durchaus relevante Spannkraftverluste.

Die Spannkraftverluste werden in den Einwirkungen CSR1 und CSR2 des Dialogs *DIN Fachbericht 101 Einwirkungen* definiert.

## Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Es stehen folgende Nachweise zur Verfügung:

- Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein (FB 102, Abschnitt 4.3.1).
- Versagen ohne Vorankündigung (Abschnitt 4.3.1.3).
- Querkraft (Abschnitt 4.3.2).
- Torsion und kombinierte Beanspruchung (Abschnitt 4.3.3).
- Durchstanzen (Abschnitt 4.3.4).
- Nachweis gegen Ermüdung (Abschnitt 4.3.7).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach FB 101, Abschnitt 9.4.2, berücksichtigt:

- Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} \text{ "+" } \gamma_P \cdot R_k \text{ "+" } \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (9.10)$$

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{GAj} \cdot G_{kj} \text{ "+" } \gamma_{PA} \cdot R_k \text{ "+" } A_d \text{ "+" } \psi_{11} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.11)$$

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben ( $A_E$ )

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } R_k \text{ "+" } \gamma_1 \cdot A_{Ed} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.12)$$

Der Wichtungsfaktor für die Erdbeeinwirkung wird gemäß DIN 4149, Gl.(37), zu  $\gamma_1 = 1$  angenommen.

Im Nachweis gegen Ermüdung kommen alternativ folgende Kombinationen zur Anwendung:

- Häufige Kombination gemäß FB 101, Abschnitt 9.5.2, Gleichung (9.17), für vereinfachte Nachweise nach FB 102, Abschnitte 4.3.7.4 und 4.3.7.5(101).

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } R_k \text{ "+" } \psi_{11} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.17)$$

- Ermüdungskombination gemäß DIN EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.3, Gleichung (6.69), für Nachweise mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten nach FB 102, Abschnitt 4.3.7.5(102) und Anhang 106.

$$\left( \sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } R_k \text{ "+" } \psi_{11} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \right) \text{ "+" } Q_{fat} \quad (6.69)$$

Dabei sind  $Q_{k,1}$  und  $Q_{k,i}$  nicht-zyklische, nicht-ständige Einwirkungen und  $Q_{fat}$  die zyklische Einwirkung aus dem maßgebenden Ermüdungslastmodell.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

## Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe sind mit den Werten nach FB 102, Abschnitt 2.3.3.2, Tabelle 2.3, vorbelegt und können bei Bedarf angepasst werden. In den Bemessungssituationen infolge Erdbeben gelten gemäß DIN 4149:2005-04, Kapitel 8.1.3 (3), die Beiwerte der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation. Ab den Festigkeitsklassen C55/67 und LC55/60 findet Vorschrift 5.3.3 (9) der DIN 1045-1 Anwendung.

## Spannungs-Dehnungslinien

Bei der Querschnittsbemessung kommen die folgenden Kennlinien zur Anwendung:

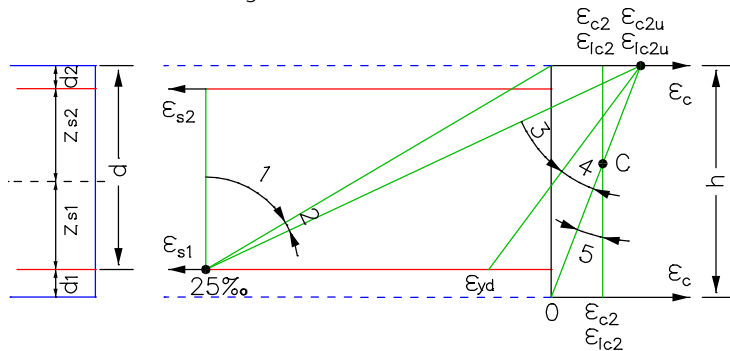
- *Beton*: Parabel-Rechteck-Diagramm nach FB 102, Abb. 4.2.
- *Betonstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Abb. 4.5 b) mit ansteigendem oberem Ast.
- *Spannstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Abb. 4.6 b), mit horizontalem oberem Ast gemäß II-4.2.3.3.3 (6)\*.

Für die Nachweise gegen Ermüdung wird vom Anwender eine der folgenden Kennlinien zur Berechnung der Betondruckspannungen festgelegt:

- Spannungs-Dehnungs-Linie nach Abb. 4.1 mit  $f_c = f_{cm}$ .
- Parabel-Rechteck-Diagramm nach Abb. 4.2.
- Lineare Kennlinie mit der Steigung  $\arctan E_{cm}$ .

## Bemessung für Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein

Die Bemessung für Normalkraft und Biegemoment erfolgt nach FB 102, Abschnitt 4.3.1. Für Platten-, Scheiben- und Schalenelemente mit rechtwinkliger oder schiefwinkliger Bewehrung werden die Bemessungsschnittgrößen analog zur Bemessung nach DIN 1045-1 berechnet. Die für jede Schnittkraftkombination erforderliche Bewehrung am Stahlbetonquerschnitt wird iterativ, nach Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen, unter Beachtung der in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Grenzdehnungslinien ermittelt. Das endgültige Resultat ergibt sich aus dem Extremwert aller berechneten Bewehrungen.



Dehnungsbereiche für die Bemessung

Der Anwender steuert durch die Vorgabe der Bewehrungsgeometrie und die Auswahl eines von drei Bemessungsmodi das Ergebnis der Bemessung:

### Modus Standard

Dies ist der Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Längskraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Die Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich eingelegt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und zur Begrenzung der Druckzonenhöhe nach FB 102, Abschnitt 2.5.3.4.2 (5) wird im Dehnungsbereich 3 Druckbewehrung ermittelt, so dass für die Stahldehnung  $\epsilon_{s1}$  gilt:

$$\epsilon_{s1} \geq \max \left( \epsilon_{yd}, \frac{\epsilon_{c2u}}{x/d} - \epsilon_{c2u} \right) \quad [‰]$$

mit

$\epsilon_{yd}$  Zum Bemessungswert der Festigkeit  $f_{yd}$  gehörende Stahldehnung.

$x/d$  Bezogene Druckzonenhöhe.

≤ 0,45 bei Betonfestigkeitsklassen bis C50/60.

≤ 0,35 bei Betonfestigkeitsklassen ab C55/67 und für Leichtbeton gemäß DIN 1045-1, Abschnitt 8.2 (3).

In den Dehnungsbereichen 4 und 5 wird wie bei symmetrischer Bemessung verfahren.

### Modus Symmetrisch

Im Gegensatz zur Standardbemessung wird in allen Dehnungsbereichen, falls erforderlich, die Bewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen bestimmten Bewehrungslagen bleiben erhalten.

**Modus Druckglied**

Die Bemessung wird symmetrisch durchgeführt. Zusätzlich wird die nach II-5.4.1.2.1 (1)\*P verlangte Mindestbewehrung ermittelt:

$$A_{s,\min} = 0,15 \cdot N_{\text{Ed}} / f_{\text{yd}} \geq 0,003 \cdot A_c$$

mit

$N_{\text{Ed}}$  Bemessungswert der aufzunehmenden Längskraft.

$f_{\text{yd}}$  Bemessungswert der Festigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze.

Die Betonstauchung nach II-4.3.1.2(1)P(X) kann nicht überprüft werden.

**Berücksichtigung von Spanngliedern im Verbund**

In der Bemessung von Stäben und Bemessungsobjekten werden die Schnittgrößen des Betonquerschnitts um die statisch bestimmten Anteile gemindert, wie sie sich aus Vorspannung abzüglich der Verluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation des Spannstahls (CSR) ergeben. Ausgenommen sind die Situationen vor dem Verpressen der Spannglieder. In den verbleibenden Schnittgrößen für den Verbundquerschnitt sind dann nur noch die Zwängungsanteile aus  $P+CSR$  und die äußeren Lasten enthalten. Die durch den Benutzer lagemäßig festgelegte Schlaffstahlbewehrung wird bei Bedarf solange erhöht, bis die Verbundschnittgrößen aufgenommen werden können.

Die Lage der Spannstränge im Querschnitt, die Spannkraftverluste aus CSR, die statisch bestimmten Anteile sowie die Schnittgrößen des Betonquerschnitts und Verbundquerschnitts werden im ausführlichen Protokoll ausgegeben.

Da bei Flächentragwerken eine Trennung in statisch bestimmte und unbestimmte Anteile der Schnittgrößen aus Vorspannung nicht möglich ist, wird bei der Bemessung der Längsbewehrung die Vorspannung vollständig auf der Einwirkungsseite berücksichtigt, während auf der Widerstandsseite nur Schlaffstahl und Beton wirksam werden. Die Dehnungsreserven der im Verbund liegenden Spannglieder bleiben folglich ungenutzt.

**Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Vorankündigung**

Nach FB 102, Abschnitt 4.3.1.3, muss ein sprödes Versagen des Querschnitts ohne Vorankündigung vermieden werden. Die Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite nach Abschnitt II-4.4.2 reicht dazu gemäß II-4.3.1.3 (3) in den meisten Fällen aus. Falls erforderlich, kann das Versagen durch Anordnung einer Robustheitsbewehrung gemäß II-4.3.1.3 (105)P, Buchstabe (b), vermieden werden:

$$A_s = M_{\text{r,ep}} / (f_{\text{yk}} \cdot z_s)$$

mit

$M_{\text{r,ep}}$  Rissmoment, bei dem ohne Wirkung der Vorspannung am Querschnittsrand eine Zugspannung von  $f_{\text{ctk};0,05} = 0,7 \cdot f_{\text{ctm}}$  auftritt.

$z_s$  Hebelarm der inneren Kräfte.

Die Robustheitsbewehrung  $A_s$  sollte in den Bereichen angeordnet werden, in denen unter der nichthäufigen Einwirkungskombination Zugspannungen im Beton auftreten. In dieser Kombination sollte gemäß II-4.3.1.3 (108) die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung nicht, die statisch unbestimmte jedoch berücksichtigt werden.

Im Programm werden alle Spannungen am Bruttoquerschnitt ermittelt. Die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung kann nur bei Stäben und Bemessungsobjekten in Abzug gebracht werden. Bei Flächenelementen wird die Vorspannung ersatzweise mit dem Reduktionsfaktor gemäß Benutzervorgabe abgemindert.

Das Rissmoment ergibt sich zu  $M_{\text{r,ep}} = W_y \cdot f_{\text{ctk};0,05}$ , der Hebelarm  $z_s$  der inneren Kräfte wird vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Die ermittelte Bewehrung wird gleichmäßig auf die in der Zugzone liegenden Bewehrungslagen verteilt. Im Bemessungsmodus *Symmetrisch* erhalten die übrigen Lagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten. Für Querschnitte mit Bemessungsmodus *Druckglied* wird keine Robustheitsbewehrung nachgewiesen, da bei der Bemessung für Biegung und Längskraft bereits Mindestdruckbewehrung ermittelt wird.

**Mindestoberflächenbewehrung für vorgespannte Bauteile**

Bei vorgespannten Bauteilen ist nach FB 102, Abschnitt 5.4.0 (Ausgabe 2009), sowie nach Reg.-Nr. 002 der Erfahrungssammlung des NABau unabhängig von den Vorschriften für die Robustheits- oder Rissbewehrung stets eine Mindestoberflächenbewehrung anzuordnen. Die nach den Tabellen 5.7 und 5.7.a ermittelte Bewehrung kann im Programm durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigt werden.

## Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft umfasst die Ermittlung der Querkraftbewehrung und den Nachweis der Betondruckstreben nach FB 102, Abschnitt 4.3.2. Es gelten folgende Besonderheiten:

- Die Neigung der Querkraftbewehrung wird mit 90° angenommen.
- In der Berechnung wird der Wert für  $\cot \Theta$  auf den nach Gl. (4.122) zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit veränderlicher bzw. beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung), sofern im Querschnittsdialog nicht der Nachweis mit einem konstanten Wert gewählt wurde. Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben. Ausgabe 2009: Bei senkrechten Bügeln oder Längszugbelastung sollte  $\cot \Theta$  gemäß II-4.3.2.4.4(1)\*P die Grenze 1,0 nicht unterschreiten. Dies wird programmseitig gewährleistet, sofern der Anwender nicht einen kleineren Wert vorgibt.
- In der berechneten Bügelbewehrung ist die Mindestbewehrung nach II-5.4.2.2 (3)\*P und (4)\*P enthalten, wobei der Bewehrungsgrad  $\rho$  nach Tabelle II-5.7 mit dem Faktor gemäß Benutzereingabe gewichtet wird. Bei Flächen wird Mindestbewehrung nur dann ermittelt, wenn Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich ist (vgl. NABau Nr. 131).
- Platten- und Schalenelemente werden für die Querkraft  $q_T = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$  bemessen. Für die zugehörige Längskraft wird, je nachdem was ungünstig wirkt, die Hauptdruck- oder die Hauptzugkraft eingesetzt. Falls gewählt, wird alternativ der Nachweis gemäß Abschnitt II-4.3.2.2(5)\* (Ausgabe 2009) getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y geführt. Für die zugehörige Längskraft wird dann die in Bewehrungsrichtung wirkende Normalkraft eingesetzt. Wenn Querkraftbewehrung erforderlich ist, wird diese aus beiden Richtungen addiert.
- Es erfolgt **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten nach II-4.3.2.2 Absatz (10) und (11).
- Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die maßgebenden Werte des Ersatzrechtecks unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie vom Anwender definiert. Die Beiwerte zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe und Nutzhöhe sind ebenfalls vorzugeben. Alternativ kann der Hebelarm aus der Biegebemessung benutzt werden.
- Bei Flächenelementen wird normalerweise mit dem Hebelarm  $z = 0,9 d$  gerechnet. Falls gewählt, wird alternativ der Hebelarm aus der Biegebemessung verwendet.
- Gemäß II-4.3.2.4.2(2)\* wird der innere Hebelarm auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,1} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,1}$  begrenzt (Ausgabe 2009 und Auslegung Nr. 24 des NABau). Dabei ist  $c_{v,1}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Wenn  $c_{v,1}$  nicht angegeben ist, nimmt das Programm statt dessen den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ .
- Bei Querschnitten mit interner Vorspannung wird der Bemessungswert der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  gemäß II-4.3.2.2 (8)\*P mit dem Nennwert  $b_{w,nom}$  der Querschnittsbreite ermittelt.
- Ausgabe 2009: Die Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  wird gemäß II-4.3.2.2(4)P nur für Querkräfte  $V_{Ed} > V_{Rd,ct}$  geprüft.
- Die Notwendigkeit einer Querkraftbewehrung wird nach II-4.3.2.3 untersucht. Dabei erfolgt ebenfalls **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten.

Nachfolgend sind die verwendeten Formeln aus FB 102 wiedergegeben.

### Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

#### Ausgabe 2003

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4.118a:2003)$$

mit einem Mindestwert von

$$V_{Rd,ct,min} = [\eta_1 \cdot v_{min} - 0,12 \sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot \kappa^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (4.118b:2003)$$

In der Außergewöhnlichen Bemessungssituation gilt nach II-4.3.2.3 (101)

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,115 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4.118c:2003)$$

mit einem Mindestwert von

$$V_{Rd,ct,min} = [\eta_1 \cdot v_{min} - 0,12 \sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$

$$v_{min} = 0,040 \cdot \kappa^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (4.118d:2003)$$

**Ausgabe 2009**

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,15 / \gamma_c \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4.118a:2009)$$

mit einem Mindestwert von

$$V_{Rd,ct,min} = [\eta_1 \cdot v_{min} - 0,12 \sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$

$$v_{min} = \frac{\kappa_1}{\gamma_c} \cdot \sqrt{\kappa^3 \cdot f_{ck}} \quad (4.118b:2009)$$

Dabei ist

$\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert für bewehrten Beton nach II-2.3.3.2(1)P, Tab. 2.3.

$\kappa_1 = 0,0525$  für  $d \leq 600$  mm

$= 0,0375$  für  $d \geq 800$  mm

Im Bereich  $600 \text{ mm} < d < 800$  mm darf  $\kappa_1$  linear interpoliert werden.

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$V_{Rd,ct}$  der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung.

$\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10.

$\rho_1$  der Längsbewehrungsgrad mit

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$A_{sl}$  die Fläche der Zugbewehrung, die mindestens um das Maß  $d$  über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt und dort wirksam verankert wird (siehe Abb. II-4.12). Bei Vorspannung mit sofortigem Verbund darf die Spannstahlfläche voll auf  $A_{sl}$  angerechnet werden.

$b_w$  die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts in mm.

$d$  die statische Nutzhöhe der Biegebewehrung im betrachteten Querschnitt in mm.

$f_{ck}$  der charakteristische Wert der Betondruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>.

$\sigma_{cd}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit

$$\sigma_{dc} = N_{Ed} / A_c \text{ in N/mm}^2.$$

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung ( $N_{Ed} < 0$  als Längsdruckkraft).

**Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung**

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \Theta \quad (4.27)$$

Dabei ist

$V_{Rd,sy}$  der Bemessungswert der durch die Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung begrenzten aufnehmbaren Querkraft.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung.

$s_w$  der Abstand der zur Bauteilachse rechtwinkligen Bewehrung in Richtung der Bauteilachse gemessen.

$z$  der innere Hebelarm.

$\cot \Theta$  die Neigung der Druckstreben des Fachwerks:

$$4/7 \leq \cot \Theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 7/4 \quad (4.122)$$

(vgl. ARS 11/2003 (11) bzw. Ril 804.4201 (10))

Ausgabe 2009:  $\cot \Theta < 1$  sollte nur in Ausnahmefällen verwendet werden. Bei Längszugbelastung gilt diese Untergrenze generell (vgl. auch Heft 525, Ber. 1:2005-05). Im Programm wird die Grenze eingehalten, sofern der Anwender nicht einen kleineren Wert vorgegeben hat.

$$V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left( 1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z \quad (4.123:2003)$$

$$V_{Rd,c} = c_j \cdot 0,48 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}\right) \cdot b_w \cdot z \quad (4.123:2009)$$

Dabei ist

$$\beta_{ct} = 2,4$$

$$c_j = 0,5$$

$\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10.

$\sigma_{cd}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit  $\sigma_{cd} = N_{Ed} / A_c$  in N/mm<sup>2</sup>.

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung ( $N_{Ed} < 0$  als Längsdruckkraft).

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft.

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \Theta + \tan \Theta} \quad (4.26)$$

mit

$V_{Rd,max}$  Bemessungswert der durch die Druckstrebenfestigkeit begrenzten aufnehmbaren Querkraft. Die Spannungen in den Druckstreben sind zu begrenzen auf den Wert

$$\sigma_c \leq \alpha_c \cdot f_{cd} \quad (4.21)$$

$\alpha_c$  Abminderungsbeiwert für die Druckstrebenfestigkeit.

$\alpha_c = 0,75 \eta_1$  mit  $\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tab. 10.

Der Zugkraftanteil in der Längsbewehrung infolge Querkraft ergibt sich nach Abb. 4.13 zu

$$\Delta F_{sd} = 0,5 \cdot |V_{Ed}| \cdot (\cot \Theta - \cot \alpha).$$

### Querkraftbewehrung

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \quad (5.16)$$

Dabei ist

$\rho_w$  der Bewehrungsgrad der Querkraftbewehrung.

$\alpha$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und Balkenachse.

**min**  $\rho_w$  Mindestwert von  $\rho_w$  nach II-5.4.2.2 (4)\*P

Allgemein:  $\rho_w = 1,0 \rho$

Platten:  $\rho_w = 0,6 \rho$

Gliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt:  $\rho_w = 1,6 \rho$

$\rho$  der Wert nach FB 102, Tabelle 5.7.



## Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung

Die Bemessung für Torsion geschieht nach FB 102, Abschnitt 4.3.3. Sie beinhaltet die Ermittlung der Schrägzugbewehrung, die Ermittlung der Längsbewehrung, den Nachweis der Betondruckstreben unter maximaler Torsionsbeanspruchung und den Nachweis der Betondruckstreben bei gleichzeitig wirkender Querkraft. Die Druckstrebenneigung wird nach Gleichung (4.122) mit der Schubkraft nach Gleichung (4.242) ermittelt. Alternativ kann im Querschnittsdialog für Torsion eine Druckstrebenneigung von 45° bzw. 30° (FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2(3)\*P oder für Querkraft und Torsion ein konstanter Wert  $\cot \Theta$  gewählt werden (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).

Bei Hohlkastenträgern wird gemäß 4.3.3.2.2 (2) zusätzlich überprüft, ob die im Zustand I berechnete Hauptdruckspannung  $\sigma_2$  aus Biegung, Längskraft und Torsion den Wert  $f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$  überschreitet. Dazu wird die Längsdruckspannung  $\sigma_{Ed}$  im Abstand  $t_{eff}/2$  vom Querschnittsrand ermittelt und die Schubspannung aus Torsion zu

$$\tau_{Ed} = T_{Ed} / (2 \cdot A_k \cdot t_{eff}) \text{ angenommen.}$$

Der zu Grunde liegende Ersatzquerschnitt wird, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert.

Verwendete Formeln aus FB 102:

$$V_{Ed,T} = \frac{T_{Ed} \cdot z}{2A_k} \quad (4.142)$$

Dabei ist

$V_{Ed,T}$  die Schubkraft in einer Wand des Nachweisquerschnittes infolge eines Torsionsmomentes.

$A_k$  die durch die Mittellinien der Wände eingeschlossene Fläche.

$z$  die Höhe der Wand, definiert durch den Abstand der Schnittpunkte der Wandmittellinie mit den Mittellinien der angrenzenden Wände.

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + \frac{V_{Ed} \cdot t_{eff}}{b_w} \quad (4.242)$$

Dabei ist

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft nach II-4.3.2.

$t_{eff}$  die effektive Dicke einer Wand;  $t_{eff}$  ist gleich dem doppelten Abstand von der Mittellinie zur Außenfläche, aber nicht größer als die vorhandene Wanddicke (s. Abb. 4.15).

$$T_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot 2A_k \cdot \cot \Theta \quad (4.43)$$

$$T_{Rd,sy} = \frac{A_{sl}}{u_k} \cdot f_{yd} \cdot 2A_k \cdot \tan \Theta \quad (4.44)$$

Dabei ist

$T_{Rd,sy}$  der Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmoments des Querschnitts.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Torsionsbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse.

$s_w$  der Abstand der Torsionsbewehrung in Richtung der Bauteilachse gemessen.

$A_{sl}$  die Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung.

$u_k$  der Umfang der Fläche  $A_k$ .

$\Theta$  die Neigung der Druckstreben des Fachwerks.

$$T_{Rd,max} = \frac{\alpha_{c,red} \cdot f_{cd} \cdot 2A_k \cdot t_{eff}}{\cot \Theta + \tan \Theta} \quad (4.40)$$

Dabei ist

$T_{Rd,max}$  der Bemessungswert des maximal aufnehmbaren Torsionsmoments des Querschnitts.

$\alpha_{c,red} = 0,7 \alpha_c$  allgemein (mit  $\alpha_c = 0,75 \eta_1$  mit  $\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10).

$\alpha_{c,red} = \alpha_c$  bei Kastenquerschnitten mit Bewehrung an den Innen- und Außenseiten der Wände.

$$\left[ \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right]^2 \leq 1 \text{ für Kompaktquerschnitte} \quad (4.47a)$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \quad \text{für Kastenquerschnitte} \quad (4.47b)$$

Dabei ist

$V_{Rd,max}$  der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (4.26).

Für einen näherungsweise rechteckigen Vollquerschnitt ist außer der Mindestbewehrung nach Kapitel 5.4.2.2, Tabelle 5.7, keine Schub- und Torsionsbewehrung erforderlich, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten sind:

$$T_{Ed} \leq V_{Ed} \cdot \frac{b_w}{4,5} \quad (4.48)$$

$$V_{Ed} \left[ 1 + \frac{4,5 T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w} \right] \leq V_{Rd,ct} \quad (4.49)$$

### Hinweis

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.1(7)\*P, darf die Torsionslängsbewehrung in Druckgurten entsprechend den vorhandenen Druckkräften abgemindert werden. In Zuggurten ist sie zur übrigen Längsbewehrung zu addieren. Mit Hilfe der graphischen Darstellung der Spanngliedspannungen für die ständige und vorübergehenden Kombination lässt sich beurteilen, in welchen Bereichen und in welchem Umfang gemäß Kapitel 4.3.3.1(8)P Spannstahl auf die Torsionslängsbewehrung angerechnet werden kann.

## Durchstanzen

Der Nachweis gegen Durchstanzen nach DIN Fachbericht 102 Abschnitt 4.3.4 entspricht im wesentlichen dem Nachweis nach DIN 1045-1. Eine Erläuterung hierzu ist im Handbuchabschnitt *DIN 1045-1* zu finden. Der Aufruf erfolgt über das Tragwerksmenü.

## Nachweise gegen Ermüdung

Für die Nachweise können vom Benutzer alternativ zwei Verfahren gewählt werden:

- Vereinfachter Nachweis gemäß DIN FB 102, Abschnitte 4.3.7.4 und 4.3.7.5(101), für die häufige Einwirkungskombination mit den im Gebrauchszustand relevanten Verkehrslasten.
- Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten gemäß FB 102, Abschnitt 4.3.7.5(102) und Anhang 106, mit der speziell definierten zyklischen Einwirkung  $Q_{fat}$  entsprechend DIN EN 1992-1-1:2005, Kapitel 6.8.3.

Bei Straßenbrücken entspricht  $Q_{fat}$  dem Ermüdungslastmodell 3 gemäß DIN FB 101, Abschnitt 4.6. Die Erhöhungsfaktoren nach I-4.6.1 (7) sind bei der Eingabe der Lastordinaten zu berücksichtigen während die Faktoren nach II-A.106.2 (101)P im Querschnittsdialog definiert werden.

Bei Eisenbahnbrücken ist gemäß FB 101, Abschnitt 6.9 in Verbindung mit FB 102, Anhang A.106.3 für die Ermittlung der Schwingbreite das Verkehrslastmodell 71 in der nichthäufigen Einwirkungskombination einschließlich des dynamischen Faktors nach FB 101 maßgebend.

Nach Abschnitt II-4.3.7.2 (103)P ist für den Nachweis der 0,9-fache statisch bestimmte Anteil der Vorspannkraft anzusetzen. An Arbeitsfugen mit Spanngliedkopplung ist der statisch bestimmte Anteil weiter abzumindern. Die Festlegung des maßgeblichen Abminderungsfaktors erfolgt im Querschnittsdialog.

Die Kennlinie zur Berechnung der Betondruckspannungen im Zustand II wird in den Berechnungseinstellungen ausgewählt.

## Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl

Der Ermüdungsnachweis wird nach Abschnitt II-4.3.7.5 geführt. Die Ermittlung der Stahlspannungen erfolgt für Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft sowie für Spannstahl in Stäben und Bemessungsobjekten unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Schub- und Längsbewehrung aus Querkraft- und Torsion werden die Spannungen gemäß II-4.3.7.3 (4)\*P auf der Grundlage eines Fachwerkmodells mit der Druckstrebenneigung  $\tan \Theta_{fat} = \sqrt{\tan \Theta}$  nach Gl. (4.187) berechnet. Spannstahlspannungen in Flächenelementen werden am ungerissenen Betonquerschnitt ermittelt. Für Spannglieder ohne Verbund und externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

### Vereinfachter Nachweis

Nach Abschnitt II-4.3.7.5(101) kann ausreichender Widerstand gegen Ermüdung angenommen werden, wenn unter der

häufigen Einwirkungskombination die Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bewehrungsstäbe 70 MN/m<sup>2</sup> nicht übersteigt.

### Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten

Der Nachweis gilt als erbracht, wenn für Betonstahl und Spannstahl gilt:

$$\gamma_{F,fat} \cdot \gamma_{Ed,fat} \cdot \Delta\sigma_{s,equ} \leq \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / \gamma_{s,fat} \quad (4.191)$$

mit

$$\gamma_{F,fat} = \gamma_{Ed,fat} = 1$$

$$\gamma_{s,fat} = 1,15 \text{ für Betonstahl und Spannstahl mit neuer Zulassung.}$$

$$= 1,25 \text{ für Spannstahl mit Zulassung nach DIN 4227-1 gem. ARS 11/03 (13).}$$

$$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*) \quad \text{Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite bei } N^* \text{ Lastzyklen gemäß den Wöhlerlinien nach II-4.3.7.7 für Spannstahl bzw. II-4.3.7.8 für Betonstahl.}$$

$$\Delta\sigma_{s,equ} \quad \text{Schadensäquivalente Schwingbreite mit } \Delta\sigma_{s,equ} = \lambda_s \cdot \Delta\sigma_s \text{ gem. Gl. (A.106.1) bzw. Gl. (A.106.6).}$$

$$\lambda_s \quad \text{Korrekturbeiwert gemäß Anhang II-A.106.2 bzw. II-A.106.3.}$$

$$\Delta\sigma_s \quad \text{Berechnete Schwingbreite aus der zyklischen Einwirkung } Q_{fat} \text{ bei Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft einschließlich des Erhöhungsfaktors } \eta \text{ gemäß 4.3.7.3 (3)*P Gl. (4.193) zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl.}$$

Die Werte für  $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ ,  $\eta$  und  $\lambda_s$  werden vom Benutzer im Querschnittsdialog vorgegeben.

### Berechnungsmethode

Als vorhandene Längsbewehrung wird das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung angenommen. Falls damit die Beanspruchung aus der Ermüdungskombination im Zustand II nicht aufnehmbar ist, wird mit der vorhandenen Bewehrung und den Nachweisschnittgrößen eine erneute Bemessung durchgeführt.

Die sich aus dem Dehnungszustand im Zustand II bzw. am Fachwerkmodell ergebende maximale Spannungsschwingbreite je Stahllage wird für jede Nachweissituation getrennt ermittelt. Durch Multiplikation mit den Beiwerten  $\eta$  und  $\lambda_s$  wird die schadensäquivalente Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,equ}$  erhalten. Wenn diese bei Längs- oder Schubbewehrung die zulässige Spannungsschwingbreite übersteigt, wird die erforderliche Bewehrung solange iterativ erhöht, bis der Nachweis für alle Situationen erfüllt ist. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* wird die Längsbewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Die für den Nachweis maßgebliche, gegebenenfalls erhöhte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll ausgegeben und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Druckbeanspruchung erfolgt für Biegung und Längskraft am gerissenen Querschnitt. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis für Betonstahl berücksichtigt. Bei Straßenbrücken braucht der Nachweis gemäß II-4.3.7.1 (102), Buchstabe (g), nicht geführt zu werden, wenn im Gebrauchszustand die Betondruckspannung gemäß II-4.4.1.2 (103)P auf  $0,6f_{ck}$  begrenzt wird. Druckstreben von querkraftbeanspruchten Bauteilen werden nicht untersucht.

### Vereinfachter Nachweis

Der Nachweis gilt nach II-4.3.7.4 (101)P als erbracht, wenn FB 102 Gl. (4.188) bzw. DIN 1045-1 Gl. (123) eingehalten wird.

$$\frac{\max|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \cdot \frac{\min|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 \quad \text{für Beton bis } C50/60 \text{ oder } LC50/55 \quad (4.188)$$

$$\frac{\max|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \cdot \frac{\min|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,8 \quad \text{für Beton ab } C55/67 \text{ oder } LC55/60 \quad (123)$$

mit

$\max|\sigma_{cd}|, \min|\sigma_{cd}|$  Bemessungswerte der maximalen und minimalen Betondruckspannung unter der häufigen Einwirkungskombination. Im Fall von Zugspannungen ist  $\min|\sigma_{cd}|$  zu Null anzunehmen.

$f_{cd,fat}$  Bemessungswert der Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung. Dieser Wert wird im Querschnittsdialog vorgegeben.

### Nachweis über schadensäquivalente Betondruckspannungen

Der Nachweis gilt für Eisenbahnbrücken nach FB 102, Abschnitt A.106.3.2, als erbracht, wenn Gl. (A.106.12) erfüllt ist:

$$E_{cd,max, equ} + 0,43 \sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1 \quad (\text{A.106.12})$$

mit

$$R_{equ} = \min |\sigma_{cd, equ}| / \max |\sigma_{cd, equ}|$$

$$E_{cd,max, equ} = \gamma_{Ed, fat} \cdot \max |\sigma_{cd, equ}| / f_{cd, fat}$$

Dabei ist  $\max |\sigma_{cd, equ}|$  bzw.  $\min |\sigma_{cd, equ}|$  die obere bzw. untere Druckspannung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite mit  $N = 10^6$  Zyklen.

Die obere und untere Spannung der schadensäquivalenten Schwingbreite soll nach Gleichung (A.106.13) ermittelt werden.

$$\max |\sigma_{cd, equ}| = |\sigma_{c, perm}| + \lambda_c (\max |\sigma_{c, 71}| - |\sigma_{c, perm}|)$$

$$\min |\sigma_{cd, equ}| = |\sigma_{c, perm}| - \lambda_c (|\sigma_{c, perm}| - \min |\sigma_{c, 71}|) \quad (\text{A.106.13})$$

Dabei ist

$|\sigma_{c, perm}|$  die betragsmäßige Druckspannung unter der Ermüdungskombination ohne Lastmodell 71.

$\max |\sigma_{c, 71}|$ , die betragsmäßig größte bzw. kleinste Druckspannung unter der Ermüdungskombination einschließlich des dynamischen Faktors  $\Phi_2$  nach DIN FB 101.

$\lambda_c$  der Korrekturfaktor zur Berechnung der durch Lastmodell 71 hervorgerufenen Spannungen.

### Besonderheit bei Flächentragwerken

Bei Flächentragwerken kann der Dehnungszustand am gerissenen Betonquerschnitt unter allgemeiner Beanspruchung nicht eindeutig ermittelt werden. Die Bemessung erfolgt deshalb getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y mit den oben näher erläuterten Bemessungsschnittgrößen nach Wolfensberger/Thürlimann bzw. nach Rüsç. Mit der so ermittelten Bewehrung kann die Tragfähigkeit als gesichert angenommen werden.

Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite für Betonstahl und Beton kann diese Methode im Fall von Drill- oder Scherbeanspruchungen zu unrealistischen Ergebnissen führen, wie am folgenden Beispiel deutlich wird:

Gegeben seien zwei identische Sätze von Plattenschnittgrößen:

Satz	$m_x$ [kNm/m]	$m_y$ [kNm/m]	$m_{xy}$ [kNm/m]
1	300	200	100
2	300	200	100

Daraus folgen nach Wolfensberger/Thürlimann als Bemessungsvarianten für die x-Richtung:

Satz	Variante	$m$ [kNm/m]
1	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$
2	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$

Die Drillmomente erzeugen eine Variation der Bemessungsmomente und damit rein rechnerisch eine Spannungsschwingbreite. Im Ermüdungsnachweis könnte dadurch eine Bewehrungserhöhung aufgrund scheinbarer Überbeanspruchung notwendig werden. Bei Bemessungsnormalkräften gilt dies für die Scherkräfte sinngemäß.

Mit der Benutzerauswahl **Bemessungsvarianten einschränken** im Querschnittsdialog lässt sich der beschriebene Effekt vermeiden. In diesem Fall werden bei der Ermittlung der Schwingbreite nur noch die korrespondierenden Varianten verglichen, im Beispiel also nur die jeweils ersten und die jeweils zweiten Varianten der beiden Sätze. Bei konstanter Beanspruchung wird somit die Schwingbreite korrekt zu Null ermittelt.

**Diese Alternative kann allerdings nicht sicherstellen, dass immer alle denkbaren Spannungsschwankungen erfasst werden. Die Ergebnisse sind deshalb mit besonderer Aufmerksamkeit zu bewerten. Im ausführlichen Protokoll werden dazu die für den Nachweis maßgeblichen Varianten und Bemessungsschnittgrößen angegeben.**

Bei Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Rüsç für schiefwinklige Bewehrung gelten die dargestellten Zusammenhänge entsprechend.

## Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Einzelnen werden folgende Nachweise geführt:

- Begrenzung der Betondruckspannungen (FB 102, Abschnitt 4.4.1.2).
- Begrenzung der Betonstahlspannungen (Abschnitt 4.4.1.3).
- Begrenzung der Spannstahlspannungen (Abschnitt 4.4.1.4).
- Nachweis der Dekompression (Abschnitt 4.4.2.1).
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite (Abschnitt 4.4.2.2).
- Nachweis der Rissbreite (Abschnitt 4.4.2.3 bzw. 4.4.2.4).
- Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen (Abschnitt 4.4.0.3, Ausgabe 2009).
- Begrenzung der Verformungen (Abschnitt 4.4.3).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach FB 101, Abschnitt 9.5.2, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische (seltene) Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (9.16)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.17)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.18)$$

- Kombination für nicht häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi'_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{1i} \cdot Q_{ki} \quad (9.19)$$

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Soweit erforderlich, wird die im Nachweis vorgeschriebene Kombination automatisch aus den Querschnittsvorgaben ermittelt. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Spannungsberechnung

Am ungerissenen Betonquerschnitt wird gemäß FB 102, Abschnitt 4.4.1.1 (6), angenommen, dass sich Beton und Stahl unter Zug- und Druckbeanspruchung elastisch verhalten. Bei Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts werden die Betondruckspannungen gemäß Reg.-Nr. 098 der Erfahrungssammlung des NABau nach Abbildung 4.1 mit  $f_c = f_{cm}$  bestimmt, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen werden die Betonspannungen am Bruttoquerschnitt berechnet. Der Nachweis der Stahlspannungen erfolgt für Betonstahl durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt und für Spannstahl am ungerissenen Betonquerschnitt.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Die ohne Nachweis darstellbaren Spannungen der Einwirkungskombinationen werden immer am Bruttoquerschnitt und ohne Berücksichtigung des eingegebenen Vollquerschnitts berechnet.

In den Nachweisen werden dagegen die Spannungen wie folgt ermittelt und graphisch dargestellt bzw. protokolliert:

- Beim Nachweis der Rissbewehrung und der Rissbreite erfolgt die Ermittlung der Biegespannung am Bruttoquerschnitt. Die Längskraft wird gemäß II-4.4.1.1(109) auf die Fläche des Vollquerschnitts bezogen.

- Beim Nachweis der Dekompression, der Betondruckspannungen und der schiefen Hauptzugspannungen erfolgt die Berechnung der Biegespannung
  - ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern im Verbund für die Situationen vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.
 Die Längskraft wird gemäß II-4.4.1.1(109) auf die Fläche des Vollquerschnitts bezogen.
- Der Nachweis der Betonstahl- und Spannstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

## Begrenzung der Betondruckspannungen

Der Nachweis der Betondruckspannungen erfolgt nach FB 102, Abschnitt 4.4.1.2. Gemäß II-4.4.1.1 (5) wird der gerissene Zustand angenommen, wenn die im ungerissenen Zustand unter der seltenen Einwirkungskombination berechnete Zugspannung den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet.

Die Berechnung im gerissenen Zustand erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands mit der endgültigen Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis). Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden im Verbund liegende Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind. Bei Flächenelementen wird, da der allgemeine Dehnungszustand nicht eindeutig bestimmbar ist, die Druckspannung für beide Bewehrungsrichtungen getrennt ermittelt und der Extremwert nachgewiesen.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die Spannungen aus Längskraft entsprechend II-4.4.1.1 (109) mit dem Vollquerschnitt berechnet. Im übrigen gelten die oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

Für Bau- und Endzustände ist die Betondruckspannung  $\sigma_c$  nach II-4.4.1.2 (103)P auf  $0,60 f_{ck}$  unter der nichthäufigen Kombination zu begrenzen. Die Grenze darf um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone z.B. durch Querbewehrung umschnürt ist. Falls die Gebrauchstauglichkeit durch den Einfluss des Kriechens wesentlich beeinflusst wird, soll nach II-4.4.1.2 (104)\*P zusätzlich die Grenze  $0,45 f_{ck}$  unter der quasi-ständigen Kombination eingehalten werden. Beide Optionen werden nach Benutzervorgabe berücksichtigt.

In Spannbetonbauteilen nach II-4.4.1.2 (102)P ist die maximale Betondruckspannung bei Eintragung des Mittelwerts der Vorspannung auf  $0,60 f_{c(t)}$  zu beschränken. Übersteigt die Betondruckspannung den Wert von  $0,45 f_{c(t)}$ , ist die Nichtlinearität des Kriechens zu berücksichtigen. Dabei bezeichnet  $f_{c(t)}$  den Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung.

Im Programm wird der Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannung bei der Situation  $G1+P$  angenommen. Falls in der maßgebenden Kombination eine Situation  $G1+P$  definiert ist, wird für diese Situation die Betonspannung je nach Benutzervorgabe gegen den Grenzwert  $0,45 f_{c(t)}$  oder  $0,60 f_{c(t)}$  geprüft. Der Wert für  $f_{c(t)}$  wird ebenfalls im Dialog festgelegt.

## Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen

### Betonstahl

Bei Betonstahl wird gemäß II-4.4.1.3 die Begrenzung der Stahlspannung unter der nicht häufigen Kombination auf  $0,80 f_{yk}$  nachgewiesen. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt am gerissenen Betonquerschnitt. Im Verbund liegende Stabspannglieder werden auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie verpresst sind.

### Spannstahl

Bei Spanngliedern im Verbund wird die Begrenzung der Stahlspannung unter der quasi-ständigen Kombination nachgewiesen, und zwar für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen und für Flächenelemente am ungerissenen Betonquerschnitt, wobei folgende Grenzen gelten:

- $0,65 f_{pk}$  gemäß II-4.4.1.4 für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 1045-1 und EC2
- $0,75 \beta_s$  bzw.  $0,55 \beta_z$  gemäß DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65, für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 4227

Für Situationen vor dem Verpressen und für Spannglieder ohne Verbund wird die Spannung  $\sigma_{pm0}$  gemäß FB 102, Gl. (4.6) bzw. DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65, nachgewiesen. Für externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

**Hinweis**

Ergänzend zum Nachweis im Gebrauchszustand werden die Spannstahlspannungen für die ständige und vorübergehende Kombination in den Situationen nach dem Verpressen mit dem Mittelwert der Vorspannung berechnet. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen Betonquerschnitt mit den für den Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebenden Spannungs-Dehnungslinien. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Bei Flächenelementen wird von einem ungerissenen Betonquerschnitt ausgegangen. Aus der graphischen Spannungsdarstellung lässt sich entnehmen, in welchen Bereichen und in welchem Umfang Spannstahlreserven nutzbar sind. Dabei ist die Ausnutzung eines Spannglieds als Quotient aus der ermittelten Spannung und dem Grenzwert  $f_{p0,1k} / \gamma_s$  definiert.

**Nachweis der Dekompression**

Der Nachweis ist für vorgespannte Bauteile der Anforderungsklassen A-C mit den Kombinationen nach FB 102, Tabelle 4.118, am ungerissenen Querschnitt zu führen.

Für Spannbetonbrücken mit Kastenquerschnitt der Anforderungsklasse D ist nach ARS 11/2003 (4) bzw. 6/2009 (4) der Nachweis der Dekompression für eine spezielle quasi-ständige Einwirkungskombination zu führen, die sich programmseitig durch Definition einer entsprechenden Situation berücksichtigen lässt.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die Spannungen aus Längskraft entsprechend II-4.4.1.1(109) mit dem Vollquerschnitt berechnet. Bei Flächenelementen wird je nach Benutzerauswahl die Hauptzugspannung  $\sigma_1$  oder eine der Längszugspannungen  $\sigma_x$  bzw.  $\sigma_y$  überprüft. Mit letzterer kann der Nachweis auf die Richtung der Vorspannung beschränkt werden, wenn die Schnittkraftsysteme entsprechend ausgerichtet sind (vgl. Reg.-Nr. 069 der Erfahrungssammlung des NABau). Im übrigen gelten die oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

Bei der Festlegung der Spannungsgrenzen ist nach Bauzustand und Tragwerkstyp zu unterscheiden.

**Bauzustand nach II-4.4.0.3 (102)P und II-4.4.2.1 (107)P****Ausgabe 2003:**

- Bauwerke der Klassen A-C: Am oberen und unteren Querschnittsrand werden Zugspannungen  $\sigma_c \leq 0,85 f_{ctk;0,05}$  zugelassen (vgl. Ril 804.4201 (15) und Reg.-Nr. 006 der Erfahrungssammlung des NABau).
- Kastenbrücken der Klasse D: Am oberen und unteren Querschnittsrand werden Zugspannungen  $\sigma_c \leq 0,85 f_{ctk;0,95}$  zugelassen (vgl. ARS 11/2003 (4)).

**Ausgabe 2009:**

- Bei ausschließlich verbundloser Vorspannung sind die Zugspannungen an dem Rand, der dem Spannglied am nächsten liegt, auf die Werte der Tabelle 4.118a, in allen anderen Fällen auf  $0,85 f_{ctk;0,05}$  zu begrenzen.
- Kastenbrücken der Klasse D: Am oberen und unteren Querschnittsrand werden Zugspannungen  $\sigma_c \leq 0,85 f_{ctk;0,95}$  zugelassen (vgl. ARS 6/2009 (4)).

**Endzustand nach II-4.4.2.1 (106)P**

Bei Bauwerken der Klassen A-C und Kastenbrücken der Klasse D dürfen keine Zugspannungen an dem Rand auftreten, der dem Spannglied am nächsten liegt.

Der betreffende Querschnittsrand wird im Programm wie folgt ermittelt:

- Stäbe und Bemessungsobjekte: Wenn der dem Spannglied nächstgelegene Randpunkt oberhalb des Schwerpunkts liegt, wird die Spannung auf der Oberseite, anderenfalls auf der Unterseite des Querschnitts nachgewiesen.
- Flächenelemente: Der Nachweis wird für den oberen bzw. unteren Querschnittsrand geführt, wenn das dem Nachweispunkt nächstgelegene Spannglied oberhalb bzw. unterhalb der Schwereebene des betrachteten Elements liegt. Spannglieder außerhalb des Elements werden dabei in einer Entfernung bis zur fünffachen Querschnittshöhe berücksichtigt.

Bei nicht eindeutiger Spanngliedführung wird der Nachweis für beide Seiten geführt.

**Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung**

Wird in Brückenlängsrichtung vorgespannt und die Brückenquerrichtung als nicht vorgespannte Konstruktion ausgeführt, ist nach FB 102, Abschnitt 4.4.0.3 (4)P nachzuweisen, dass unter der seltenen Einwirkungskombination die im Zustand I ermittelten Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung die Werte der Tabelle 4.118a nicht überschreiten.

Der Nachweis kann bei Bedarf durch Kontrolle der Randspannungen aus der seltenen Kombination in der graphischen Oberfläche erfolgen.

## Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wird in FB 102, Abschnitt 4.4.2.2 geregelt. Sie ist nach 4.4.2.2(5)\* in den Bereichen einzulegen, wo Zug zu erwarten ist. Die Festlegung der Zugbereiche kann im Querschnittsdialog entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* erhalten die nicht gezogenen Betonstahllagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Nach Abschnitt 4.4.2.2(4)\*P soll bei profilierten Querschnitten jeder Teilquerschnitt (Gurte und Stege) einzeln nachgewiesen werden. Dies ist unter Berücksichtigung beliebiger polygonaler Querschnittsgeometrien nicht möglich. Das Programm ermittelt deshalb die Mindestbewehrung immer am Gesamtquerschnitt. Bei rechteckigen Vollquerschnitten kommt dabei Gleichung (4.195), in allen anderen Fällen Gleichung (4.195a) zur Anwendung.

### Ermittlung der Mindestbewehrung

Die Ermittlung der Mindestbewehrung  $A_s$  erfolgt nach Gleichung (4.194) des FB 102:

$$A_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s \quad (4.194)$$

Dabei ist

$k_c$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor der Erstrissbildung.

Für Rechteckquerschnitte und Stege von Plattenbalken und Hohlkästen:

$$k_c = 0,4 (1 + \sigma_c / (k_1 \cdot f_{ct,eff})) \leq 1 \quad (4.195)$$

Für Zuggurte von Plattenbalken und Hohlkästen:

$$k_c = 0,9 \cdot F_{cr} / A_{ct} / f_{ct,eff} \geq 0,5 \text{ (vgl. Zilch/Rogge 2002, S. 277)} \quad (4.195a)$$

mit der Zugkraft  $F_{cr}$  im Zuggurt im Zustand I unmittelbar vor Rissbildung mit der Randspannung  $f_{ct,eff}$ . Die Zugkraft wird durch Integration der Zugspannungen innerhalb der Fläche  $A_{ct}$  gewonnen.

$\sigma_c$  die Betonspannung in Höhe der Schwerelinie des Querschnitts oder Teilquerschnitts im ungerissenen Zustand unter der Einwirkungskombination, die am Gesamtquerschnitt zur Erstrissbildung führt ( $\sigma_c < 0$  bei Druckspannungen).

$k_1$  = 1,5  $h/h'$  für Drucknormalkraft,  
= 2/3 für Zugnormalkraft.

$h$  die Höhe des Querschnitts oder Teilquerschnitts.

$h'$  =  $\min(h; 1 \text{ m})$ .

$k$  der Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen gem. Eingabe.

$A_{ct}$  die Fläche der Betonzugzone bei Erstrissbildung im Zustand I. Das Programm skaliert hierzu die Biegemomente der Einwirkungskombination soweit, dass die maximale Randspannung im Zustand I den Wert  $f_{ct,eff}$  annimmt.

$f_{ct,eff}$  die effektive Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter gem. II-4.4.2.2 (5)\*:

$f_{ct,eff} = 0,5 f_{ctm}$  bei einem Alter von 3 - 5 Tagen,

$f_{ct,eff} = f_{ctm}$  bei einem Alter von 6 - 28 Tagen,

$f_{ct,eff} = f_{ctm}$  mindestens jedoch 3 MN/m<sup>2</sup>, bei einem Alter von mehr als 28 Tagen.

$\sigma_s$  die maximal zulässige Spannung in der Betonstahlbewehrung in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser des Betonstahls.

Im Querschnittsdialog wird der größte vorhandene Stabdurchmesser  $d_s$  angegeben. Daraus ergibt sich mit Gleichung (4.196) der modifizierte Grenzdurchmesser  $d_s^*$  als Eingangswert für die Tabelle II-4.120:

$$d_s = d_s^* \cdot k_c \cdot k \cdot h_t / (4(h-d)) \cdot f_{ct,eff} / f_{ct0} \geq d_s^* \cdot f_{ct,eff} / f_{ct0} \quad (4.196)$$

Dabei ist

$d_s^*$  der Grenzdurchmesser der Bewehrung nach Tabelle II-4.120.

$h$  die Bauteilhöhe.

$d$  die statische Nutzhöhe.



$h_t$  die Höhe der Zugzone im Querschnitt bzw. Teilquerschnitt vor Beginn der Erstrissbildung.

$f_{ct0}$  die Zugfestigkeit des Betons, auf die die Werte der Tabelle II-4.120 bezogen sind ( $f_{ct0} = 3,0 \text{ MN/m}^2$ ).

Gemäß *Zilch/Rogge* (2002, S. 277) wird der Ausdruck  $k_c \cdot k \cdot h_t / (4(h-d))$  verallgemeinert zu  $0,6 \cdot k_c \cdot k \cdot A_{ct} / A_{c,eff}$  mit der effektiven Zugzone  $A_{c,eff}$  nach Abb. II-4.137. Mit dem modifizierten Grenzdurchmesser  $d_s^*$  und der zulässigen Rissbreite  $w_k$  ergibt sich aus Tabelle II-4.120 die zulässige Betonstahlspannung  $\sigma_s$  für Gl. (4.194).

Wenn gleichzeitig der Nachweis der Rissbreite zu führen ist, überprüft das Programm, ob durch Einlegen der ermittelten Mindestbewehrung die vorgegebene Rissbreite nach Abschnitt II-4.4.2.4 eingehalten wird. Bei Bedarf wird die Mindestbewehrung bis zum Erreichen der Nachweisgrenze iterativ erhöht. Im Protokoll wird die erhöhte Bewehrung dann durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Die Vorschrift nach ARS 11/2003 (14) bzw. Abschnitt II-4.4.2.2(106) der Ausgabe 2009, nach der für Arbeitsfugen immer Mindeststrissbewehrung anzuordnen ist, kann durch manuelle Vorgabe einer Grundbewehrung berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Regelung (107).

Ausgabe 2009: Gemäß Abschnitt II-4.4.2.2 (9) darf bei dickeren Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (4.197a) berechnet werden, wobei der Wert nach Gl. (4.197b) nicht unterschritten werden darf. Es braucht jedoch nicht mehr Bewehrung eingelegt zu werden, als sich nach Gl. (4.194) ergibt. Die vorgenannten Regelungen kommen gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung, während die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung für langsam erhärtende Betone nach Absatz (10) ungenutzt bleibt.

### Besonderheit bei Spannbetontragwerken

In einem Quadrat von 300 mm Seitenlänge um ein Spannglied im sofortigen oder nachträglichen Verbund darf nach Abschnitt II-4.4.2.2(7)\* die in diesem Bereich erforderliche Mindestbewehrung um den Betrag  $\xi_1 \cdot A_p$  verringert werden.

Dabei ist

$A_p$  die Querschnittsfläche des Spannstahls im Spannglied.

$\xi_1$  das Verhältnis der Verbundfestigkeiten von Spannstahl und Betonstahl.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden Spanngliedlagen im Verbund, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind, mit dem im Querschnittsdialog eingegebenen Wert für  $\xi_1$  angerechnet. Bei Flächenelementen kann Spannstahl generell nicht berücksichtigt werden.

Nach Absatz (3)\* des Abschnitts II-4.4.2.2 ist bei Bauteilen mit Vorspannung mit Verbund die Mindestbewehrung nicht in Bereichen erforderlich, in denen unter der seltenen (charakteristischen) Einwirkungskombination und den charakteristischen Werten der Vorspannung Betondruckspannungen am Querschnittsrand auftreten, die dem Betrag nach größer als  $1 \text{ MN/m}^2$  sind. Diese Bedingung wird im Programm automatisch berücksichtigt.

## Berechnung der Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch direkte Berechnung nach FB 102, Abschnitt 4.4.2.4, mit der Einwirkungskombination gemäß Anforderungsklasse nach Tab. II-4.118. Der Grenzdurchmesser und das Betonalter zur Ermittlung der effektiven Zugfestigkeit werden im Querschnittsdialog eingegeben.

Die Spannungen aus Längskraft werden entsprechend II-4.4.1.1(109) mit dem Vollquerschnitt berechnet.

In Abhängigkeit von der Betonrandspannung  $\sigma_c$  im Zustand I sind folgende Risszustände zu unterscheiden (vgl. Heft 525, S. 191, und Leitfaden zum DIN FB 102, S. 24):

$\sigma_c \leq f_{ct,eff}$  Stadium der Einzelrissbildung

$\sigma_c > f_{ct,eff}$  Stadium der abgeschlossenen Rissbildung

mit

$f_{ct,eff}$  Effektive Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter gemäß II-4.4.2.2 (5)\*.

Ausgabe 2009: Hier ohne Ansatz einer Mindestbetonzugfestigkeit.

Durch Begrenzung des maximalen Rissabstands und der Differenz der Dehnungen sind die Formeln in FB 102, Abschnitt

4.4.2.4, gemäß Heft 525, S. 104, sowohl für das Stadium der Einzelrissbildung als auch für das abgeschlossene Rissbild anwendbar. Im Programm wird deshalb die Rissbreite für alle Fälle mit  $\sigma_c > 0$  nachgewiesen.

Die Durchführung des Nachweises gliedert sich programmseitig in folgende Schritte:

- Dehnungszustand II unter der Nachweiskombination gemäß Anforderungsklasse mit Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß FB 102, Abb. 4.1, ermitteln. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden dabei alle im Verbund liegenden Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt.
- Effektive Zugzone  $A_{c,eff}$  bestimmen (siehe nächster Abschnitt), Betonstahllagen und Spannstahllagen innerhalb  $A_{c,eff}$  ermitteln.
- Bewehrungsgrad berechnen:

$$eff \rho = (A_s + \xi_1^2 \cdot A_p) / A_{c,eff} \quad (4.200a)$$

$$\rho_{tot} = (A_s + A_p) / A_{c,eff} \quad (4.200b)$$

mit

$\xi_1$  Verbundbeiwert lt. Benutzervorgabe.

- Für jede Betonstahllage einzeln bestimmen:

#### Differenz der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = [\sigma_s - 0,4 f_{ct,eff} / eff \rho (1 + \alpha_E \cdot eff \rho)] / E_s \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (4.202)$$

mit

$$\alpha_E = E_s / E_{cm}$$

$$\sigma_s = \sigma_2 + 0,4 f_{ct,eff} (1/eff \rho - 1/\rho_{tot}) \quad (4.199)$$

$\sigma_2$  Betonstahlspannung aus Dehnungszustand II.

$f_{ct,eff}$  Wirksame Betonzugfestigkeit im angegebenen Betonalter.

#### Maximaler Rissabstand

$$s_{r,max} = d_s / (3,6 eff \rho) \leq \sigma_s / (3,6 f_{ct,eff}) \quad (4.203)$$

Wenn im Querschnittsdialog eine Obergrenze für den Rissabstand nach Gleichung (4.203) angegeben wurde, lassen sich damit die Besonderheiten der Gleichung (4.204) berücksichtigen.

#### Rechenwert der Rissbreite

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4.201)$$

Im Protokoll wird die Lage mit der größten rechnerischen Rissbreite nachgewiesen.

- Bei gezogenem Querschnitt erfolgt die Untersuchung für jede der beiden effektiven Zugzonen getrennt. Das Maximum wird im Protokoll ausgegeben.

Falls der Nachweis der Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite nicht gewählt ist, ermittelt das Programm automatisch eine zur Einhaltung der Rissbreite erforderliche Rissbewehrung. Dazu erfolgt eine Bemessung mit der für die Berechnung der Rissbreite maßgebenden Nachweiskombination. Die so ermittelte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Die Rissbreite wird dann für die endgültige Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis) nachgewiesen und für die graphische Darstellung gespeichert.

Die Regelung für Arbeitsfugen nach ARS 11/2003 (14) bzw. II-4.4.2.2(106), (107) und II-4.4.2.3(5)\*P der Ausgabe 2009 wird nicht erfasst.

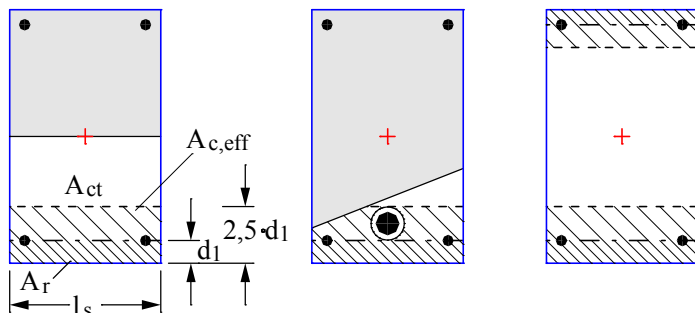
## Ermittlung des Wirkungsbereichs $A_{c,eff}$

Die effektive Zugzone  $A_{c,eff}$  definiert nach DIN FB 102, Abb. 4.137, den Bereich eines rechteckigen, einachsigen beanspruchten Betonquerschnitts, in dem die Modellannahmen nach Heft 466 anwendbar sind (vgl. auch Heft 525, Erläuterung zu DIN 1045-1, Bild 53). Die Übertragung dieses Modells auf beliebige Querschnitte und Beanspruchungssituationen ist programmseitig möglich, liegt jedoch im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders.

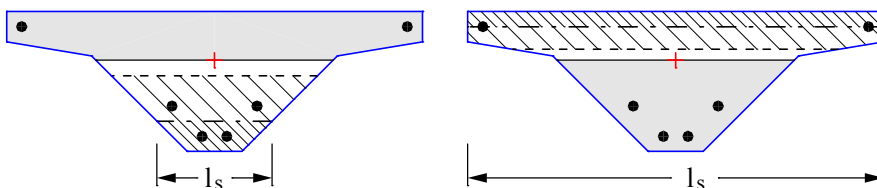
Bei der Bestimmung von  $A_{c,eff}$  wird im Programm folgendermaßen vorgegangen:

- Zugzone  $A_{ct}$  im Zustand I ermitteln, bei Berechnung der Mindestbewehrung mit der zum Erstriss führenden Beanspruchung, bei Berechnung der Rissbreite mit der Nachweiskombination gemäß Anforderungsklasse.
- Schwerlinie der Bewehrung als Regressionsgrade durch die Betonstahllagen in der Zugzone bestimmen. Bei Flächenelementen wird eine horizontale Linie durch den Schwerpunkt der gezogenen Bewehrungslagen angenommen.
- Abgeschnittene Restfläche  $A_r$  bis zum Rand und Summe der Schnittlängen  $l_s$  ermitteln. Die mittlere Überdeckung wird dann zu  $d_1 = A_r / l_s$  angenommen, allerdings nicht kleiner als der kleinste Randabstand der Betonstahllagen in der Zugzone.
- Schwerlinie um den Betrag  $1,5 \cdot d_1$  parallel verschieben. Bei Flächenelementen wird  $2,5 \cdot d_1 \leq (h-x) / 2$  eingehalten ( $x$  = Druckzonenhöhe).
- Das sich so ergebende Polygon wird mit der Zugzone verschnitten und definiert dann die effektive Zugzone  $A_{c,eff}$ .
- Wenn alle Betonstahllagen des Querschnitts gezogen sind, werden zwei Zonen ermittelt, und zwar eine für die Lagen oberhalb des Schwerpunkts und eine zweite für die Lagen unterhalb des Schwerpunkts. Die Fläche jeder Zone wird auf  $A_c / 2$  begrenzt.
- Ausgabe 2009: Falls im Querschnittsdialog die Mindestbewehrung für dickere Bauteile unter zentrischem Zwang gewählt wurde, ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß Bild 4.137 d) zu  $h_{eff} \geq 2,5 d_1$ .

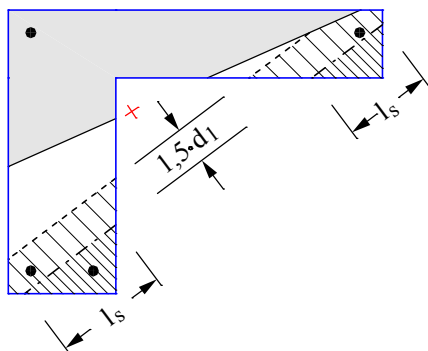
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die vom Programm ermittelten effektiven Zugzonen in typischen Situationen. Der letzte Fall (Randbalken) weicht von den Modellannahmen in Heft 466 jedoch soweit ab, dass eine Anwendung fragwürdig ist.



Effektive Zugzonen am Rechteckquerschnitt unter einachsiger Biegung, Normalkraft mit Doppelbiegung und zentrischem Zug



Effektive Zugzonen an einem Brückenquerschnitt unter einachsiger Biegung



Effektive Zugzone an einem Randbalken unter einachsiger Biegung

## Nachweis der Rissbreite durch Begrenzung der Stababstände

Als Alternative zur direkten Berechnung der Rissbreite nach Abschnitt 4.4.2.4 kann im Querschnittsdialog der vereinfachte Nachweis gemäß FB 102, Abschnitt 4.4.2.3(2)\* durch Begrenzung der Stababstände nach Tabelle 4.121 gewählt werden.

Die Durchführung des Nachweises gliedert sich programmseitig in folgende Schritte:

- Dehnungszustand II unter der Nachweiskombination gemäß Anforderungsklasse mit Spannungs-Dehnungs-Linie nach FB 102, Abb. 4.1 ermitteln. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden dabei alle im Verbund liegenden Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt.
- Betonstahlspannung  $\sigma_s$  für jede Bewehrungslage nach Gleichung (4.199) bestimmen.
- Vergleich des im Dialog eingegebenen Wertes (**max. s**) mit dem Tabellenwert (**zul. s**), der sich aus der berechneten Stahlspannung  $\sigma_s$  und der zulässigen Rissbreite  $w_k$  ergibt. Im Protokoll wird die Lage mit dem größten Quotienten (**max. s / zul. s**) nachgewiesen.

Falls der Nachweis der Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite nicht gewählt ist, ermittelt das Programm automatisch eine Rissbewehrung, für die die zulässigen Stababstände eingehalten werden. Dazu erfolgt eine Bemessung mit der für den Nachweis maßgebenden Einwirkungskombination. Die so ermittelte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Der Nachweis der Stababstände erfolgt dann für die endgültige Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis).

### Hinweis

Der vereinfachte Nachweis ist nach Abschnitt 4.4.2.3(2)\* nur bei Rissbildung infolge überwiegend direkter Einwirkungen (Lastbeanspruchung) anwendbar. Ferner liefert diese Methode nach Auffassung von *Zilch* und *Rogge* (2002, S. 277) nur bei einlagiger Zugbewehrung mit  $d_1 = 4$  cm sichere Ergebnisse. Die Beurteilung dieser Voraussetzungen obliegt dem Anwender.

## Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen

Bei vorgespannten Straßenbrücken mit schlanken Stegen ist nach II-4.4.0.3(5)P, Ausgabe 2009, bzw. ARS 11/2003 (16) die Schubrissbildung zu begrenzen. Es ist nachzuweisen, dass die schiefen Hauptzugspannungen unter der Wirkung von Querkraft und Torsion die Werte von  $f_{ctk;0,05}$  nicht überschreiten. Der Nachweis ist im Zustand I für die häufige Kombination zu führen.

Bei vorgespannten Eisenbahnbrücken sind die Hauptzugspannungen nach II-4.4.03(6)P, Ausgabe 2009, bzw. Ril 804.4201 (18) ebenso zu begrenzen. Allerdings darf der Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen beschränkt werden, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen. Diese Option kann im Querschnittsdialog gewählt werden. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Im Programm werden durch Querschnittsanalyse alle Schubkenngrößen aus Querkraft und Torsion für den Querschnittsrand ermittelt. Die Schubspannungen aus Querkraft werden gemäß Auswahl im Querschnittsdialog entweder nach der Theorie dickwandiger Profile oder durch Mittelung über die Querschnittsbreite bestimmt. Die schiefe Hauptzugspannung lässt sich dann für jeden Querschnittspunkt berechnen:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2 + 4\tau_{xz}^2}$$

mit

$\sigma_x$  Längsspannung aus Biegung und Längskraft unter Beachtung der oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

$\tau_{xy}$  Randschubspannung in Richtung y aus Querkraft und Torsion.

$\tau_{xz}$  Randschubspannung in Richtung z aus Querkraft und Torsion.

Der Winkel zwischen  $\sigma_1$  und  $\sigma_x$  ergibt sich zu:

$$\tan 2\vartheta_1 = \frac{-2\tau}{\sigma_x}$$

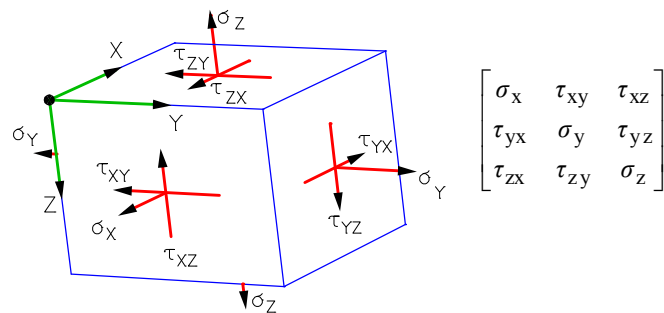
mit

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} \text{ als resultierende Randschubspannung.}$$

Im Protokoll wird der Maximalwert für  $\sigma_1$  mit dem zugehörigen Querschnittspunkt nachgewiesen.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen wird der Nachweis für die Hauptzugspannungen am Bruttoquerschnitt geführt. Der räumliche Spannungszustand ist durch folgenden Spannungstensor beschrieben:



mit

$\sigma_x, \sigma_y$  Längsspannungen aus Biegung und Normalkraft.

$\sigma_z = 0$ .

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$  Schubspannung aus Drillmoment und Scherkraft mit linearem Verlauf über die Querschnittshöhe.

$\tau_{xz} = \tau_{zx}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_x$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_x / h$  in der Schwererebene.

$\tau_{yz} = \tau_{zy}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_y$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_y / h$  in der Schwererebene.

Durch schichtweise Bestimmung des Spannungstensors und Lösung des Eigenwertproblems für die drei Hauptspannungen wird die maximale Hauptspannung  $\sigma_1$  mit ihrer Höhenlage  $z$  bezüglich der Querschnittsoberkante ermittelt. Diese werden zusammen mit den zugehörigen Spannungskomponenten im Ergebnisprotokoll nachgewiesen.

## Begrenzung der Verformungen

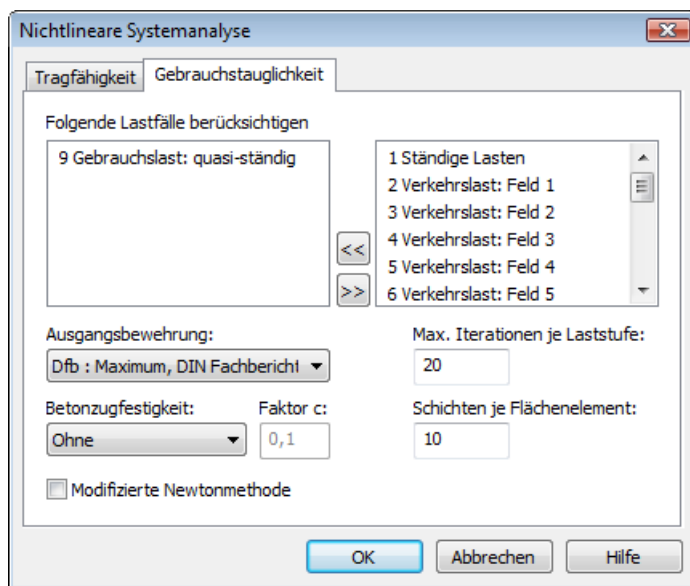
Nach FB 102, Abschnitt 4.4.3.1 (1)\*P, dürfen die Verformungen eines Bauteils oder Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild beeinträchtigen. Für Eisenbahnbrücken sind die Grenzwerte der Verformungen in FB 101, Abschnitt G3, geregelt. Für andere Brücken sind geeignete Grenzwerte in Abstimmung mit dem Bauherrn zu vereinbaren.

Die Durchbiegungen sollen gemäß II-4.3.3.1 (106) unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination bestimmt werden. Die eingesetzte Berechnungsmethode soll nach II-4.4.3.2 (103)P den „tatsächlichen Verhältnissen und Randbedingungen des Tragwerks“ entsprechen. Heft 525, Abschnitt 11.3.2, verweist auf entsprechende Literaturstellen.

Im Programmsystem InfoCAD kann ein wirklichkeitsnaher Nachweis im Rahmen der Nichtlinearen Systemanalyse für Stab- und Schalenträgerwerke unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten geführt werden. Der Widerstand von im Verbund liegenden Spanngliedern geht z.Zt. nicht in die Berechnung ein.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Definition von Nachweissituationen über die Funktion *Lastgruppe* im Belastungsdialog durch Zusammenstellung der maßgebenden Einzellastfälle. Dabei sind die veränderlichen Lasten mit den Kombinationsbeiwerten  $\psi_2$  für die quasi-ständige Kombination zu wichten.
- Auswahl der Nachweissituationen im Dialog *Nichtlineare Systemanalyse / Gebrauchstauglichkeit* der Berechnungseinstellungen für die FEM-Berechnung.
- Einstellen der im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Bewehrung im Auswahlfeld *Ausgangsbewehrung* (Maximum aus Biegung, Robustheit, Rissesicherung und Ermüdung).
- Ausführen der FEM-Berechnung zur Ermittlung der Verformungen im Zustand II.
- Überprüfung der graphisch oder tabellarisch wiedergegebenen Systemverformungen.



Eine ausführliche Beschreibung der Nichtlinearen Systemanalyse ist dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Die sich ergebende Biege-, Robustheits- und Rissbewehrung, das resultierende Maximum sowie die Querkraft- und Torsionsbewehrung werden ebenfalls für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt.

Im Protokoll werden zu jedem Berechnungsort die Bemessungsschnittgrößen und erforderlichen Bewehrungen bzw. nachgewiesenen Spannungen oder Rissbreiten ausgegeben. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte werden als Warnungen gemeldet und am Nachweisort gekennzeichnet. Das ausführliche Protokoll dokumentiert zusätzlich die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen.

### Spannungen bei Stäben und Bemessungsobjekten

$\sigma_x$  Längsspannungen in den Nachweisen der Dekompression und der Betondruckspannungen [MN/m<sup>2</sup>].

$\sigma_1, \sigma_x, \tau_{\max}$  Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und Schubspannungen [MN/m<sup>2</sup>].

$\sigma_s, \Delta\sigma_s$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd}, \Delta\sigma_{cd}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,y}, \Delta\sigma_{sb,z}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus $Q_y$ und $Q_z$ [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,T}, \Delta\sigma_{sl,T}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus Torsion und für Torsionslängsbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Spannungen bei Flächenelementen

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_1$	Längsspannungen in x- oder y-Richtung bzw. Hauptzugspannungen im Nachweis der Dekompression (abhängig von Benutzervorgabe) [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_2$	Hauptdruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$	Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und Schubspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	
$\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sx}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in x-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sy}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd,x}, \Delta\sigma_{cd,x}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck in
$\sigma_{cd,y}, \Delta\sigma_{cd,y}$	x- und y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{s,b}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Biegebewehrung

$A_s$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> ] bei Stäben und Bemessungsobjekten.
$a_{sx}, a_{sy}$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Flächenelementen in x- und y-Richtung.

### Bewehrung aus Querkraft

$a_{sb}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_T$ .
$a_{sbx}, a_{sby}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_x$ und $q_y$ .
$A_{sb,y}, A_{sb,z}$	Bügelbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [cm <sup>2</sup> /m] aus $Q_y$ und $Q_z$ .
$A_{sl}$ für $a_{sb}=0$	Längsbewehrung [cm <sup>2</sup> ] von Flächenelementen.
$z_y, z_z$	Innerer Hebelarm [m] für Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .
$\Delta F_{sd,y}, \Delta F_{sd,z}$	Zugkraftanteil [kN] in der Längsbewehrung gemäß Abb. 4.13 infolge Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .

### Torsionsbewehrung

$A_{sb,T}$	Torsionsbügelbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [cm <sup>2</sup> /m] aus $M_x$ .
$A_{sl,T}$	Torsionslängsbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [cm <sup>2</sup> ] aus $M_x$ .

### Bemessungswerte

$V_{Rd,ct}, v_{Rd,ct}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft ohne Schubbewehrung [kN bzw. kN/m].
$v_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Flächen [kN/m].
$V_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Stäben und Bemessungsobjekten [kN].

### Rissbreiten

$w_{k,oben}$	Berechnete Rissbreite an der Ober- und Unterseite des Querschnitts,
$w_{k,unten}$	bei Flächenelementen jeweils getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y.

## Beispiele

### Straßenbrücke in Massivbauweise

Dieses Beispiel zeigt die Funktionen und Fähigkeiten des Programmmoduls *DIN-Fachbericht Brückennachweise* anhand einer einfachen Brückenplatte auf.

Das Beispiel wurde in Anlehnung an Teil 1 des Buches

Bauer, Thomas / Müller, Michael

Straßenbrücken in Massivbauweise nach DIN-Fachbericht

**Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.**

Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.

2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003

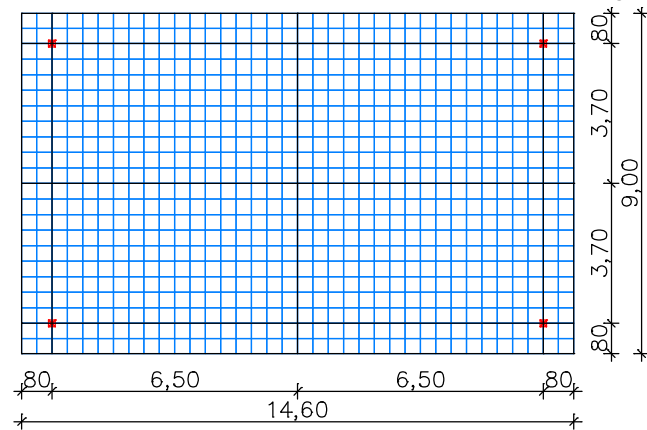
gewählt.

Programmseitig teilen sich die DIN-Fachberichte in folgende Abschnitte:

- Querschnittsabhängige Nachweisvorgaben
- Auswahl der Tragwerksart
- Lastmodell 1
- Kombination der Einwirkungen
- Nachweise durchführen

### Aufgabenstellung

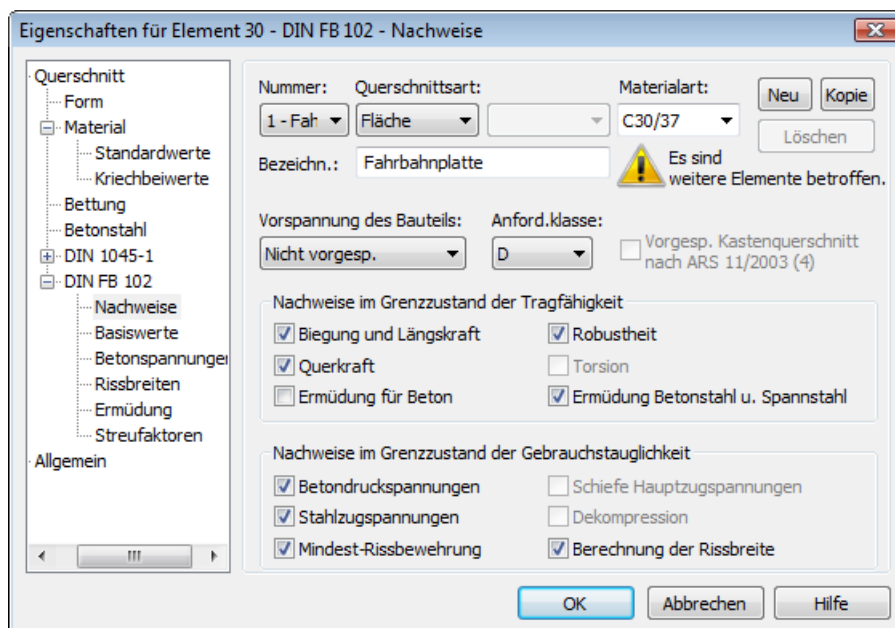
Zu berechnen ist eine Straßenbrücke. Diese soll als einfeldrige Stahlbetonplatte ausgeführt werden.



Beton C30/37, Plattendicke 0,85 [m]

Das abgebildete FEM-System wird mit Plattenelementen generiert. Zur Vereinfachung wird die Belastung nachfolgend auf Eigenlast, Ausbaulasten sowie die Lastmodelle 1 und 3 nach DIN Fachbericht 101 beschränkt.

Anschließend werden die querschnittsabhängigen Nachweisvorgaben ergänzt:





## Tragwerksart



Nach Öffnen des Ordners *DIN-Fachbericht* in der Datenbasis werden unter *Tragwerksart* der Verkehrsweg und die Bauart eingestellt.

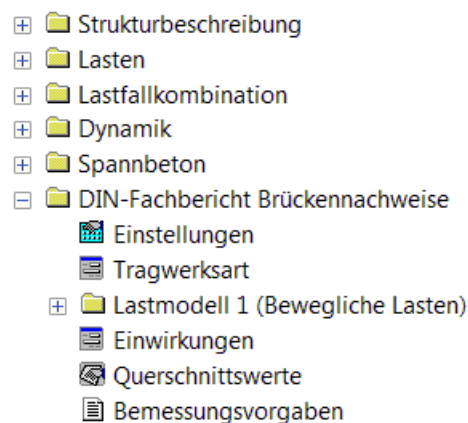
## Lastmodell 1

Das Lastmodell 1 besteht aus 2 Teilen:

- Doppelachse (Tandemsystem TS)
- Gleichmäßig verteilten Flächenlasten UDL

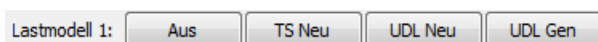
Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt.

Da nicht in allen Fällen von vorne herein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, können unterschiedliche Varianten von Laststellungen definiert werden.

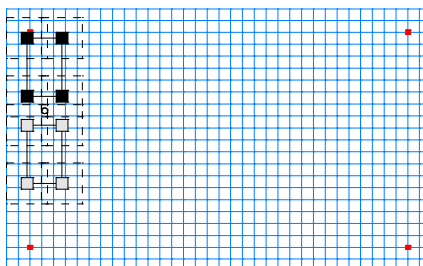
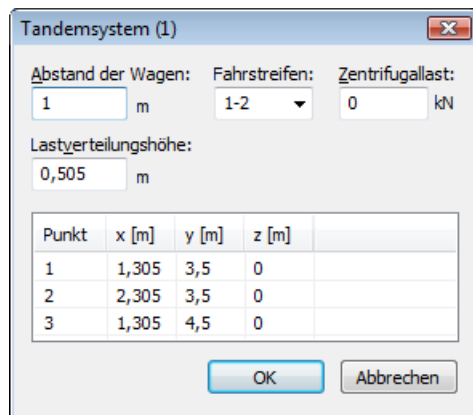


Im Ordner *DIN-Fachbericht* wird mit der rechten Maustaste auf *Lastmodell 1* geklickt und im Kontextmenü die Option *Neu* gewählt.

Es wird die 1. Variante des Lastmodells angelegt und der Eingabedialog gestartet.

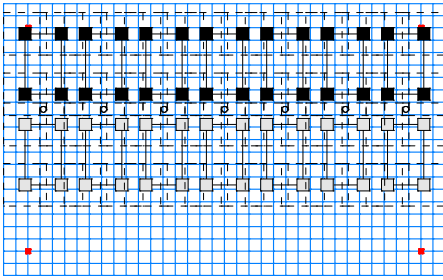


Nach Klicken auf *TS neu* können Schwerpunkt und Fahrtrichtung des 1. Tandemsystems festgelegt werden.



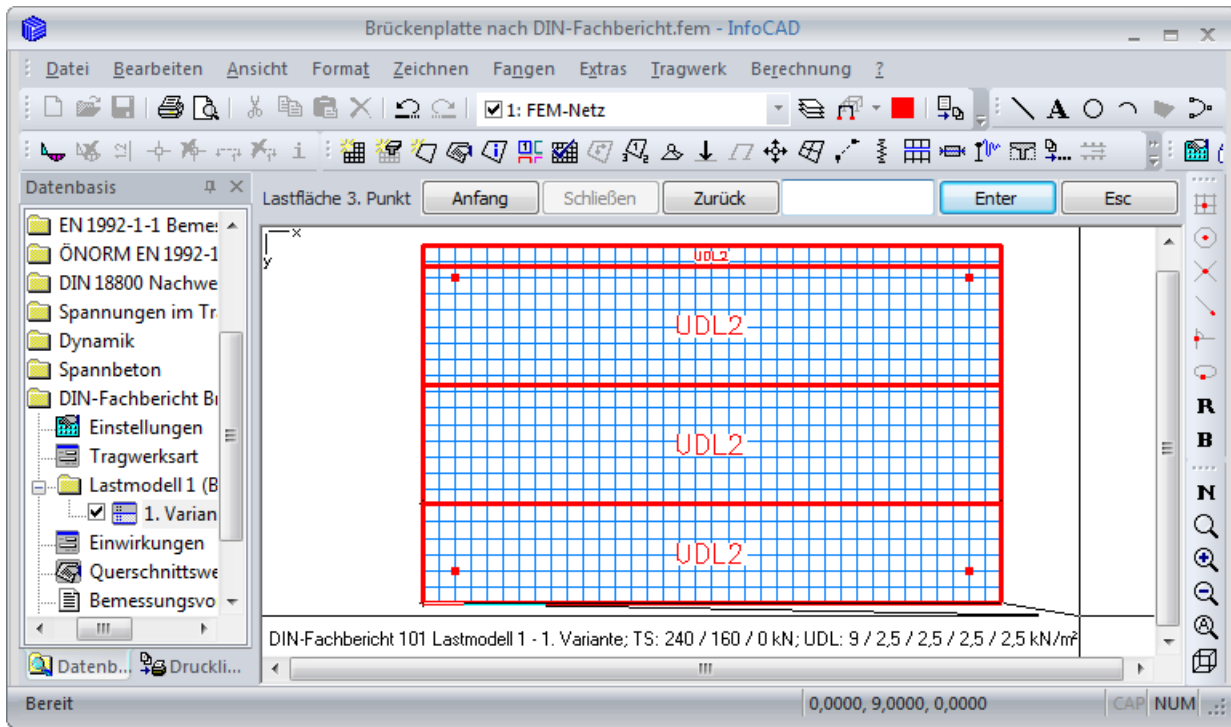
Die Eigenschaften der Tandemsystemstellung werden im Dialog eingestellt.

Der Fahrstreifen 1 wird in Fahrtrichtung links angenommen und durch eine dunkle Schraffur gekennzeichnet. Die sich aus der Lastverteilungshöhe ergebende Fläche wird gestrichelt dargestellt.

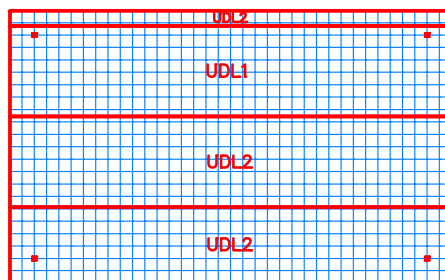
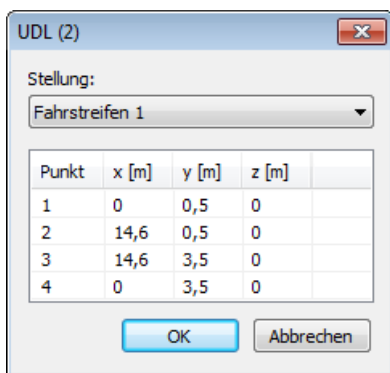


Nach Markieren des Tandemsystems lassen sich die gewünschten Laststellungen durch Kopieren oder Generieren erzeugen. Dabei können die üblichen Fangfunktionen wie *Mitte* oder *Ende* angewendet werden.

Anschließend werden nach Klick auf die Option *UDL neu* fortlaufend die Lastflächen des UDL-Systems definiert.

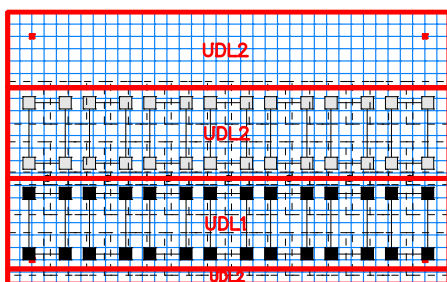


Zunächst werden alle Lastflächen als UDL2 (Fahrstreifen 2) angenommen. Nach Doppelklicken auf die obere UDL-Fläche ist hierfür *Fahrstreifen 1* einzustellen.



Fertige UDL-Flächen (TS wurde ausgeblendet)

Damit ist die 1. Variante des Lastmodells 1 definiert. Zur Eingabe der 2. Variante ist mit der rechten Maustaste erneut in der Datenbasis auf *Lastmodell 1* zu klicken und im Kontextmenü die Option *Neu* zu wählen. Mittels der Zwischenablage können alle TS- und UDL-Stellungen auch in die 2. Variante kopiert und anschließend verändert werden (hier: Rotation um 180°).

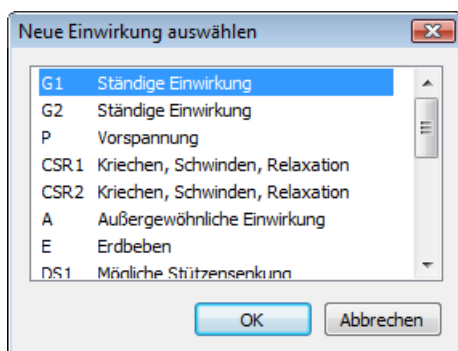


Das Lastmodell 1 ist damit vollständig beschrieben und kann berechnet werden. Dies erfolgt zusammen mit den Lastfällen im Rahmen der FEM-Berechnung. Die Ergebnisse aller Laststellungen werden einzeln abgespeichert und in einem Ordner

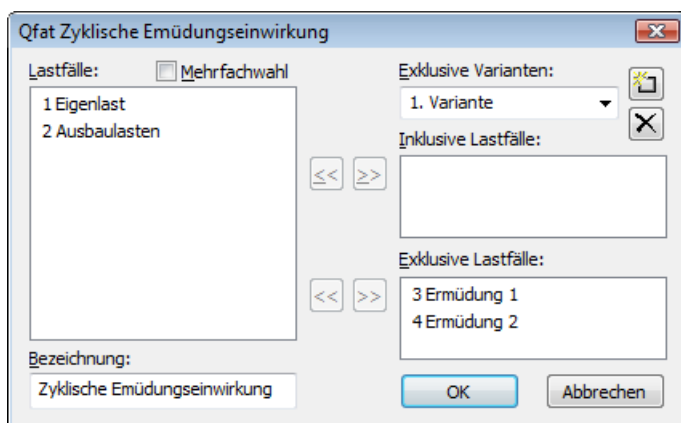
📁 *Lastmodell 1 (Bewegliche Lasten)* zusammengefasst.

## Kombination der Einwirkungen

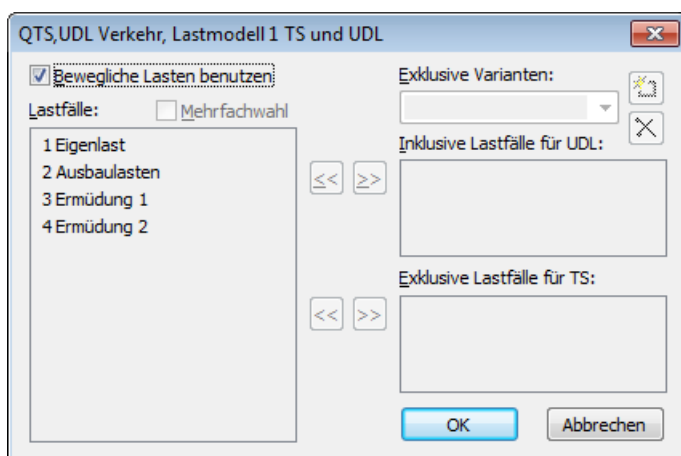
Zur Beschreibung der Einwirkungen und deren Kombination ist in der Datenbasis die Option *Einwirkungen* zu öffnen und dann auf *Einfügen* zu klicken.



Die zu betrachtenden Einwirkungen werden im Dialog ausgewählt. Anschließend werden ihnen Lastfälle zugeordnet.



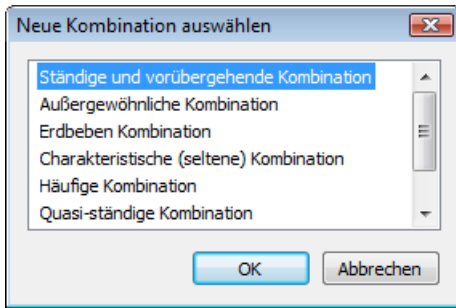
Bei veränderlichen Einwirkungen lassen sich mehrere Lastfälle zu inklusiven und exklusiven Gruppen zusammenfassen. Zusätzlich können bei Bedarf mehrere sich gegenseitig ausschließende Varianten definiert werden.



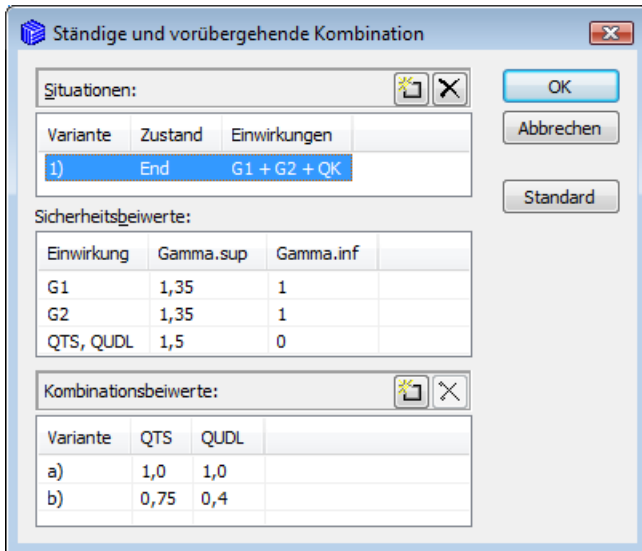
Die veränderlichen Einwirkungen QTS und QUDL werden direkt aus dem Lastmodell 1 genommen.

Dazu muss die Option *Bewegliche Lasten benutzen* aktiviert werden.

Alternativ können auch frei definierte Lastfälle oder Kombinationen verwendet werden.

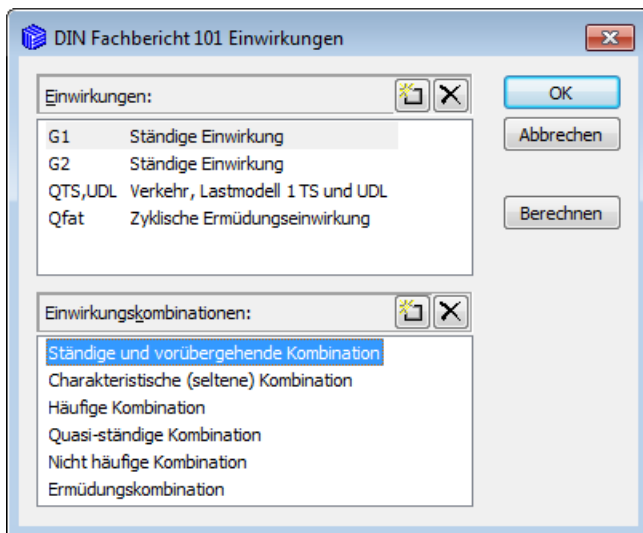


Nachdem den Einwirkungen die zugehörigen Lasten zugeordnet worden sind, werden die für die Nachweise benötigten Kombinationen ergänzt.



Gemäß Fachbericht 101/102 ergeben sich mit den Sicherheits- und Kombinationsbeiwerten die abgebildeten Varianten.

Der Vorschlag kann hier mit *OK* akzeptiert werden, um mit der Auswahl weiterer Kombinationen fortzufahren.



Zur Ermittlung der extremalen Schnittkräfte aus den beschriebenen Kombinationen ist anschließend auf *Berechnen* zu klicken.

Das Programm kombiniert die Ergebnisse der verwendeten Lastfälle, Kombinationen sowie des Lastmodells und stellt diese wie gewohnt zur Verfügung:

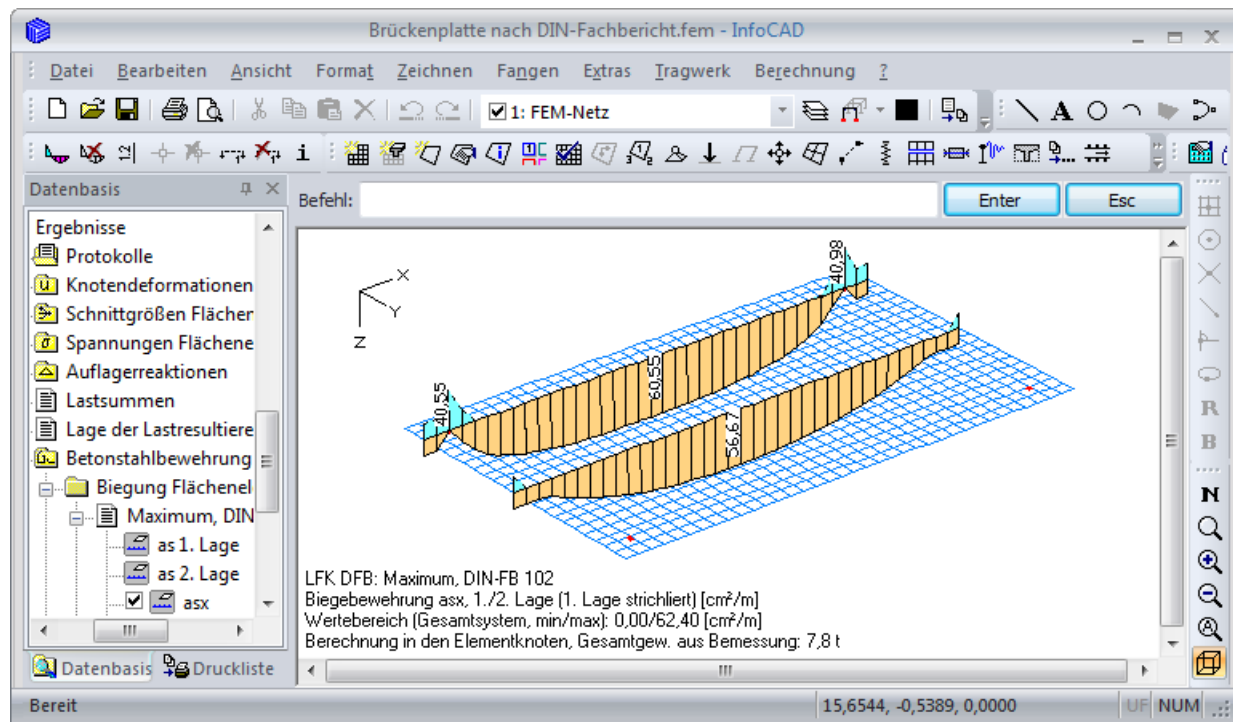
**Schnittgrößen Flächenelemente**

- ⊕ 1. Ständige und vorübergehende Kombination, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Charakteristische (seltene) Kombination, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Häufige Kombination, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Quasi-ständige Kombination, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Nicht häufige Kombination, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Ermüdungssituation, Basisanteil, DIN-FB 102
- ⊕ 1. Ermüdungssituation, zyklischer Anteil, DIN-FB 102

Die Berechnung der Kombinationen ist hier nur optional, da das Nachweisprogramm diese ohnehin durchführt.

## Nachweise durchführen

Der Start des Nachweisprogramms *DIN-Fachbericht Brückennachweise* erfolgt aus dem Berechnungsmenü. Die Ergebnisse sind anschließend aus der Datenbasis abrufbar.



Maximum der oberen und unteren Längsbewehrung aus Biegung mit Normalkraft, Rissicherung und Ermüdung.

Nachfolgend ist das Kurzprotokoll für ein einzelnes Element in Feldmitte abgedruckt:

### Bemessung nach DIN-Fachbericht 101 und 102 (2009-03)

Die Einwirkungen werden nach DIN-Fachbericht 101 mit den bauwerksspezifischen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten kombiniert.

Alle Nachweise erfolgen für die Extremwerte der Einwirkungen.

### Tragwerksart

Verkehrsweg: Straße  
 Bauart: Beton

### Bemessungsvorgaben

Qu.	Klasse, Vorspannung des Bauteils	Kasten	Bewehrung	Ermüd.	Riss-	De-	Spannungen
		ARS	M R B Q T	S P C	breite	komp.	Druck H-Zug S P
1	D Nicht vorgespannt	.	x x x x	. x . .	x	.	x . . x .

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

### Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung

M,N	Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.										
fyk	Stahlgüte der Bügel.										
Theta	Neigung der Betondruckstreben. Der eingegebene Wert für cot Theta wird programmseitig auf den Wertebereich nach Gl. (II-4.122) begrenzt.										
Pl.	Balken werden wie Platten bemessen.										
Asl	Vorh. Biegezugbewehrung nach Abb. 4.12, autom. Erhöhung bis Maximum.										
rhov	Mindestbewehrungsgrad min rhov = Faktor * rho mit rho nach Tabelle 5.7.										
x,y	Getrennter Querkraftnachweis für die Bewehrungsrichtungen x und y.										
cvl	Verlegemaß der Längsbewehrung zur Begrenzung des Hebelarms z.										
Red.	Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.										
Qu.	Beton	Rohdichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Abb. 4.12	Fak. vorh. max	Nw. rhov	cvl x,y [mm]	Red. Vor-spg.
1	C30/37	.	ST	500	1,75	.	0,00	0,00	0,60	.	60

**Schubquerschnitte**

bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
 h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
 kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d. z wird gemäß II-4.3.2.4.2(2)\* nach oben begrenzt.  
 z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
 teff Wanddicke des Torsionskastens.  
 K. Kastenquerschnitt.

Qu.	Breite [m]		Nutzbreite		Höhe [m]		Nutzhöhe		Torsionsquerschn. [m]		
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h	h.nom	d [m]	kd	z1	z2	teff K.
1	1,000	.	.	.	0,850	.	0,780	0,90	.	.	.

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
 max.s Größter vorhandener Stababstand der Betonstahlbewehrung.  
 Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
 k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
 sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (4.203).  
 Methode Direkte Berechnung der Rissbreite nach Kap. 4.4.2.4 oder Nachweis durch Begrenzung der Stababstände nach Tab. 4.121.  
 DB Dickes Bauteil nach Kap. 4.4.2.2(9) zur Bestimmung von As,min.

Qu.	wk, zul	ds	max.s	Beiwert	sr,max	Betonalter	Methode	f.	Betonzugzone	DB
	[mm]	[mm]	[mm]	Xil k	[mm]	As,min	wk	Rissbreite	für As,min	
1	0,20	28	.	0,50	.	> 28d	> 28d	Berechnung	Charakt. EK	.

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen**

Av Fläche des Vollquerschnitts zur Ber. der Normalspannung aus Längskraft.  
 fc(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.  
 H-Zug Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruckspannungen nachweisen.  
 (NK, QK) Nichthäufige, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	Av	fc(t)	zul.sigma.c(t)	zul.sigma.c	Dekompression	H-Zug nur bei
	[m²]	[MN/m²]	(NK, QK)	(NK) (QK)	Spannung	Längsdruck
1	.	.	.	0,60 fck	0,45 fck	.

**Vorgaben für den Nachweis gegen Ermüdung**

Die Betondruckspannungen werden nach Abb. 4.1 mit fc = fcm berechnet.

fcd,fat Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung.  
 dSigma.Rsk,s Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Längsbewehrung.  
 dSigma.Rsk,b Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Schubbewehrung.  
 dSigma.Rsk,p Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite des Spannstahls.  
 Lambda.s,b,p Zugh. Korrekturbeiwerte für schadensäquivalente Schwingbreite.  
 Lambda.c Korrekturbeiwert für schadensäquivalente Betonspannungen.  
 Eta Erhöhungsfaktor für Betonstahlspannung nach II-4.3.7.3 (3)P.  
 k0 Abminderungsfaktor für den statisch best. Anteil der Vorspannung nach II-4.3.7.2 (103)P.  
 Fak. Qfat Faktor für Qfat zur Ber. der schadensäqu. Schwingbreite (s,b,p).  
 Nw. SPC Nachweis für (S) Betonstahl, (P) Spannstahl, (C) Beton.  
 (x) Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten - Ermüdungskomb.  
 (+) Vereinfachter Nachweis nach II-4.3.7.4/5 - häufige Kombination.

Qu.	Nw.	fcd,fat	dSigma	[MN/m²]			Lambda			Eta	k0	Fak.
	SPC	[MN/m²]	Rsk,s	Rsk,b	Rsk,p	s	b	p	c	.	.	Qfat
1	x..	.	175,00	175,00	.	1,26	1,26	.	.	.	.	1,00 *)

\*) Die Berechnung der Schwingbreite wird bei diesem Querschnitt auf die korrespondierenden Varianten von Bemessungsschnittgrößen beschränkt.

**Spannungsberechnung für Flächenelemente**

Betonspannungen werden am Bruttoquerschnitt berechnet.  
 Der Nachweis der Betonstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

**Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe im Grenzzustand der Tragfähigkeit**

	Beton	Betonstahl	Spannstahl
	(gamma.c)	(gamma.s)	(gamma.s)
Ständige und vorübergehende Komb., Erdbeben	1,50	1,15	1,15
Außergewöhnliche Kombination	1,30	1,00	1,00
Nachweis gegen Ermüdung	1,50	1,15	1,15

Für Beton ab den Festigkeitsklassen C55/67 und LC55/60 findet Vorschrift 5.3.3 (9) der DIN 1045-1 (2001, 2008) Anwendung.

**Betonstahl für Flächenelemente**

Qu.	Lage	Güte	E-Modul	do x	du x	asx	do y	du y	asy	as
			[MN/m²]	[m]	[m]	[cm²/m]	[m]	[m]	[cm²/m]	fix
1	1	500M	200000	0,060	.	0,00	0,080	.	0,00	.
	2	500M	200000	.	0,060	0,00	.	0,080	0,00	.

**NACHWEISE FÜR FLÄCHENELEMENTE**

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach II-4.3.1.3 (105)P (N.häufige K.)
- (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach II-4.4.2.2/4 zur Begrenzung der Rissbreite  
Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit  
Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert

Element Nr.	Qu.	Ort	Lage	Bew. Typ	Bewehrung in x-Richtung			Bewehrung in y-Richtung			
					nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	erf.asx [cm <sup>2</sup> /m]	nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	erf.asy [cm <sup>2</sup> /m]	
124	1	1	1	M	0,00	759,77	0,00	0,00	-46,54	7,05	
				R	0,00	759,77	0,00	0,00	-47,70	15,90	
				B	0,00	1680,41	0,00	0,00	-65,27	1,87	
				2	M	0,00	1114,00	6,88	0,00	12,78	7,05
					R	0,00	1053,48	60,52!	0,00	21,95	15,90
					B	0,00	1680,41	52,50	0,00	44,86	1,28
124	1	2	1	M	0,00	768,60	0,00	0,00	-39,99	7,05	
				R	0,00	768,60	0,00	0,00	-41,00	15,90	
				B	0,00	1679,24	0,00	0,00	-56,11	1,61	
				2	M	0,00	1112,53	6,88	0,00	4,64	7,05
					R	0,00	1052,20	60,48!	0,00	13,24	15,90
					B	0,00	1679,24	52,46	0,00	34,76	0,99
124	1	3	1	M	0,00	756,81	0,00	0,00	-24,47	7,05	
				R	0,00	756,81	0,00	0,00	-24,58	15,90	
				B	0,00	1653,19	0,00	0,00	-34,83	1,00	
				2	M	0,00	1095,20	6,88	0,00	27,55	7,05
					R	0,00	1035,91	59,90!	0,00	39,03	15,90
					B	0,00	1653,19	51,53	0,00	70,72	2,03
124	1	4	1	M	0,00	747,99	0,00	0,00	-30,37	7,05	
				R	0,00	747,99	0,00	0,00	-30,48	15,90	
				B	0,00	1654,40	0,00	0,00	-41,28	1,18	
				2	M	0,00	1096,68	6,88	0,00	35,65	7,05
					R	0,00	1037,21	59,95!	0,00	47,67	15,90
					B	0,00	1654,40	51,57	0,00	82,24	2,36

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach II-5.4.2.2 (4)P wird berücksichtigt

- vRd Aufnehmbare Querkraft der Druckstreben nach II-4.3.2.4.4 (2)\*P [kN/m]
- Neigung Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Elementebene
- As1 Erf. Biegezugbewehrung nach Abb. II-4.12 für erf. asb [cm<sup>2</sup>]
- qr Bemessungsquerkraft = (qx<sup>2</sup>+qy<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup> [kN/m]

Element Nr.	Ort	qx [kN/m]	qy [kN/m]	n [kN/m]	qr [kN/m]	qr/vRd	Neigung	erf. asb [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	As1 f. asb=0 [cm <sup>2</sup> ]	erf. As1 [cm <sup>2</sup> ]
124	1	69,36	50,21	0,00	85,62	0,02	1,75	0,00	.	.
	2	69,36	51,89	0,00	86,62	0,02	1,75	0,00	.	.
	3	69,50	51,89	0,00	86,73	0,02	1,75	0,00	.	.
	4	69,50	50,21	0,00	85,74	0,02	1,75	0,00	.	.

**Nachweis gegen Ermüdung für Längsbewehrung**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

- dSigma.s, equ Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]
- dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,s / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]
- (vereinfacht) = dSigma.Rsk,s nach II-4.3.7.5 (101) [MN/m<sup>2</sup>]

Element Nr.	Ort	Lage	Nachweis in x-Richtung			Nachweis in y-Richtung				
			as [cm <sup>2</sup> /m]	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul.	as [cm <sup>2</sup> /m]	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul.		
124	1	1	0,00	.	152,17	15,90	.	24,22	152,17	
		2	60,52	.	30,52	152,17	15,90	.	1,19	152,17
124	2	1	0,00	.	.	152,17	15,90	.	26,73	152,17
		2	60,48	.	33,60	152,17	15,90	.	1,31	152,17
124	3	1	0,00	.	.	152,17	15,90	.	20,51	152,17
		2	59,90	.	33,36	152,17	15,90	.	13,76	152,17
124	4	1	0,00	.	.	152,17	15,90	.	14,25	152,17
		2	59,95	.	30,18	152,17	15,90	.	16,93	152,17

**Nachweis gegen Ermüdung für Schubbewehrung**

Die Stahlspannungen werden auf der Grundlage eines Fachwerkmodells ermittelt.

- dSigma.s, equ Schadensäquivalente Schwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]
- dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,b / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]
- (vereinfacht) = dSigma.Rsk,b nach II-4.3.7.5 (101) [MN/m<sup>2</sup>]

Element Nr.	Qu.	Ort	asb [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]
			vorh.	erh.
124	1	1	0,00	.
		2	0,00	.
		3	0,00	.
		4	0,00	.

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.  
 Maßgebend ist die endgültige Längsbewehrung als Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung inklusive einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis.

wk Rechenwert der Rissbreite nach II-4.4.2.4 [mm]  
 wk,zul Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]  
 nsd, msd Bemessungsnormalkraft, Bemessungsmoment [kN/m, kNm/m]  
 (CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination  
 (NK) Nichthäufige Kombination

Element Nr.	Qu.	K.	Ort	Nachweis in x-Richtung				Nachweis in y-Richtung			
				nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	wk [mm]	wk,zul [mm]	nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	wk [mm]	wk,zul [mm]
124	1	HK	1	0,00	1053,48	0,20	0,20	0,00	-47,30	0,01	0,20
			2	0,00	1052,20	0,20	0,20	0,00	-40,96	0,01	0,20
			3	0,00	1035,91	0,20	0,20	0,00	-25,74	0,00	0,20
			4	0,00	1037,21	0,20	0,20	0,00	-31,82	0,01	0,20

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.  
 Im Zustand (II) wird die Spannung  $\min(\sigma_x, \sigma_y)$  nachgewiesen.

$\sigma_{min}$  Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 $\sigma_{zul}$  = 0,60\*f<sub>ck</sub> für N.häufige K. (NK) nach 4.4.1.2 (103)P  
 = 0,45\*f<sub>ck</sub> für Q.-ständige K. (QK) nach 4.4.1.2 (104)\*P  
 (o,u) Oberer, unterer Querschnittsrand

Element Nr.	Qu.	Ort	Spannung	$\sigma_{min}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{zul}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Seite		Zustand	Situation
						o	u		
124	1	1	Sigma.x(II)	-13,93	-18,00	x	.	End	NK.1
			Sigma.x(II)	-10,93	-13,50	x	.	End	QK.1
		2	Sigma.x(II)	-13,92	-18,00	x	.	End	NK.1
			Sigma.x(II)	-10,91	-13,50	x	.	End	QK.1
		3	Sigma.x(II)	-13,76	-18,00	x	.	End	NK.1
			Sigma.x(II)	-10,78	-13,50	x	.	End	QK.1
		4	Sigma.x(II)	-13,77	-18,00	x	.	End	NK.1
			Sigma.x(II)	-10,81	-13,50	x	.	End	QK.1

**Nachweis der Betonstahlspannungen für die Nichthäufige Kombination**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

$\sigma_{s,zul} = 0,80 * f_{yk}$  (NK) nach II-4.4.1.3 (105)

Element Nr.	Qu.	Ort	Lage	Nachweis in x-Richtung			Nachweis in y-Richtung		
				as [cm <sup>2</sup> /m]	$\sigma_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	as [cm <sup>2</sup> /m]	$\sigma_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]
124	1	1	1	0,00	.	400,00	15,90	40,05	400,00
			2	60,33	257,53	400,00	15,90	11,00	400,00
124	1	2	1	0,00	.	400,00	15,90	34,41	400,00
			2	60,28	257,40	400,00	15,90	3,99	400,00
124	1	3	1	0,00	.	400,00	15,90	21,06	400,00
			2	59,72	255,65	400,00	15,90	23,71	400,00
124	1	4	1	0,00	.	400,00	15,90	26,13	400,00
			2	59,77	255,78	400,00	15,90	30,68	400,00



## Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau

Das Beispiel wurde in Anlehnung an Teil 2 des Buches

Müller, Michael / Bauer, Thomas  
Eisenbahnbrückenbau nach DIN-Fachbericht

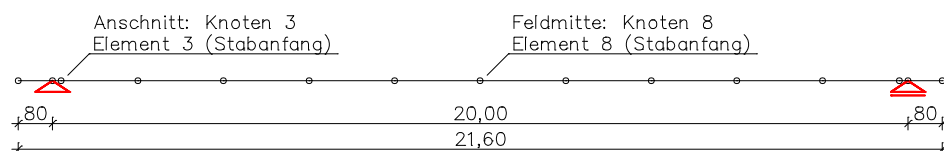
### Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.

Band 1: Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.

2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003

gewählt.

Die Konstruktion ist ein in Längsrichtung mit nachträglichen Verbund vorgespannter Balken mit der Anforderungsklasse B. Die Querrichtung wird im Rahmen dieses Beispiels nicht untersucht. Die Auflagerung erfolgt in Längsrichtung schwimmend und in Querrichtung fest.



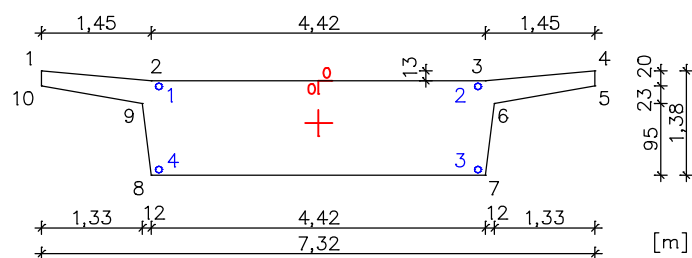
Statisches System und Abmessungen

### Material

Beton C40/50

Betonstahl BSt 500/550, Achsabstand vom Rand 7,5 cm

### Querschnitt



Als Entwurfsvorgabe ist der Überbau für das Lastmodell 71 mit einem Klassifizierungsbeiwert von  $\alpha = 1,0$  und für das Lastmodell SW/2 zu bemessen.

Die maßgebenden Nachweise werden für folgende Zeitpunkte geführt:

$t_0 = 10$  Tage: Zeitpunkt der Vorspannung

$t_1 = 100$  Tage: Zeitpunkt der Verkehrsübergabe

$t_\infty = 100$  Jahre: Zeitpunkt nach Abschluss des Kriechens und Schwindens

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise geführt:

#### Grenzzustand der Tragfähigkeit

- Biegung mit Längskraft
- Querkraft
- Versagen ohne Vorankündigung (Robustheit)
- Ermüdung der Längsbewehrung und des Spannstahls
- Ermüdung der Schubbewehrung
- Ermüdung des Betons unter Druckbeanspruchung

#### Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- Dekompression
- Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite
- Berechnung der Rissbreite
- Begrenzung der Betondruckspannungen
- Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen
- Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen

Auf Grund ihres geringen Einflusses auf die gewählten Nachweise wurde auf die Einwirkungen aus Zentrifugallasten,

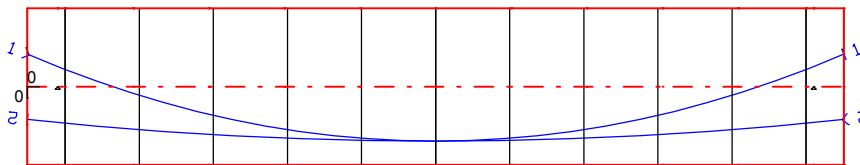
Seitenstoß, Windlasten, Lastmodell „Unbelasteter Zug“, Anfahren und Bremsen, Entgleisung, Einwirkungen auf Geländer, Verkehrslast auf Dienstgehwegen und aus Erddruck verzichtet.

**Spannstahl und Spannverfahren**

Spannstahlgüte	St 1500/1770
Zulassung des Spannverfahrens	SUSPA EC 140
Anzahl der Spannglieder im Bündel	6
Querschnittsfläche $A_p$	2660 mm <sup>2</sup>
E-Modul des Spannstahls	190000 MN/m <sup>2</sup>
0,1%-Dehngrenze (Streckgrenze) des Spannstahls $f_{p0,1k}$	1500 MN/m <sup>2</sup>
Zugfestigkeit des Spannstahls $f_{pk}$	1770 MN/m <sup>2</sup>
Zulässige Vorspannkraft eines Spannglieds $P_{m0}$	3391,5 kN
Reibungsbeiwerte beim Anspannen und Nachlassen $\mu$	0,21
Ungewollter Umlenkwinkel eines Spanngliedes $\beta'$	0,3 °/m
Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker	6 mm
Hüllrohrdurchmesser $d_h$	97 mm
Vorhaltemaß zur Sicherung einer Überspannreserve $\kappa$	1,5
Streufaktoren der internen Vorspannung	
Bauzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,95
Endzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,9

Die Spanngliedführung kann der nächsten Abbildung entnommen werden. Es werden zwei Spannstränge mit jeweils 6 Bündelspanngliedern angeordnet, die über die gesamte Trägerlänge durchlaufen und wechselseitig an den Trägerenden angespannt werden. Spannverfahren, Spannweisungen und Spannkraftverläufe für beide Spannstränge sind ebenfalls dargestellt.

Überhöhung = 3



Spannstrangordinaten  $z_v$  [cm] an den Stützstellen

xv	0,00	1,00	2,96	4,92	6,88	8,84	10,80	12,76	14,72	16,68	18,64	20,60	21,60
1	-28,6	-15,1	7,6	25,3	37,9	45,5	48,0	45,5	37,9	25,3	7,6	-15,1	-28,6
2	28,8	32,2	37,9	42,3	45,5	47,4	48,0	47,4	45,5	42,3	37,9	32,2	28,8

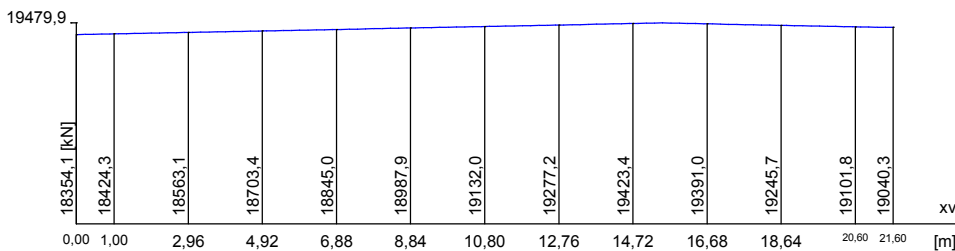
**Spanngliedführung im Längsschnitt**

Spannkraftverlauf Spannstrang 1 (6 Spannglied(er), l = 21,67 m)

Spannverfahren 1 - SUSPA EC 140. Zulassung nach EC2.  
 $P_{m0}$  = 3391,5 kN,  $A_p$  = 2660,0 mm<sup>2</sup>,  $\mu_a$  = 0,21, Winkel  $\beta'$  = 0,30 °/m  
 E-Modul = 190000 MN/m<sup>2</sup>,  $A_h$  = 7389,8 mm<sup>2</sup>,  $\mu_n$  = 0,21, Schlupf = 6,00 mm

Spannweisung 1 - Mit Reserve  
 Anspannen mit  $P_{max}$  (DIN-Fachbericht, DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1).  $\kappa$  = 1,5.

Spannanker : Anfang  
 Bez. Spannkraft: 1,000  
 Spannkraft [kN]: 3446,0  
 Längung [mm]: 141,8



Spannkraftverlauf des Spannstrangs 1 im Längsschnitt

Spannkraftverlauf Spannstrang 2 (6 Spannglied(er), l = 21,60 m)

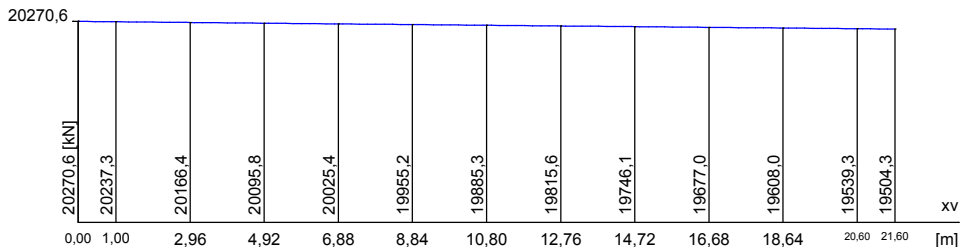
Spannverfahren 1 - SUSPA EC 140. Zulassung nach EC2.

Pm0 = 3391,5 kN, Ap = 2660,0 mm², ua = 0,21, Winkel β' = 0,30 °/m  
 E-Modul = 190000 MN/m², Ah = 7389,8 mm², μn = 0,21, Schiupf = 6,00 mm

Spannanweisung 1 - Mit Reserve

Anspannen mit Pmax (DIN-Fachbericht, DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1). Kappa = 1,5.

Spannanker : Anfang  
 Bez. Spannkraft: 1.000  
 Spannkraft [kN]: 3522,5  
 Längung [mm]: 147,7

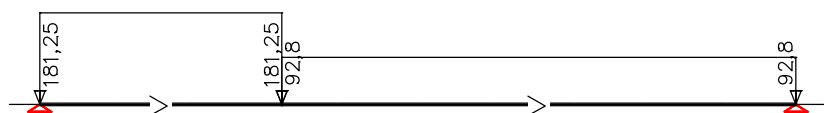


Spannkraftverlauf des Spannstrangs 2 im Längsschnitt

**Lasten**

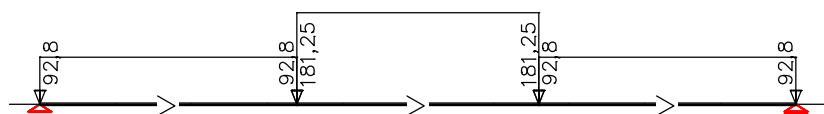
- Lastfall 1 Eigenlast (G1).
- Lastfall 2 Ausbaulasten 103,7 kN/m (G2).
- Lastfall 3 Vorspannung (P).
- Lastfall 4 Kriecherzeugende Dauerlast (G1+G2+P)
- Lastfall 5 Kriechen und Schwinden (CS, t<sub>∞</sub>). Mit den Vorgaben  
 RH=80%, t<sub>0</sub>=10 d, t<sub>s</sub>=1 d, Zementhärtung = Normal  
 ergeben sich die Beiwerte: φ<sub>t∞</sub> = 1,57; ε<sub>t∞</sub> = -30,2·10<sup>-5</sup>; ρ = 0,8  
 Kriecherzeugender Dauerlastfall: 4,  
 Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstrahl wird berücksichtigt.
- Lastfall 11-13 Stellungen des Lastmodells 71 (Q1)
- Lastfall 21 Lastmodell SW/2 (Q2)
- Lastfall 31 Temperatur Δx<sub>neg</sub> (T)
- Lastfall 32 Temperatur Δx<sub>pos</sub> (T)

**Lastmodell 71**

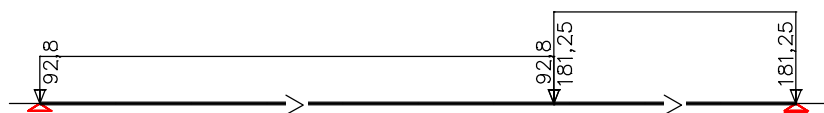


Lastfall 11: Lastmodell 71, links

Der dynamische Beiwert Φ von 1,16 ist bereits in den Lastordinaten berücksichtigt.

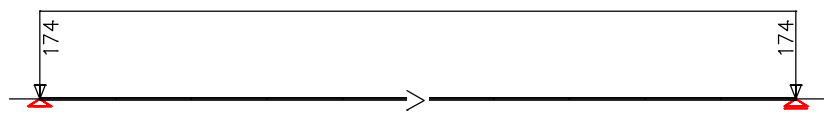


Lastfall 12: Lastmodell 71, mitte



Lastfall 13: Lastmodell 71, rechts

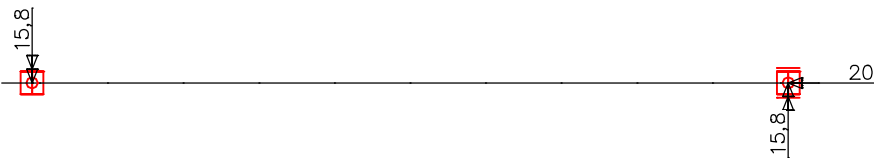
**Lastmodell SW/2**



Lastfall 21: Der dynamische Beiwert Φ von 1,16 ist bereits in den Lastordinaten berücksichtigt.

**Temperatur**

Auf Grund der schwimmenden Lagerung ergeben sich unter den anzusetzenden Temperaturbeanspruchungen  $\Delta T_{Mz}$  und  $\Delta T_N$  Lagerwege und damit Rückstellkräfte gem. Müller, Seite 71-72.



Lastfall 31: Rückstellkräfte als äußere Lagerreaktionen

Nachfolgend sind die für die Nachweise definierten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen wiedergegeben.

**DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen**

**G1 - Ständige Einwirkung, Eigenlast**

1 G1

**G2 - Ständige Einwirkung, Ausbaulast**

2 G2

**P - Vorspannung, intern**

3 P

**CSR1 - Kriechen, Schwinden, Relaxation, t1**

CS als konstante Minderung der Vorspannung um 4 %.  
Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 2,2 %.

**CSR2 - Kriechen, Schwinden, Relaxation, too**

5 CS,too  
Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 6,2 %.

**T - Temperatur, 1. Variante, exklusiv**

31 Temperatur dTN (dx,neg)  
32 Temperatur dTN (dx,pos)

**Q1 - Lastgruppen gr11-gr14 (1 Gleis), 1. Variante, exklusiv**

11 Qvk LM 71,1  
12 Qvk LM 71,2  
13 Qvk LM 71,3

**Q2 - Lastgruppen gr16-gr17 (1 Gleis), 1. Variante, inklusiv**

21 Qvk LM SW/2

**Qfat - Zyklische Emüdungseinwirkung, 1. Variante, exklusiv**

11 Qvk LM 71,1  
12 Qvk LM 71,2  
13 Qvk LM 71,3

**Ständige und vorübergehende Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ständige und vorübergehende Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1,35	0
Q1	1,45	0
Q2	1,2	0

**Ständige und vorübergehende Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	1	0,8	0
b) T	1	0	0,8
c) Q1	0,8	1	0
d) Q2	0,8	0	1

**Charakteristische (seltene) Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Charakteristische (seltene) Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Charakteristische (seltene) Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	1	0,8	0
b) T	1	0	0,8
c) Q1	0,8	1	0
d) Q2	0,8	0	1

**Häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	0,6	0	0
b) Q1	0,5	0,8	0
c) Q2	0,5	0	0,8

**Quasi-ständige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Quasi-ständige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Quasi-ständige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a)	0,5	0	0

**Nicht häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Nicht häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Nicht häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	0,8	0,8	0
b) T	0,8	0	0,8
c) Q1	0,6	1	0
d) Q2	0,6	0	1

**Ermüdungskombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK + Qfat

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ermüdungskombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0
Qfat	1	0

**Ermüdungskombination, Kombinationsbeiwerte**

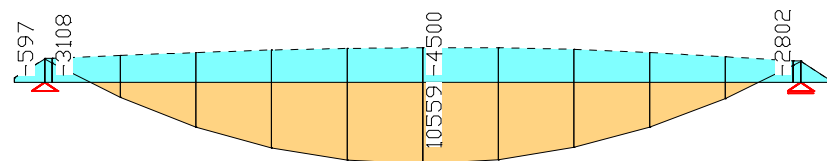
Variante	T	Q1	Q2
a)	0,6	0	0

Hinweise zu den Nachweissituationen:

- Bei den Nachweisen zum Zeitpunkt  $t_1$  wurde der Einfluss von Kriechen und Schwinden mit 4% der Vorspannung abgeschätzt.
- Für den Dekompressionsnachweis im Bauzustand wurde in der häufigen Kombination eine Einwirkungsvariante zum Zeitpunkt  $t_1$  (G1+P+CSR1) aufgenommen.
- Zum Nachweis der Betondruckspannungen zum Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannung wurde in die nicht häufige Kombination eine Einwirkungsvariante zum Zeitpunkt  $t_0$  (G1+P) aufgenommen.

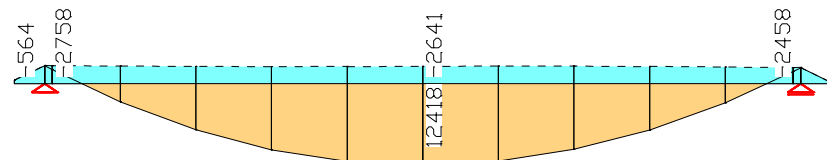
Nachfolgend ist beispielhaft der Verlauf der Biegemomente  $M_y$  für die Bemessungssituationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit dargestellt.

**2. Ständige und vorübergehende Situation – t1**



Biegemoment  $M_y$  [kNm]

**3. Ständige und vorübergehende Situation - too**



Biegemoment  $M_y$  [kNm]

**Bemessungsvorgaben DIN Fachbericht 102 (2009-03)**

Qu.	Klasse des Bauteils	Vorspannung	Kasten	Bewehrung	Ermüd.	Riss-	De-	Spannungen
			ARS	M R B Q T	S P C	breite	komp.	Druck H-Zug S P
1	B	Nachtr.	Verbund	.	x x x x .	x x x	x	x x x x x

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Streuung der Wirkungen aus Vorspannung**

Die Streuung der Vorspannung wird bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:

- Nachweis der Dekompression
  - Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite
  - Nachweis der Rissbreite
- Alle anderen Nachweise benutzen den Mittelwert  $P_{m,t}$  der Vorspannung.

Qu.	Vorspannung des Bauteils	Bauzustand	Endzustand
		r.sup r.inf	r.sup r.inf
1	Nachtr. Verbund	1,10 0,95	1,10 0,90

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben. Der eingegebene Wert für cot Theta wird programmseitig auf den Wertebereich nach Gl. (II-4.122) begrenzt.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- As1 Vorh. Biegezugbewehrung nach Abb. 4.12, autom. Erhöhung bis Maximum.
- rhov Mindestbewehrungsgrad min rhov = Faktor \* rho mit rho nach Tabelle 5.7.
- x,y Getrennter Querkraftnachweis für die Bewehrungsrichtungen x und y.
- cv1 Verlegetmaß der Längsbewehrung zur Begrenzung des Hebelarms z.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh-dichte	Bem.	fyk	cot	Bem.	As1	Red.
		[kg/m³]	M,N	[MPa]	Theta	wie	Abb. 4.12	Vor-
						Pl.	vorh.	max
1	C40/50	.	ST	500	1,75	.	64,35	.

**Schubquerschnitte**

bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
 h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
 kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d. z wird gemäß II-4.3.2.4.2(2)\* nach oben begrenzt.  
 z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
 teff Wanddicke des Torsionskastens.  
 K. Kastenquerschnitt.

Qu.	Breite [m]		Nutzbreite		Höhe [m]		Nutzhöhe		Torsionsquerschn. [m]		
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h	h.nom	d [m]	kd	z1	z2	teff K.
1	4,420	4,129	4,345	0,90	1,250	1,155	1,175	0,90	1,100	4,270	0,150

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
 max.s Größter vorhandener Stababstand der Betonstahlbewehrung.  
 Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
 k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
 sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (4.203).  
 Methode Direkte Berechnung der Rissbreite nach Kap. 4.4.2.4 oder Nachweis durch Begrenzung der Stababstände nach Tab. 4.121.  
 DB Dickes Bauteil nach Kap. 4.4.2.2(9) zur Bestimmung von As,min.

Qu.	wk, zul [mm]	ds [mm]	max.s [mm]	Beiwert	Xil	k	sr,max [mm]	Betonalter	Methode	f. Rissbreite	Betonzugzone	DB
1	0,20	16	.	0,00	0,50	.	3-5d	> 28d	Berechnung	Charakt.	EK	.

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen**

Av Fläche des Vollquerschnitts zur Ber. der Normalspannung aus Längskraft.  
 fc(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.  
 H-Zug Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruckspannungen nachweisen.  
 (NK, QK) Nichthäufige, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	Av [m²]	fc(t) [MN/m²]	zul.sigma.c(t) (NK, QK)	zul.sigma.c (NK) (QK)	Dekompression Spannung	H-Zug nur bei Längsdruck
1	6,39	34,40	0,45 fc(t)	0,60 fck	0,45 fck	Sigma.x

**Vorgaben für den Nachweis gegen Ermüdung**

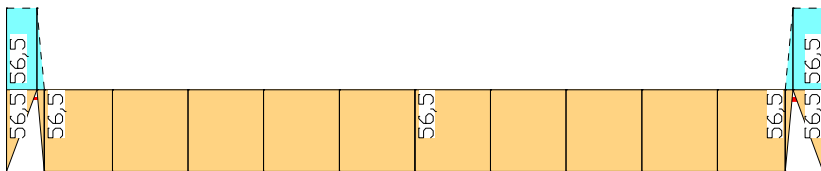
Die Betondruckspannungen werden nach Abb. 4.1 mit fc = fcm berechnet.

fcd,fat Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung.  
 dSigma.Rsk,s Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Längsbewehrung.  
 dSigma.Rsk,b Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Schubbewehrung.  
 dSigma.Rsk,p Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite des Spannstahls.  
 Lambda.s,b,p Zugeh. Korrekturbeiwerte für schadensäquivalente Schwingbreite.  
 Lambda.c Korrekturbeiwert für schadensäquivalente Betonspannungen.  
 Eta Erhöhungsfaktor für Betonstahlspannung nach II-4.3.7.3 (3)P.  
 k0 Abminderungsfaktor für den statisch best. Anteil der Vorspannung nach II-4.3.7.2 (103)P.  
 Fak. Qfat Faktor für Qfat zur Ber. der schadensäqu. Schwingbreite (s,b,p).  
 Nw. SPC Nachweis für (S) Betonstahl, (P) Spannstahl, (C) Beton.  
 (x) Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten - Ermüdungskomb.  
 (+) Vereinfachter Nachweis nach II-4.3.7.4/5 - häufige Kombination.

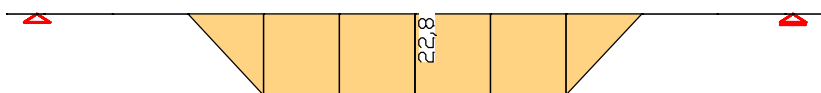
Qu.	Nw. SPC	fcd,fat [MN/m²]	dSigma [MN/m²]	Lambda	Eta	k0	Fak. Qfat
1	xxx	20,90	175,00 Rsk,s 175,00 Rsk,b 120,00 Rsk,p	0,75 s 0,79 b 0,75 p	0,74 c	1,45	0,90 Qfat

**Ergebnisse**

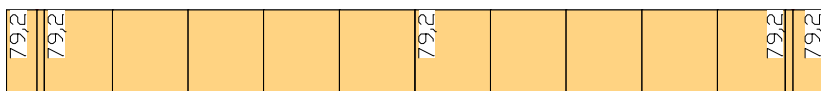
Den Verlauf der erforderlichen Längs- und Schubbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen. Bei der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit reichen die Dehnungsreserven der Spannglieder aus, um den Nachweis ohne zusätzliche Biegebewehrung zu führen. Es werden also lediglich Robustheits- und Rissbewehrung erforderlich.



Mindestbewehrung  $A_s$  zur Sicherstellung der Robustheit (Duktilität) [cm²] (obere Bewehrung strichliert)



Bewehrung  $A_s$  zur Begrenzung der Rissbreite [cm²]



Querkraftbewehrung  $A_{sbz}$  in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit [cm²/m]



Nachfolgend ist das Standard-Nachweisprotokoll für Stab 3 am Ort 1 (Anschnitt,  $x = 0,2 \text{ m}$ ) und Stab 8 am Ort 1 (Feldmitte) in Auszügen wiedergegeben.

### Nachweis der Längsbewehrung

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach II-4.3.1.3 (105)P (N.häufige K.)  
 (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach II-4.4.2.2/4 zur Begrenzung der Rissbreite  
 Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert  
 Ap' Teil der Spannstahlfläche  $X_{l1} \cdot A_p$ , um den erf.As verringert wurde  
 $X_{l1}$  Verbundbeiwert für Spannstahl gemäß Gl. (II-4.197)  
 (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit  
 Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Lage	Bewehrung	Nx	My	Mz	Ap'	erf.As
						[kN]	[kNm]	[kNm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]
3	1	1	1	1	M	-1,39	265,36	0,00	.	0,00
					R	0,00	0,00	0,00	.	0,00
				2	B	-32625,51	-2757,57	0,00	.	0,00
					M	-1,39	265,36	0,00	.	0,00
				3	B	-32625,51	-2757,57	0,00	.	0,00
					M	72,95	787,67	0,00	.	28,25
	8	1	1	1	M	0,00	7936,54	0,00	.	0,00
					R	-42919,03	-12664,60	0,00	.	0,00
				2	B	-39017,30	-10791,77	0,00	.	0,00
					M	0,00	7936,54	0,00	.	0,00
				3	B	-42919,03	-12664,60	0,00	.	0,00
					M	-39017,30	-10791,77	0,00	.	0,00
8	1	1	3	M	12,00	21797,83	0,00	.	28,25	
				R	-29442,16	7663,69	0,00	.	11,40	
			4	B	-36576,63	10559,19	0,00	.	0,00	
				M	12,00	21797,83	0,00	.	28,25	
			4	R	-29442,16	7663,69	0,00	.	11,40	
				B	-36576,63	10559,19	0,00	.	0,00	

### Nachweis der Schubbewehrung

Der Mindestbewehrungsgrad nach II-5.4.2.2 (4)P wird berücksichtigt.

- VRd, TRd Bemessungswert der max. aufnehmbaren Querkraft, Torsion  
 Neigung Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Längsachse  
 Asb,Asl.T Erf. Bügelbewehrung aus Querkraft und Torsion, erf. Torsionslängsbew.  
 Asl Erf. Biegezugbewehrung gem. Abb. II-4.12 für erf.Asb.  
 S2/fcd Kastenquerschnitt, max. Hauptdruckspannung aus M,N und Torsion

Stab	Nr.	Ort	VRd	Neigung	Asb.y	VRd	Neigung	Asb.z	Asl	Q/VRd+	Asb.T, Asl.T	S2/fcd
					[cm <sup>2</sup> /m]			[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	Mx/TRd	[cm <sup>2</sup> /m, cm <sup>2</sup> ]	
3	1	0,00	1,75	0,00	0,09	1,75	79,21	64,35	.	.	.	.
8	1	0,00	1,75	0,00	0,00	1,75	79,21	64,35	.	.	.	.

### Nachweis gegen Ermüdung für Längsbewehrung und Spannstahl

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

- Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nummer der Lage  
 Typ P Spannstahl, Nummer des Spannstrangs  
 dSigma.s, equ Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]  
 dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,s / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]  
 (vereinfacht) = dSigma.Rsk,s nach II-4.3.7.5 (101) [MN/m<sup>2</sup>]

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Stahl	vorh.As	erh.As	dSigma.s	zul.	
				Typ Nr.	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	
3	1	1	S	1	0,00	.	.	152,17	
				2	0,00	.	.	152,17	
				3	28,25	.	1,17	152,17	
				4	28,25	.	1,17	152,17	
				P	1	159,60	.	0,19	104,35
				P	2	159,60	.	0,40	104,35
8	1	1	S	1	0,00	.	.	152,17	
				2	0,00	.	.	152,17	
				3	28,25	.	28,09	152,17	
				4	28,25	.	28,09	152,17	
				P	1	159,60	.	14,24	104,35
				P	2	159,60	.	14,24	104,35

### Nachweis gegen Ermüdung für Schubbewehrung

Die Stahlspannungen werden auf der Grundlage eines Fachwerkmodells ermittelt.

- Typ BY, BZ Schubbewehrung aus Qy, Qz [cm<sup>2</sup>/m]  
 dSigma.s, equ Schadensäquivalente Schwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]  
 dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,b / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]  
 (vereinfacht) = dSigma.Rsk,b nach II-4.3.7.5 (101) [MN/m<sup>2</sup>]

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Bew.	vorh.Asb	erh.Asb	dSigma.s	zul.
				Typ	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	equ.	zul.
3	1	1	BY	0,00	.	.	.	152,17
				79,21	.	97,48	.	152,17
8	1	1	BY	0,00	.	.	.	152,17
				79,21	.	7,92	.	152,17

**Nachweis gegen Ermüdung für Beton unter Druck**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.  
 Sigma.cd,min Betrag der schadensäquivalenten min. Betondruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.cd,max Betrag der schadensäquivalenten max. Betondruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.cd,zul = fcd,fat \* (1 - 0,43 \* (1 - Sigma.cd,min/Sigma.cd,max)<sup>1/2</sup>) [MN/m<sup>2</sup>]  
 o, u Lage des Qu.-Punkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Sigma.cd,min [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.cd,max [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.cd,zul [MN/m <sup>2</sup> ]	Qu.-Pkt.	Seite
	3	1	1	5,96	6,11	19,51	8	. x
	8	1	1	4,02	7,70	14,69	4	x .

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.  
 Maßgebend ist die endgültige Längsbewehrung als Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung inklusive einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis.  
 wk Rechenwert der Rissbreite nach II-4.4.2.4 [mm]  
 wk,zul Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]  
 Sigma.c Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 (CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination  
 (NK) Nichthäufige Kombination

Stab	Nr.	Qu.	K.	Ort	Bew. Lage	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Sigma.c [MN/m <sup>2</sup> ]	wk [mm]	wk,zul [mm]
	3	1	NK	1	.	-42351,9	-3867,42	0,00	-3,77	0,00	0,20
	8	1	NK	1	4	-29446,1	7660,53	0,00	1,05	0,00	0,20

**Nachweis der Dekompression**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines ungerissenen Betonquerschnitts.  
 (HK) Häufige Kombination, (QK) Quasi-ständige Kombination  
 (NK) Nichthäufige Kombination  
 (o,u) Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

Stab	Nr.	Qu.	Ort	max Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]	Qu.-Pkt.	Seite	Zustand	Situation
	3	1	1	-2,82	0,00	1	x .	End	HK.3
	8	1	1	-0,47	0,00	7	. x	End	HK.3

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert fctm überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.  
 Sigma.x,min Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.x,zul = 0,60\*fck für N.häufige K. (NK) nach 4.4.1.2 (103)\*P  
 = 0,45\*fck für Q.-ständige K. (QK) nach 4.4.1.2 (104)\*P  
 (o,u) Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Sigma.x,min [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.x,zul [MN/m <sup>2</sup> ]	Qu.-Pkt.	Seite	Zustand	Situation
	3	1	1	(I) -8,62	-15,48	7	. x	Bau	NK.1
				(I) -8,62	-15,48	7	. x	Bau	QK.1
	8	1	1	(I) -14,34	-15,48	7	. x	Bau	NK.1
				(I) -14,34	-15,48	7	. x	Bau	QK.1

**Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen für die häufige Kombination**

Sigma1,max Maximale Hauptzugspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma1,zul = fctk;0,05 nach II-4.4.0.3 (5/6)P [MN/m<sup>2</sup>]  
 y, z Punkt am Querschnittsrand mit max. Sigma1 [m]  
 o, u Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts  
 Theta1 Winkel zwischen Sigma1 und der Längsspannung Sigma.x [°]

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Sigma1,max [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma1,zul [MN/m <sup>2</sup> ]	Theta1 [°]	Querschn.punkt y[m]	Seite z[m]	Zustand
	3	1	1	0,59	2,45	19,79	-2,329	0,300	x . End
	8	1	1	0,00	2,45	0,96	-2,329	0,300	x . End

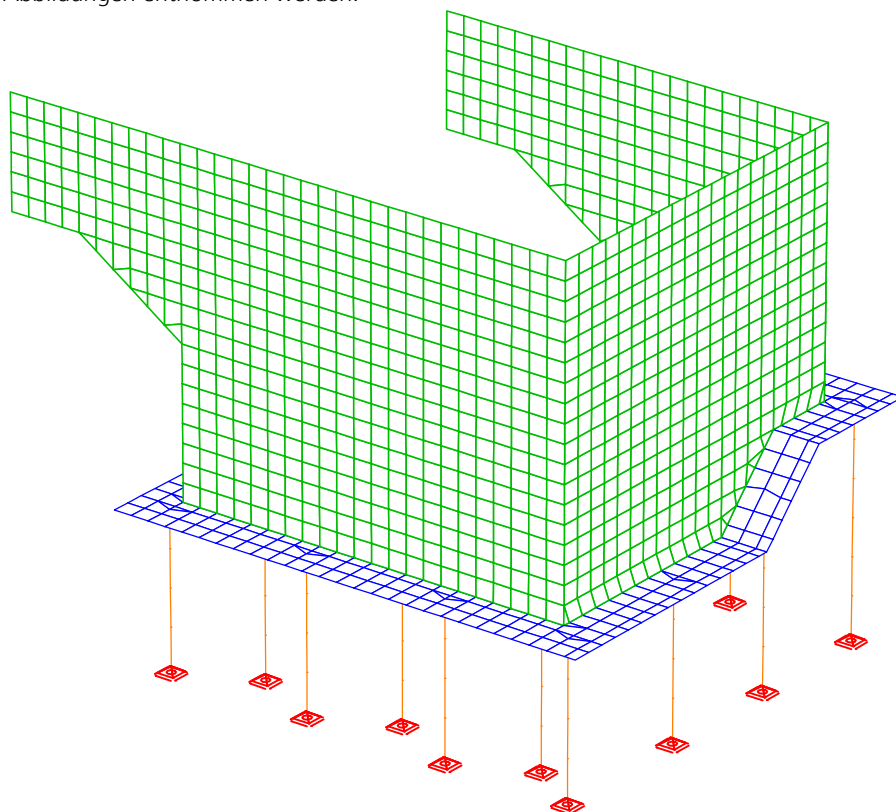
**Nachweis der Stahlspannungen**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.  
 Für Spannstränge ohne Verbund bzw. Situationen vor dem Verpressen wird die Spannspannung gemäß Gl. (4.6) nachgewiesen.  
 Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nr. der Lage, N.häufige K. (NK)  
 Typ P Spannstahl, Nr. des Spannstrangs, Q.-ständige K. (QK)  
 Sigma.s,zul = 0,80 \* fyk (NK) nach II-4.4.1.3 (105)  
 Sigma.p,zul = 0,65 \* fpk (QK) nach II-4.4.1.4 (1)\*P

Stab	Nr.	Qu.	Ort	Stahl Typ	As [cm <sup>2</sup> ]	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	Situation
	3	1	1	S 1	0,00	.	400,00	NK.3
				S 2	0,00	.	400,00	NK.3
				S 3	28,25	-38,06	400,00	NK.3
				S 4	28,25	-38,06	400,00	NK.3
				P 1	159,60	1154,41	1275,00	QK.1
				P 2	159,60	1268,00	1275,00	QK.1
	8	1	1	S 1	0,00	.	400,00	NK.1
				S 2	0,00	.	400,00	NK.1
				S 3	28,25	-5,41	400,00	NK.3
				S 4	28,25	-5,40	400,00	NK.3
				P 1	159,60	1198,75	1275,00	QK.1
				P 2	159,60	1245,94	1275,00	QK.1

## Brückenwiderlager

Das Beispiel zeigt die Anwendung des DIN-Fachberichts bei einem Widerlager einer Straßenbrücke. Die Konstruktion besteht aus Widerlagerflügeln, einer Lagerbank und einer Pfahlkopfplatte mit Pfählen. Die Abmessungen können den nächsten Abbildungen entnommen werden.



*Statisches System*

### Material

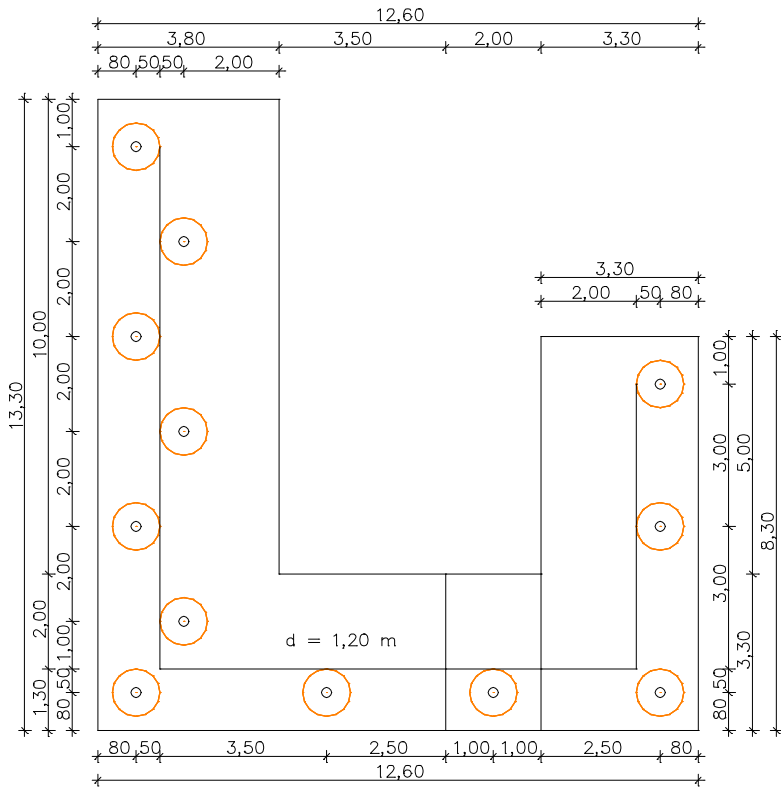
Beton	C 30/37 (Flächen), C 35/45 (Pfähle)
Betonstahl	BSt 500/550, Achsabstand vom Rand 8 cm
Bettung	Horizontales Bettungsmodul 50 MN/m <sup>3</sup>

### Querschnitt

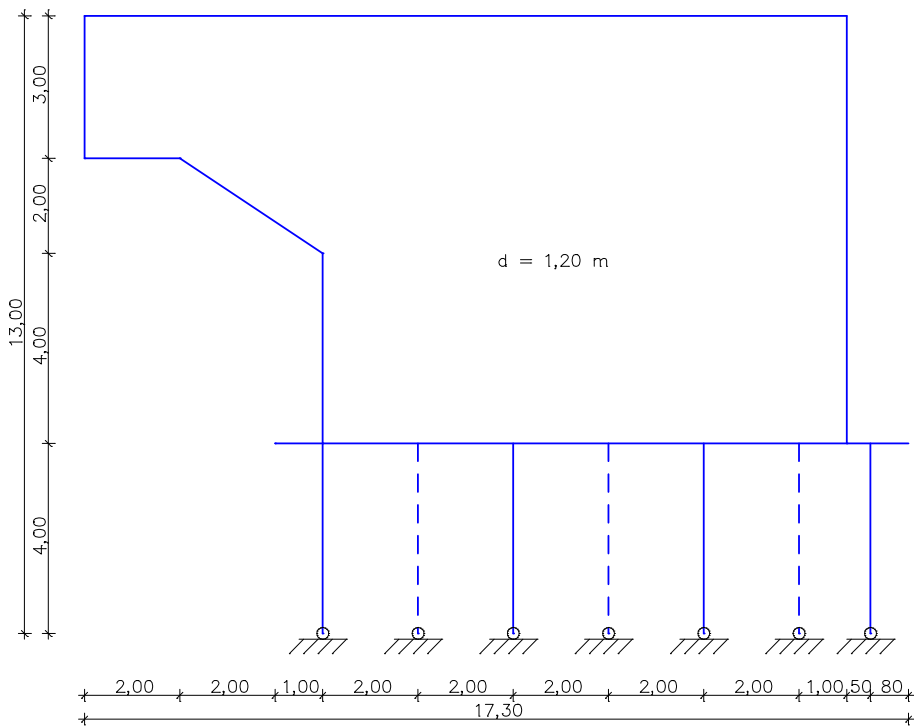
Flügelwände	d = 1,2 m (Querschnitt 1)
Lagerbank	d = 1,5 m (Querschnitt 2)
Pfahlkopfplatte	d = 1,2 m (Querschnitt 3)
Pfähle	Ø = 1,0 m (Querschnitt 4)
Anforderungsklasse	D

Das abgebildete FEM-System wird mit Schalenelementen in Verbindung mit Biegestäben generiert. Die Grundlage für die Erzeugung des Tragwerks war eine 3D-Zeichnung aus Rändern und Modellflächen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich die Modellobjekte auf den Mittellinien bzw. -flächen der Tragwerksteile befinden, da die Elemente über diese beschrieben werden.

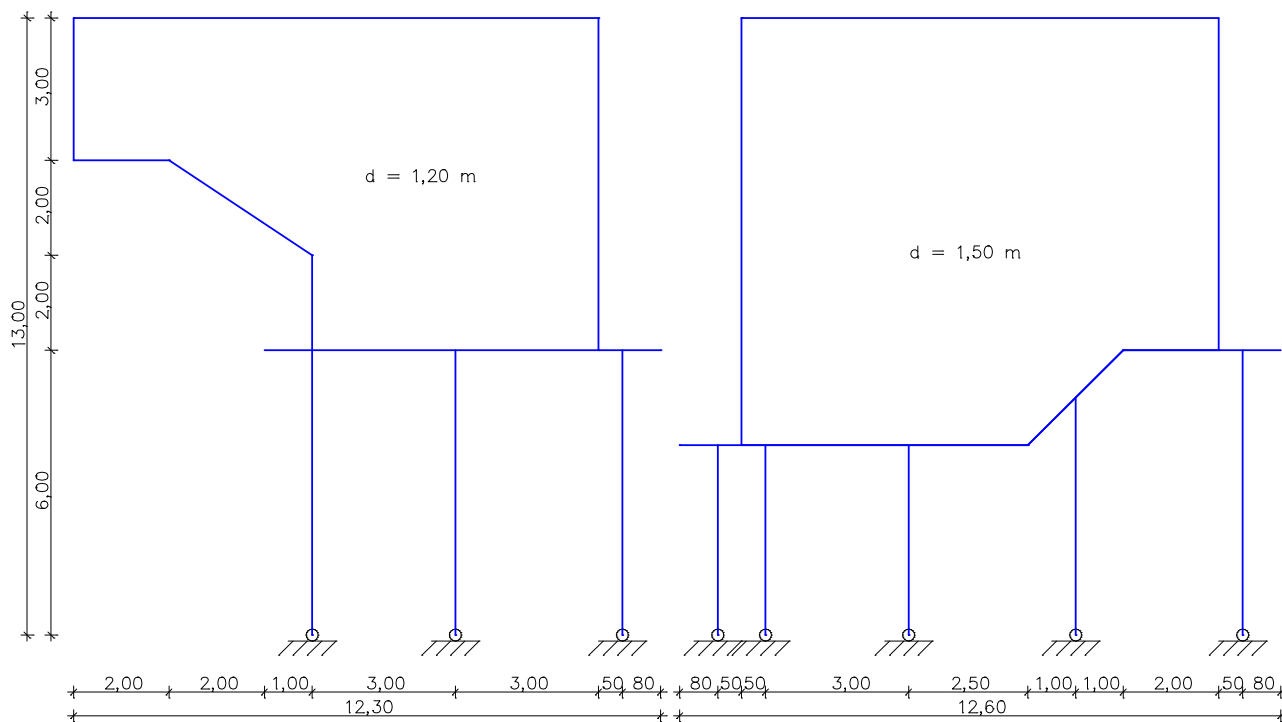
**Abmessungen**



Aufsicht der Pfahlkopfplatte



Ansicht der langen Flügelwand



Ansicht der kurzen Flügelwand und der Lagerbank

### Nachweise

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise geführt:

Grenzzustand der Tragfähigkeit

- Biegung mit Längskraft
- Querkraft
- Versagen ohne Vorankündigung (Robustheit)

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite
- Berechnung der Rissbreite
- Begrenzung der Betondruckspannungen
- Begrenzung der Betonstahlspannungen

Auf Grund der Durchdringung werden die Nachweise nicht für die Pfahlkopfplatte geführt. Die notwendigen Vorgaben sind weiter unten aufgeführt.

### Lasten

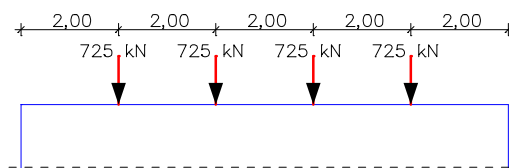
Auf Grund des Umfangs wurden die Einwirkungen auf die maßgeblichen Lasten beschränkt.

- Lastfall 1 G: Eigenlast
- Lastfall 2 G: Erddruck
- Lastfall 3 G: Überbau
- Lastfall 4 Q: UDL-Gleichlast
- Lastfall 5 Q: TS-Stellung 1
- Lastfall 6 Q: TS-Stellung 2

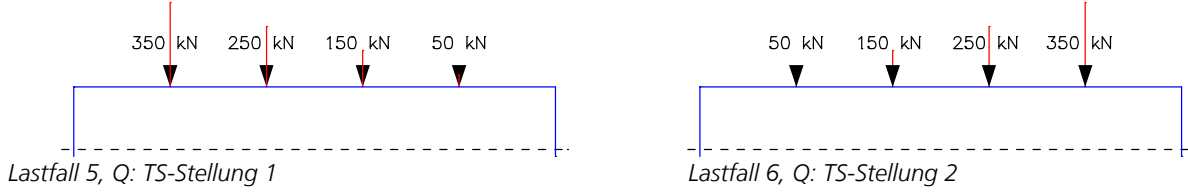
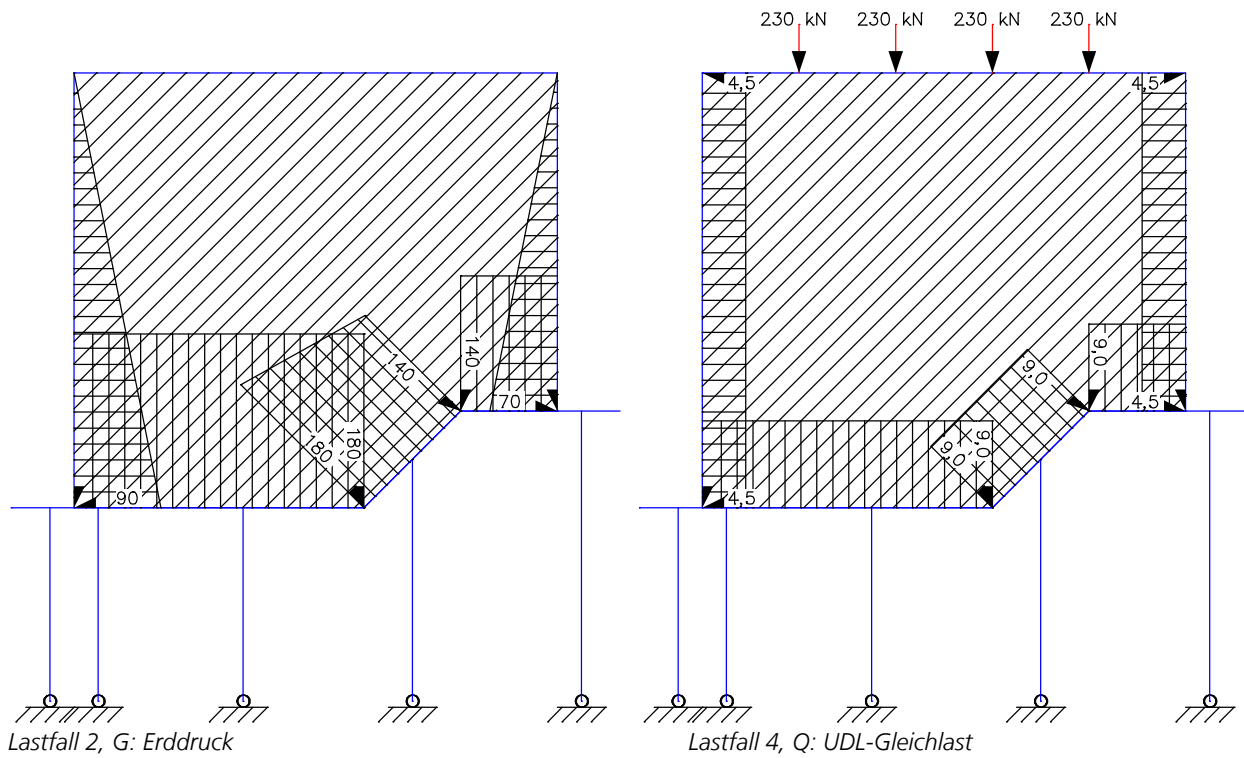
#### Lastdaten Lastfall 1: G: Eigenlast

LfdNr	Eigenlast (EG) aus Material- und Querschnittsbeschreibung		
	Wichtungsfaktoren in Richtung		
	X [-]	Y [-]	Z [-]
1	0,0000	0,0000	1,0000

Lastfall 1, G: Eigenlast



Lastfall 3, G: Überbau



Nachfolgend sind die für die Nachweise definierten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen wiedergegeben.

**DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen**

**G1 - Ständige Einwirkung**

- 1 G: Eigenlast
- 2 G: Erddruck

**G2 - Überbau**

- 3 G: Überbau

**QUDL - Verkehr, Lastmodell 1 Flächenlast, 1. Variante, inklusiv**

- 4 Q: UDL-Gleichlast

**QTS - Verkehr, Lastmodell 1 Tandemsystem, 1. Variante, exklusiv**

- 5 Q: TS-Stellung 1
- 6 Q: TS-Stellung 2

**Ständige und vorübergehende Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	Bau	G1
2)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ständige und vorübergehende Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
QTS, QU DL	1,5	0

**Ständige und vorübergehende Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QUDL
a)	1	1

**Charakteristische (seltene) Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Charakteristische (seltene) Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QUDL	1	0

**Charakteristische (seltene) Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QUDL
a)	1	1

**Häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QUDL	1	0

**Häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QUDL
a)	1	1

**Nicht häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Nicht häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QUDL	1	0

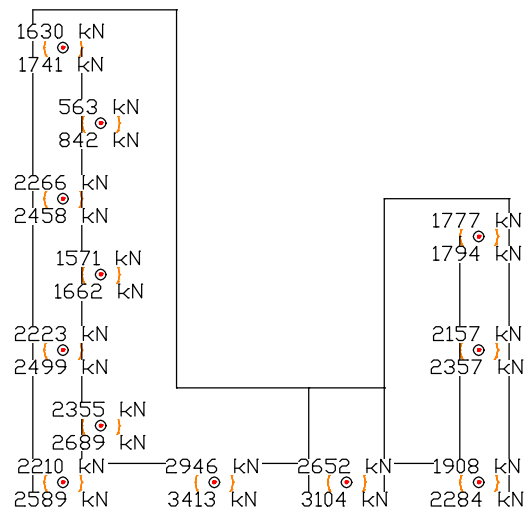
**Nicht häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QUDL
a)	1	1

Auf Grund der geringen Druckkräfte und der hohen Biegemomente ist in einigen Bereichen bei der Tragsicherheit der Bauzustand (G1) maßgebend.

Nachfolgend sind beispielhaft die Auflagerreaktionen  $R_z$  für die Charakteristische (seltene) Kombination dargestellt.

1. Charakteristische (seltene) Kombination



Auflagerreaktionen  $R_z$

Bemessung nach DIN-Fachbericht 101 und 102 (2009-03)

Bemessungsvorgaben

Qu.	Klasse des Bauteils	Vorspannung	Kasten	ARS	M	R	B	Q	T	Ermüd.	Riss-	De-	Spannungen
										S P C	breite	komp.	Druck H-Zug S P
1	D	Nicht vorgesp.	.	.	x	x	x	x	.	.	.	.	x . x .
2	D	Nicht vorgesp.	.	.	x	x	x	x	.	.	.	.	x . x .
4	D	Nicht vorgesp.	.	.	.	x	x	x	.	.	.	.	x . x .

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben. Der eingegebene Wert für cot Theta wird programmseitig auf den Wertebereich nach Gl. (II-4.122) begrenzt.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Abb. 4.12, autom. Erhöhung bis Maximum.
- rhov Mindestbewehrungsgrad min rhov = Faktor \* rho mit rho nach Tabelle 5.7.
- x,y Getrennter Querkraftnachweis für die Bewehrungsrichtungen x und y.
- cvl Verlegetmaß der Längsbewehrung zur Begrenzung des Hebelarms z.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh-dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] vorh.	Abb. 4.12 max	Fak. rhov	Nw. x,y [mm]	cvl	Red. Vor-spg.
1	C30/37	.	SY	500	1,75	.	0,00	0,00	0,60	.	80	.
2	C30/37	.	SY	500	1,75	.	0,00	0,00	0,60	.	80	.
4	C35/45	.	DG	500	1,75	.	0,00	.	1,00	.	80	.

Schubquerschnitte

- bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.
- h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.
- kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d. z wird gemäß II-4.3.2.4.2(2)\* nach oben begrenzt.
- z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.
- teff Wanddicke des Torsionskastens.
- K. Kastenquerschnitt.

Qu.	Breite [m]	Nutzhöhe [m]	Nutzhöhe [m]	Torsionsquerschn. [m]					
	bw	bw.nom	bn [m] kb	h	h.nom	d [m] kd	z1	z2	teff K.
1	1,000	.	.	1,200	.	1,120	0,90	.	.
2	1,000	.	.	1,500	.	1,420	0,90	.	.
4	0,707	.	0,627	0,90	0,707	0,627	0,90	0,547	0,547



**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds	Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.						
max.s	Größter vorhandener Stababstand der Betonstahlbewehrung.						
Xil	Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.						
k	Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.						
sr,max	Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (4.203).						
Methode	Direkte Berechnung der Rissbreite nach Kap. 4.4.2.4 oder Nachweis durch Begrenzung der Stababstände nach Tab. 4.121.						
DB	Dicke Bauteil nach Kap. 4.4.2.2(9) zur Bestimmung von As,min.						

Qu.	wk	zul ds	max.s	Beiwert	sr,max	Betonalter	Methode	f.	Betonzugzone	DB
	[mm]	[mm]	[mm]	Xil	k	[mm]	As,min	wk	Rissbreite	für As,min
1	0,20	16	.	.	0,50	.	3- 5d	> 28d	Berechnung	EK gem. Klasse .
2	0,20	16	.	.	0,50	.	3- 5d	> 28d	Berechnung	EK gem. Klasse .
4	0,15	16	.	.	0,50	.	3- 5d	> 28d	Berechnung	EK gem. Klasse .

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen**

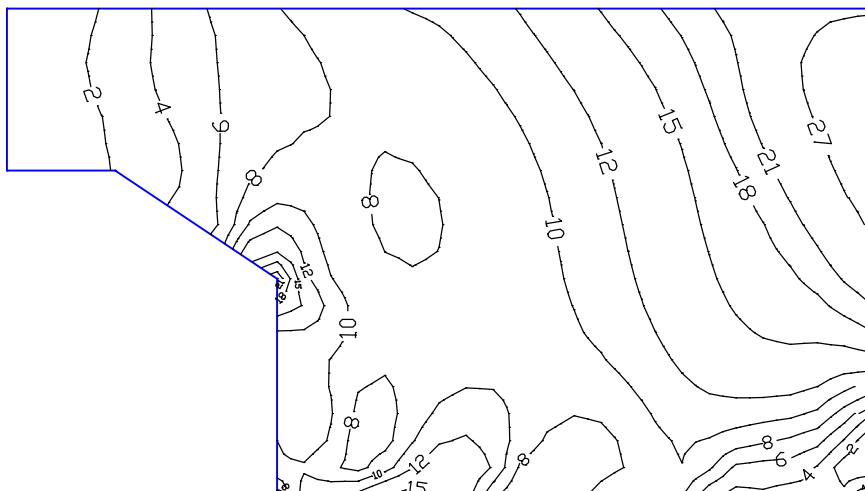
Av	Fläche des Vollquerschnitts zur Ber. der Normalspannung aus Längskraft.					
fc(t)	Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.					
H-Zug	Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruckspannungen nachweisen.					
(NK,QK)	Nichthäufige, Quasi-ständige Kombination.					

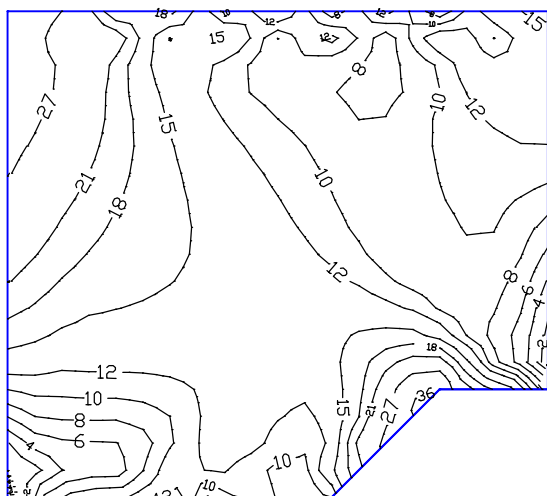
Qu.	Av	fc(t)	zul.sigma.c(t)	zul.sigma.c	Dekompression	H-Zug nur bei
	[m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	(NK, QK)	(NK)	Spannung	Längsdruck
1	.	.	.	0,60 fck	.	.
2	.	.	.	0,60 fck	.	.
4	0,77	.	.	0,60 fck	.	.

**Ergebnisse**

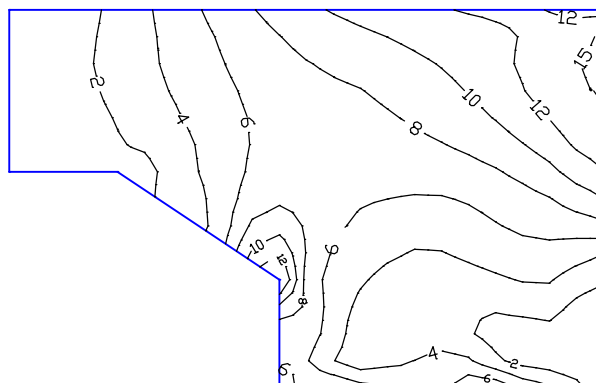
Den Verlauf der erforderlichen Längsbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen.



Lange Flügelwand

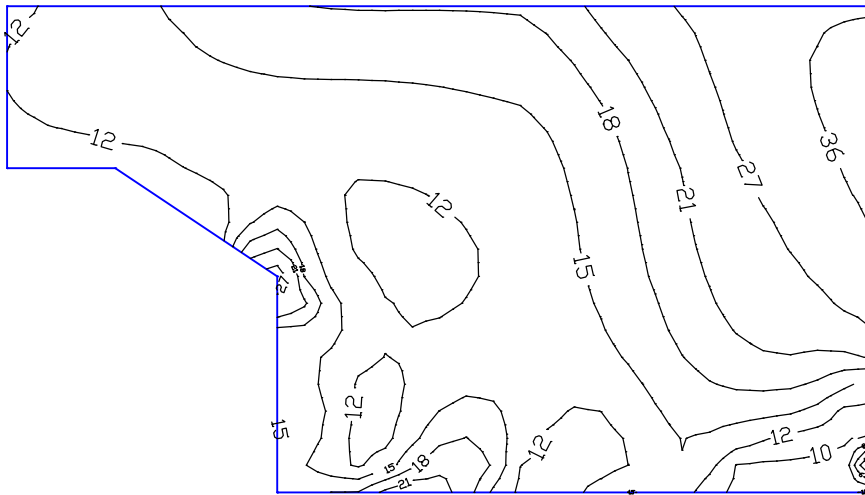


Lagerbank

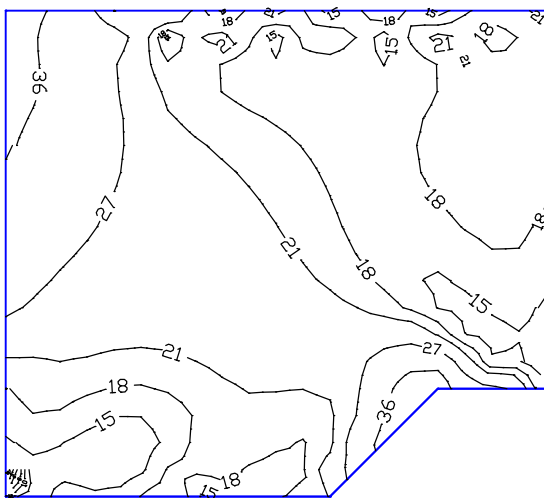


Kurze Flügelwand

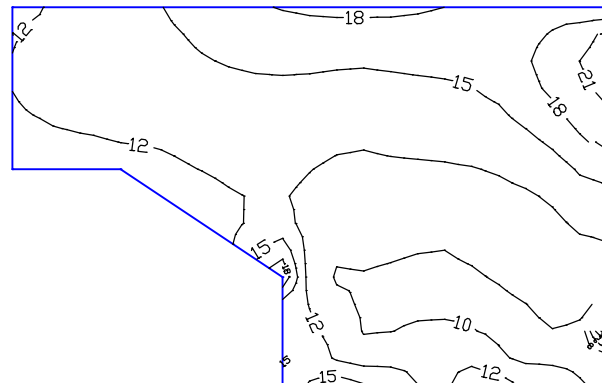
Erforderliche horizontale innere Längsbewehrung für die Tragfähigkeit [cm<sup>2</sup>/m]



Lange Flügelwand

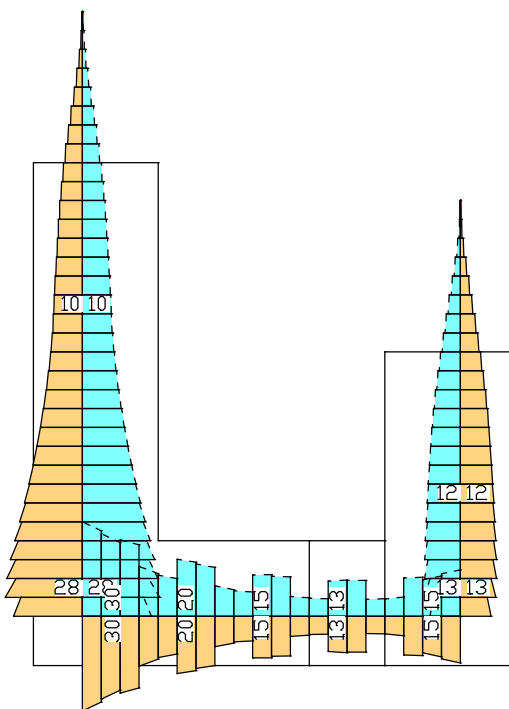


Lagerbank



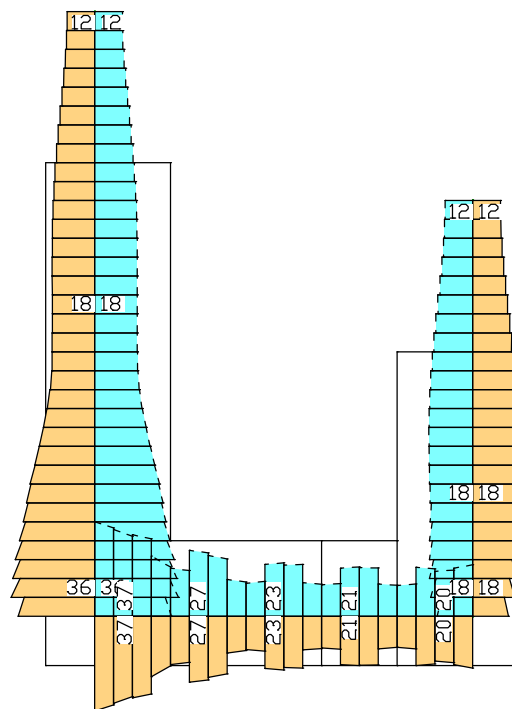
Kurze Flügelwand

Maximal erforderliche horizontale innere Längsbewehrung [cm<sup>2</sup>/m]

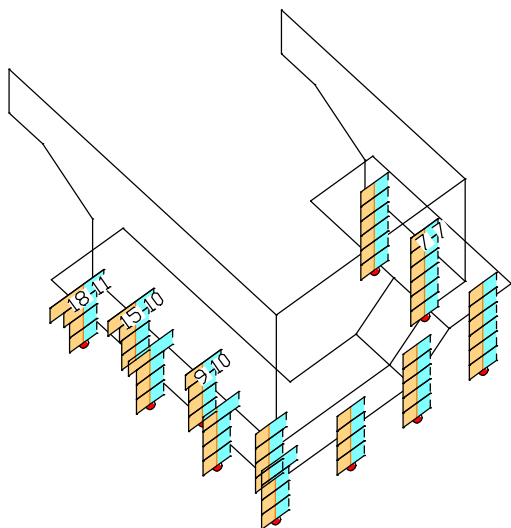


Bewehrung für die Tragfähigkeit

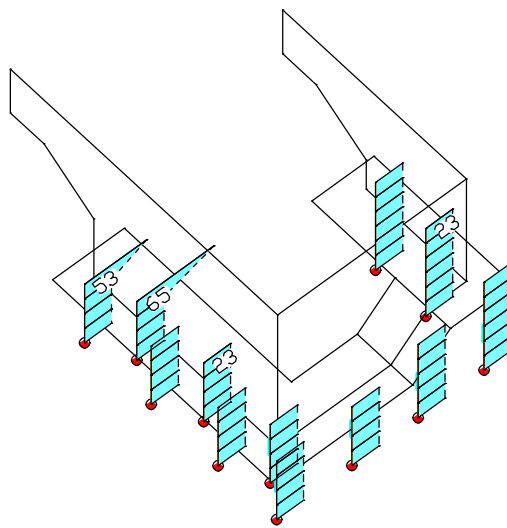
Horizontale Längsbewehrung entlang der Oberkante [cm<sup>2</sup>/m]



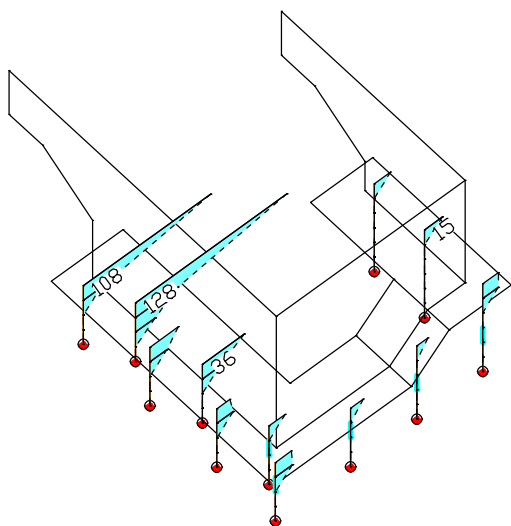
Maximal erforderliche Bewehrung



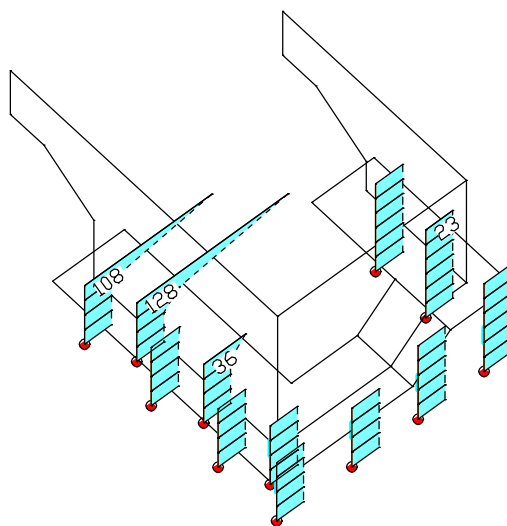
Bügelbewehrung [cm<sup>2</sup>/m]



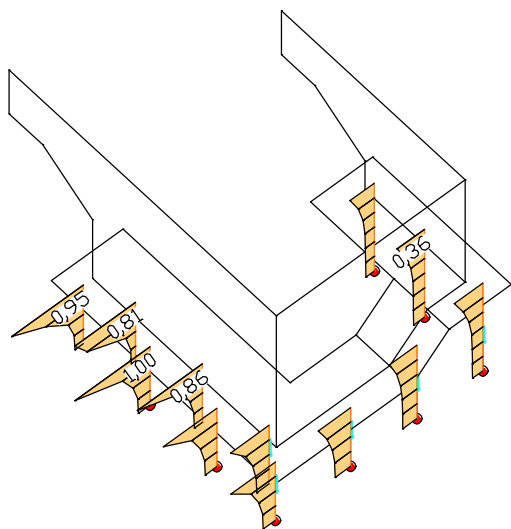
Tragfähigkeitsbewehrung [cm<sup>2</sup>]



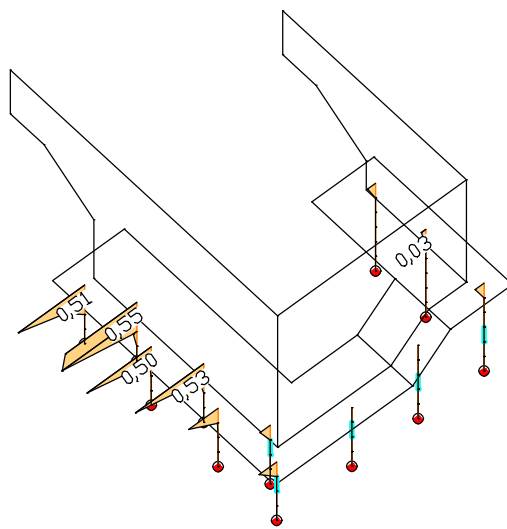
Bewehrung zur Rissesicherung [cm<sup>2</sup>]



Maximal erforderliche Bewehrung [cm<sup>2</sup>]



Betondruckspannungen  $\sigma_c / \sigma_{c,zul}$  [MN/m<sup>2</sup>]



Betonstahlspannungen  $\sigma_s / \sigma_{s,zul}$  [MN/m<sup>2</sup>]

## Literaturhinweise

- Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 2003 (ARS 2003)  
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Nr. 8/2003 – Nr. 14/2003 vom 7. März 2003.  
Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund 2003.
- Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 2009 (ARS 2009)  
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Nr. 6/2009 vom 5. Juni 2009.  
Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund 2009.
- Auslegungen des Normenausschusses Bauwesen (NABau)  
zur DIN 1045-1. Stand: 1.6.2012.
- Bauer, T.; Müller, M.  
Straßenbrücken in Massivbauweise nach DIN-Fachbericht,  
Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.  
Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.  
2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003.
- DIN 1045-1:2008-08  
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.  
Neuausgabe. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2008.
- DIN 4149:2005-04  
Bauten in deutschen Erdbebengebieten.  
Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.  
Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005.
- DIN Fachbericht 101 - März 2003  
Einwirkungen auf Brücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
2. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003.
- DIN Fachbericht 101 - März 2009  
Einwirkungen auf Brücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Neuausgabe. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2009.
- DIN Fachbericht 102 - März 2003  
Betonbrücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
2. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003.
- DIN Fachbericht 102 - März 2009  
Betonbrücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Neuausgabe. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2009.
- Einführungserlasse des Eisenbahnbundesamtes  
zu den DIN Fachberichten vom 24. April 2003.  
Eisenbahnbundesamt, Bonn 2003.
- Erfahrungssammlung des Normenausschusses Bauwesen (NABau)  
zu den DIN Fachberichten 101 und 102. Stand: 9.9.2011.
- Fingerloos, F.  
DIN 1045 - Ausgabe 2008, Tragwerke aus Beton und Stahlbeton.  
Teil 1: Bemessung und Konstruktion - Kommentierte Kurzfassung.  
Herausgeber: Deutscher Beton- und Bautechnikverein e.V.  
3. vollständig überarbeitete Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2008.
- Heft 525 - Erläuterungen zur DIN 1045-1  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton,  
1. Auflage - September 2003, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003.
- Heft 525 - Berichtigung 1:2005-05  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton,  
Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005.
- Heft 466 - Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton.  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.  
Beuth Verlag GmbH, Berlin 1996.

- König, G.; Maurer, R.; Kliver, J.; Bornmann, M.  
Leitfaden zum DIN-Fachbericht 102 Betonbrücken, Ausgabe März 2003.  
1. Auflage - November 2003. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- Müller, M.; Bauer, T.  
Eisenbahnbrückenbau nach DIN-Fachbericht,  
Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.  
Band 1: Stahlbeton- und Spannbetonüberbauten nach DIN-Fachbericht 101 und 102  
2. aktualisierte und erweiterte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003.
- Novak, B.; Gabler, M.  
Leitfaden zum DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen auf Brücken, Ausgabe März 2003.  
1. Auflage - November 2003. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- Richtlinie 804 - Eisenbahnbrücken  
Herausgeber: DB Netz AG. Stand 1.5.2003.
- Rossner, W.; Graubner, C.-A.  
Spannbetonbauwerke.  
Teil 3: Bemessungsbeispiele nach DIN 1045-1 und DIN-Fachbericht 102.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.
- Zilch, K.; Curbach, M. (Hrsg.)  
Einführung in die DIN 1045-1 - Anwendungsbeispiele.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2001.
- Zilch, K.; Rogge, A.  
Bemessung der Stahlbeton- und Spannbetonbauteile nach DIN 1045-1.  
Beton-Kalender 2002, Bd. 1, S. 217-359.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2002.
- Maurer, R.; Zilch, K.; Hegger, J.; Zichner, T.; Dunkelberg, D.; Karakas, A.; Kolodziejcyk, A.  
Erläuterungen und Hintergründe zur Nachrechnungsrichtlinie - Betonbrücken.  
Bauingenieur 01-2012, S. 24-35.  
Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 2012.

# EN 1992-2 Brückennachweise

## Grundlagen

Die Brückennachweise nach EN 1992-2 (Eurocode 2, Teil 2) sind als Ergänzung zur FEM-Analyse 3D konzipiert. Sie sind anwendbar für Brückenbauwerke und andere Ingenieurbauwerke, soweit Einwirkungen aus Straßen- oder Eisenbahnverkehr nach EN 1991-2 (Eurocode 1, Teil 2) zu berücksichtigen sind. Als Tragwerksmodelle sind Stab-, Flächen- und Volumentragwerke zugelassen. Im einzelnen werden folgende Normen berücksichtigt:

- EN 1992-2:2005/AC:2008 als Basisdokument
- ÖNORM EN 1992-2:2012 mit Nationalem Anhang Österreich B 1992-2:2014-09
- DIN EN 1992-2:2010 mit Nationalem Anhang Deutschland 2013-04.

Die Auswahl der gewünschten Vorschrift erfolgt im Dialog *Bemessungsnormen* des Extras-Menüs. Davon abhängig werden die entsprechenden Eingabe-, Berechnungs- und Ergebnisdialoge in der Bedienungs Oberfläche angeboten. Bei der Materialauswahl stehen folgende Alternativen für Verfügung:

- C12/15-EN-D bis C100/115-EN-D sowie LC12/13-EN-D bis LC80/88-EN-D für die Bemessung nach DIN EN 1992-2
- C12/15-EN bis C90/105-EN sowie LC12/13-EN bis LC80/88-EN für die Bemessung nach den anderen Normen

Innerhalb eines Tragwerksmodells sind verschiedenartige Bauteile kombinierbar:

- Nicht vorgespannte Bauteile
- Vorgespannte Bauteile mit nachträglichem Verbund
- Vorgespannte Bauteile ohne Verbund
- Bauteile mit externer Vorspannung
- Bauteile in Mischbauweise

Die Bemessung erfolgt im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle und Lastmodellvarianten den Einwirkungen nach EN 1991-2:2003, zuzuordnen. In den gewünschten Bemessungssituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte nach EN 1990/A1:2010 (Eurocode 0) automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente.

Die Dialoge zu den Einwirkungen und zur Nachweisauswahl werden über die Berechnungseinstellungen aufgerufen. Die detaillierten Nachweisvorgaben und Bewehrungsangaben sind im Rahmen der Querschnittsdefinition einzugeben.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden alle Nachweise am Polygonquerschnitt geführt. Allgemeine Hinweise zur Anwendung von Bemessungsobjekten sind dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

Im Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise* der Datenbasis und den Ordnern der nationalen Varianten ist zusätzlich eine Einzelbemessung für frei definierte Polygonquerschnitte oder Verbundquerschnitte möglich.

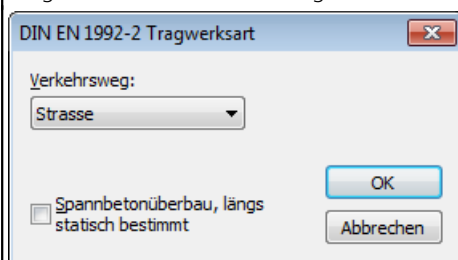
In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften der EN 1992-2 zitiert. Auf die jeweiligen nationalen Festlegungen wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthalten. Die betreffenden Passagen werden durch senkrechten Strich am Text markiert.

## Eingaben

### Tragwerksart

DIN EN 1992-2:

Der Dialog zur Auswahl der Tragwerksart wird aus der Datenbasis oder über die Einstellungen im Berechnungsmenü aufgerufen. Beim Verkehrsweg kann zwischen Straße und Eisenbahn gewählt werden.



### Spannbetonüberbau

Auswahl der Nachweisbedingungen bei Straßenbrücken gemäß Tabelle 7.101DE für in Längsrichtung statisch bestimmte Bauteile mit im Verbund liegenden Spanngliedern.

## Lastmodell 1 für Straßenbrücken

Das Lastmodell 1 besteht nach EN 1991-2, Kapitel 4.3.2, aus zwei Teilen:

- Doppelachse (Tandemsystem TS)
- Gleichmäßig verteilte Flächenlast UDL

Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt. Da nicht in allen Fällen von vornherein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, können unterschiedliche Varianten von Laststellungen definiert werden.

Die Bearbeitung des Lastmodells 1 erfolgt über den Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise / Lastmodell 1* der Datenbasis. Mit der Option *Neu* des Kontextmenüs des Lastmodells 1 wird eine neue Variante von Laststellungen angelegt und der Eingabedialog gestartet.

Die angepassten Grundwerte des Tandemsystems ( $\alpha_{Qi} \cdot Q_{ik}$ ) und die Lastordinaten der UDL-Lasten ( $\alpha_{qi} \cdot q_{ik}$ ) werden mit dem Kontextmenüpunkt *Eigenschaften* des Lastmodells 1 eingestellt.

Stellung	Tandem-System (TS) alpha.Qi * Qik [kN]	Gleichlast (UDL) alpha.qi * qik [kN/m²]
Fahrstreifen 1	300	12
Fahrstreifen 2	200	6
Fahrstreifen 3	100	3
Andere Fahrstreifen		3
Verbleibende Fläche (qrk)		3

Tandemfahrzeuge in Querrichtung entkoppeln  
 Projizierte Lasten anwenden

OK    Abbrechen

Bei der FEM-Berechnung werden alle vertikalen Lastanteile des Lastmodells 1 als Flächenlasten behandelt und in getrennten Lastfällen berechnet, um später die extremalen Reaktionen ermitteln zu können.

Mit der Option *Projizierte Lasten anwenden* werden die vertikalen Lasten auf die Elemente in globaler z-Richtung projiziert. Daher ist die Last über den Elementen anzuordnen (siehe *Freie Flächenlast n-Eck*). Es werden nur Elemente belastet, die nicht durch andere Elemente verdeckt werden. Dies gilt auch für eine teilweise Überdeckung.

Lastmodell 1:    Aus    TS Neu    UDL Neu    UDL Gen

### Aus

Beendet die Darstellung des Lastmodells 1.

### TS Neu

Eingabe einer neuen Stellung des Tandemsystems (siehe auch Tandemsystem). Die Stellungen des Tandemsystems schließen sich gegenseitig aus.

### UDL Neu

Fortlaufende Eingabe von vier- oder dreieckigen Lastflächen der UDL-Last. Die Teilflächen der UDL-Last können gleichzeitig wirken. Die Eingabe ist für UDL2 (Fahrstreifen 2) voreingestellt. Über das Kontextmenü der Lastfläche können andere Fahrstreifen oder eine Restfläche gewählt werden.

Punkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	-0,5001	-0,8	0
2	9,6666	-0,8	0
3	9,6666	2,2	0
4	-0,5001	2,2	0

OK    Abbrechen

**UDL Gen**

Generieren neuer Lastflächen der UDL-Last. Das viereckige Generierungsgebiet wird mit identischer Anzahl von Lastflächen auf den gegenüberliegenden Rändern eingeteilt.

**Tandemsystem des Lastmodells 1**

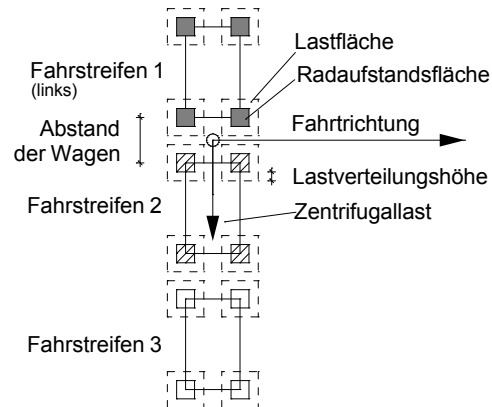
**Tandemsystem (1)**

Abstand der Wagen:  m    Fahrstreifen: 1-2-3    Zentrifugallast:  kN

Lastverteilungshöhe:  m

Punkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	1,5	2,5	0
2	3,5	2,5	0
3	1,5	3,5	0

OK    Abbrechen



Eingabedialog und Prinzipskizze des Tandemsystems im Lastmodell 1 nach EN 1991-2.

**Abstand der Wagen**

Abstand der Schwerpunkte der Radaufstandsflächen (Siehe Abbildung).

**Fahrstreifen**

Anordnung der Fahrstreifen von links nach rechts.

**Zentrifugallast**

Lastgröße  $Q_t$  dieser Stellung des Tandemsystems. Sie wirkt senkrecht zur Fahrtrichtung. Ihre exzentrische Lage wird nicht erfasst.

**Lastverteilungshöhe**

Ergibt in Verbindung mit den Radaufstandsflächen die Lastflächen des Tandemsystems (siehe Abbildung).

**Punkt**

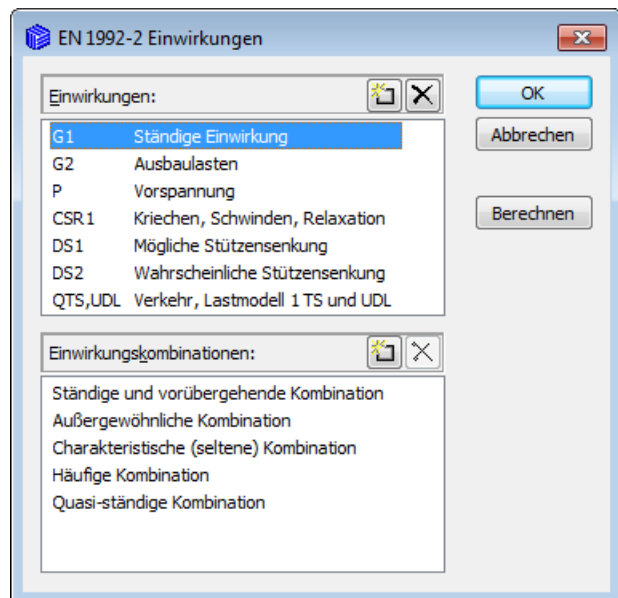
1. Bezugspunkt des Tandemsystems
2. Punkt der lokalen x-Achse (Fahrtrichtung)
3. Punkt in lokaler x-y Ebene



## Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die maßgeblichen Einwirkungskombinationen.

Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



### Einwirkungen

Liste der definierten Einwirkungen. Folgende Einwirkungen können definiert werden:

- G1 bis G9: Ständige Einwirkungen
- P: Vorspannung
- QTS, QUDL: Verkehr, Lastmodell 1 TS und UDL
- QI: Verkehr, Bremsen und Anfahren
- Qt: Verkehr, Zentrifugallast
- T: Temperatur
- W: Wind
- DS1: Mögliche Stützensenkung
- DS2: Wahrscheinliche Stützensenkung
- CSR1, CSR2: Kriechen, Schwinden und Relaxation zu verschiedenen Zeitpunkten
- A: Außergewöhnliche Einwirkung
- E: Erdbeben
- Q1 bis Q9: Andere veränderliche Einwirkung
- Qfat: Zyklische Ermüdungseinwirkung

Gemäß EN 1990/A1, Tabelle A.2.4(B), Anmerkung 2, werden die Einwirkungen DS1 und DS2 ebenso wie die Einwirkungen Q, T und W in den Bemessungssituationen nur berücksichtigt, wenn sie ungünstig wirken.

DIN EN 1992-2:

Die Einwirkungen QTS, QUDL, QI und Qt stehen nur bei Wahl des Verkehrswegs *Straße* zur Verfügung.

### Einwirkungskombinationen

Liste der definierten Einwirkungskombinationen.



Fügt eine neue Einwirkung bzw. Einwirkungskombination hinzu.



Entfernt die markierte Einwirkung bzw. Einwirkungskombination.

### Berechnen

Berechnet die definierten Einwirkungskombinationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind

anschließend für alle Kombinationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls.

Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Verwendung der Kombinationen in den verschiedenen Nachweisen dargestellt.

Situation	Tragfähigkeit	EN 1992-1-1	EN 1992-2
Ständig & vorüb. Außergewöhnlich Erdbeben	Längsbewehrung	6.1	3.1.6
	Querbewehrung	6.2	
	Torsionsbewehrung	6.3	
Charakteristisch (selten)	Robustheitsbewehrung		6.1(110)
Häufig	Ermüdung vereinfacht	6.8.6(2)	
Ermüdung	Beton	6.8.7(1)	NN.3.2
	Betonstahl	6.8.4	NN.2.1
	Spannstahl	6.8.4	NN.3.1
Situation	Gebrauchstauglichkeit	EN 1992-1-1	EN 1992-2
Charakteristisch (selten)	Betondruckspannungen	7.2(5) 7.2(5)	7.2(102)
	Betonstahlspannungen		
	Spannstahlspannungen		
Häufig	Dekompression Klasse XC2-XS3		7.3.1
	Rissbreite, Vorsp. mit Verbund		7.3.1
Quasi-ständig	Betondruckspannungen	7.2(2)	7.3.1
	Rissbreite, Stahlbeton & Vorsp. o.V. Verformungen	7.4	

DIN EN 1992-2:

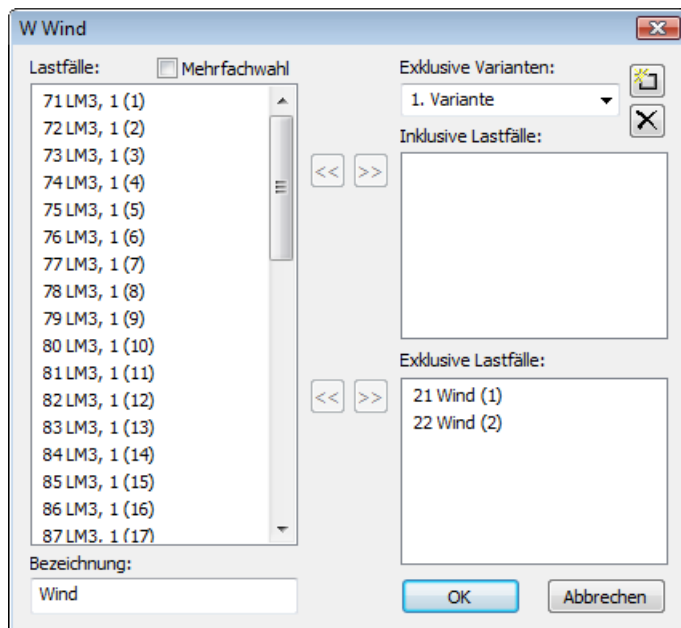
Für den Nachweis der Dekompression, der zulässigen Randspannungen und der Rissbreitenbeschränkung stehen spezielle Einwirkungskombinationen gemäß Tab. 7.101DE, Fußnote a und b (Straßenbrücken), und Tab. 7.102DE, Fußnote a und b (Eisenbahnbrücken), zur Verfügung.

ÖNORM EN 1992-2:

Für den Nachweis der Dekompression und der Rissbreitenbeschränkung stehen spezielle Einwirkungskombinationen gemäß Tab. 2AT, Fußnote c, zur Verfügung.

## Definition einer Einwirkung

Die Zuordnung der Lastfälle zu den Einwirkungen geschieht nach Auswahl oder Neueingabe einer Einwirkung. Dabei stehen je nach Art der Einwirkung unterschiedliche Dialoge zur Verfügung, von denen nachfolgend ein Beispiel dargestellt ist. Die möglichen Dialogoptionen werden anschließend erläutert.



**Lastfälle**

Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen markieren, um sie der aktuellen Einwirkung hinzuzufügen.



**Mehrfachauswahl**

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

**Bezeichnung**

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

**Exklusive Varianten**

Eine exklusive Variante besteht aus inklusiven und exklusiven Anteilen. Die Varianten schließen sich gegenseitig aus. Mit den Schaltflächen  bzw.  können Einwirkungsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden.

**Inklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

**Exklusive Lastfälle**

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

**Bewegliche Lasten benutzen**

Die Einwirkungen des Lastmodells 1 können entweder mit Hilfe von *beweglichen Lasten* oder normalen Lastfällen erfasst werden. Die *beweglichen Lasten* werden über einen eigenen Dialog beschrieben (siehe Lastmodell 1). Bei der Verwendung von normalen Lastfällen wird vereinfachend angenommen, dass die vertikalen ( $Q_{TG}$ ) und horizontalen ( $Q_t$ ) Einwirkungen des Tandemsystems unabhängig wirken.

**Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls**

Der Spannkraftverlust wird als konstante prozentuale Minderung der Vorspannung definiert.

**CS als konstante Minderung der Vorspannung**

Alternativ zur Definition von CS-Lastfällen kann der Einfluss des Kriechens und Schwindens durch eine konstante prozentuale Minderung der Vorspannung berücksichtigt werden.

**Interne Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die interne Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

**Externe Vorspannung**

Gewählte Lastfälle, welche die externe Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

## Definition einer Einwirkungskombination

Je nach gewähltem Nachweis sind unterschiedliche Einwirkungskombinationen erforderlich, die mit nachfolgendem Dialog eingegeben werden.

**Situationsbeiwerte:**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	Bau - Unverpr.	G1 + P
2)	End	G1 + G2 + P + CSR1 + DS1 + QK

**Sicherheitsbeiwerte:**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
P, CSR1	1	1
DS1, DS2	1,2	0
QTS, QUDL, QI	1,35	0
T	1,5	0
W	1,5	0

**Kombinationsbeiwerte:**

Variante	QTS	QUDL	QI	T	W
a)	1,0	1,0	0	0	0,6
b)	1,0	1,0	0	0,6	0
c)	0,75	0,4	0	1,0	0
d)	0	0	0	0	1,0
e)	0,75	0,4	1,0	0,6	0

### Situationen

Liste der Bemessungs- bzw. Nachweissituationen. Jede Situation kann entweder für den Bau- oder den Endzustand gültig sein. Für Spannbetongtragwerke mit nachträglichem Verbund lässt sich festlegen, dass die Spannglieder noch unverpresst sind. Die Einwirkung QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte. Mit den Schaltflächen bzw. können Situationen hinzugefügt bzw. gelöscht werden. Durch Doppelklick auf eine Situation lässt sich diese nachträglich bearbeiten.

### Sicherheitsbeiwerte

Tabelle der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{sup}$  und  $\gamma_{inf}$  für die Einwirkungen. Die national gültigen Werte nach EN 1990/A1, Tabelle A.2.4.(B), werden vorgeschlagen.

DIN EN 1992-2:

Nach 2.3.1.3(4) darf bei Betonbrücken für Setzungen der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{G,Set} = 1,0$  angenommen werden.

### Kombinationsbeiwerte

Tabelle der Kombinationsbeiwerte für die veränderlichen Einwirkungen. Die national gültigen Werte nach EN 1990/A1, Tabelle A.2.1 (Straßenbrücken) werden sinngemäß vorgeschlagen. Mit den Schaltflächen bzw. können Kombinationsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden. In der Berechnung werden ausschließlich die hier aufgeführten Varianten berücksichtigt.

### Standard

Die Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte werden mit den empfohlenen Werten belegt. Als Nachweissituation werden alle relevanten Einwirkungen im Endzustand ausgewählt.

## Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe sind nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1, mit den jeweils national gültigen Werten vorgelegt und können bei Bedarf in den Berechnungseinstellungen geändert werden. In den Bemessungssituationen infolge Erdbeben gelten gemäß EN 1998-1, Kapitel 5.2.4(2), die Beiwerte der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen werden innerhalb der Definition der Einwirkungskombinationen festgelegt.

## Querschnittseingaben

Die Querschnittseingaben umfassen alle spezifischen Festlegungen für die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Eine Übersicht der Bemessungsvorgaben kann im Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise* der Datenbasis und in den Ordnern der nationalen Varianten aufgerufen werden.

## Nachweise

Im nachfolgenden Dialog wird festgelegt, welche Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für den Querschnitt vorgesehen sind. In den Berechnungseinstellungen kann diese Auswahl für das gesamte Tragwerk übersteuert werden.

*Nachweisauswahl für EN 1992-2 (Nationale Varianten entsprechend)*

### Vorspannung des Bauteils

Die Art der Vorspannung kann für jeden Querschnitt getrennt gewählt werden:

- *Nicht vorgespannt*
- *Nachträglich Verbund*
- *Ohne Verbund*
- *Extern*
- *Mischbauweise*

### Expositionsklasse

Die Nachweisbedingungen für den Dekompressions- und Rissbreitenachweis sind in EN 1992-2, Tabelle 7.101N, nach Expositionsklassen geordnet. Eine Zuordnung der Bauteile zu Expositionsklassen ist mit Hilfe der Tabelle 4.1 in EN 1992-1-1 möglich.

DIN EN 1992-2:

Für die Nachweisbedingungen sind die Tabellen 7.101DE (Straßenbrücken) und 7.102DE (Eisenbahnbrücken) maßgebend. Die Auswahl erfolgt im Dialog *Tragwerksart*.

ÖNORM B 1992-2:

Für die Nachweisbedingungen ist Tabelle 2AT maßgebend.

### Robustheit

Dieser Nachweis ermittelt die Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung (Robustheitsbewehrung) nach EN 1992-2, Kapitel 6.1(109), Gleichung (6.101a).

### Stahlzugspannungen

Bei Bauteilen mit interner Vorspannung werden neben den Betonstahlspannungen auch die Spannstahlspannungen nachgewiesen.

### Mindest-Rissbewehrung, Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch Berechnung nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.4. Dabei wird die endgültige

Längsbewehrung als Maximum aus Biegebewehrung, Robustheitsbewehrung und Mindest-Rissbewehrung nach 7.3.2 angesetzt. Letztere wird bei Bedarf automatisch erhöht, um die Rissbreite einzuhalten.

## Basiswerte

Die Basiswerte gelten für alle Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

### Bemessungsmodus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.5.2(2), durchgeführt.

### Reduktionsfaktor der Vorsp. für Robustheit

Für die Anordnung der Robustheitsbewehrung sind die Vorschriften des Kapitels 6.1(110) maßgebend. Danach soll bei Ermittlung der Zugzone die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung unberücksichtigt bleiben. Da diese bei Flächentragwerken nicht bestimmbar ist, kann ersatzweise die Vorspannung mit einem Reduktionsfaktor abgemindert werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes liegt im Ermessen des Anwenders.

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe für die Schubbemessung von Flächenelementen [m].

### Neigung cot Theta

$\cot \Theta$  definiert die Neigung der Betondruckstreben gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(2), Gl. (6.7N). Das Programm schlägt den Wert 1 vor (45° Druckstrebenneigung). Davon abweichend kann der Anwender einen Wert innerhalb der national zugelassenen Grenzen frei wählen. Die Vorgabe eines größeren Wertes hat in aller Regel eine geringere erforderliche Querkraftbewehrung  $A_{sw}$ , eine geringere aufnehmbare Querkraft  $V_{Rd,max}$  und ein größeres Versatzmaß  $a_1$  nach Kapitel 9.2.1.3, Gleichung (9.2), zur Folge.

DIN EN 1992-2:

Der Druckstrebenwinkel ist nach Gl. (6.107aDE) auf  $1,0 \leq \cot \Theta \leq 1,75$  zu begrenzen.

Für den Nachweis stehen vier Berechnungsmethoden zur Auswahl:

- *Standard*: Der Eingabewert wird auf den nach DIN EN 1992-1-1, Gl. (6.7aDE), für Querkraft, Torsion und kombinierte Beanspruchungen jeweils zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung).
- *Konstant*: Der Nachweis erfolgt ohne weitere Begrenzung mit dem für  $\cot \Theta$  eingegebenen Wert (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).

- *Std./45°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  nach DIN EN 1992-1-1, Gl. (6.7aDE), begrenzt. Für Torsion wird gemäß Kapitel 6.3.2 (102) vereinfachend eine konstante Druckstrebenneigung von  $45^\circ$  angenommen.
- *Std./30°*: Für Torsion wird eine konstante Druckstrebenneigung von  $30^\circ$  angenommen.

Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

ÖNORM B 1992-1-1:

Die Druckstrebenneigung wird durch  $\tan \Theta$  beschrieben und ist nach den Gleichungen (3AT) und (4AT) zu begrenzen.

### Asl nach Bild 6.3

Die anzurechnende Biegezugbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.2, Bild 6.3 [cm<sup>2</sup>].

### Asl erhöhen bis

Bei Flächen kann optional ein Größtwert angegeben werden, bis zu dem das Programm automatisch den vorgenannten Eingabewert erhöht, um Bügelbewehrung zu vermeiden [cm<sup>2</sup>].

### Stahlgüte der Bügel

- *420S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 420$  MN/m<sup>2</sup>.
- *500S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 500$  MN/m<sup>2</sup>.
- *500M*: Betonstahlmatten mit  $f_{yk} = 500$  MN/m<sup>2</sup>.
- *Allgemein*: Frei definierbare Stahlgüte [MN/m<sup>2</sup>].

### Bemessung wie Platten

Stäbe bzw. Bemessungsobjekte werden wie Platten behandelt, d.h. es wird gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.1(4), keine Mindestquerkraftbewehrung ermittelt, wenn rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist.

### Faktor für $\rho_{w,min}$

Der Mindestbewehrungsgrad  $\rho_{w,min}$  wird über einen Faktor in Bezug auf den Grundwert für Balken nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.2 (5) festgelegt.

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

Bei Platten mit  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  ist mindestens der 0,6-fache Wert der Mindestbewehrung von Balken erforderlich.

DIN EN 1992-1-1:

Für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt ist nach Gleichung (9.5bDE) der 1,6-fache Wert anzusetzen.

### Verlegemaß $c_{v,l}$

DIN EN 1992-2:

In DIN EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(1), wird der innere Hebelarm  $z$  auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,l} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,l}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,l}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Das Programm schlägt für  $c_{v,l}$  den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ , vor.

### Getrennter Nachweis für x- und y-Richtung

DIN EN 1992-2:

Nach DIN EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.1(10), darf bei zweiachsig gespannten Platten der Querkraftnachweis in den Spannrichtungen x und y getrennt geführt werden. Die problemgerechte Orientierung der Bewehrungsrichtungen obliegt dem Anwender.

### Hebelarm aus Biegebemessung

DIN EN 1992-2:

Normalerweise wird für den Querkraftnachweis bei Flächenelementen der Hebelarm  $z$  zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Alternativ kann der Hebelarm aus der Biegebemessung verwendet werden. Das Programm ermittelt an jedem Nachweisort für beide Bewehrungsrichtungen den größten Hebelarm je Nachweissituation und begrenzt ihn auf den Bereich  $0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$ . Beim Nachweis für die resultierende Querkraft  $q_r$  wird das Minimum aus  $z_x$  und  $z_y$  benutzt.

## Schubquerschnitt

Bei Polygonquerschnitten werden für die Querkraft- und Torsionsbemessung zusätzliche Querschnittsabmessungen benötigt. Diese werden nachfolgend erläutert. Bei Querschnitten mit interner Vorspannung oder vom Rechteck abweichender Form sollten die vom Programm vorgeschlagenen Abmessungen überprüft werden.

### Breite

Querschnittsbreite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Höhe

Querschnittshöhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$  [m].

### Nutzbreite

Statisch wirksame Breite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$  [m].

### Nom. Breite, Nom. Höhe

Die nominelle Breite bzw. Höhe intern vorgespannter Bauteile gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(6), zur Berücksichtigung der Hüllrohrdurchmesser bei der Berechnung des Bemessungswertes der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$ .

### Faktor kb, Faktor kd

Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzbreite  $b_n$  bzw. Nutzhöhe  $d$  im Nachweis der Quertragfähigkeit für  $Q_y$  bzw.  $Q_z$ .

### Kernquerschnitt $A_k = z_1 * z_2$

Abmessungen des Kernquerschnitts für die Berechnung der Torsionsbewehrung [m].

### tef

Die effektive Wandstärke des Torsionsquerschnitts nach EN 1992-1-1, Bild 6.11 [m].

### Kastenquerschnitt

Auswahl der für Kastenquerschnitte geltenden Regeln zum Nachweis der Maximaltragfähigkeit nach Kapitel 6.3.2(4) und erforderlichen Bewehrung nach Kapitel 6.3.2(5) bei kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion.

DIN EN 1992-2:

Bei Kastenquerschnitten wird gemäß Kapitel 6.3.2 (NA.106) zusätzlich die Hauptdruckspannung aus Biegung, Längskraft und Torsion nachgewiesen.



## Hebelarm

DIN EN 1992-2:

Der innere Hebelarm  $z$  kann auf folgende Arten definiert werden:

- $kd \cdot \text{Nutzhöhe}, kb \cdot \text{Nutzbreite}$   
Die Berechnung erfolgt mit den eingegebenen Größen.
- *aus Biegebemessung*  
Das Programm ermittelt in der Biegebemessung an jedem Nachweisort den größten Hebelarm je Bemessungssituation. Dieser ist als Abstand zwischen den Schwerpunkten der Betondruck- und Stahlzugkräfte definiert.
- *NRR Gl. 12.16*  
In der Biegebemessung wird entsprechend Gl. (12.16) der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken (NRR) ein mit dem Kraftzuwachs in den Spanngliedern gewichteter Hebelarm ermittelt. Am Nachweisort ist je Bemessungssituation das Maximum aus den Schnittkraftsätzen mit Spannstahl in der Zugzone II maßgebend. Wenn für alle Schnittkraftsätze der Spannstahl in der Druckzone liegt, wird der Hebelarm nach Gl. (12.16) zu  $z = z_s$  ermittelt.
- $0,9 \cdot d_p$   
Im Nachweis für  $Q_z$  wird der Hebelarm über die Nutzhöhe  $d_p$  der Spannglieder bestimmt. Dabei wird  $d_p$  als der über die Spanngliedflächen gewichtete Mittelwert am Nachweisort angenommen (vgl. Rossner/Graubner 2005, S. 252).

Der maßgebende Hebelarm wird gemäß DIN EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(1), auf den Bereich

$0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,1}; d - c_{v,1} - 30 \text{ mm})$  begrenzt und im ausführlichen Nachweisprotokoll dokumentiert.

## Spannungen

**Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-2 - Spannungen**

Querschnitt  
 Form  
 Schubspannungen  
 Material  
 Standardwerte  
 Kriechbeiwerte  
 Bettung  
 EN 1992-1-1  
 EN 1992-2  
 Nachweise  
 Basiswerte  
 Schubquerschnitt  
**Spannungen**  
 Rissbreiten  
 Ermüdung  
 Streufaktoren  
 Thermische Berechnung  
 Allgemein

Numer: 1 - Dac    Querschnittsart: Polygon    Materialart: C40/50-EN    Neu    Kopie  
 Bezeichn.: Hauptträger    Es sind weitere Elemente betroffen.

Nachweis der Betondruckspannungen

Charakt. EK.	Quasi-ständige EK.	Zum Zeitpunkt $t$ der Vorspannung	Betonfestigkeit $f_{ck}(t)$ [MN/m <sup>2</sup> ]:
<input checked="" type="radio"/> 0,60 $f_{ck}$	<input type="checkbox"/> 0,45 $f_{ck}$	<input checked="" type="radio"/> 0,45 $f_{ck}(t)$	40
<input type="radio"/> 0,66 $f_{ck}$		<input type="radio"/> 0,60 $f_{ck}(t)$	

Nachweis der Betonstahlspannungen

Charakteristische EK.

zul  $\sigma_{s,c}$ :

0,80  $f_{yk}$   
 1,00  $f_{yk}$

OK    Abbrechen    Hilfe

### zul $\sigma_{c,c}$

Die Betondruckspannung  $\sigma_c$  ist in den Bau- und Endzuständen nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(2), auf  $0,60 \cdot f_{ck}$  unter der charakteristischen Einwirkungskombination zu begrenzen. Diese Grenze darf gemäß EN 1992-2, Kapitel 7.2(102), um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone umschnürt ist. Falls die Spannung im Beton unter quasi-ständiger Kombination die Grenze  $0,45 \cdot f_{ck}$  nicht übersteigt, darf nach 7.2(3) von linearem Kriechen ausgegangen werden, anderenfalls ist nicht-lineares Kriechen zu berücksichtigen.

ÖNORM B 1992-2:

Eine Erhöhung der Spannungsgrenze ist auch bei Umschnürung der Druckzone unzulässig.

### zul $\sigma_{c,c}(t)$

Zulässige Betonspannung  $\sigma_{c,c}(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  der Einleitung der Vorspannung gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.2.2(5), Gl.(5.42). Übersteigt die Druckspannung den Wert  $0,45 \cdot f_{ck}(t)$ , so soll nach EN 1992-1-1 die Nichtlinearität des Kriechens berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt der Eintragung der Vorspannung wird im Programm bei der Bemessungssituation „G1 +P“ angenommen.

**f<sub>ck</sub>(t)**

Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.2.2(5) [MN/m<sup>2</sup>].

**Betonstahlspannungen**

Die Zugspannungen in der Bewehrung dürfen nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(5), unter der charakteristischen Einwirkungskombination den Wert  $0,8 \cdot f_{yk}$  nicht übersteigen. Bei Spannungen aus indirekter Einwirkung darf die Grenze zu  $1,0 \cdot f_{yk}$  angenommen werden.

**Dekompression, Spannung**

DIN EN 1992-2, ÖNORM B 1992-2:

Maßgebliche Spannung für den Dekompressionsnachweis bei Flächenelementen ( $\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$ ).

**Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruck**

DIN EN 1992-2:

Mit dieser Option lassen sich die Anwendungsvorschriften des Kapitels 7.3.1 (NA.112) nutzen. Diese lassen bei vorgespannten Eisenbahnbrücken zu, den Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen zu begrenzen, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

**Av**

DIN EN 1992-2:

Fläche des Vollquerschnitts zur Berechnung der Normalspannung aus Längskraft (vgl. Rossner/Graubner 2012, S.228), wenn die Querschnittsabmessungen auf die mitwirkende Plattenbreite reduziert wurden. Falls alternativ der Querschnitt als Vollpolygon mit Angabe der mitwirkende Breite definiert wurde, ist die Eingabe von  $A_v$  gesperrt (s. auch Kapitel *Strukturbeschreibung/Polygonquerschnitt*).

**Rissbreiten**

Die Vorgaben gelten für die Berechnung der Mindestrissbewehrung und den Nachweis der Rissbreite.

**Querschnittsrand**

Der Grenzwert der rechnerischen Rissbreite  $w_{max}$ , der größte vorhandene Stabdurchmesser  $max. d_s$  und der Rissabstand  $s_{r,max}$  können für Querschnittsränder und Bewehrungsrichtungen unterschiedlich definiert werden.

*Standard*

Die Standard-Definition gilt für nicht spezifizierte Ränder und Richtungen.

*Oben, unten, x, y*

Definition für den oberen oder unteren Rand in Bewehrungsrichtung x oder y.

<Hinzufügen>

Startet den Dialog zum Hinzufügen eines Querschnittsrands.

<Löschen>

Löscht den angezeigten Querschnittsrand.

**w<sub>max</sub>**

Grenzwert für die rechnerische Rissbreite nach EN 1992-2, Kapitel 7.3.1, Tabelle 7.101N [mm]. Das Programm schlägt den Tabellenwert vor, der sich nach den nationalen Bestimmungen aus der gewählten Expositionsklasse und der Vorspannung des Bauteils ergibt. Nach Freischaltung des Eingabefeldes kann dieser Wert modifiziert werden.

**max. d<sub>s</sub>**

Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung zur Auswertung der Gleichungen (7.6N), (7.7N) und (7.11) in Kapitel 7.3 der EN 1992-1-1 [mm].

**s<sub>r,max</sub>**

Bei der Berechnung der Rissbreite wird der Rissabstand  $s_{r,max}$  standardmäßig nach Gleichung (7.11) der EN 1992-1-1 ermittelt. Alternativ kann vom Anwender eine Obergrenze für vorgegeben werden, um z.B. die Besonderheiten der Gleichung (7.14) oder der Absätze (4) und (5) des Kapitels 7.3.4 zu berücksichtigen.

**Beiwert  $\xi_1$** 

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2, Gleichung (7.5), legt fest, in welchem Maße Spannstahl gemäß 7.3.2(3) auf die Mindestrissbewehrung angerechnet werden kann. Er geht ferner in die Berechnung des effektiven Bewehrungsgrads nach Kapitel 7.3.4, Gleichung (7.10), und damit in die direkte Berechnung der Rissbreite ein. Bei Flächenelementen ist die Eingabe gesperrt, da hier Spannstahl generell nicht angerechnet wird.

ÖNORM B 1992-1-1:

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  dient auch zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Betonstahl und Spannstahl in den Spannungsnachweisen nach Kapitel 7.2 der Norm.

**Festlegung der Betonzugzone**

Die Festlegung der Zugbereiche, in denen risseverteilende Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2, einzulegen ist, kann entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination (EK) oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen.

**Dickes Bauteil**

DIN EN 1992-1-1:

Gemäß DIN EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2 (5), darf bei dicken Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (NA.7.5.1) berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gl. (7.1) ergeben.

**Mindestbewehrung nach Gl. (17AT)**

ÖNORM B 1992-1-1:

Bei zentrischem Zwang darf die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (17AT) berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gl. (7.1) ergeben.

**Beiwert  $k$** 

Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Betonzugspannungen im Querschnitt in EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2, Gleichung (7.1) .

DIN EN 1992-1-1:

Bei Zwang innerhalb des Bauteils darf  $k$  mit 0,8 multipliziert werden, wobei für  $h$  das Minimum aus Höhe und Breite des Querschnitts oder Teilquerschnitts anzusetzen ist. Bei Zugspannungen infolge außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs gilt  $k = 1,0$ .

**Faktor für  $f_{ctm}$** 

Mit diesem Faktor wird die wirksame Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  in Bezug auf den Mittelwert der Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  festgelegt, und zwar getrennt für die Berechnung der Mindestbewehrung nach Gleichung (7.1) und die Berechnung der Rissbreite nach Gleichung (7.9) der EN 1992-1-1. Die vom Betonalter abhängige Zugfestigkeit ist in Gleichung (3.4) des Kapitels 3.1.2 definiert.

DIN EN 1992-1-1:

Wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, sollte für Gl. (7.1) mindestens eine Zugfestigkeit von 3,0 MN/m<sup>2</sup> für Normalbeton und von 2,5 MN/m<sup>2</sup> für Leichtbeton angenommen werden. Diese Bedingung wird programmseitig erfüllt, sofern der Abminderungsfaktor mit 1,0 vorgegeben wird.

## Einwirkungskombination

Die Einwirkungskombination (EK) für den Nachweis der Rissbreite ergibt sich in der Regel aus der gewählten Expositionsklasse. Alternativ kann eine davon abweichende Kombination gewählt werden.

## Lastdauer; $k_t$

Mit dieser Auswahl wird der Faktor  $k_t$  in Gleichung (7.9) zur Berechnung der Rissbreite festgelegt.

DIN EN 1992-2:

Für Brücken ist stets der Faktor  $k_t = 0,4$  anzunehmen.

## Ermüdung

The screenshot shows a software dialog box titled 'Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-2 - Ermüdung'. It contains several sections for defining fatigue properties:

- General:** Nummer: 1-Dac, Querschnittsart: Polygon, Materialart: C40/50-EN, Bezeichn.: Hauptträger. Buttons: Neu, Kopie, Löschen.
- Warning:** A yellow warning triangle icon with the text 'Es sind weitere Elemente betroffen.'
- Betonstahl, Spannstahl:**
  - Vereinfachter Nachweis
  - Längsbew. dSigma.Rsk,s: 70
  - Schubbew. dSigma.Rsk,b: 32
  - Spannstahl dSigma.Rsk,p: 70 MN/m²
  - Lambda.s, Lambda.b, Lambda.p: (empty)
  - Eta: 1
  - Faktor für Qfat: (empty)
- Beton:**
  - Vereinfachter Nachweis
  - fcd,fat: 16,1 MN/m²
  - Lambda.c: (empty)
- Options:**  Bemessungsvarianten einschränken
- Buttons:** OK, Abbrechen, Hilfe

### $d\sigma_{Rsk,s}$ , $d\sigma_{Rsk,b}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  der Längsbewehrung und Schubbewehrung bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.4 [MN/m²]. Im Dialog wird der national maßgebende Wert nach Tabelle 6.3N Zeile 1 (Stabquerschnitte) bzw. Zeile 2 (Flächenquerschnitte) vorgeschlagen. Für die Schubbewehrung wird dabei der Biegerollendurchmesser mit dem vierfachen Stabdurchmesser angenommen.

### $d\sigma_{Rsk,p}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  des Spannstahls bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.4 [MN/m²]. Im Dialog wird der national maßgebende Wert nach Tabelle 6.4N, Zeile 4, vorgeschlagen.

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

Der Wert für Spannstahl der Klasse 1 wird vorgeschlagen.

### $\lambda_{s}$ , $\lambda_{b}$ , $\lambda_{p}$

Korrekturbeiwert  $\lambda_s$  zur Ermittlung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  aus der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_s$  des Stahls gemäß EN 1992-2, Kapitel NN.2.1 (102) und NN.3.1 (101), für Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl.

### $\lambda_c$

Korrekturbeiwert  $\lambda_c$  zur Berechnung der schadensäquivalenten Betonspannungen gemäß EN 1992-2, Kapitel NN.3.2 (102), für Eisenbahnbrücken.

### Eta

Erhöhungsfaktor  $\eta$  für die Betonstahlspannung der Längsbewehrung. Er dient zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.2 (1), Gl. (6.64).

**f<sub>cd,fat</sub>**

Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.7 (1), Gl. (6.76) [MN/m<sup>2</sup>]. Im allgemeinen gilt:

$$f_{cd,fat} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (6.76)$$

mit

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{s(1-\sqrt{28/t_0})}$$

$s$  ein vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert.

$t_0$  Zeitpunkt der Erstbelastung des Betons.

$k_1 = 0,85$

DIN EN 1992-1-1:

$k_1 = 1,0$

Im Dialog wird  $f_{cd,fat}$  für  $s = 0,2$ ,  $t_0 = 28$  und  $f_{cd}$  gemäß Gl. (3.15) vorgeschlagen.

**k<sub>0</sub>**

DIN EN 1992-2, ÖNORM B 1992-2:

Bei Stäben und Bemessungsobjekten ist der statisch bestimmte Anteil der Vorspannung abzumindern. Im Dialog wird der Grundwert 0,9 (DIN) bzw. 0,95 (ÖNORM) gemäß Kapitel 6.8.3(1)P vorgeschlagen. An Spanngliedkopplungen ist der Grundwert weiter abzumindern.

**Vereinfachter Nachweis**

Im vereinfachten Nachweis ist gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.6(2), die häufige Kombination mit den für die Gebrauchsnachweise benutzten Verkehrslasten maßgebend. Die Nachweismethode für Beton richtet sich nach Kapitel 6.8.7 (2), die zulässige Spannungsschwingbreite für Stahl wird im Dialog gemäß Kapitel 6.8.6(1) vorgeschlagen. Für Schubbewehrung wird dieser Wert wie in Tabelle 6.3N gemindert.

**Bemessungsvarianten einschränken**

Bei Flächenelementen können die Varianten zur Ermittlung der Schwingbreite auf korrespondierende Sätze von Bemessungsschnittgrößen beschränkt werden. Eine nähere Erläuterung ist im Kapitel „Nachweise gegen Ermüdung / Besonderheit bei Flächentragwerken“ zu finden.

**Faktor für Q<sub>fat</sub>**

Erhöhungsfaktor für die in  $Q_{fat}$  definierte zyklische Ermüdungseinwirkung, der bei der Berechnung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  des Betonstahls und Spannstahls berücksichtigt wird. Damit lassen sich z.B. die Vorschriften für den Ermüdungsnachweis von Straßenbrücken nach NN.2.1(101) anwenden.

## Streufaktoren

Dialog: Eigenschaften für Element 6 - EN 1992-2 - Streufaktoren

Querschnitt

- Form
- Schubspannungen
- Material
  - Standardwerte
  - Kriechbeiwerte
- Bettung
- EN 1992-1-1
- EN 1992-2
  - Nachweise
  - Basiswerte
  - Schubquerschnitt
  - Spannungen
  - Rissbreiten
  - Ermüdung
  - Streufaktoren
  - Thermische Berechnung
- Allgemein

Nummer: 1-Dac    Querschnittsart: Polygon    Materialart: C40/50-EN    Neu    Kopie  
 Löschen

Bezeichn.: Hauptträger    ⚠ Es sind weitere Elemente betroffen.

Streufaktoren für die Wirkung aus interner Vorspannung in den Gebrauchsnachweisen.

	r.sup	r.inf
Bauzustand:	1,1	0,9
Endzustand:	1,1	0,9

OK    Abbrechen    Hilfe

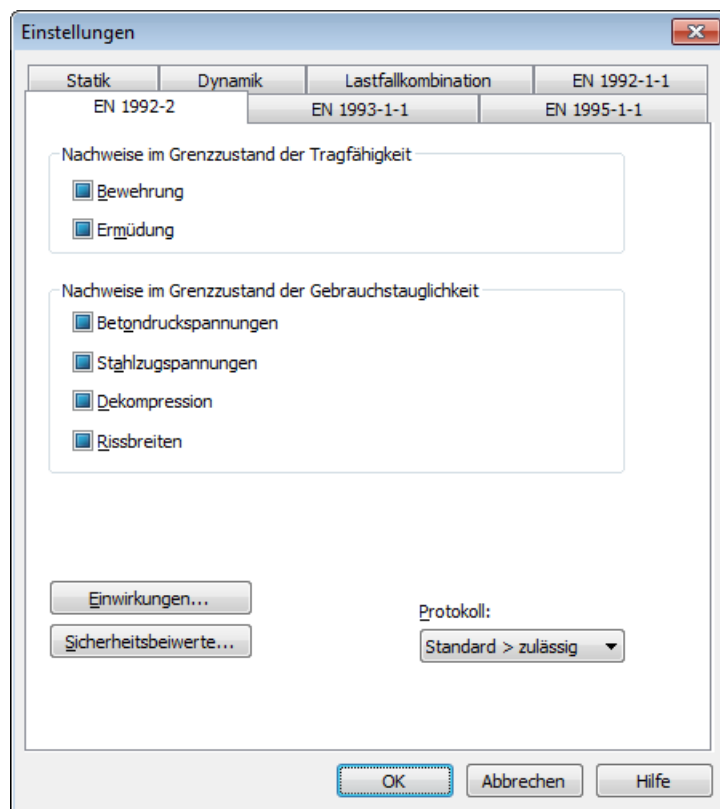
Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft sind in EN 1992-1-1 in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung festgelegt. Im Dialog werden die Werte nach Kapitel 5.10.9(1)P für nachträglichen Verbund vorgeschlagen. Die definierten Streufaktoren werden für die Wirkungen aus interner Vorspannung bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:

- Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen.
- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen (DIN EN 1992-2).

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streufaktoren mit  $r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1$  angenommen.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *EN 1992-2* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Nachweisauswahl

Bei der Nachweisauswahl sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Der Nachweis wird gemäß Einstellung im Querschnittsdialog geführt (s. Querschnittseingaben).
- Der Nachweis wird für alle Querschnitte des Tragwerks geführt.
- Der Nachweis wird für keinen Querschnitt des Tragwerks geführt.

Zugehörige Querschnittseinstellungen werden dabei folgendermaßen zusammengefasst:

Bewehrung	Biegung und Längskraft Querkraft Torsion Robustheit
Ermüdung	Ermüdung für Beton Ermüdung für Betonstahl und Spannstahl
Rissbreiten	Mindest-Rissbewehrung Berechnung der Rissbreite

Mit der Funktion *Bemessungsvorgaben* im Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise* der Datenbasis kann eine Nachweisübersicht angezeigt werden.

### Tragwerksart...

DIN EN 1992-2:

Startet den Dialog zur Auswahl der Tragwerksart.

### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

### Sicherheitsbeiwerte...

Startet den Dialog zur Änderung der Teilsicherheitsbeiwerte.

**Protokoll**

- *Nicht erstellen*: Vom Nachweisprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Protokoll mit tabellarischer Ausgabe der Ergebnisse.
- *Ausführlich*: Zusätzliche Ausgabe der maßgebenden Kombinationsschnittgrößen an den Nachweisorten.
- *Standard > zulässig*: Beschränkung des Standardprotokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.
- *Ausführlich > zulässig*: Beschränkung des ausführlichen Protokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.

**Einzelbemessung**

Mit der Einzelbemessung lassen sich unabhängig vom Gesamtsystem einzelne Querschnitte mit vorgegebenen Schnittgrößen untersuchen. Die nachfolgend aufgeführten Angaben sind in der Tabelle *Einzelbemessung* im Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise* der Datenbasis bzw. in den Ordnern der nationalen Varianten einzugeben.

**Querschnitt**

Nummer des zu bemessenden Querschnitts. Es können Polygon- und Verbundquerschnitte bemessen werden.

**Kombination**

Bemessungssituation nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1.

- 0: Ständige und vorübergehende Bemessungssituation
- 1: Außergewöhnliche Bemessungssituation

**Nsd, Mysd, Mzsd**

Schnittgrößen, die bemessen werden. Bei Polygonquerschnitten beziehen sich die Schnittgrößen auf den Schwerpunkt, bei Verbundquerschnitten auf den Querschnittsnulppunkt.

**Modus**

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.5.2(2) durchgeführt.
- *Dehnungen*: Dehnungszustand für vorhandene Betonstahllagen ermitteln.
- *Dehnungen GZG*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird in der Druckzone eine lineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons verwendet.
- *Dehnungen GZG2*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons nach EN 1992-1-1, Bild 3.2, verwendet, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.
- *Aufnehmbare Belastung*: Ermittlung der aufnehmbaren Belastung in Grenzzustand der Tragfähigkeit.
- *Inaktiv*: Bemessung inaktiv.

Die Berechnung wird bei geöffneter Eingabetabelle mit dem Menüpunkt *Einzelbemessung* oder mit der Seitenansicht ausgeführt.

ÖNORM B 1992-1-1:

In den Modi GZG und GZG2 wird der Spannungszuwachs vorgespannter Stahllagen nach Gl. (14AT) mit dem für den Nachweisquerschnitt eingegebenen Verbundbeiwert  $\xi_1$  ermittelt.



# Vorgespannte Tragwerke

## Interne Vorspannung

Bei interner Vorspannung werden die Spannstränge einschließlich der Spannverfahren und Spannanweisungen über die Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs eingegeben und durch Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* bei der FEM-Berechnung berücksichtigt. Näheres dazu ist dem Handbucheil *Spannbeton* zu entnehmen.

Die Unterscheidung zwischen Vorspannung mit und ohne Verbund erfolgt in den Querschnittseingaben und den Vorgaben für den Lastfall *Kriechen und Schwinden*.

## Externe Vorspannung, Mischbauweise

Externe Vorspannung lässt sich durch direkte Eingabe der äußeren Kräfte berücksichtigen. Bei Mischbauweise sind die zusätzlichen im Verbund liegenden Spannglieder wie oben beschrieben einzugeben.

## Streuung der Wirkungen aus Vorspannung

Bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt für den Bemessungswert der Vorspannkraft nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.8(1):

$$P_{d,t}(x) = \gamma_P \cdot P_{m,t}(x)$$

mit

$P_{m,t}(x)$  Mittelwert der Vorspannkraft zur Zeit  $t$  am Ort  $x$  inkl. Spannkraftverlusten aus Reibung, Ankerschlupf, Kriechen und Schwinden sowie Relaxation.

$\gamma_P$  Teilsicherheitsbeiwert der Vorspannkraft,  $\gamma_P = 1$  nach Kapitel 2.4.2.2(1).

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden in Kapitel 5.10.9(1) zwei charakteristische Werte der Vorspannkraft festgelegt:

$$P_{k,\text{sup}} = r_{\text{sup}} \cdot P_{m,t}(x) \quad \text{Oberer charakteristischer Wert gemäß Gleichung (5.47)}$$

$$P_{k,\text{inf}} = r_{\text{inf}} \cdot P_{m,t}(x) \quad \text{Unterer charakteristischer Wert gemäß Gleichung (5.48)}$$

Die Streufaktoren der internen Vorspannung werden im Querschnittsdialog getrennt für Bau- und Endzustände definiert. Sie kommen bei folgenden Nachweisen zur Anwendung:

- Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen.
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen (DIN EN 1992-2).

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streufaktoren mit  $r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1$  angenommen.

Bei interner Vorspannung sind die empfohlenen landesspezifischen Werte:

- für Spannglieder im sofortigen Verbund und ohne Verbund:

$$r_{\text{sup}} = 1,05 \text{ und } r_{\text{inf}} = 0,95.$$

- für Spannglieder im nachträglichen Verbund:

$$r_{\text{sup}} = 1,10 \text{ und } r_{\text{inf}} = 0,90.$$

ÖNORM B 1992-1-1:

- für Spannglieder im sofortigen Verbund und ohne Verbund:

$$r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1,00.$$

- für Spannglieder im nachträglichen Verbund:

$$r_{\text{sup}} = 1,05 \text{ und } r_{\text{inf}} = 0,95.$$

## Kriechen und Schwinden

Die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens erfolgt ebenso wie bei der Vorspannung durch einen entsprechenden Lastfall (Lastart *Kriechen und Schwinden*) in der FEM-Berechnung. Dabei ist neben dem kriecherzeugenden Dauerlastfall anzugeben, ob die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden soll. Diese Option ist nur bei im Verbund liegenden Spanngliedern sinnvoll.

Die Eingabe der maßgeblichen Kriech- und Schwindbeiwerte für die Berechnung des Lastfalls *Kriechen und Schwinden* erfolgt im Querschnittsdialog. Alternativ können dort die Beiwerte gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 3.1.4 und Anhang B berechnet werden. Der optionale Sicherheitsfaktor  $\gamma_{1t}$  nach EN 1992-2, Tabelle B.101, wird dabei nicht berücksichtigt.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1+\rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \varphi \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,s})$$

Hierin bedeuten

- $\sigma_b(t)$      Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $E_b$          E-Modul des Betons.
- $\rho$            Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt  $t$  (i.d.R.  $\rho = 0,80$ ).
- $\varphi$            Kriechbeiwert für den Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_b(t)$      Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .
- $\varepsilon_{b,0}$      Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.
- $\varepsilon_{b,s}$      Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben. Sofern im Lastfall gewählt, werden im Weiteren die resultierenden Spannungsänderungen im Spannstahl ermittelt. Ein eventueller Einfluss aus der Relaxation des Spannstahls bleibt dabei unberücksichtigt. Nach Zilch/Rogge (2002, S. 256) lässt sich dieser getrennt berechnen (s. nächster Abschnitt) und mit den Änderungen aus Kriechen und Schwinden zu den gesamten zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenfassen:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \Delta\sigma_{pr} + E_p \cdot \Delta\varepsilon_{cpt}$$

mit

- $\Delta\sigma_{pr}$      Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls.
- $\Delta\varepsilon_{cpt}$      Dehnungsänderung des Betons aus Kriechen und Schwinden.
- $E_p$          E-Modul des Spannstahls.

## Relaxation des Spannstahls

Nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.6, ist neben den Spannungsverlusten aus Kriechen und Schwinden des Betons die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  in den Spanngliedern an der Stelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  infolge Relaxation zu berücksichtigen. Die Relaxation des Stahls hängt ab von der Verformung des Betons infolge Kriechen und Schwinden. Diese Wechselwirkung darf nach 5.10.6(1) (b) generell und näherungsweise mit einem Abminderungsbeiwert von 0,8 berücksichtigt werden.

Die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  ist nach 5.10.6(2) für die Ausgangsspannung in den Spanngliedern infolge Vorspannung und quasi-ständigen Einwirkungen zu bestimmen. Näheres ist in Kapitel 3.3.2 der Norm geregelt.

Die Spannkraftverluste werden in den Einwirkungen CSR des Dialogs *EN 1992-2 Einwirkungen* definiert.

DIN EN 1992-1-1:

Die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  darf mit den Angaben der Zulassung des Spannstahls für das Verhältnis Ausgangsspannung zu charakteristischer Zugfestigkeit ( $\sigma_{p0}/f_{pk}$ ) bestimmt werden. Als Ausgangsspannung darf  $\sigma_{p0} = \sigma_{pg0}$  angenommen werden, wobei  $\sigma_{pg0}$  die anfängliche Spannstahlspannung aus Vorspannung und den ständigen Einwirkungen ist.

## Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

Im einzelnen werden folgende Nachweise gemäß EN 1992-2 in Verbindung mit EN 1992-1-1 geführt:

- Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein (Kapitel 6.1).
- Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung (Kapitel 6.1(109)).
- Querkraft (Kapitel 6.2).
- Torsion und kombinierte Beanspruchung (Kapitel 6.3).
- Durchstanzen (Kapitel 6.4).
- Nachweis gegen Ermüdung (Kapitel 6.8).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.4.3, berücksichtigt:

- Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10)$$

Die optionalen Gleichungen (6.10a) und (6.10b) werden nicht genutzt.

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" A_d "+" (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Für die Kombination kommt im Programm  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  zur Anwendung.

ÖNORM B 1990-1:

$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  ist maßgebend.

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" A_{Ed} "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

Im Nachweis gegen Ermüdung kommen alternativ folgende Kombinationen zur Anwendung:

- Häufige Kombination für vereinfachte Nachweise gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.6 (2), in Verbindung mit EN 1990, Kapitel 6.5.3.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Ermüdungskombination für Nachweise mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.3.

$$\left( \sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right) "+" Q_{fat} \quad (6.69)$$

Dabei sind  $Q_{k,1}$  und  $Q_{k,i}$  nicht-zyklische, nicht-ständige Einwirkungen und  $Q_{fat}$  die zyklische Einwirkung aus dem maßgebenden Ermüdungslastmodell.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

## Spannungs-Dehnungslinien

Bei der Querschnittsbemessung kommen die folgenden Kennlinien zur Anwendung:

- Beton: Parabel-Rechteck-Diagramm nach EN 1992-1-1, Bild 3.3. Dabei ist der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit  $f_{cd}$  in EN 1992-2, Gleichung (3.15), zu  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$  mit  $\alpha_{cc} = 0,85$  definiert.

DIN EN 1992-2:

$\alpha_{cc} = 0,85$  für Normalbeton und  $\alpha_{cc} = 0,75$  für Leichtbeton.

ÖNORM B 1992-2:

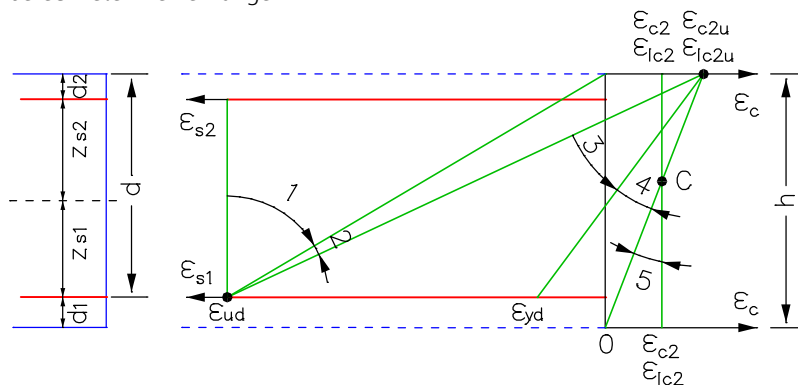
$\alpha_{cc} = 1,0$  für Normalbeton bis einschließlich Festigkeitsklasse C50/60, darüber ist  $\alpha_{cc} = 0,9$  anzunehmen. Für Leichtbeton gilt  $\alpha_{cc} = 0,85$ .

- Betonstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.8 mit ansteigendem oberem Ast, wobei die Maximalspannung zu  $k \cdot f_{yk} / \gamma_s$  mit  $k = 1,05$  nach Tabelle C.1, Klasse A, angenommen wird.
- Spannstahl: Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.10, mit horizontalem oberem Ast gemäß Kapitel 3.3.6 (7) der Norm.

Beim Nachweis gegen Ermüdung werden die Betondruckspannungen mit der Spannungs-Dehnungslinie nach EN 1992-1-1, Bild 3.2 ermittelt.

## Bemessung für Biegung mit oder ohne Normalkraft und Normalkraft allein

Die Bemessung für Längskraft und Biegemoment erfolgt nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.1. Für Platten-, Scheiben- und Schalenelemente mit rechtwinkliger oder schiefwinkliger Bewehrung werden die Bemessungsschnittgrößen analog zur Bemessung nach DIN 1045-1 berechnet. Die für jede Schnittkraftkombination erforderliche Bewehrung am Stahlbetonquerschnitt wird iterativ, nach Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen, unter Beachtung der in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Grenzdehnungslinien ermittelt. Das endgültige Resultat ergibt sich aus dem Extremwert aller berechneten Bewehrungen.



Dehnungsbereiche für die Bemessung mit  $\epsilon_{ud} = 0,9 \epsilon_{uk}$  und  $\epsilon_{uk} = 0,025$  nach Tabelle C.1.

DIN EN 1992-1-1:

$$\epsilon_{ud} = 0,025$$

Der Anwender steuert durch die Vorgabe der Bewehrungsgeometrie und die Auswahl eines von drei Bemessungsmodi das Ergebnis der Bemessung. Bei Querschnitten, die einer Drucknormalkraft ausgesetzt sind, wird die Mindestexzentrizität nach Kapitel 6.1(4) berücksichtigt. Die Betonstauchung nach Kapitel 6.1(5) kann nicht überprüft werden.

### Modus Standard

Dies ist der Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Längskraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Die Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich eingelegt. In den Dehnungsbereichen 4 und 5 wird wie bei symmetrischer Bemessung verfahren.

DIN EN 1992-1-1:

Die bezogene Druckzonenhöhe  $x_d / d$  wird gemäß Kapitel 5.4 (NA.5) und NA.11.5.2(1) wie folgt begrenzt:

$$x_d / d \leq 0,45 \text{ bei Betonfestigkeitsklassen bis C50/60.}$$

$$\leq 0,35 \text{ bei Betonfestigkeitsklassen ab C55/67 und bei Leichtbeton.}$$

### Modus Symmetrisch

Im Gegensatz zur Standardbemessung wird in allen Dehnungsbereichen, falls erforderlich, die Bewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen bestimmten Bewehrungslagen bleiben erhalten.

### Modus Druckglied

Die Bemessung wird symmetrisch durchgeführt. Zusätzlich wird die nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.5.2(2), verlangte Mindestbewehrung ermittelt:

$$A_{s,\min} = 0,10 | N_{Ed} | / f_{yd} \text{ oder } 0,002 A_c, \text{ je nachdem welcher der größere Wert ist} \quad (9.12N)$$

mit

$N_{Ed}$  Bemessungswert der aufzunehmenden Längskraft.

$f_{yd}$  Bemessungswert der Festigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze.

DIN EN 1992-2:

$$A_{s,\min} = 0,15 N_{Ed} / f_{yd} \geq 0,003 A_c \quad (9.12DE)$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$A_{s,\min} = 0,13 N_{Ed} / f_{yd} \geq 0,0026 A_c \quad (30AT)$$

### Berücksichtigung von Spanngliedern im Verbund

In der Bemessung von Stäben und Bemessungsobjekten werden die Schnittgrößen des Betonquerschnitts um die statisch bestimmten Anteile gemindert, wie sie sich aus Vorspannung abzüglich der Verluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation des Spannstahls (CSR) ergeben. Ausgenommen sind die Situationen vor dem Verpressen der Spannglieder. In den verbleibenden Schnittgrößen für den Verbundquerschnitt sind dann nur noch die Zwängungsanteile aus „P+CSR“ und die äußeren Lasten enthalten. Die durch den Benutzer lagemäßig festgelegte Schlaffstahlbewehrung wird bei Bedarf solange erhöht, bis die Verbundschnittgrößen aufgenommen werden können.

Die Lage der Spannstränge im Querschnitt, die Spannkraftverluste aus CSR, die statisch bestimmten Anteile sowie die Schnittgrößen des Betonquerschnitts und Verbundquerschnitts werden im ausführlichen Protokoll ausgegeben.

Da bei Flächentragwerken eine Trennung in statisch bestimmte und unbestimmte Anteile der Schnittgrößen aus Vorspannung nicht möglich ist, wird bei der Bemessung der Längsbewehrung die Vorspannung vollständig auf der Einwirkungsseite berücksichtigt, während auf der Widerstandsseite nur Schlaffstahl und Beton wirksam werden. Die Dehnungsreserven der im Verbund liegenden Spannglieder bleiben folglich ungenutzt.

## Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Ankündigung

Ein Versagen ohne Ankündigung kann bei Spannbetontragwerken durch Einbau einer Mindestbewehrung (Robustheitsbewehrung) gemäß EN 1992-2, Kapitel 6.1(109), verhindert werden. Diese wird nach Gleichung (6.101a) ermittelt:

$$A_{s,\min} = M_{\text{rep}} / (z_s \cdot f_{yk}) \quad (6.101a)$$

mit

$M_{\text{rep}}$  Rissmoment ohne Anrechnung der Vorspannkraft und unter der Annahme, dass die Randzugspannung den Wert  $f_{\text{ctm}}$  annimmt. Bei Bauteilen mit Spanngliedern ohne Verbund oder mit externer Vorspannung wird  $M_{\text{rep}}$  gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.1.1(4), um den Faktor 1,15 erhöht.

$z_s$  Hebelarm der inneren Kräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Die Mindestbewehrung soll nach EN 1992-2, Kapitel 6.1(110), in den Bereichen eingebaut werden, wo unter der charakteristischen Einwirkungskombination Zugspannungen im Beton auftreten. Dabei soll die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung berücksichtigt, die statisch bestimmte Wirkung jedoch vernachlässigt werden.

Im Programm werden alle Spannungen am Bruttoquerschnitt ermittelt. Die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung kann nur bei Stäben und Bemessungsobjekten in Abzug gebracht werden. Bei Flächenelementen wird die Vorspannung ersatzweise mit dem Reduktionsfaktor gemäß Benutzervorgabe abgemindert. Der Hebelarm  $z_s$  der inneren Kräfte wird vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Die ermittelte Bewehrung wird gleichmäßig auf die in der Zugzone liegenden Bewehrungslagen verteilt. Im Bemessungsmodus *Symmetrisch* erhalten die übrigen Lagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten. Für Querschnitte mit Bemessungsmodus *Druckglied* wird keine Robustheitsbewehrung nachgewiesen, da bei der Bemessung für Biegung und Längskraft bereits Mindestdruckbewehrung ermittelt wird.

DIN EN 1992-2:

Das Rissmoment wird für die Randzugspannung  $f_{\text{ctk},0,05}$  ermittelt und gemäß NCI zu Kapitel 9.2.1.1(4) nicht erhöht.

## Oberflächenbewehrung

Zur Vermeidung von Betonabplatzungen kann nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.4, eine Oberflächenbewehrung notwendig sein. Detaillierte Angaben hierzu sind in Anhang J enthalten. Die danach ermittelte Bewehrung lässt sich im Programm durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigen.

DIN EN 1992-2:

Für Brücken ist eine konstruktive Mindestbewehrung nach Kapitel 9.1 (NA.104) erforderlich. Bei vorgespannten Bauteilen ist stets eine Oberflächenbewehrung nach Tabelle NA.J.4.1 des Anhangs J anzuordnen.

ÖNORM B 1992-1-1:

Die Vorschriften nach Anhang J sind nicht normativ.

## Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft umfasst die Ermittlung der Querkraftbewehrung und den Nachweis der Betondruckstreben nach EN 1992-2, Kapitel 6.2. Es gelten folgende Besonderheiten:

- Die Neigung der Querkraftbewehrung wird mit  $90^\circ$  angenommen.
- Der Wert für  $\cot \Theta$  kann vom Benutzer innerhalb der national zugelassenen Grenzen der Gleichung (6.7N) in EN 1992-1-1 frei gewählt werden.

DIN EN 1992-2:

In der Berechnung wird der eingegebene Wert für  $\cot \Theta$  auf den nach Gleichung (6.107aDE) zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung), sofern im Querschnittsdialog nicht der Nachweis mit einem konstanten Wert gewählt wurde. Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

- In der berechneten Bügelbewehrung ist die Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1, Kapitel 9.2.2(5) enthalten. Bei Flächen wird Mindestbewehrung gemäß Kapitel 6.2.1(4) nur dann ermittelt, wenn Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich ist. Bei Stäben wird für die Richtung, für die  $M = Q = 0$  ist, keine Mindestbewehrung berechnet.
- Platten- und Schalenelemente werden für die Querkraft  $q_T = \sqrt{q_{x^2} + q_{y^2}}$  bemessen. Für die zugehörige Längskraft wird, je nachdem was ungünstig wirkt, die Hauptdruck- oder die Hauptzugkraft eingesetzt.

DIN EN 1992-2:

Falls gewählt, wird der Nachweis gemäß Kapitel 6.2.1(10) getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y geführt. Für die zugehörige Längskraft wird dann die in Bewehrungsrichtung wirkende Normalkraft eingesetzt. Wenn Querkraftbewehrung erforderlich ist, wird diese aus beiden Richtungen addiert.

- Es erfolgt **keine** Verminderung der Einwirkung auflagennaher Lasten nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.1(8).
- Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die maßgebenden Werte des Ersatzrechtecks unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie vom Anwender definiert. Die Beiwerte zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe und Nutzhöhe sind ebenfalls vorzugeben. Bei Flächenelementen wird generell mit dem Hebelarm  $z = 0,9 d$  gerechnet.

DIN EN 1992-2:

Alternativ kann der innere Hebelarm aus der Biegebemessung benutzt werden. Der Hebelarm wird nach DIN EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(1), auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,1} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,1}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,1}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone.

- Bei Stabquerschnitten mit interner Vorspannung wird der Bemessungswert der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3(6) mit dem Nennwert  $b_{w,nom}$  der Querschnittsbreite ermittelt.
- Die Notwendigkeit einer Querkraftbewehrung wird nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.2(1) untersucht. Die Besonderheiten der Absätze (2) bis (7) kommen dabei nicht zur Anwendung.
- Die Interaktion von Querkraft und Querbiegung nach EN 1992-2, Kapitel 6.2.106, in den Stegen von Hohlkastenquerschnitten wird nicht geprüft. Gleiches gilt für den Sonderfall gerader Spannglieder nach Bild 6.101.

Nachfolgend sind die verwendeten Formeln der Norm wiedergegeben.

### Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (6.2a)$$

mit mindestens

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \quad (6.2b)$$

Für Leichtbeton gilt

$$V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{1ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \geq (\eta_1 \cdot v_{1,min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d \quad (11.6.2)$$

Dabei ist

$f_{ck}, f_{1ck}$  die charakteristische Betonfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>].

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$  mit  $d$  in mm.

$\rho_1 = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$ .

$A_{sl}$  die Fläche der Zugbewehrung, die mindestens  $(l_{bd} + d)$  über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird (siehe Bild 6.3).

$b_w$  die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts [mm].

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 f_{cd}$  [N/mm<sup>2</sup>].

$N_{Ed}$  die Normalkraft im Querschnitt infolge Lastbeanspruchung oder Vorspannung [N] ( $N_{Ed} > 0$  für Druck). Der Einfluss von Zwang auf  $N_{Ed}$  darf vernachlässigt werden.

$A_c$  die Gesamtfläche des Betonquerschnitts [mm<sup>2</sup>].

$V_{Rd,c}$ ,  $V_{IRd,c}$  der Bemessungswert für den Querkraftwiderstand [N].

$\eta_1$  der Reduktionsfaktor für Leichtbeton nach Gl. (11.1).

Die empfohlenen Werte sind:

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c \text{ für Normalbeton}$$

$$C_{IRd,c} = 0,15 / \gamma_c \text{ für Leichtbeton}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ für Normalbeton} \quad (6.3N)$$

$$v_{l,\min} = 0,028 k^{3/2} \cdot f_{lck}^{1/2} \text{ für Leichtbeton nach 11.6.1(1)}$$

DIN EN 1992-1-1:

$$C_{Rd,c} = C_{IRd,c} = 0,15 / \gamma_c$$

$$k_1 = 0,12$$

$$v_{\min} = (\kappa_1 / \gamma_c) k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

$$v_{l,\min} = (\kappa_1 / \gamma_c) k^{3/2} \cdot f_{lck}^{1/2}$$

mit

$$\kappa_1 = 0,0525 \text{ für } d < 600 \text{ mm}$$

$$= 0,0375 \text{ für } d > 800 \text{ mm}$$

Für  $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$  darf interpoliert werden.

#### Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Der Winkel  $\theta$  zwischen den Betondruckstreben und der rechtwinklig zur Querkraft verlaufenden Bauteilachse ist zu begrenzen:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (6.7N)$$

DIN EN 1992-2:

$$1,0 \leq \cot \theta \leq (1,2 + 1,4 \sigma_{cp} / f_{cd}) / (1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}) \leq 1,75 \quad (6.107aDE)$$

mit

$$V_{Rd,cc} = c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} (1 - 1,2 \sigma_{cp} / f_{cd}) \cdot b_w \cdot z \quad (6.7bDE)$$

Dabei ist

$$c = 0,5$$

$\sigma_{cp}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c \text{ in N/mm}^2.$$

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen ( $N_{Ed} > 0$  als Längsdruckkraft).

Bei Leichtbeton ist der Eingangswert  $V_{Rd,cc}$  aus Gl.(6.7bDE) mit  $\eta_1$  nach Gl.(11.1) zu multiplizieren.

ÖNORM B 1992-1-1:

$$0,6 \leq \tan \theta \leq 1,0 \quad (3AT)$$

Wenn der Querschnitt überdrückt ist, dann darf  $\theta$  im Bereich

$$0,4 \leq \tan \theta \leq 1,0 \quad (4AT)$$

gewählt werden.

Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse ist der Querkraftwiderstand  $V_{Rd}$  der kleinere Wert aus

$$V_{Rd,s} = (A_{sw} / s) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (6.8)$$

und

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (6.9)$$

Dabei ist

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung.



$s$	der Abstand der Bügel untereinander.
$f_{ywd}$	der Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung.
$v_1$	ein Abminderungsbeiwert für die Betonfestigkeit bei Schubrisen.
$\alpha_{cw}$	ein Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt.

Die empfohlenen Werte sind:

$$v_1 = v$$

mit

$$v = 0,6 (1 - f_{ck} / 250) \quad (f_{ck} \text{ in N/mm}^2) \quad (6.6N)$$

$$\alpha_{cw} = 1 \quad \text{für nicht vorgespannte Bauteile} \quad (6.11aN)$$

$$= (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd} \quad (6.11bN)$$

$$= 1,25 \quad \text{für } 0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd} \quad (6.11cN)$$

$$= 2,5 (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0 f_{cd} \quad (6.11cN)$$

Dabei ist

$\sigma_{cp}$  die mittlere Druckspannung im Beton, positiv bezeichnet, infolge des Bemessungswertes der Normalkraft.

Die höchstens wirksame Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung  $A_{sw,max}$  für  $\cot \theta = 1$  ist gegeben durch:

$$(A_{sw,max} \cdot f_{ywd}) / (b_w \cdot s) \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad (6.12)$$

Die zusätzliche Zugkraft in der Längsbewehrung infolge Querkraft ergibt sich nach Gl. (6.18) zu

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot V_{Ed} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (6.18)$$

DIN EN 1992-2:

$$v_1 = \eta_1 \cdot 0,75$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ für Normalbeton, nach Gl.(11.1) für Leichtbeton.}$$

$$\alpha_{cw} = 1,0$$

Gleichung (6.12) wird nicht angewendet.

### Querkraftbewehrung

Der Querkraftbewehrungsgrad ergibt sich aus Gleichung (9.4):

$$\rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin \alpha) \quad (9.4)$$

Dabei ist

$\rho_w$  der Bewehrungsgrad der Querkraftbewehrung. Dieser hat in der Regel nicht kleiner als  $\rho_{w,min}$  zu sein.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung je Länge  $s$ .

$s$  der Abstand der Querkraftbewehrung gemessen entlang der Bauteilachse.

$b_w$  die Stegbreite des Bauteils.

$\alpha$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und der Bauteilachse.

Der empfohlene Wert für die Mindestbewehrung ist:

$$\rho_{w,min} = 0,08 \sqrt{f_{ck} / f_{yk}} \quad (9.5N)$$

DIN EN 1992-1-1:

$$\rho_{w,min} = 0,16 f_{ctm} / f_{yk} \quad (9.5aDE)$$

Bei Platten kann der Wert gemäß Kapitel 9.3.2(2) zwischen dem Null- und Einfachen des vorgenannten Wertes variieren.

Für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt gilt:

$$\rho_{w,min} = 0,256 f_{ctm} / f_{yk} \quad (9.5bDE)$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$\rho_{w,\min} = 0,15 f_{ctm} / f_{yd} \quad (24AT)$$

Bei Platten mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung ist mindestens der 0,6-fache Wert der Mindestquerkraftbewehrung von Balken vorzusehen.

## Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung

Die Bemessung für Torsion geschieht nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.3. Sie beinhaltet die Ermittlung der Schrägzugbewehrung und der Längsbewehrung nach Gleichung (6.28) sowie den Nachweis der Betondruckstreben bei gleichzeitig wirkender Querkraft nach Formel (6.29) der Norm.

Der zu Grunde liegende Ersatzquerschnitt ist, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert. Der Nachweis für Kastenquerschnitte gemäß EN 1992-2, Bild 6.104 wird nicht geführt.

DIN EN 1992-2:

Bei Hohlkastenträgern wird gemäß Kapitel 6.3.2 (NA.106) zusätzlich überprüft, ob die im Zustand I berechnete Hauptdruckspannung  $\sigma_2$  aus Biegung, Längskraft und Torsion den Wert  $f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$  überschreitet. Dazu wird die Längsdruckspannung  $\sigma_{Ed}$  im Abstand  $t_{ef} / 2$  vom Querschnittsrand ermittelt und die Schubspannung aus Torsion zu

$$\tau_{Ed} = T_{Ed} / (2 \cdot A_k \cdot t_{ef}) \text{ angenommen.}$$

### Druckstrebenneigung

Für die Druckstrebenneigung gelten nach 6.3.2(2) die Regeln in Kapitel 6.2.3(2) für Querkraft.

DIN EN 1992-2:

Bei kombinierter Beanspruchung aus Torsion und anteiliger Querkraft ist in Gleichung (6.7aDE) für  $V_{Ed}$  die Schubkraft der Wand  $V_{Ed,T+V}$  nach Gleichung (NA.6.27.1) und in Gleichung (6.7bDE) für  $b_w$  die effektive Dicke der Wand  $t_{ef}$  einzusetzen.

Mit dem gewählten Winkel  $\Theta$  ist der Nachweis sowohl für Querkraft als auch für Torsion zu führen. Die so ermittelten Bewehrungen sind zu addieren.

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + V_{Ed} \cdot t_{ef} / b_w \quad (NA.6.27.1)$$

Alternativ kann im Querschnittsdialog für Torsion eine Druckstrebenneigung von 45° oder 30° (vgl. Kapitel 6.3.2(102)) oder für Querkraft und Torsion ein konstanter Wert  $\cot \Theta$  gewählt werden (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).

### Torsionsbewehrung

Die erforderliche Bewehrung ist gemäß Kapitel 6.3.2(3) zu ermitteln:

$$\Sigma A_{sl} \cdot f_{yd} / u_k = T_{Ed} / 2A_k \cdot \cot \Theta \quad (6.28)$$

bzw.

$$A_{sw} \cdot f_{yd} / s = T_{Ed} / 2A_k \cdot \tan \Theta$$

Dabei ist

$A_{sl}$  die Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Torsionsbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse.

$u_k$  der Umfang der Fläche  $A_k$ .

$s$  der Abstand der Torsionsbewehrung gemessen entlang der Bauteilachse.

$A_k$  die durch die Mittellinien der Wände eingeschlossene Fläche.

Bei näherungsweise rechteckigen Vollquerschnitten ist nach Absatz (5) nur die Mindestbewehrung erforderlich, falls die Bedingung der Gleichung (6.31) erfüllt ist:

$$T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1,0 \quad (6.31)$$

Dabei ist

$T_{Rd,c}$  das Torsionsrissmoment, das nach Ziich (2006, S. 290) zu  $T_{Rd,c} = f_{ctd} \cdot W_T$  ermittelt wird.

$V_{Rd,c}$  der Querkraftwiderstand nach Gleichung (6.2).

DIN EN 1992-1-1:

Die Bedingung (6.31) wird durch folgende Gleichungen ergänzt:

$$T_{Ed} \leq \frac{V_{Ed} \cdot b_w}{4,5} \quad (\text{NA.6.31.1})$$

$$V_{Ed} \left[ 1 + \frac{4,5 T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w} \right] \leq V_{Rd,c} \quad (\text{NA.6.31.2})$$

### Druckstreben­tragfähigkeit

Um die Druckstreben­tragfähigkeit eines auf Torsion und Querkraft beanspruchten Bauteils nicht zu überschreiten, ist folgende Bedingung zu erfüllen:

$$T_{Ed} / T_{Rd,max} + V_{Ed} / V_{Rd,max} \leq 1,0 \quad (6.29)$$

Dabei ist

$T_{Ed}$  der Bemessungswert des Torsionsmoments.

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der Querkraft.

$T_{Rd,max}$  der Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmoments gemäß

$$T_{Rd,max} = 2 v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \quad (6.30)$$

mit  $\alpha_{cw}$  nach Gleichung (6.9) und  $v$  nach Gl. (6.6N) für Normalbeton sowie Gl. (11.6.6N) für Leichtbeton.

DIN EN 1992-1-1:

Für Kompaktquerschnitte wird die Interaktionsgleichung (NA.6.29.1) benutzt:

$$(T_{Ed} / T_{Rd,max})^2 + (V_{Ed} / V_{Rd,max})^2 \leq 1,0 \quad (\text{NA.6.29.1})$$

In Gleichung (6.30) wird für Kastenquerschnitte  $v = \eta_1 \cdot 0,75$  angenommen, in allen anderen Fällen

$v = \eta_1 \cdot 0,525 \cdot \min(1,0; 1,1 - f_{ck}/500)$  gemäß NDP zu 6.2.2(6) mit  $\eta_1 = 1$  für Normalbeton, nach Gl. (11.1) für Leichtbeton.

ÖNORM B 1992-1-1:

Für Vollquerschnitte darf die folgende Interaktionsgleichung benutzt werden:

$$(T_{Ed} / T_{Rd,max})^2 + (V_{Ed} / V_{Rd,max})^2 \leq 1,0 \quad (9AT)$$

## Durchstanzen

Der Nachweis gegen Durchstanzen richtet sich nach EN 1992-1-1, Kapitel 6.4. Eine Erläuterung hierzu ist im Handbuchabschnitt *EN 1992-1-1* zu finden. Der Aufruf erfolgt über das Tragwerksmenü.

## Nachweise gegen Ermüdung

Für die Nachweise können vom Benutzer alternativ zwei Verfahren gewählt werden:

- Vereinfachter Nachweis für die häufige Einwirkungskombination gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.6(2), und EN 1990, Gl. (6.15b), mit den im Gebrauchszustand relevanten Verkehrslasten.
- Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten für die Ermüdungskombination gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 6.8.3, Gl. (6.69), mit der speziell definierten zyklischen Einwirkung  $Q_{fat}$ .

Die Betondruckspannungen im Zustand II werden in beiden Fällen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 3.2 der Norm ermittelt. Die Streuung der Vorspannung wird abweichend von Kapitel 5.10.9 nicht berücksichtigt.

Bei Straßenbrücken entspricht  $Q_{fat}$  dem Ermüdungslastmodell 3 gemäß EN 1991-2, Kapitel 4.6.4. Die Erhöhungsfaktoren nach EN 1991-2, Kapitel 4.6.1 (6), sind bei der Eingabe der Lastordinaten zu berücksichtigen, während die Faktoren nach NN.2.1(101) im Querschnittsdialog definiert werden.

Bei Eisenbahnbrücken ist gemäß EN 1991-2, Kapitel 6.9, in Verbindung mit EN 1992-2, Anhang NN.3, für die Ermittlung der Schwingbreite das Verkehrslastmodell 71 einschließlich des dynamischen Faktors nach EN 1991-2 maßgebend.

DIN EN 1992-2:

Nach Kapitel 6.8.3(1)P ist für den Nachweis der 0,9-fache statisch bestimmte Anteil der Vorspannkraft anzusetzen. An Arbeitsfugen mit Spanngliedkopplung ist der statisch bestimmte Anteil mit dem Faktor 0,75 abzumindern. Die Festlegung des maßgeblichen Abminderungsfaktors erfolgt im Querschnittsdialog.

## Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl

Der Ermüdungsnachweis wird nach Kapitel 6.8 der EN 1992-1-1 geführt. Die Ermittlung der Stahlspannungen erfolgt für Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft sowie für Spannstahl in Stäben und Bemessungsobjekten unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Schub- und Längsbewehrung aus Querkraft und Torsion werden die Spannungen gemäß 6.8.3(3) auf der Grundlage eines Fachwerkmodells mit der Druckstrebenneigung  $\tan \Theta_{fat} = \sqrt{\tan \Theta} \leq 1$  nach Gl. (6.65) berechnet. Spannstahlspannungen in Flächenelementen werden am ungerissenen Betonquerschnitt ermittelt. Für Spannglieder ohne Verbund und externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

DIN EN 1992-1-1:

Die Druckstrebenneigung ist nach Heft 600 des DAfStb, Gl. (H.6-26), zu ermitteln.

### Vereinfachter Nachweis

Nach Kapitel 6.8.6 kann ausreichender Widerstand gegen Ermüdung angenommen werden, wenn unter der häufigen Einwirkungskombination die Spannungsschwingbreite für nichtgeschweißte Bewehrungsstäbe  $70 \text{ MN/m}^2$  und für geschweißte Bewehrungsstäbe  $35 \text{ MN/m}^2$  nicht übersteigt. Die Bedingung nach Kapitel 6.8.6(3) für Kopplungen in Spannbetonbauteilen wird programmseitig nicht überprüft.

DIN EN 1992-1-1:

Für geschweißte Bewehrungsstäbe ist der vereinfachte Nachweis nicht zulässig.

### Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten

Der Nachweis gilt nach Kapitel 6.8.5(3) als erbracht, wenn für Betonstahl und Spannstahl Gl. (6.71) erfüllt ist:

$$\gamma_{F,fat} \cdot \Delta\sigma_{s,equ}(N^*) \leq \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / \gamma_{s,fat} \quad (6.71)$$

mit

$\gamma_{F,fat}$  = 1 gemäß Kapitel 2.4.2.3.

$\gamma_{s,fat}$  = 1,15 für Betonstahl und Spannstahl gemäß Kapitel 2.4.2.4.

$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$  Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite bei  $N^*$  Lastzyklen gemäß den Wöhlerlinien nach Tab. 6.4N für Spannstahl bzw. Tab. 6.3N für Betonstahl.

$\Delta\sigma_{s,equ}(N^*)$  Schadensäquivalente Schwingbreite mit  $\Delta\sigma_{s,equ} = \lambda_s \cdot \Delta\sigma_s$  gem. Gl. (NN.101) bzw. Gl. (NN.106) in EN 1992-2.

$\lambda_s$  Korrekturbeiwert gemäß EN 1992-2, Anhang NN.2 bzw. NN.3.

$\Delta\sigma_s$  Maximale Spannungsschwingbreite aus der zyklischen Einwirkung  $Q_{fat}$ .

### Berechnungsmethode

Als vorhandene Längsbewehrung wird das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung angenommen. Falls damit die Beanspruchung aus der Nachweiskombination im Zustand II nicht aufnehmbar ist, wird mit der vorhandenen Bewehrung und den Nachweisschnittgrößen eine erneute Bemessung durchgeführt.

Die sich aus dem Dehnungszustand im Zustand II bzw. am Fachwerkmodell ergebende maximale Spannungsschwingbreite je Stahllage wird für jede Nachweissituation getrennt ermittelt. Bei Längsbewehrung wird das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl durch Erhöhung mit dem Beiwert  $\eta$  nach Gl. (6.64) berücksichtigt. Wenn bei Längs- oder Schubbewehrung die resultierende Schwingbreite die zulässige Spannungsschwingbreite übersteigt, wird die erforderliche Bewehrung solange iterativ erhöht, bis der Nachweis für alle Situationen erfüllt ist. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* wird die Längsbewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Die zulässigen Spannungsschwingbreiten sowie die Beiwerte  $\eta$  und  $\lambda$  werden vom Benutzer im Querschnittsdialog vorgegeben. Die für den Nachweis maßgebliche, gegebenenfalls erhöhte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll ausgegeben und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermüdung von Beton unter Druckbeanspruchung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Druckbeanspruchung erfolgt für Biegung und Längskraft nach Kapitel 6.8.7 der EN 1992-1-1 am gerissenen Querschnitt. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis für Betonstahl berücksichtigt. Druckstreben von querkraftbeanspruchten Bauteilen werden nicht untersucht.

### Vereinfachter Nachweis

Ausreichender Widerstand gegen Ermüdung kann angenommen werden, wenn die nachfolgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 \text{ für } f_{ck} \leq 50 \text{ MN/m}^2 \quad (6.77)$$

$$\leq 0,8 \text{ für } f_{ck} > 50 \text{ MN/m}^2$$

Dabei ist

$\sigma_{c,max}$  die maximale Druckspannung in einer Faser unter der häufigen Einwirkungskombination (Druckspannungen positiv bezeichnet).

$\sigma_{c,min}$  die minimale Druckspannung in derselben Faser, in der  $\sigma_{c,max}$  wirkt ( $\sigma_{c,min} = 0$  bei Zugspannung).

$f_{cd,fat}$  der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit des Betons nach Gl. (6.76). Dieser Wert wird im Querschnittsdialog vorgegeben.

$$f_{cd,fat} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot (1 - f_{ck}/250) \text{ mit } \beta_{cc}(t_0) \text{ nach Gl. (3.2) und } f_{cd} \text{ nach Gl. (3.15)} \quad (6.76)$$

$$k_1 = 0,85$$

DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1:

$$k_1 = 1,0$$

### Nachweis über schadensäquivalente Betondruckspannungen

Für Eisenbahnbrücken ist der Nachweis nach dem in Anhang NN.3.2 der EN 1992-2 angegebenen Verfahren zu führen. Ausreichender Ermüdungswiderstand darf demnach angenommen werden, wenn folgender Ansatz erfüllt ist:

$$14 \cdot (1 - E_{cd,max,eq}) / \sqrt{1 - R_{equ}} \geq 6 \quad (NN.112)$$

Dabei ist

$R_{equ} = E_{cd,min,eq} / E_{cd,max,eq}$  das Verhältnis der Spannungen.

$E_{cd,min,eq} = \sigma_{cd,min,eq} / f_{cd,fat}$  das minimale Niveau der Druckspannung.

$E_{cd,max,eq} = \sigma_{cd,max,eq} / f_{cd,fat}$  das maximale Niveau der Druckspannung.

$\sigma_{cd,min,eq}$  die untere Spannung der schadensäquivalenten Schwingbreite mit  $N = 10^6$  Lastzyklen.

$\sigma_{cd,max,eq}$  die obere Spannung der schadensäquivalenten Schwingbreite mit  $N = 10^6$  Lastzyklen.

$f_{cd,fat}$  der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit des Betons nach Gl. (6.76).

Die obere und untere Spannung der schadensäquivalenten Schwingbreite soll nach Gleichung (NN.113) ermittelt werden.

$$\sigma_{cd,max,eq} = \sigma_{c,perm} + \lambda_c (\sigma_{c,max,71} - \sigma_{c,perm}) \quad (NN.113)$$

$$\sigma_{cd,min,eq} = \sigma_{c,perm} - \lambda_c (\sigma_{c,perm} - \sigma_{c,min,71})$$

Dabei ist

$\sigma_{c,perm}$  die Druckspannung unter der Ermüdungskombination ohne Lastmodell 71.

$\sigma_{c,max,71}$  die maximale bzw. minimale Druckspannung unter der Ermüdungskombination mit dem Lastmodell 71 und dem dynamischen Beiwert  $\Phi$ .

$\sigma_{c,min,71}$

$\lambda_c$  der Korrekturfaktor zur Berechnung der durch Lastmodell 71 hervorgerufenen Spannungen.

### Besonderheit bei Flächentragwerken

Bei Flächentragwerken kann der Dehnungszustand am gerissenen Betonquerschnitt unter allgemeiner Beanspruchung nicht eindeutig ermittelt werden. Die Bemessung erfolgt deshalb getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y mit den oben näher erläuterten Bemessungsschnittgrößen nach Wolfensberger/Thürlimann bzw. nach Rüschi. Mit der so ermittelten Bewehrung kann die Tragfähigkeit als gesichert angenommen werden.

Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite für Betonstahl und Beton kann diese Methode im Fall von Drill- oder Scherbeanspruchungen zu unrealistischen Ergebnissen führen, wie am folgenden Beispiel deutlich wird:

Gegeben seien zwei identische Sätze von Plattenschnittgrößen:

Satz	mx [kNm/m]	my [kNm/m]	mxy [kNm/m]
1	300	200	100
2	300	200	100

Daraus folgen nach Wolfensberger/Thürlimann als Bemessungsvarianten für die x-Richtung:

Satz	Variante	m [kNm/m]
1	1	$mx +  mxy  = 400$
	2	$mx -  mxy  = 200$
2	1	$mx +  mxy  = 400$
	2	$mx -  mxy  = 200$

Die Drillmomente erzeugen eine Variation der Bemessungsmomente und damit rein rechnerisch eine Spannungsschwingbreite. Im Ermüdungsnachweis könnte dadurch eine Bewehrungserhöhung aufgrund scheinbarer Überbeanspruchung notwendig werden. Bei Bemessungsnormalkräften gilt dies für die Scherkräfte sinngemäß.

Mit der BenutzerAuswahl **Bemessungsvarianten einschränken** im Querschnittsdialog lässt sich der beschriebene Effekt

vermeiden. In diesem Fall werden bei der Ermittlung der Schwingbreite nur noch die korrespondierenden Varianten verglichen, im Beispiel also nur die jeweils ersten und die jeweils zweiten Varianten der beiden Sätze. Bei konstanter Beanspruchung wird somit die Schwingbreite korrekt zu Null ermittelt.

**Diese Alternative kann allerdings nicht sicherstellen, dass immer alle denkbaren Spannungsschwankungen erfasst werden. Die Ergebnisse sind deshalb mit besonderer Aufmerksamkeit zu bewerten. Im ausführlichen Protokoll werden dazu die für den Nachweis maßgeblichen Varianten und Bemessungsschnittgrößen angegeben.**

Bei Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Rüsç für schiefwinklige Bewehrung gelten die dargestellten Zusammenhänge entsprechend.

## Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

Im einzelnen werden folgende Nachweise gemäß EN 1992-2 in Verbindung mit EN 1992-1-1 geführt:

- Begrenzung der Betondruckspannungen (Kapitel 7.2).
- Begrenzung der Betonstahlspannungen ( Kapitel 7.2).
- Begrenzung der Spannstahlspannungen (Kapitel 7.2).
- Nachweis der Dekompression (Kapitel 7.3.1).
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite (Kapitel 7.3.2).
- Berechnung der Rissbreite (Kapitel 7.3.4).
- Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen (DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1).
- Begrenzung der Verformungen (Kapitel 7.4).

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.5.3, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

DIN EN 1992-2:

Zusätzlich werden die Nachweiskombinationen gemäß Tab. 7.101DE für Straßenbrücken und Tab. 7.102DE für Eisenbahnbrücken berücksichtigt.

ÖNORM EN 1992-2:

Zusätzlich werden die Nachweiskombinationen gemäß Tab. 2AT berücksichtigt.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Soweit erforderlich, wird die im Nachweis vorgeschriebene Kombination automatisch aus den Querschnittsvorgaben ermittelt. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Spannungsberechnung

Am ungerissenen Betonquerschnitt wird angenommen, dass sich Beton und Stahl unter Zug- und Druckbeanspruchung elastisch verhalten. Bei Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts werden die Betondruckspannungen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach EN 1992-1-1, Bild 3.2, bestimmt, wobei für Dehnungen ab  $\varepsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen werden die Betonspannungen am Bruttoquerschnitt berechnet. Der Nachweis der Stahlspannungen erfolgt für Betonstahl durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt und für Spannstahl am ungerissenen Betonquerschnitt.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Die ohne Nachweis darstellbaren Spannungen der Einwirkungskombinationen werden immer am Bruttoquerschnitt berechnet.

In den Nachweisen werden dagegen die Spannungen wie folgt ermittelt und graphisch dargestellt bzw. protokolliert:

- Beim Nachweis der Rissbewehrung und der Rissbreite erfolgt die Ermittlung der Betonspannung am Bruttoquerschnitt.
- Beim Nachweis der Dekompression, der Betondruckspannungen und der schiefen Hauptzugspannungen erfolgt die Berechnung der Biegespannung
  - ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern im Verbund für die Situationen vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.
- Der Nachweis der Betonstahl- und Spannstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

Beim Nachweis der Rissbewehrung und Rissbreite, der Dekompression, der Betondruck- und Hauptzugspannungen wird die Längskraft auf die Fläche des Vollquerschnitts bezogen (vgl. Rossner/Graubner 2012, S.228).

ÖNORM B 1992-1-1:

Wenn die Spannungen nach Kapitel 7.2 am gerissenen Querschnitt berechnet werden, soll das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl berücksichtigt werden. Hierfür ist der Zuwachs an Zugkraft  $\Delta F_{tp}$  im Spannstahl wie folgt zu berechnen:

$$\Delta F_{tp} = \xi_1^2 \cdot A_p \cdot \varepsilon(y_p) \cdot E_p \quad (14AT)$$

Dabei ist

$\xi_1$  der Verbundbeiwert nach Gl. (7.5); die Eingabe erfolgt im Dialog für den Nachweis der Rissbreite;

$A_p$  die Querschnittsfläche des im Verbund liegenden Spannstahls;

$\varepsilon(y_p)$  die Dehnung des Betonquerschnitts am Ort  $y_p$  des Spannstahls;

$E_p$  der Elastizitätsmodul des Spannstahls.

Die Vorschrift wird programmseitig bei Stäben und Bemessungsobjekten in Situationen nach dem Verpressen berücksichtigt. Bei Flächenelementen kommt sie nicht zur Anwendung, da Spannstahl hier nur am ungerissenen Querschnitt nachgewiesen wird.

## Begrenzung der Betondruckspannungen

Der Nachweis der Betondruckspannungen erfolgt nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2. Gemäß Kapitel 7.1(2) ist von gerissenen Querschnitten auszugehen, wenn die im ungerissenen Zustand berechnete Zugspannung den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet.

Die Berechnung im gerissenen Zustand erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands mit der endgültigen Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis). Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden im Verbund liegende Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind. Bei Flächenelementen wird, da der allgemeine Dehnungszustand nicht eindeutig bestimmbar ist, die Druckspannung für beide Bewehrungsrichtungen getrennt ermittelt und der Extremwert nachgewiesen.

Für die Expositionsklassen XD, XF und XS ist in den Bau- und Endzuständen die Betondruckspannung  $\sigma_c$  nach EN 1992-2, Kapitel 7.2(102) auf  $0,60 f_{ck}$  unter der charakteristischen Kombination zu begrenzen. Die Grenze darf um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone z.B. durch Querbewehrung umschürt ist. Falls die Spannung im Beton unter quasi-ständiger Kombination die Grenze  $0,45 f_{ck}$  nicht übersteigt, darf nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(3), von linearem Kriechen

ausgegangen werden, anderenfalls ist nichtlineares Kriechen zu berücksichtigen. Beide Bedingungen werden nach Benutzervorgabe berücksichtigt.

In Spannbetonbauteilen nach EN 1992-1-1, Kapitel 5.10.2.2, ist die maximale Betondruckspannung bei Eintragung des Mittelwerts der Vorspannung auf  $0,60 f_{c(t)}$  zu beschränken. Übersteigt die Betondruckspannung den Wert von  $0,45 f_{c(t)}$ , ist die Nichtlinearität des Kriechens zu berücksichtigen. Dabei bezeichnet  $f_{c(t)}$  den Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung.

Im Programm wird der Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannung bei der Situation  $G1+P$  angenommen. Falls in der maßgebenden Kombination eine Situation  $G1+P$  definiert ist, wird für diese Situation die Betonspannung je nach Benutzervorgabe gegen den Grenzwert  $0,45 f_{c(t)}$  oder  $0,60 f_{c(t)}$  geprüft. Der Wert für  $f_{c(t)}$  wird ebenfalls im Dialog festgelegt.

ÖNORM B 1992-2:

Eine Erhöhung der Spannungsgrenze ist auch bei Umschnürung der Druckzone unzulässig.

## Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen

### Betonstahl

Bei Betonstahl wird gemäß EN 1992-1-1, Kapitel 7.2(5) die Begrenzung der Stahlspannung unter der charakteristischen Kombination je nach Benutzerauswahl auf  $0,8 f_{yk}$  oder  $1,0 f_{yk}$  nachgewiesen. Die erhöhte Grenze ist für Spannungen aus indirekten Einwirkungen zulässig. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt am gerissenen Betonquerschnitt. Im Verbund liegende Spannglieder werden bei Stäben und Bemessungsobjekten auf der Widerstandseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind.

### Spannstahl

Bei Spanngliedern im Verbund wird die Begrenzung der Stahlspannung für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen und für Flächenelemente am ungerissenen Betonquerschnitt nachgewiesen. Dabei gilt die Grenze  $0,75 f_{pk}$  unter der charakteristischen Einwirkungskombination.

Für Situationen vor dem Verpressen und für Spannglieder ohne Verbund wird die Spannung  $\sigma_{pm0}(x)$  gemäß EN 1992-1-1, Gleichung (5.43), nachgewiesen. Für externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

DIN EN 1992-1-1:

Der Nachweis wird für die quasi-ständige Kombination mit der Grenze  $0,65 f_{pk}$  geführt. Zusätzlich wird geprüft, ob unter der charakteristischen Kombination das Minimum aus  $0,9 f_{p0,1k}$  und  $0,8 f_{pk}$  nicht überschritten wird.

## Nachweis der Dekompression

Der Nachweis ist für vorgespannte Bauteile mit Verbund der Expositionsclassen XC2-XC4, XD1-XD3 und XS1-XS3 nach Kapitel 7.3.1, Tabelle 7.1N, der Norm zu führen. Danach wird verlangt, dass alle Teile des Spannglieds im Verbund oder des Hüllrohrs mindestens 100 mm tief im überdrückten Beton liegen. Die maßgebende Einwirkungskombination ergibt sich aus der Expositionsklasse.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten erfolgt die Untersuchung für die Spannungen aus Biegung und Normalkraft. Dabei wird ein gerissener Querschnitt angenommen, falls die Zugspannung unter der maßgebenden Einwirkungskombination den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet. Im übrigen gelten die oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

Bei Flächenquerschnitten wird von einem ungerissenen Querschnitt ausgegangen. Für den Nachweis ist die in Richtung des Spannglieds wirkende ebene Betonspannung maßgebend.

Als Ergebnis wird die „Drucktiefe“, d.h. der geringste Abstand des Spannglieds oder Hüllrohrs von der Zugzone bzw. vom Querschnittsrand ausgegeben. Dieser Wert ist negativ, wenn das Spannglied in der Zugzone liegt.

DIN EN 1992-2:

Die Nachweisbedingungen ergeben sich je nach gewählter Tragwerksart entweder gemäß Tabelle 7.101DE (Straßenbrücken) oder 7.102DE (Eisenbahnbrücken) und sind unabhängig von der Expositionsklasse. Im Endzustand dürfen nach 7.3.1(105) keine Zugspannungen an dem Rand auftreten, der dem Spannglied am nächsten liegt. Im Bauzustand sind je nach Ausführung des Bauteils Randspannungen von  $0,85 \cdot f_{ctk;0,05}$  oder die in Tabelle 7.103DE angegebenen Grenzspannungen zugelassen.



ÖNORM B 1992-2:

Tabelle 2AT ist maßgebend mit der Einwirkungskombination gemäß Expositionsklasse und den Ergänzungen der Fußnote c. Nach Kap. 9.2.1 ist nachzuweisen, dass der Beton innerhalb einer Distanz von 200 mm vom Rand des Spanngliedes oder des Hüllrohrs unter Druck steht. Vereinfachend darf der Grenzzustand der Dekompression angenommen werden, wenn in der vorgedrückten Zugzone (also an dem dem Spannglied zugewandten Querschnittsrand) die Spannung der Randfaser Null wird.

DIN EN 1992-2, ÖNORM B 1992-2:

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines ungerissenen Betonquerschnitts.

Der betreffende Rand wird im Programm wie folgt ermittelt:

- Stäbe und Bemessungsobjekte: Wenn der dem Spannglied nächstgelegene Randpunkt oberhalb des Schwerpunkts liegt, wird die Spannung auf der Oberseite, anderenfalls auf der Unterseite des Querschnitts nachgewiesen.
- Flächenelemente: Der Nachweis wird für den oberen bzw. unteren Querschnittsrand geführt, wenn das dem Nachweispunkt nächstgelegene Spannglied oberhalb bzw. unterhalb der Schwereebene des betrachteten Elements liegt. Spannglieder außerhalb des Elements werden dabei in einer Entfernung bis zur fünffachen Querschnittshöhe berücksichtigt.

Bei nicht eindeutiger Spanngliedführung wird der Nachweis für beide Seiten geführt. Für Flächenelemente ist je nach Benutzerwahl die Hauptzugspannung  $\sigma_1$  oder eine der Längszugspannungen  $\sigma_x$  bzw.  $\sigma_y$  maßgebend. Mit letzterer kann der Nachweis auf die Richtung der Vorspannung beschränkt werden, wenn die Schnittkraftsysteme entsprechend ausgerichtet sind.

## Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung

DIN EN 1992-2:

Wird in Brückenlängsrichtung vorgespannt und die Brückenquerrichtung als nicht vorgespannte Konstruktion ausgeführt, ist nach Tabelle 7.101DE (Straßenbrücken) bzw. 7.102DE (Eisenbahnbrücken) nachzuweisen, dass unter der seltenen Einwirkungskombination die im Zustand I ermittelten Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung die Werte der Tabelle 7.103DE nicht überschreiten.

Der Nachweis kann bei Bedarf durch Kontrolle der Randspannungen aus der seltenen Kombination in der graphischen Oberfläche erfolgen.

## Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wird in EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.2 geregelt. Sie ist nach 7.3.2(1) in den Bereichen einzulegen, wo Zug zu erwarten ist. Die Festlegung der Zugbereiche kann im Querschnittsdialog entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* erhalten die nicht gezogenen Betonstahllagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten.

Nach EN 1992-2, Kapitel 7.3.2, Bild 7.101, soll bei profilierten Querschnitten jeder Teilquerschnitt (Gurte und Stege) einzeln nachgewiesen werden. Dies ist unter Berücksichtigung beliebiger polygonaler Querschnittsgeometrien nicht möglich. Das Programm ermittelt deshalb die Mindestbewehrung immer am Gesamtquerschnitt. Bei rechteckigen Vollquerschnitten kommt dabei Gleichung (7.2), in allen anderen Fällen Gleichung (7.3) zur Anwendung.

### Ermittlung der Mindestbewehrung

Die Ermittlung der Mindestbewehrung  $A_{s,min}$  erfolgt nach Gleichung (7.1) der Norm:

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (7.1)$$

Dabei ist

- $A_{ct}$  die Fläche der Betonzugzone bei Erstrissbildung im Zustand I. Das Programm skaliert hierzu die Biegemomente der Einwirkungskombination soweit, dass die maximale Randspannung im Zustand I den Wert  $f_{ct,eff}$  annimmt.
- $\sigma_s$  die maximal zulässige Spannung in der Betonstahlbewehrung in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser des Betonstahls.
- $k$  der Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen gemäß Eingabe, der je nach Querschnittshöhe zwischen 0,65 und 1,0 variieren kann.

DIN EN 1992-1-1:

Bei Zwang innerhalb des Bauteils dürfen diese Werte mit 0,8 multipliziert werden, bei Zugspannungen infolge außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs soll  $k = 1,0$  angenommen werden.

$f_{ct,eff}$	die effektive Betonzugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung gemäß Eingabe. Der Wert ist mit $f_{ctm}$ oder niedriger anzunehmen, falls die Rissbildung vor Ablauf von 28 Tagen erwartet wird. Die vom Betonalter abhängige Zugfestigkeit ist in Gleichung (3.4) des Kapitels 3.1.2 definiert. Um dem Schwinden Rechnung zu tragen, sollte mindestens eine Zugfestigkeit von 2,9 MN/m <sup>2</sup> angenommen werden. DIN EN 1992-1-1: Wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, sollte mindestens eine Zugfestigkeit von 3 MN/m <sup>2</sup> für Normalbeton und von 2,5 MN/m <sup>2</sup> für Leichtbeton angenommen werden.
$k_c$	der Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor der Erstrissbildung. $k_c = 1,0$ bei reinem Zug Für Rechteckquerschnitte und Stege von Hohlkästen oder T-Querschnitten: $k_c = 0,4 (1 - \sigma_c / (k_1 \cdot h / h^*) / f_{ct,eff}) \leq 1$ (7.2) Für Gurte von Hohlkästen und T-Querschnitten: $k_c = 0,9 \cdot F_{cr} / A_{ct} / f_{ct,eff} \geq 0,5$ (7.3)
$\sigma_c$	die mittlere Betonspannung im untersuchten Teil des Querschnitts mit $\sigma_c = N_{Ed} / (b \cdot h)$ (7.4)
$N_{Ed}$	die Normalkraft im untersuchten Querschnittsteil (Druckkraft positiv) unter der maßgebenden Einwirkungskombination.
$h^*$	$= \min(h; 1,0 \text{ m})$ .
$k_1$	der Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Normalkraft $N_{Ed}$ auf die Spannungsverteilung: $k_1 = 1,5$ für Drucknormalkraft $k_1 = 2 h^* / (3 h)$ für Zugnormalkraft
$F_{cr}$	der Absolutwert der Zugkraft im Gurt unmittelbar vor Rissbildung. Die Zugkraft wird durch Integration der Zugspannungen innerhalb der Fläche $A_{ct}$ gewonnen.

Im Querschnittsdialog wird der größte vorhandene Stabdurchmesser  $\phi_s$  angegeben (dort mit  $d_s$  bezeichnet). Daraus ergibt sich mit den folgenden Gleichungen der Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  als Eingangswert für die Tabelle 7.2N:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot h_{cr} / (2(h-d)) \quad \text{für Biegung} \quad (7.6N)$$

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot h_{cr} / (8(h-d)) \quad \text{für zentrischen Zug} \quad (7.7N)$$

Dabei ist

$h$  die Gesamthöhe des Querschnitts.

$d$  die statische Nutzhöhe bis zum Schwerpunkt der äußersten Lage der Bewehrung.

$h_{cr}$  die Höhe der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung unter der maßgebenden Einwirkungskombination.

Mit dem Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  und der zulässigen Rissbreite  $w_{max}$  ergibt sich nach Tabelle 7.2N die zulässige Betonstahlspannung  $\sigma_s$  für Gleichung (7.1). Dabei wird innerhalb der Tabelle linear interpoliert, außerhalb für  $w_k$  linear und für  $\sigma_s$  quadratisch extrapoliert.

Wenn gleichzeitig der Nachweis der Rissbreite zu führen ist, überprüft das Programm, ob durch Einlegen der ermittelten Mindestbewehrung die vorgegebene Rissbreite nach Kapitel 7.3.4 eingehalten wird. Bei Bedarf wird die Mindestbewehrung bis zum Erreichen der Nachweisgrenze iterativ erhöht. Im Protokoll wird die erhöhte Bewehrung dann durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

DIN EN 1992-1-1:

Der Grenzdurchmesser  $\phi_s^*$  für Tabelle 7.2DE wird mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (4(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad \text{für Biegung} \quad (7.6DE)$$

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (8(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad \text{für zentrischen Zug} \quad (7.7DE)$$

Gemäß Kapitel 7.3.2 (NA.5) darf bei dickeren Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (NA.7.5.1) berechnet werden. Es braucht jedoch nicht mehr Bewehrung eingelegt zu werden, als sich nach Gl. (7.1) ergibt. Die vorgenannten Regelungen kommen gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung, während die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung für langsam erhärtende Betone nach Absatz (NA.6) ungenutzt bleibt.

ÖNORM B 1992-1-1:

Tabelle 7.2N wird durch Tabelle 8AT ersetzt. Die Stahlspannung  $\sigma_s$  wird nach Gl. (19AT) bestimmt. Der Grenzdurchmesser ist wie folgt zu modifizieren:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \cdot k_c \cdot k \cdot h_{cr} / (4(h-d)) \geq \phi_s^* \cdot f_{ct,eff} / 2,9 \quad (21AT)$$

Bei zentrischem Zug ist je Bauteilseite  $h_{cr} / 2$  anzusetzen.

Bei Bauteilen unter zentrischem Zwang darf die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (17AT) ermittelt werden. Die Vorschrift kommt gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung. Die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung bei langsam erhärtenden Betonen wird im Programm nicht genutzt.

### Besonderheit bei Spannbetontragwerken

Spannglieder im Verbund, die in der Zugzone liegen, dürfen nach den Vorschriften des Kapitels 7.3.2(3) auf die Mindestbewehrung angerechnet werden, sofern ihr Achsabstand zu den Betonstahllagen nicht mehr als 150 mm beträgt. Die Anrechnung erfolgt durch Addition des Terms

$$\xi_1 \cdot A_p' \cdot \Delta\sigma_p$$

zur linken Seite der Gleichung (7.1). Dabei ist

$A_p'$  die Querschnittsfläche der in  $A_{c,eff}$  liegenden Spannglieder im Verbund.

$A_{c,eff}$  der Wirkungsbereich der Bewehrung gemäß Bild 7.1. Die Ermittlung von  $A_{c,eff}$  ist im übernächsten Abschnitt beschrieben.

$\xi_1$  das angepasste Verhältnis der Verbundfestigkeiten zwischen Betonstahl und Spannstahl nach Gleichung (7.5).

$\Delta\sigma_p$  die Spannungsänderung in den Spanngliedern.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden Spanngliedlagen im Verbund, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind, mit dem im Querschnittsdialog eingegebenen Wert für  $\xi_1$  angerechnet. Bei Flächenelementen kann Spannstahl generell nicht berücksichtigt werden.

Nach Absatz (4) des Kapitels 7.3.2 wird bei Bauteilen aus Spannbeton keine Mindestbewehrung in den Querschnitten benötigt, in denen unter der charakteristischen Einwirkungskombination und der charakteristischen Vorspannung der Betrag der Betonzugspannung  $\sigma_{ct,p}$  kleiner als  $f_{ct,eff}$  ist. Diese Bedingung wird im Programm automatisch berücksichtigt.

DIN EN 1992-2:

Nach Absatz (NA.104) ist keine Mindestbewehrung in den Bereichen erforderlich, in denen die Betondruckspannung unter der charakteristischen Kombination am Querschnittsrand dem Betrag nach größer als 1 N/mm<sup>2</sup> ist. Diese Bedingung wird im Programm ebenfalls berücksichtigt.

ÖNORM B 1992-2:

Der Wert wird gemäß Kapitel 9.2.2.1 mit  $\sigma_{ct,p} = -1$  N/mm<sup>2</sup> festgelegt.

## Berechnung der Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch direkte Berechnung nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.3.4, für alle Querschnitte, in denen unter der Einwirkungskombination gemäß Benutzerauswahl Zugspannungen im Zustand I auftreten. Der Stabdurchmesser  $\phi$  ( $d_s$  im Dialog) der Betonstahlbewehrung und die maßgebende Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  werden im Querschnittsdialog vorgegeben.

Die Durchführung des Nachweises gliedert sich programmseitig in folgende Schritte:

- Dehnungszustand II unter der Nachweiskombination mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 3.2 ermitteln. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden dabei alle im Verbund liegenden Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt.
- Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,eff}$  nach Bild 7.1 bestimmen (s. nächster Abschnitt), Betonstahllagen und Spannstahllagen innerhalb  $A_{c,eff}$  ermitteln.
- Bewehrungsgrad berechnen:

$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 \cdot A_p') / A_{c,eff} \quad (7.10)$$

$\xi_1$  Verbundbeiwert lt. Benutzervorgabe.

$A_s, A_p'$  Betonstahl, Spannstahl innerhalb  $A_{c,eff}$ .

- Für jede Betonstahllage einzeln bestimmen:

### Differenz der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = [\sigma_s - k_t \cdot f_{ct,eff} / \rho_{p,eff} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})] / E_s \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (7.9)$$

Dabei ist

$$\alpha_e = E_s / E_{cm}$$

$\sigma_s$  die Betonstahlspannung aus dem Dehnungszustand II. Bei Spanngliedern wird dieser Wert durch den Spannungszuwachs  $\Delta\sigma_p$  ersetzt.

DIN EN 1992-1-1:

$$\sigma_s = \sigma_{s2} + 0,4 f_{ct,eff} (1/\rho_{p,eff} - 1/\rho_{tot})$$

$\sigma_{s2}$  = Betonstahlspannung aus Dehnungszustand II

$f_{ct,eff}$  die wirksame Betonzugfestigkeit gemäß Vorgabe.

$k_t$  der Faktor für die Dauer der Lasteinwirkung:

0,6 bei kurzzeitiger und 0,4 bei langfristiger Lasteinwirkung.

DIN EN 1992-2:

Für Brücken ist stets der Faktor  $k_t = 0,4$  anzunehmen.

### Maximaler Rissabstand

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi / \rho_{p,eff} \quad (7.11)$$

Dabei ist

$\phi$  der Stabdurchmesser gemäß Eingabe.

$c$  die Betondeckung bezogen auf die Längsbewehrung. Diese wird im Programm zu  $d_1 - \phi / 2$  angenommen, wobei  $d_1$  der kleinste Achsabstand der Betonstahlbewehrung vom Querschnittsrand innerhalb  $A_{c,eff}$  ist.

$k_1$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung. Er wird im Programm zu 0,8 angenommen, dem empfohlenen Wert für gute Verbundeigenschaften.

$k_2$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung:  
0,5 für Biegung; 1,0 für reinen Zug.

$k_3, k_4$  Die empfohlenen landesspezifischen Werte sind  $k_3 = 3,4$  und  $k_4 = 0,425$ .

DIN EN 1992-1-1:

$$k_1 \cdot k_2 = 1, k_3 = 0 \text{ und } k_4 = 1 / 3,6$$

$$s_{r,max} \leq \sigma_s \cdot \phi / (3,6 \cdot f_{ct,eff})$$

ÖNORM B 1992-1-1:

$$k_3 = 0 \text{ und } k_4 = 1 / (3,6 \cdot k_1 \cdot k_2) \leq \rho_{p,eff} \cdot \sigma_s / (3,6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot f_{ct,eff}) \quad (22AT)$$

$$s_{r,max} = \phi / (3,6 \cdot \rho_{p,eff}) \leq \sigma_s \cdot \phi / (3,6 \cdot f_{ct,eff}) \quad (23AT)$$

Wenn im Querschnittsdialog der Rissabstand vorgegeben wurde, ersetzt dieser den Wert nach Gleichung (7.11). Damit lassen sich die Besonderheiten der Gleichungen (7.13) und (7.14) sowie der Absätze (4) und (5) des Kapitels 7.3.4 berücksichtigen.

### Rechenwert der Rissbreite

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (7.8)$$

Im Protokoll wird die Lage mit der größten rechnerischen Rissbreite nachgewiesen.

- Bei vollständig gezogenem Querschnitt erfolgt die Untersuchung für jede der beiden effektiven Zugzonen getrennt. Das Maximum wird im Protokoll ausgegeben.

Falls der Nachweis der Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite nicht gewählt ist, ermittelt das Programm automatisch eine zur Einhaltung der Rissbreite erforderliche Rissbewehrung. Dazu erfolgt eine Bemessung mit der für die Berechnung der Rissbreite maßgebenden Nachweiskombination. Die so ermittelte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Die Rissbreite wird dann für die endgültige Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis) nachgewiesen und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermittlung des Wirkungsbereichs $A_{c,eff}$

Der Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,eff}$  definiert nach EN 1992-1-1, Bild 7.1, den Bereich eines rechteckigen, einachsigen beanspruchten Betonquerschnitts, in dem die Modellannahmen nach Heft 466 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) anwendbar sind. Die Übertragung dieses Modells auf beliebige Querschnitte und Beanspruchungssituationen ist programmseitig möglich, liegt jedoch im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders.

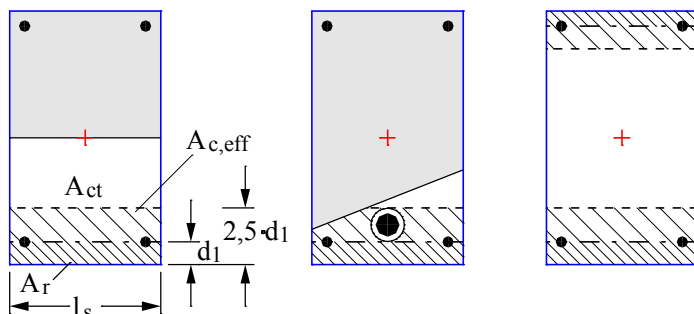
Bei der Bestimmung von  $A_{c,eff}$  wird im Programm folgendermaßen vorgegangen:

- Zugzone  $A_{ct}$  im Zustand I ermitteln, bei Berechnung der Mindestbewehrung mit der zum Erstriss führenden Beanspruchung, bei Berechnung der Rissbreite mit der Nachweiskombination gemäß Expositionsklasse.
- Schwerelinie der Bewehrung als Regressionsgrade durch die Betonstahllagen in der Zugzone bestimmen. Im Ebenen Stabwerk und bei Flächenelementen wird eine horizontale Linie durch den Schwerpunkt der gezogenen Bewehrungslagen angenommen.
- Abgeschnittene Restfläche  $A_r$  bis zum Rand und Summe der Schnittlängen  $l_s$  ermitteln. Der mittlere Randabstand wird dann zu  $d_1 = A_r / l_s$  angenommen, allerdings nicht kleiner als der kleinste Randabstand der Betonstahllagen in der Zugzone.
- Schwerelinie um den Betrag  $1,5 \cdot d_1$  parallel verschieben. Mit  $h - d = d_1$  ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß 7.3.2(3) zu  $h_{c,ef} = 2,5 \cdot (h - d) \leq h / 2$ .

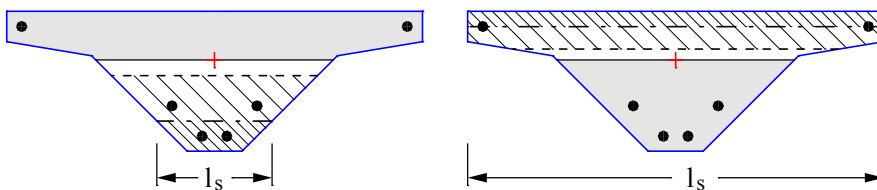
Dieser Wert wird gemäß DIN EN 1992-1-1 bzw. ÖNORM B 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2(3), auf  $(h - x) / 2$  begrenzt ( $x =$  Druckzonenhöhe im Zustand I).

- Das sich so ergebende Polygon wird mit der Zugzone verschnitten und definiert dann den Wirkungsbereich  $A_{c,eff}$ .
- Wenn alle Betonstahllagen des Querschnitts gezogen sind, werden zwei Zonen ermittelt, und zwar eine für die Lagen oberhalb des Schwerpunkts und eine zweite für die Lagen unterhalb des Schwerpunkts. Die Fläche jeder Zone wird auf  $A_c / 2$  begrenzt.
- DIN EN 1992-1-1 und ÖNORM B 1992-1-1:  
Falls im Querschnittsdialog die Mindestbewehrung für dickere Bauteile unter zentrischem Zwang gewählt wurde, ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß Bild NA.7.1 d) bzw. Gl. (17AT) zu  $h_{eff} \geq 2,5 d_1$ .

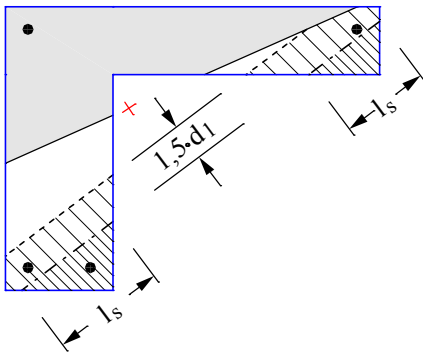
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die vom Programm ermittelten Wirkungsbereiche in typischen Situationen. Der letzte Fall (Randbalken) weicht von den Modellannahmen in Heft 466 jedoch soweit ab, dass eine Anwendung fragwürdig ist.



Wirkungsbereich der Bewehrung am Rechteckquerschnitt unter einachsiger Biegung, Normalkraft mit Doppelbiegung und zentrischem Zug



Wirkungsbereich der Bewehrung an einem Brückenquerschnitt unter einachsiger Biegung



Wirkungsbereich der Bewehrung an einem Randbalken unter einachsiger Biegung

## Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen

DIN EN 1992-2:

Bei vorgespannten Straßenbrücken mit schlanken Stegen ist nach Kapitel 7.3.1 (NA.111) die Schubrissbildung zu begrenzen. Es ist nachzuweisen, dass die schiefen Hauptzugspannungen unter der Wirkung von Querkraft und Torsion die Werte von  $f_{ctk;0,05}$  nicht überschreiten. Der Nachweis ist im Zustand I für die häufige Kombination zu führen.

Bei vorgespannten Eisenbahnbrücken sind die Hauptzugspannungen nach Kapitel 7.3.1 (NA.112) ebenso zu begrenzen. Allerdings darf der Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen beschränkt werden, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen. Diese Option kann im Querschnittsdialog gewählt werden. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Im Programm werden durch Querschnittsanalyse alle Schubkenngrößen aus Querkraft und Torsion für den Querschnittsrand ermittelt. Die Schubspannungen aus Querkraft werden gemäß Auswahl im Querschnittsdialog entweder nach der Theorie dickwandiger Profile oder durch Mittelung über die Querschnittsbreite bestimmt. Die schiefe Hauptzugspannung lässt sich dann für jeden Querschnittspunkt berechnen:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2 + 4\tau_{xz}^2}$$

mit

$\sigma_x$  Längsspannung aus Biegung und Längskraft unter Beachtung der oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

$\tau_{xy}$  Randschubspannung in Richtung y aus Querkraft und Torsion.

$\tau_{xz}$  Randschubspannung in Richtung z aus Querkraft und Torsion.

Der Winkel zwischen  $\sigma_1$  und  $\sigma_x$  ergibt sich zu:

$$\tan 2\vartheta_1 = \frac{-2\tau}{\sigma_x}$$

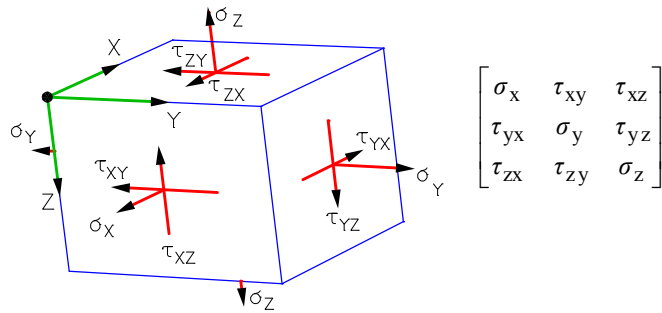
mit

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} \text{ als resultierende Randschubspannung.}$$

Im Protokoll wird der Maximalwert für  $\sigma_1$  mit dem zugehörigen Querschnittspunkt nachgewiesen.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen wird der Nachweis für die Hauptzugspannungen am Bruttoquerschnitt geführt. Der räumliche Spannungszustand ist durch folgenden Spannungstensor beschrieben:



mit

$\sigma_x, \sigma_y$  Längsspannungen aus Biegung und Normalkraft.

$\sigma_z = 0$ .

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$  Schubspannung aus Drillmoment und Scherkraft mit linearem Verlauf über die Querschnittshöhe.

$\tau_{xz} = \tau_{zx}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_x$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_x / h$  in der Schwereebene.

$\tau_{yz} = \tau_{zy}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_y$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_y / h$  in der Schwereebene.

Durch schichtweise Bestimmung des Spannungstensors und Lösung des Eigenwertproblems für die drei Hauptspannungen wird die maximale Hauptspannung  $\sigma_1$  mit ihrer Höhenlage  $z$  bezüglich der Querschnittsoberkante ermittelt. Diese werden zusammen mit den zugehörigen Spannungskomponenten im Ergebnisprotokoll nachgewiesen.

## Begrenzung der Verformungen

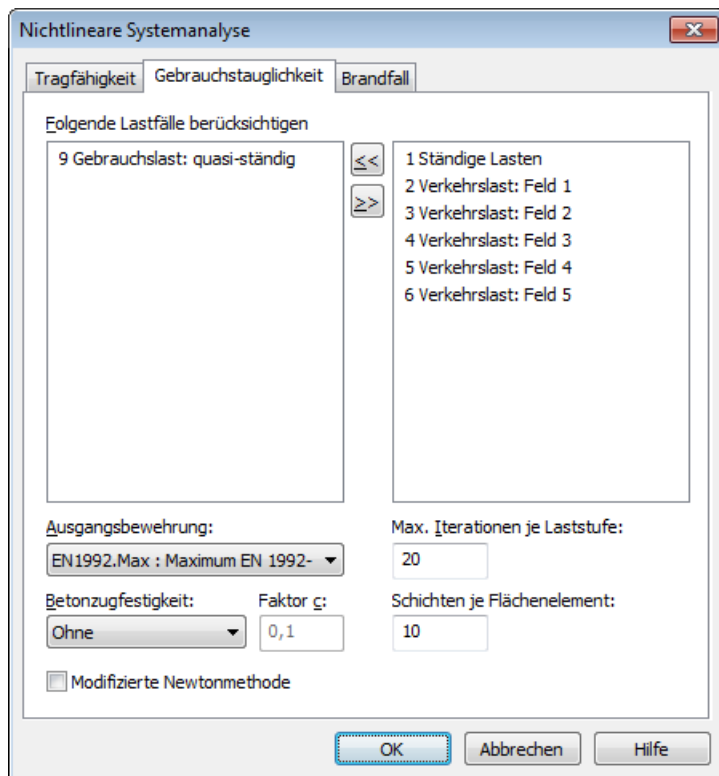
Nach EN 1992-1-1, Kapitel 7.4.1, dürfen die Verformungen eines Bauteils oder Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild beeinträchtigen.

Eine konkrete Berechnungsmethode zur direkten Berechnung der Verformungen nach Kapitel 7.4.3 ist in der Norm nicht angegeben.

Im Programmsystem InfoCAD kann ein wirklichkeitsnaher Nachweis im Rahmen der Nichtlinearen Systemanalyse für Stab- und Schalentragwerke unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten geführt werden. Der Widerstand von im Verbund liegenden Spanngliedern geht z.Z. nicht in die Berechnung ein.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Definition von Nachweissituationen über die Funktion *Lastgruppe* im Belastungsdialog durch Zusammenstellung der maßgebenden Einzellastfälle. Dabei sind die veränderlichen Lasten mit den Kombinationsbeiwerten  $\psi_2$  für die quasi-ständige Kombination zu wichten.
- Auswahl der Nachweissituationen im Dialog *Nichtlineare Systemanalyse / Gebrauchstauglichkeit* der Berechnungseinstellungen für die FEM- bzw. Stabwerksberechnung.
- Einstellen der im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Bewehrung im Auswahlfeld *Ausgangsbewehrung* (Maximum aus Biegung, Robustheit, Rissesicherung und Ermüdung).
- Ausführen der FEM- bzw. Stabwerksberechnung zur Ermittlung der Verformungen im Zustand II.
- Überprüfung der graphisch oder tabellarisch wiedergegebenen Systemverformungen.



Eine ausführliche Beschreibung der Nichtlinearen Systemanalyse ist dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.



## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Die sich ergebende Biege-, Robustheits- und Rissbewehrung, das resultierende Maximum sowie die Querkraft- und Torsionsbewehrung werden ebenfalls für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt.

Im Protokoll werden zu jedem Berechnungsort die Bemessungsschnittgrößen und erforderlichen Bewehrungen bzw. nachgewiesenen Spannungen oder Rissbreiten ausgegeben. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte werden als Warnungen gemeldet und am Nachweisort gekennzeichnet. Das ausführliche Protokoll dokumentiert zusätzlich die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen.

### Spanngliedreaktionen

$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$d_p, d_{p,min}$	Tiefe der Spannglieder bzw. Hüllrohre in der Betondruckzone im Nachweis der Dekompression [mm].

### Spannungen bei Stäben und Bemessungsobjekten

$\sigma_x$	Längsspannungen in den Nachweisen der Dekompression und der Betondruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_1, \sigma_x, \tau_{max}$	DIN EN 1992-2: Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und Schubspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_s, \Delta\sigma_s$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd}, \Delta\sigma_{cd}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,y}, \Delta\sigma_{sb,z}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus $Q_y$ und $Q_z$ [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,T}, \Delta\sigma_{sl,T}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus Torsion und für Torsionslängsbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Spannungen bei Flächenelementen

$\sigma_T$	Betonspannung in Spanngliedrichtung im Nachweis der Dekompression [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_1$	DIN EN 1992-2, ÖNORM B 1992-2: Längsspannungen in x- oder y-Richtung bzw. Hauptzugspannungen im Nachweis der Dekompression (abhängig von Benutzervorgabe) [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_2$	Hauptdruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$	DIN EN 1992-2: Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Schubspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sx}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in x-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sy}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd,x}, \Delta\sigma_{cd,x}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck in
$\sigma_{cd,y}, \Delta\sigma_{cd,y}$	x- und y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{s,b}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Biegebewehrung

$A_s$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> ] bei Stäben und Bemessungsobjekten.
$a_{sx}, a_{sy}$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Flächenelementen in x- und y-Richtung.

### Bewehrung aus Querkraft

$a_{sbx}, a_{sby}, a_{sb}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_x, q_y$ und $q_r$ .
$A_{sb,y}, A_{sb,z}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m] von Stäben und Bemessungsobjekten aus $Q_y$ und $Q_z$ .
$A_{sl}$ für $a_{sb}=0$	Längsbewehrung [cm <sup>2</sup> ] von Flächenelementen.
$z_y, z_z$	Innerer Hebelarm [m] aus Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .
$\Delta F_{tdy}, \Delta F_{tdz}$	Zusätzliche Zugkraft [kN] in der Längsbewehrung infolge Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .

**Torsionsbewehrung**

$A_{sb,T}$  Torsionsbügelbewehrung [cm<sup>2</sup>/m] von Stäben und Bemessungsobjekten aus  $M_x$ .

$A_{sl,T}$  Torsionslängsbewehrung [cm<sup>2</sup>] von Stäben und Bemessungsobjekten aus  $M_x$ .

**Bemessungswerte**

$V_{Rd,ct}, v_{Rd,ct}$  Aufnehmbare Bemessungsquerkraft ohne Schubbewehrung [kN, kN/m].

$v_{Rd,max}$  Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Flächenelementen [kN/m].

$V_{Rd,max}$  Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Stäben und Bemessungsobjekten [kN].

$T_{Rd,max}$  Bemessungswert des maximal aufnehmbaren Torsionsmomentes [kNm].

$Q/V_{Rd} + M_x/T_{Rd}$  Bei Kompakt- und Kastenquerschnitten:  $Q/V_{Rd,max} + M_x/T_{Rd,max}$

DIN EN 1992-1-1:

Bei Kompaktquerschnitten:  $(Q/V_{Rd,max})^2 + (M_x/T_{Rd,max})^2$

ÖNORM B 1992-1-1:

Bei Vollquerschnitten:  $(Q/V_{Rd,max})^2 + (M_x/T_{Rd,max})^2$

**Rissbreiten**

$w_{k,oben}$  Berechnete Rissbreite an der Ober- und Unterseite des Querschnitts,

$w_{k,unten}$  bei Flächenelementen jeweils getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y.

# Beispiele

## Straßenbrücke in Massivbauweise

Dieses Beispiel zeigt die Funktionen und Fähigkeiten des Programmmoduls *EN 1992-2 Brückennachweise* anhand einer einfachen Brückenplatte auf.

Das Beispiel wurde in Anlehnung an Teil 1 des Buches

Bauer, Thomas / Müller, Michael  
 Straßenbrücken in Massivbauweise nach DIN-Fachbericht

**Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.**

Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.

2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003

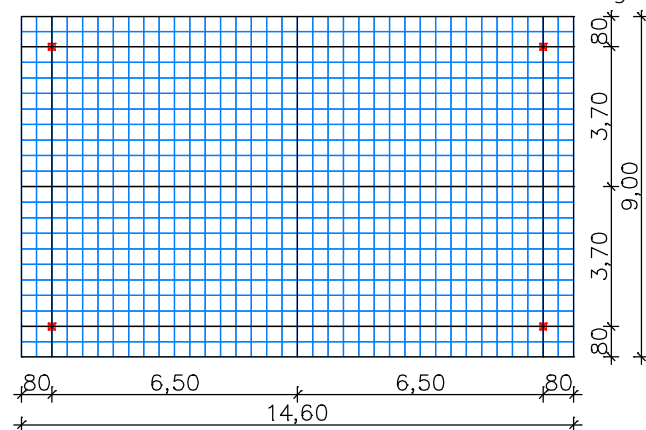
gewählt.

Programmseitig teilen sich die Brückennachweise in folgende Abschnitte:

- Querschnittsabhängige Nachweisvorgaben
- Lastmodell 1
- Kombination der Einwirkungen
- Nachweise durchführen

### Aufgabenstellung

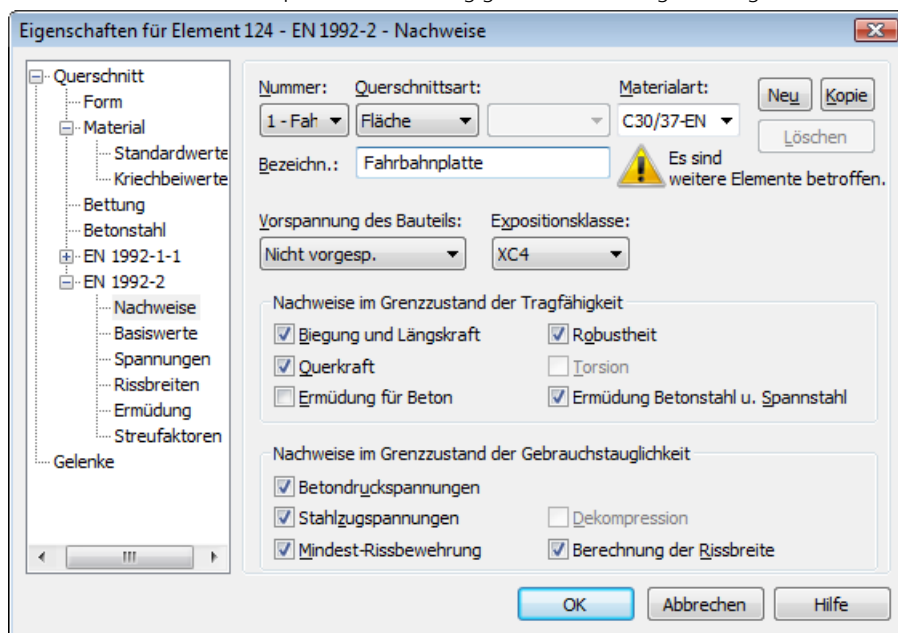
Zu berechnen ist eine Straßenbrücke. Diese soll als einfeldrige Stahlbetonplatte ausgeführt werden.



Beton C30/37-EN, Plattendicke 0,85 [m]

Das abgebildete FEM-System wird mit Schalenelementen generiert. Die Lagerung ist zwängungsfrei auszuführen. Die Lastfälle für Eigenlast, Ausbaulasten sowie alle Lasten, die nicht zum Lastmodell 1 nach EN 1991-2 gehören, werden wie gewohnt eingegeben.

Anschließend werden die querschnittsabhängigen Nachweisvorgaben ergänzt:



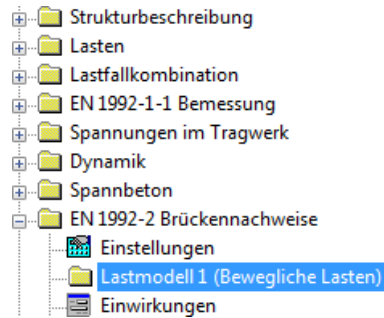
## Lastmodell 1

Das Lastmodell 1 besteht aus 2 Teilen:

- (a) Doppelachse (Tandemsystem TS)
- (b) Gleichmäßig verteilten Flächenlasten UDL

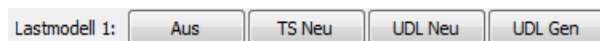
Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt.

Da nicht in allen Fällen von vorne herein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, können unterschiedliche Varianten von Laststellungen definiert werden.

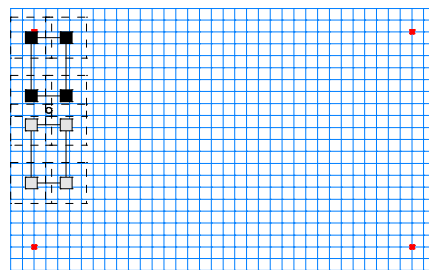
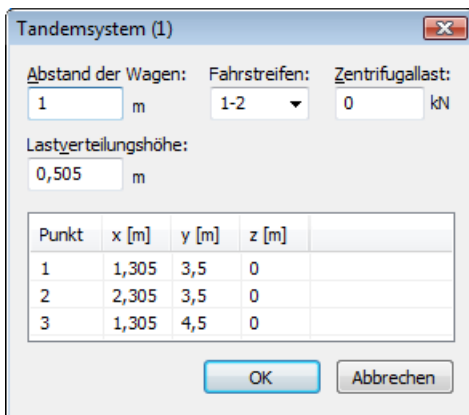


Im Ordner *EN 1992-2 Brückennachweise* wird mit der rechten Maustaste auf *Lastmodell 1* geklickt und im Kontextmenü die Option *Neu* gewählt.

Es wird die 1. Variante des Lastmodells angelegt und der Eingabedialog gestartet.

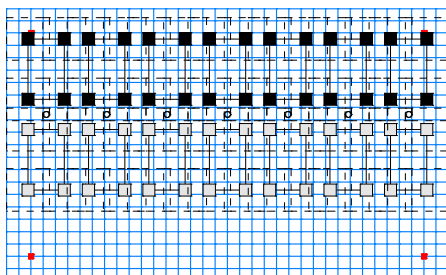


Nach Klicken auf *TS neu* können Schwerpunkt und Fahrtrichtung des 1. Tandemsystems festgelegt werden.



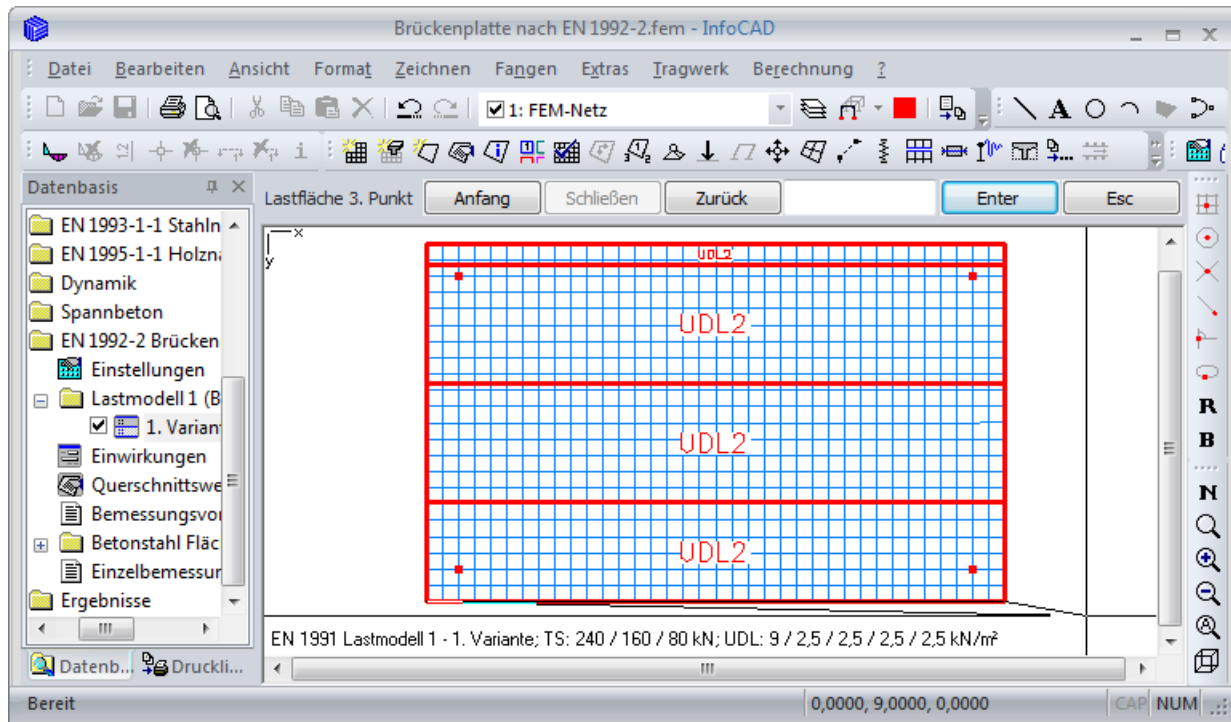
Die Eigenschaften der Tandemsystemstellung werden im Dialog eingestellt.

Der Fahrstreifen 1 wird in Fahrtrichtung links angenommen und durch eine dunkle Schraffur gekennzeichnet. Die sich aus der Lastverteilungshöhe ergebende Fläche wird gestrichelt dargestellt.

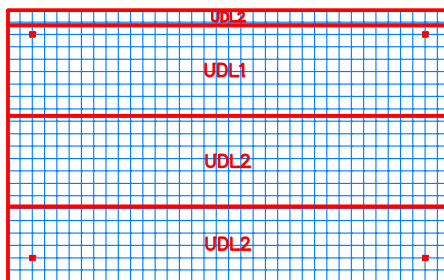
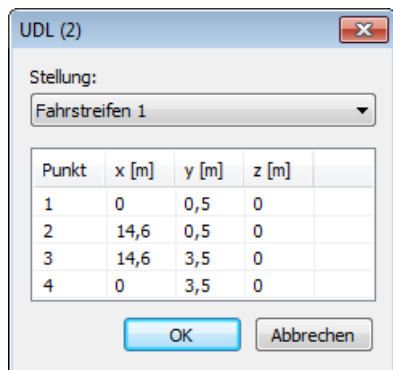


Nach Markieren des Tandemsystems lassen sich die gewünschten Laststellungen durch Kopieren oder Generieren erzeugen. Dabei können die üblichen Fangfunktionen wie *Mitte* oder *Ende* angewendet werden.

Anschließend werden nach Klick auf die Option *UDL neu* fortlaufend die Lastflächen des UDL-Systems definiert.



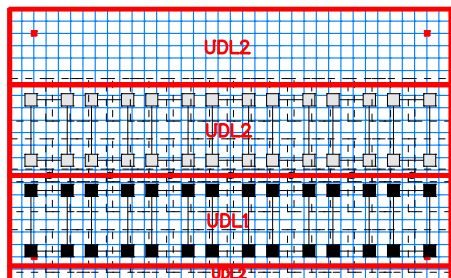
Zunächst werden alle Lastflächen als UDL2 (Fahrstreifen 2) angenommen. Nach Doppelklicken auf die obere UDL-Fläche ist hierfür *Fahrstreifen 1* einzustellen.




Fertige UDL-Flächen (TS wurde ausgeblendet)

Damit ist die 1. Variante des Lastmodells 1 definiert. Zur Eingabe der 2. Variante ist mit der rechten Maustaste erneut in der Datenbasis auf *Lastmodell 1* zu klicken und im Kontextmenü die Option *Neu* zu wählen.

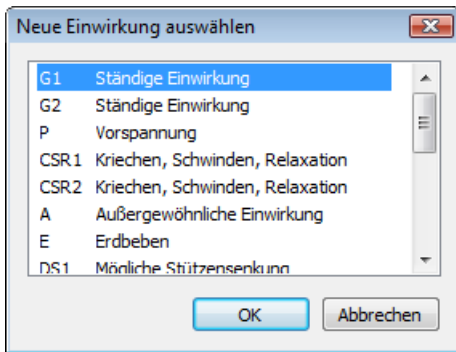
Mittels der Zwischenablage können alle TS- und UDL-Stellungen auch in die 2. Variante kopiert und anschließend verändert werden (hier: Rotation um 180°).



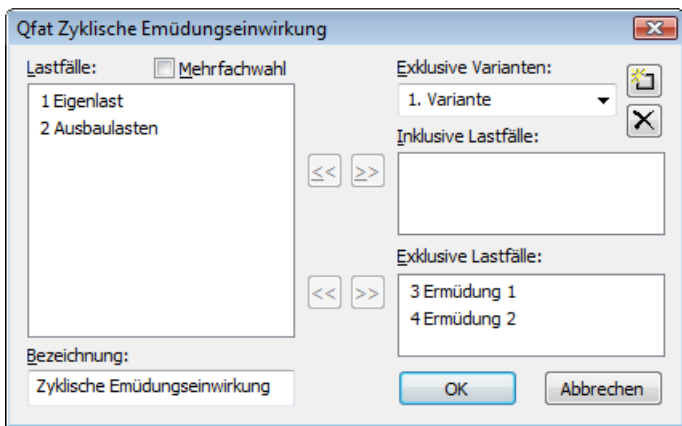
Das Lastmodell 1 ist damit vollständig beschrieben und kann berechnet werden. Dies erfolgt zusammen mit den Lastfällen im Rahmen der FEM-Berechnung. Die Ergebnisse aller Laststellungen werden einzeln abgespeichert und in einem Ordner  *Lastmodell 1 (Bewegliche Lasten)* zusammengefasst.

## Kombination der Einwirkungen

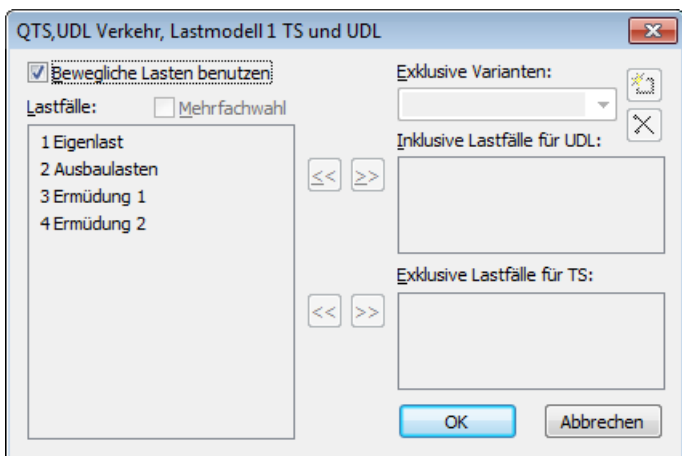
Zur Beschreibung der Einwirkungen und deren Kombination ist in der Datenbasis die Option *Einwirkungen* zu öffnen und dann auf *Einfügen* zu klicken.



Die zu betrachtenden Einwirkungen werden im Dialog ausgewählt. Anschließend werden ihnen Lastfälle zugeordnet.



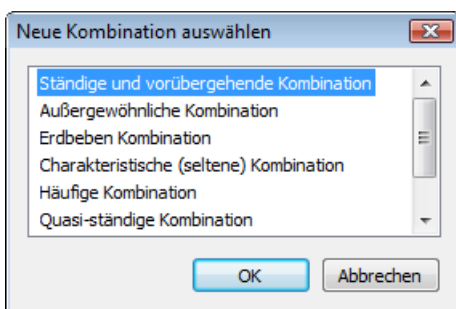
Bei veränderlichen Einwirkungen lassen sich mehrere Lastfälle zu inklusiven und exklusiven Gruppen zusammenfassen. Zusätzlich können bei Bedarf mehrere sich gegenseitig ausschließende Varianten definiert werden.



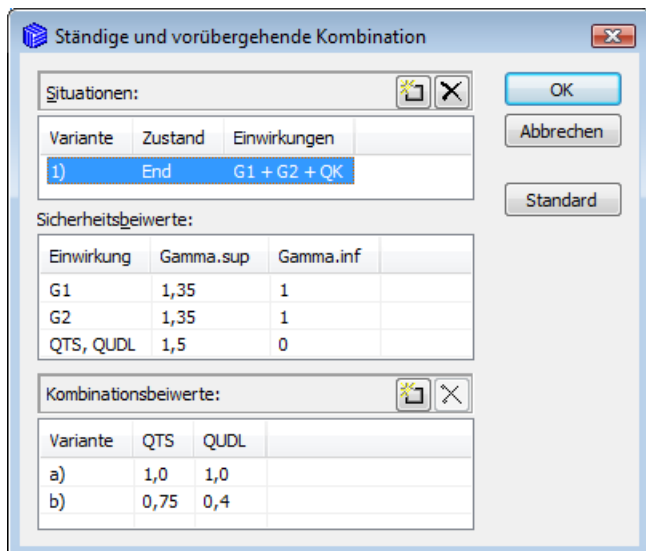
Die veränderlichen Einwirkungen QTS und QUDL werden direkt aus dem Lastmodell 1 genommen.

Dazu muss die Option *Bewegliche Lasten* aktiviert werden.

Alternativ können auch frei definierte Lastfälle oder Kombinationen verwendet werden.

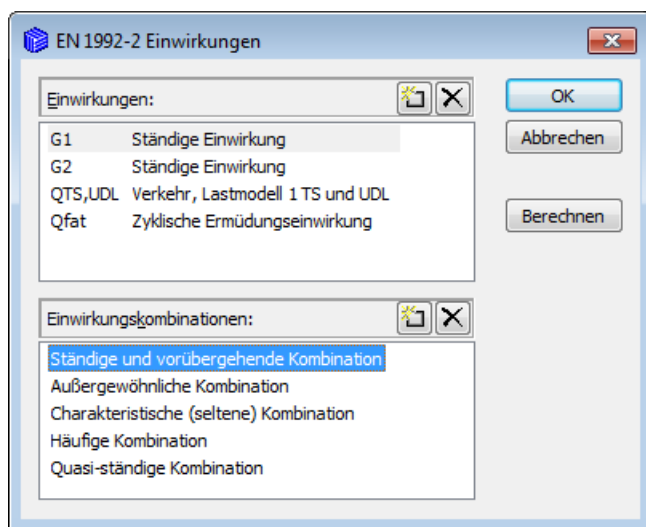


Nachdem den Einwirkungen die zugehörigen Lasten zugeordnet worden sind, werden die für die Nachweise benötigten Kombinationen ergänzt.



Mit den Sicherheits- und Kombinationsbeiwerten gemäß EN 1990 ergeben sich die abgebildeten Varianten.

Der Vorschlag kann hier mit *OK* akzeptiert werden, um mit der Auswahl weiterer Kombinationen fortzufahren.



Zur Ermittlung der extremalen Schnittkräfte aus den beschriebenen Kombinationen ist anschließend auf *Berechnen* zu klicken.

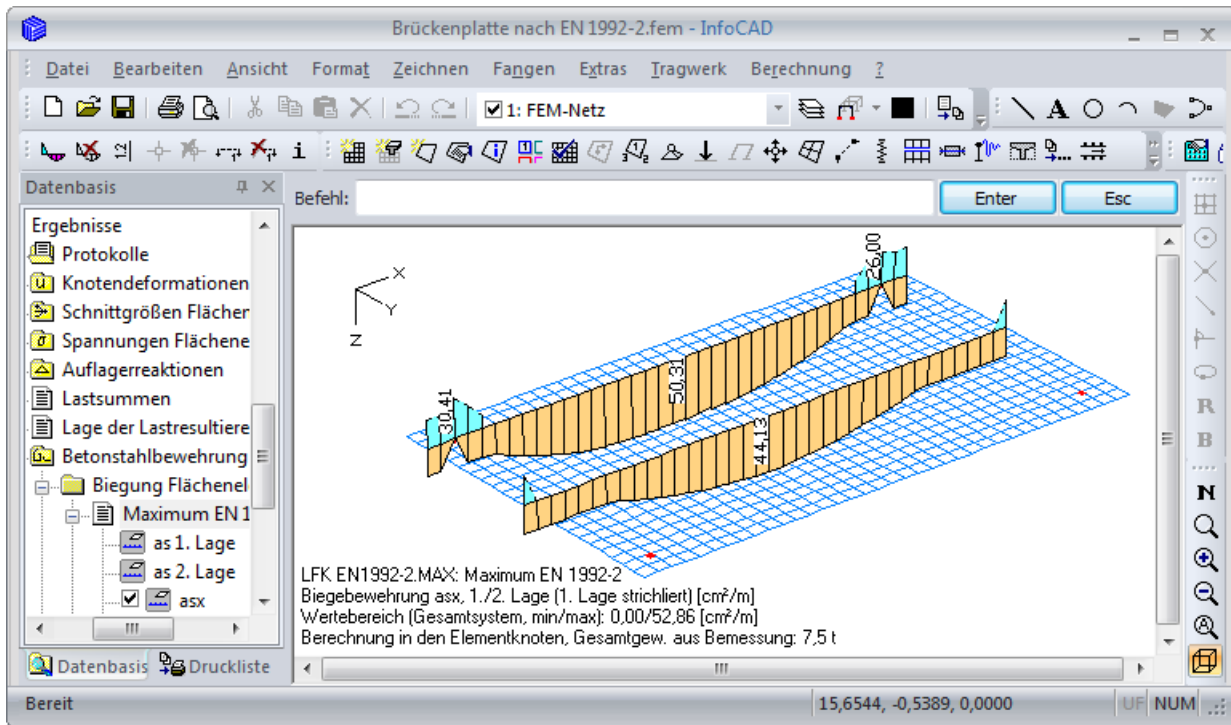
Das Programm kombiniert die Ergebnisse der verwendeten Lastfälle, Kombinationen sowie des Lastmodells und stellt diese wie gewohnt zur Verfügung:

- [-] Schnittgrößen Flächenelemente
  - [+] 1. Ständige und vorübergehende Situation, EN 1992-2
  - [+] 1. Seltene (charakteristische) Situation, EN 1992-2
  - [+] 1. Häufige Situation, EN 1992-2
  - [+] 1. Quasi-ständige Situation, EN 1992-2
  - [+] 1. Ermüdungssituation, Basisanteil, EN 1992-2
  - [+] 1. Ermüdungssituation, zyklischer Anteil, EN 1992-2

Die Berechnung der Kombinationen ist hier nur optional, da das Nachweisprogramm diese ohnehin durchführt.

## Nachweise durchführen

Der Start des Nachweisprogramms *EN1992-2 Brückennachweise* erfolgt aus dem Berechnungsmenü. Die Ergebnisse sind anschließend aus der Datenbasis abrufbar.



Maximum der oberen und unteren Längsbewehrung aus Biegung mit Normalkraft, Rissesicherung und Ermüdung.

Nachfolgend ist das Kurzprotokoll für ein einzelnes Element in Feldmitte abgedruckt:

### Bemessung nach EN 1992-2:2005

Die Nachweise gelten für Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton mit und ohne Verbund. Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit den spezifischen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten kombiniert.

**Alle Nachweise erfolgen für die Extremwerte der Einwirkungen.**

### Bemessungsvorgaben

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung M R B Q T	Ermüd. S P C	Riss-br.	De-komp.	Spannungen Druck S P
1	XC4	Nicht vorgesp.	x x x x .	x . .	x	.	x x .

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

### Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- As1 Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh-dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	As1 [cm²] vorh. max	Red. Vor-spg.
1	C30/37-EN	.	ST	500	1,75	.	0,00 0,00	.



**Schubquerschnitte**

bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).  
 kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d.  
 z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
 tef Wanddicke des Torsionskastens.  
 K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl.(6.29).

Qu.	Breite [m]		Nutzhöhe		Höhe [m]		Nutzhöhe		Torsionsquerschn. [m]			
	bw	bw.nom	bn [m]	kb	h	h.nom	d [m]	kd	z1	z2	tef	K.
1	1,000	.	.	.	0,850	.	0,780	0,90	.	.	.	.

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
 Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
 k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
 kt Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung bei Berechnung der Rissbreite.  
 Faktor Abminderungsfaktor für fctm nach Kap. 7.3.2 (As,min) bzw. 7.3.4 (wk).  
 sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (7.11).

Qu.	wmax	ds	Beiwerte			sr,max	fctm-Faktor		Kombination für Nachweis	
	[mm]	[mm]	Xil	k	kt	[mm]	As,min	wk	As,min	wk
1	0,30	28,0	.	1,00	0,4	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.  
 Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.  
 (CK), (QK) Charakteristische, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	fck(t)	zul.sigma.c(t)	zul.sigma.c	zul.sigma.s	Dekompression Spannung
	[MN/m <sup>2</sup> ]	(CK, QK)	(CK) (QK)	(CK) (QK)	
1	.	.	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fyk

**Vorgaben für den Nachweis gegen Ermüdung**

Die Betondruckspannungen werden nach Bild 3.2 berechnet.

fcd,fat Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung.  
 dSigma.Rsk,s Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Längsbewehrung.  
 dSigma.Rsk,b Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Schubbewehrung.  
 dSigma.Rsk,p Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite des Spannstahls.  
 Lambda.s,b,p Zug. Korrekturbeiwerte für schadensäquivalente Schwingbreite.  
 Lambda.c Korrekturbeiwert für schadensäquivalente Betonspannungen.  
 Eta Erhöhungsfaktor für Betonstahlspannung nach 6.8.2(2)P.  
 Nw. SPC Nachweis für (S) Betonstahl, (P) Spannstahl, (C) Beton.  
 (x) Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten - Ermüdungskomb.  
 (+) Vereinfachter Nachweis nach 6.8.6(2) - häufige Kombination.  
 Fak. Qfat Faktor für Qfat zur Ber. der schadensäquivalenten Schwingbreite für Betonstahl und Spannstahl nach Anhang NN.2.1(101).

Qu.	Nw.	fcd,fat	dSigma [MN/m <sup>2</sup> ]				Lambda			Eta	Fak.
	SPC	[MN/m <sup>2</sup> ]	Rsk,s	Rsk,b	Rsk,p	s	b	p	c		
1	x.	.	58,00	73,00	.	1,00	1,00	.	.	1,00	*

\*) Die Berechnung der Schwingbreite wird bei diesem Querschnitt auf die korrespondierenden Varianten von Bemessungsgrößen beschränkt.

**Spannungsberechnung für Flächenelemente**

Betonspannungen werden am Bruttoquerschnitt berechnet.  
 Der Nachweis der Betonstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

**Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe im Grenzzustand der Tragfähigkeit**

	Beton	Betonstahl	Spannstahl
	(gamma.c)	(gamma.s)	(gamma.s)
Ständige und vorübergehende Komb., Erdbeben	1,50	1,15	1,15
Außergewöhnliche Kombination	1,20	1,00	1,00
Nachweis gegen Ermüdung	1,50	1,15	1,15

**Betonstahl für Flächenelemente**

Qu.	Lage	Güte	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	do x	du x	asx	do y	du y	asy	as
				[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[m]	[m]	[cm <sup>2</sup> /m]	fix
1	1	500M	200000	0,060	.	0,00	0,080	.	0,00	.
	2	500M	200000	.	0,060	0,00	.	0,080	0,00	.

**NACHWEISE FÜR FLÄCHENELEMENTE**

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach EN 1992-2, 6.1 (109) (Charakt. K.)
- (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach 7.3.2/4 zur Begrenzung der Rissbreite  
Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit  
Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert  
In Querschnittsteilen nach 6.1.(5) wird die Betonstauchung nicht begrenzt  
Die Mindestlängsbewehrung nach 9.2.1.1 und 9.3.1.1 wird nicht ermittelt  
Bei Druckgliedern wird die Mindestbewehrung nach 9.5.2 berücksichtigt

Element Nr.	Qu.	Ort	Lage	Bew. Lage Typ	Bewehrung in x-Richtung			Bewehrung in y-Richtung		
					nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	erf.asx [cm <sup>2</sup> /m]	nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	erf.asy [cm <sup>2</sup> /m]
124	1	1	1	M	0,00	760,28	0,00	0,00	-47,71	10,08
				R	0,00	760,28	0,00	0,00	-41,88	22,08
				B	0,00	1618,41	0,00	0,00	-64,40	1,86
				M	0,00	1198,82	9,82	0,00	21,95	10,08
				R	0,00	778,28	45,59!	0,00	-23,88	0,00
				B	0,00	1618,41	50,29	0,00	37,99	1,09
124	1	2	1	M	0,00	769,11	0,00	0,00	-41,00	10,08
				R	0,00	769,11	0,00	0,00	-35,95	22,08
				B	0,00	1616,96	0,00	0,00	-55,35	1,60
				M	0,00	1197,75	9,82	0,00	13,24	10,08
				R	0,00	775,27	45,45!	0,00	-29,79	0,00
				B	0,00	1616,96	50,24	0,00	28,30	0,81
124	1	3	1	M	0,00	757,32	0,00	0,00	-24,58	10,08
				R	0,00	757,32	0,00	0,00	-24,02	22,08
				B	0,00	1591,86	0,00	0,00	-34,74	1,00
				M	0,00	1179,15	9,82	0,00	39,02	10,08
				R	0,00	762,99	44,87!	0,00	-18,35	0,00
				B	0,00	1591,86	49,35	0,00	62,11	1,79
124	1	4	1	M	0,00	748,50	0,00	0,00	-30,47	10,08
				R	0,00	748,50	0,00	0,00	-29,92	22,08
				B	0,00	1593,34	0,00	0,00	-41,19	1,19
				M	0,00	1180,25	9,82	0,00	47,67	10,08
				R	0,00	766,00	45,01!	0,00	-12,42	0,00
				B	0,00	1593,34	49,40	0,00	73,23	2,11

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach Gl. (9.5N) wird berücksichtigt

- vRd Aufnehmbare Querkraft der Druckstreben nach 6.2.3 (3) [kN/m]
- Neigung Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Elementebene
- Asl Erf. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3 für erf. asb [cm<sup>2</sup>]
- qr Bemessungsquerkraft = (qx<sup>2</sup>+qy<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup> [kN/m]

Element Nr.	Ort	qx [kN/m]	qy [kN/m]	n [kN/m]	qr [kN/m]	qr/vRd	Neigung	erf. Asl f. erf.		
								asb [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	asb=0 [cm <sup>2</sup> ]	Asl [cm <sup>2</sup> ]
124	1	63,31	47,08	0,00	78,90	0,03	1,75	0,00	.	.
	2	63,31	48,58	0,00	79,81	0,03	1,75	0,00	.	.
	3	63,44	48,58	0,00	79,90	0,03	1,75	0,00	.	.
	4	63,44	47,08	0,00	79,00	0,03	1,75	0,00	.	.

**Nachweis gegen Ermüdung für Längsbewehrung**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

- dSigma.s, equ Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]
- dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,s / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]
- (vereinfacht) = dSigma.Rsk,s nach 6.8.6 (1) [MN/m<sup>2</sup>]

Element Nr.	Ort	Lage	Nachweis in x-Richtung				Nachweis in y-Richtung			
			as [cm <sup>2</sup> /m]	erh.	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul.	as [cm <sup>2</sup> /m]	erh.	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul.
124	1	1	0,00	.	.	50,43	22,08	.	13,92	50,43
		2	50,29	.	28,86	50,43	10,08	.	1,01	50,43
124	2	1	0,00	.	.	50,43	22,08	.	15,36	50,43
		2	50,24	.	31,79	50,43	10,08	.	1,11	50,43
124	3	1	0,00	.	.	50,43	22,08	.	11,62	50,43
		2	49,35	.	31,81	50,43	10,08	.	16,64	50,43
124	4	1	0,00	.	.	50,43	22,08	.	7,98	50,43
		2	49,40	.	28,77	50,43	10,08	.	20,68	50,43

**Nachweis gegen Ermüdung für Schubbewehrung**

Die Stahlspannungen werden auf der Grundlage eines Fachwerkmodells ermittelt.

- dSigma.s, equ Schadensäquivalente Schwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]
- dSigma.s, zul = dSigma.Rsk,b / gamma.s, fat [MN/m<sup>2</sup>]
- (vereinfacht) = dSigma.Rsk,b nach 6.8.6 (1) [MN/m<sup>2</sup>]

Element Nr.	Qu.	Ort	asb [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]		dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	
			vorh.	erh.	equ.	zul.
124	1	1	0,00	.	.	63,48
		2	0,00	.	.	63,48
		3	0,00	.	.	63,48
		4	0,00	.	.	63,48

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.

wk Rechenwert der Rissbreite nach 7.3.4 [mm]  
 wmax Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]  
 nsd, msd Bemessungsnormalkraft, Bemessungsmoment [kN/m, kNm/m]  
 (CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

Element Nr.	Qu.	K.	Ort	Nachweis in x-Richtung				Nachweis in y-Richtung			
				nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	wk [mm]	wmax [mm]	nsd [kN/m]	msd [kNm/m]	wk [mm]	wmax [mm]
124	1	QK	1	0,00	778,28	0,26	0,30	0,00	-41,88	0,05	0,30
			2	0,00	775,27	0,26	0,30	0,00	-35,95	0,04	0,30
			3	0,00	762,99	0,26	0,30	0,00	-24,02	0,03	0,30
			4	0,00	766,00	0,26	0,30	0,00	-29,92	0,04	0,30

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert. Im Zustand (II) wird die Spannung  $\min(\sigma_x, \sigma_y)$  nachgewiesen.

$\sigma_{min}$  Betragsgrößte Längsdruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 $\sigma_{zul}$  = 0,60 \*  $f_{ck}$  für Charakt. K. (CK) nach 7.2 (2)  
 = 0,45 \*  $f_{ck}$  für Q.-ständige K. (QK) nach 7.2 (3)  
 (o,u) Oberer, unterer Querschnittsrand

Element Nr.	Qu.	Ort	Spannung	$\sigma_{min}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{zul}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Seite	Zustand	Situation
124	1	1	$\sigma_x$ (II)	-16,30	-18,00	x	End	CK.1
			$\sigma_x$ (II)	-10,90	-13,50	x	End	QK.1
		2	$\sigma_x$ (II)	-16,30	-18,00	x	End	CK.1
			$\sigma_x$ (II)	-10,86	-13,50	x	End	QK.1
		3	$\sigma_x$ (II)	-16,17	-18,00	x	End	CK.1
			$\sigma_x$ (II)	-10,77	-13,50	x	End	QK.1
		4	$\sigma_x$ (II)	-16,18	-18,00	x	End	CK.1
			$\sigma_x$ (II)	-10,81	-13,50	x	End	QK.1

**Nachweis der Betonstahlspannungen für die Charakteristische (seltene) Kombination**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

$\sigma_{s,zul} = 0,80 * f_{yk}$  bzw.  $1,0 * f_{yk}$  (CK) nach 7.2 (5)

Element Nr.	Qu.	Ort	Lage	Nachweis in x-Richtung			Nachweis in y-Richtung		
				as [cm <sup>2</sup> /m]	$\sigma_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	as [cm <sup>2</sup> /m]	$\sigma_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]
124	1	1	1	0,00	.	400,00	22,08	29,73	400,00
			2	50,29	329,32	400,00	10,08	29,45	400,00
124	1	2	1	0,00	.	400,00	22,08	25,55	400,00
			2	50,24	329,35	400,00	10,08	17,77	400,00
124	1	3	1	0,00	.	400,00	22,08	15,31	400,00
			2	49,35	329,84	400,00	10,08	52,36	400,00
124	1	4	1	0,00	.	400,00	22,08	18,99	400,00
			2	49,40	329,81	400,00	10,08	63,97	400,00

## Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau

Das Beispiel wurde in Anlehnung an Teil 2 des Buches

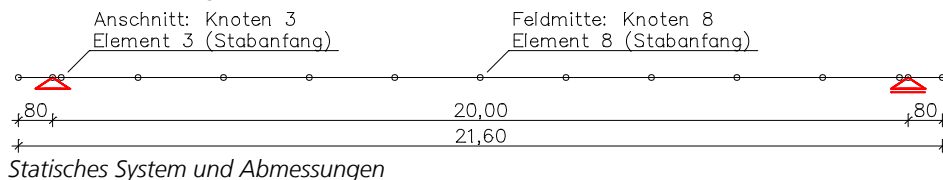
Müller, Michael / Bauer, Thomas  
Eisenbahnbrückenbau nach DIN-Fachbericht

### Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.

Band 1: Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.  
2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003

gewählt.

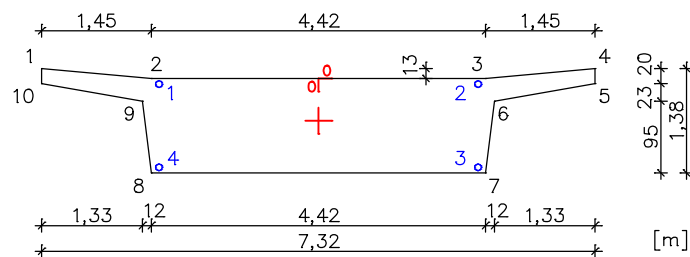
Die Konstruktion ist ein in Längsrichtung mit nachträglichen Verbund vorgespannter Balken mit der Expositionsklasse XC4. Die Querrichtung wird im Rahmen dieses Beispiels nicht untersucht. Die Auflagerung erfolgt in Längsrichtung schwimmend und in Querrichtung fest.



### Material

Beton C40/50-EN  
Betonstahl BSt 500/550, Achsabstand vom Rand 7,5 cm

### Querschnitt



Als Entwurfsvorgabe ist der Überbau für das Lastmodell 71 mit einem Klassifizierungsbeiwert von  $\alpha = 1,0$  und für das Lastmodell SW/2 zu bemessen.

Die maßgebenden Nachweise werden für folgende Zeitpunkte geführt:

- $t_0 = 10$  Tage: Zeitpunkt der Vorspannung
- $t_1 = 100$  Tage: Zeitpunkt der Verkehrsübergabe
- $t_\infty = 100$  Jahre: Zeitpunkt nach Abschluss des Kriechens und Schwindens

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise geführt:

#### Grenzzustand der Tragfähigkeit

- Biegung mit Längskraft
- Querkraft
- Versagen ohne Vorankündigung (Robustheit)
- Ermüdung der Längsbewehrung und des Spannstahls
- Ermüdung der Schubbewehrung
- Ermüdung des Betons unter Druckbeanspruchung

#### Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

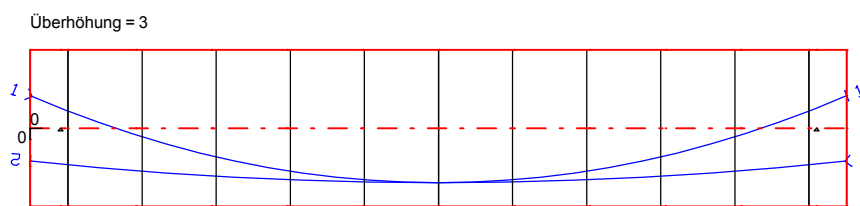
- Dekompression
- Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite
- Berechnung der Rissbreite
- Begrenzung der Betondruckspannungen
- Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen

Auf Grund ihres geringen Einflusses auf die gewählten Nachweise wurde auf die Einwirkungen aus Zentrifugallasten, Seitenstoß, Windlasten, Lastmodell „Unbeladener Zug“, Anfahren und Bremsen, Entgleisung, Einwirkungen auf Geländer, Verkehrslast auf Dienstgehwegen und aus Erddruck verzichtet.

### Spannstahl und Spannverfahren

Spannstahlgüte	St 1500/1770
Zulassung des Spannverfahrens	SUSPA EC 140
Anzahl der Spannlieder im Bündel	6
Querschnittsfläche $A_p$	2660 mm <sup>2</sup>
E-Modul des Spannstahls	190000 MN/m <sup>2</sup>
0,1%-Dehngrenze (Streckgrenze) des Spannstahls $f_{p0,1k}$	1500 MN/m <sup>2</sup>
Zugfestigkeit des Spannstahls $f_{pk}$	1770 MN/m <sup>2</sup>
Zulässige Vorspannkraft eines Spannlieds $P_{m0}$	3391,5 kN
Reibungsbeiwerte beim Anspannen und Nachlassen $\mu$	0,21
Ungewollter Umlenkwinkel eines Spannlieds $\beta'$	0,3 °/m
Ankerschlupf am vorgespannten Spannanker	6 mm
Hüllrohrdurchmesser $d_h$	97 mm
Streifaktoren der internen Vorspannung	
Bauzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,9
Endzustand ( $r_{sup} / r_{inf}$ )	1,1 / 0,9

Die Spannliedführung kann der nächsten Abbildung entnommen werden. Es werden zwei Spannstränge mit jeweils 6 Bündelspannliedern angeordnet, die über die gesamte Trägerlänge durchlaufen und wechselseitig an den Trägerenden angespannt werden. Spannverfahren, Spannanweisungen und Spannkraftverläufe für beide Spannstränge sind ebenfalls dargestellt.

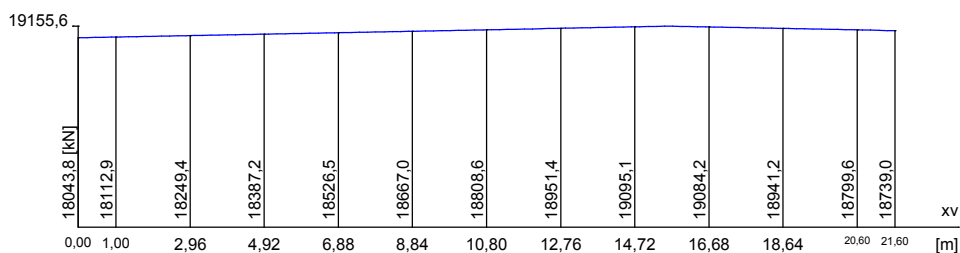


Spannstrangordinaten  $z_v$  [cm] an den Stützstellen

$x_v$	0,00	1,00	2,96	4,92	6,88	8,84	10,80	12,76	14,72	16,68	18,64	20,60	21,60
1	-28,6	-15,1	7,6	25,3	37,9	45,5	48,0	45,5	37,9	25,3	7,6	-15,1	-28,6
2	28,8	32,2	37,9	42,3	45,5	47,4	48,0	47,4	45,5	42,3	37,9	32,2	28,8

#### Spannliedführung im Längsschnitt

Spannkraftverlauf Spannstrang 1 (6 Spannlieder,  $l = 21,67$  m)  
 Spannverfahren 1 - SUSPA EC 140. Zulassung nach EC2.  
 $P_{m0} = 3391,5$  kN,  $A_p = 2660,0$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_a = 0,21$ , Winkel  $\beta' = 0,30$  °/m  
 E-Modul = 190000 MN/m<sup>2</sup>,  $A_h = 7389,8$  mm<sup>2</sup>,  $\mu_n = 0,21$ , Schlupf = 6,00 mm  
 Spannanweisung 1 -  $P_{m0}$   
 Spannanker : Anfang  
 Bez. Spannkraft: 1,000  
 Spannkraft [kN]: 3391,5  
 Längung [mm]: 139,6

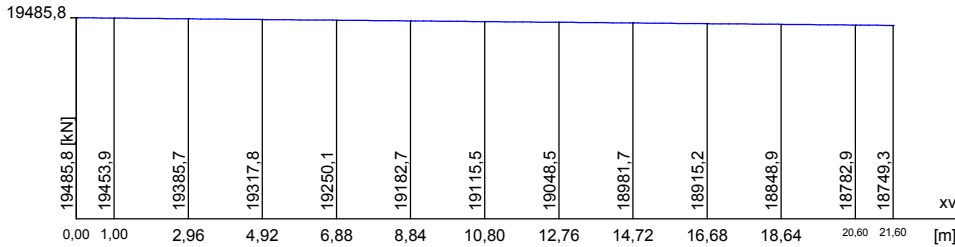


#### Spannkraftverlauf des Spannstrangs 1 im Längsschnitt

Spannkraftverlauf Spannstrang 2 (6 Spannglied(er), l = 21,60 m)

Spannverfahren 1 - SUSPA EC 140. Zulassung nach EC2.  
 Pm0 = 3391,5 kN, Ap = 2660,0 mm², μa = 0,21, Winkel β' = 0,30 °/m  
 E-Modul = 190000 MN/m², Ah = 7389,8 mm², μn = 0,21, Schlupf = 6,00 mm

Spannanweisung 1 - Pm0  
 Spannanker : Anfang  
 Bez. Spannkraft: 1.000  
 Spannkraft, [kN]: 3391,5  
 Längung [mm]: 142,2

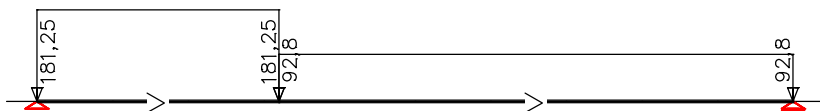


Spannkraftverlauf des Spannstrangs 2 im Längsschnitt

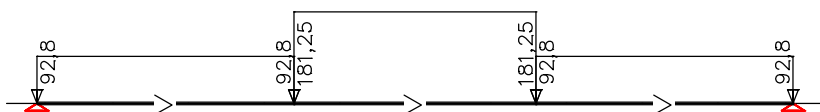
**Lasten**

- Lastfall 1      Eigenlast (G1).
- Lastfall 2      Ausbaulasten 103,7 kN/m (G2).
- Lastfall 3      Vorspannung (P).
- Lastfall 4      Kriecherzeugende Dauerlast (G1+G2+P)
- Lastfall 5      Kriechen und Schwinden (CS, t<sub>∞</sub>). Mit den Vorgaben  
 RH=80%, t<sub>0</sub>=10 d, t<sub>s</sub>=1 d, Zementhärtung = Normal  
 ergeben sich die Beiwerte: φ<sub>t∞</sub> = 1,57; ε<sub>t∞</sub> = -23,7·10<sup>-5</sup>; ρ = 0,8  
 Kriecherzeugender Dauerlastfall: 4,  
 Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spann Stahl wird berücksichtigt.
- Lastfall 11-13    Stellungen des Lastmodells 71 (Q1)
- Lastfall 21      Lastmodell SW/2 (Q2)
- Lastfall 31      Temperatur Δx<sub>neg</sub> (T)
- Lastfall 32      Temperatur Δx<sub>pos</sub> (T)

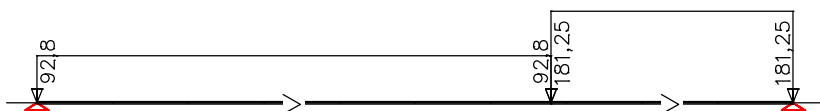
**Lastmodell 71**



Lastfall 11: Lastmodell 71, links  
 Der dynamische Beiwert Φ von 1,16 ist bereits in den Lastordinaten berücksichtigt.

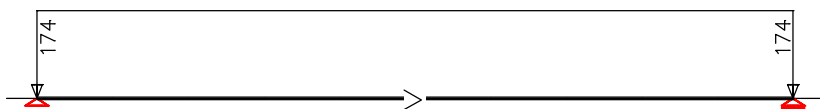


Lastfall 12: Lastmodell 71, mitte



Lastfall 13: Lastmodell 71, rechts

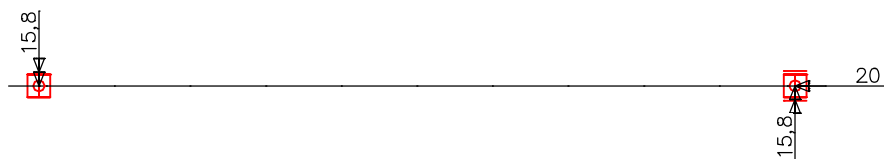
**Lastmodell SW/2**



Lastfall 21: Der dynamische Beiwert Φ von 1,16 ist bereits in den Lastordinaten berücksichtigt.

## Temperatur

Auf Grund der schwimmenden Lagerung ergeben sich unter den anzusetzenden Temperaturbeanspruchungen  $\Delta T_{Mz}$  und  $\Delta T_N$  Lagerwege und damit Rückstellkräfte gem. Müller, Seite 71-72.



Lastfall 31: Rückstellkräfte als äußere Lagerreaktionen

Nachfolgend sind die für die Nachweise definierten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen wiedergegeben.

### EN 1992-2 Einwirkungen

#### G1 - Ständige Einwirkung, Eigenlast

1 G1

#### G2 - Ständige Einwirkung, Ausbaulast

2 G2

#### P - Vorspannung, intern

3 P

#### CSR1 - Kriechen, Schwinden, Relaxation t1

CS als konstante Minderung der Vorspannung um 4 %.  
Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 2,2 %.

#### CSR2 - Kriechen, Schwinden, Relaxation too

5 CS,too  
Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls: 6,2 %.

#### T - Temperatur, 1. Variante, exklusiv

31 Temperatur dTN (dx,neg)  
32 Temperatur dTN (dx,pos)

#### Q1 - Lastgruppen gr11-gr14 (1 Gleis), 1. Variante, exklusiv

11 Qvk LM 71,1  
12 Qvk LM 71,2  
13 Qvk LM 71,3

#### Q2 - Lastgruppen gr16-gr17 (1 Gleis), 1. Variante, exklusiv

21 Qvk LM SW/2

#### Qfat - Zyklische Ermüdungseinwirkung, 1. Variante, exklusiv

11 Qvk LM 71,1  
12 Qvk LM 71,2  
13 Qvk LM 71,3

### Ständige und vorübergehende Kombination, Situationen

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ständige und vorübergehende Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1,5	0
Q1	1,45	0
Q2	1,2	0

**Ständige und vorübergehende Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	1	0,8	0
b) T	1	0	0,8
c) Q1	0,6	1	0
d) Q2	0,6	0	1

**Charakteristische (seltene) Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Charakteristische (seltene) Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Charakteristische (seltene) Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	1	0,8	0
b) T	1	0	0,8
c) Q1	0,6	1	0
d) Q2	0,6	0	1

**Häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) t1	End	G1 + G2 + P + CSR1 + QK
3) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a) T	0,6	0	0
b) Q1	0,5	0,8	0
c) Q2	0,5	0	0,8



**Quasi-ständige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) t0	Bau - Unverpr.	G1 + P
2) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Quasi-ständige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0

**Quasi-ständige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a)	0,5	0	0

**Ermüdungskombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1) too	End	G1 + G2 + P + CSR2 + QK + Qfat

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ermüdungskombination, Sicherheitsbeiwerte**

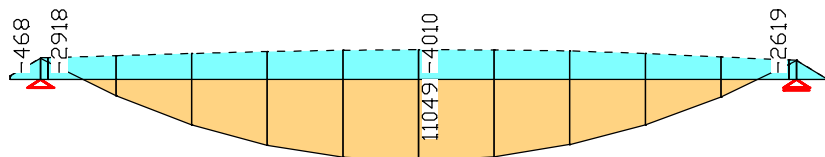
Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
P, CSR1, CSR2	1	1
T	1	0
Q1	1	0
Q2	1	0
Qfat	1	0

**Ermüdungskombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	T	Q1	Q2
a)	0,6	0	0

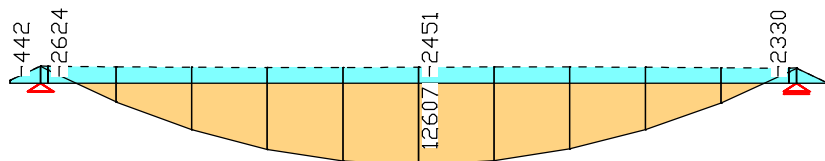
Nachfolgend ist beispielhaft der Verlauf der Biegemomente  $M_y$  für die Bemessungssituationen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit dargestellt.

**2. Ständige und vorübergehende Situation – t1**



Biegemoment  $M_y$  [kNm]

**3. Ständige und vorübergehende Situation - too**



Biegemoment  $M_y$  [kNm]

**Bemessung nach EN 1992-2:2005**

Die Nachweise gelten für Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton mit und ohne Verbund. Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit den spezifischen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten kombiniert.

**Alle Nachweise erfolgen für die Extremwerte der Einwirkungen.**

Bei Stäben mit Spannsträngen im Verbund werden bei der Ermittlung der Längsbewehrung die Schnittgrößen des Verbundquerschnitts und die Spannstränge mit ihrer Vordehnung berücksichtigt. Ausgenommen sind die Situationen vor dem Verpressen der Spannglieder.

**Bemessungsvorgaben**

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung	Ermüd.	Riss- br.	De- komp.	Spannungen
			M R B Q T	S P C			Druck S P
1	XC4	Nachtr. Verbund	x x x x .	x x x	x	x	x x x

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

**Streuung der Wirkungen aus Vorspannung**

Die Streuung der Vorspannung wird bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:  
 - Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen  
 - Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite, Nachweis der Rissbreite  
 - Nachweis der Stahlspannungen  
 Alle anderen Nachweise benutzen den Mittelwert  $P_{m,t}$  der Vorspannung.

Qu.	Vorspannung des Bauteils	Bauzustand	Endzustand
		r.sup r.inf	r.sup r.inf
1	Nachtr. Verbund	1,10 0,90	1,10 0,90

**Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung**

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh- dichte	Bem.	fyk	cot	Bem. wie	Asl [cm²]	Red.
		[kg/m³]	M,N	[MPa]	Theta	Pl. vorh.	Bild 6.3 max	Vor- spg.
1	C40/50-EN	.	ST	500	1,75	.	0,00	.

**Schubquerschnitte**

- bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzbreite bn bzw. der Nutzhöhe d.
- z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.
- tef Wanddicke des Torsionskastens.
- K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl.(6.29).

Qu.	Breite [m]	Nutzbreite	Höhe [m]	Nutzhöhe	Torsionsquerschn. [m]
	bw bw.nom	bn [m]	kb h	h.nom d [m]	kd z1 z2 tef K.
1	4,420 4,129	4,345	0,90 1,250	1,250 1,175	0,90 1,100 4,270 0,150 .

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

- ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.
- Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.
- k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.
- kt Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung bei Berechnung der Rissbreite.
- Faktor Abminderungsfaktor für fctm nach Kap. 7.3.2 (As,min) bzw. 7.3.4 (wk).
- sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (7.11).

Qu.	wmax [mm]	ds [mm]	Beiwerte	sr,max [mm]	fctm-Faktor	Kombination	für Nachweis
			Xil k kt		As,min wk	As,min wk	
1	0,20	16,0	0,31 1,00 0,4	.	1,00 1,00	gem. Klasse	gem. Klasse

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

- fck(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
- Sigma.c(t) Betondruckspannung zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.
- Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.
- Sigma.x Betonspannung aus Biegung und Längskraft in Stabrichtung.
- Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.
- (CK), (QK) Charakteristische, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	fck(t) [MN/m²]	zul.sigma.c(t) (CK, QK)	zul.sigma.c (CK)	zul.sigma.c (QK)	zul.sigma.s (CK)	Dekompression Spannung
1	36,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fyk	Sigma.x

**Vorgaben für den Nachweis gegen Ermüdung**

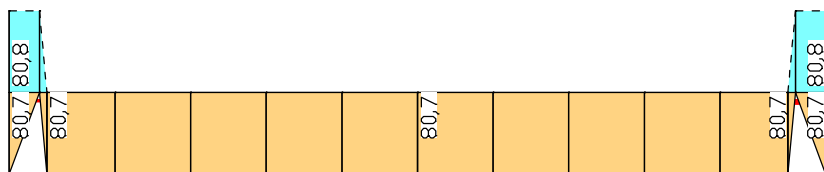
Die Betondruckspannungen werden nach Bild 3.2 berechnet.

- fcd, fat      Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung.
- dSigma.Rsk,s   Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Längsbewehrung.
- dSigma.Rsk,b   Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Schubbewehrung.
- dSigma.Rsk,p   Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite des Spannstahls.
- Lambda.s,b,p   Zug. Korrekturbeiwerte für schadensäquivalente Schwingbreite.
- Lambda.c      Korrekturbeiwert für schadensäquivalente Betonspannungen.
- Eta            Erhöhungsfaktor für Betonstahlspannung nach 6.8.2(2)P.
- Nw. SPC        Nachweis für (S) Betonstahl, (P) Spannstahl, (C) Beton.
- (x)            Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten - Ermüdungskomb.
- (+)            Vereinfachter Nachweis nach 6.8.6(2) - häufige Kombination.
- Fak. Qfat      Faktor für Qfat zur Ber. der schadensäquivalenten Schwingbreite für Betonstahl und Spannstahl nach Anhang NN.2.1(101).

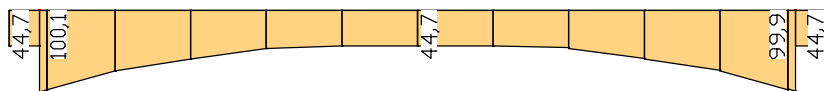
Qu.	Nw. SPC	fcd, fat [MN/m <sup>2</sup> ]	dSigma [MN/m <sup>2</sup> ]	Lambda	Eta	Fak. Qfat					
		Rsk,s	Rsk,b	Rsk,p	s	b	p	c			
1	xxx	13,68	162,00	73,00	120,00	0,65	0,65	0,70	0,90	2,00	1,00

**Ergebnisse**

Den Verlauf der erforderlichen Längs- und Schubbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen. Bei der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit reichen die Dehnungsreserven der Spannglieder aus, um den Nachweis ohne zusätzliche Biegebewehrung zu führen. Es wird also lediglich Robustheitsbewehrung erforderlich.



Mindestbewehrung  $A_s$  zur Sicherstellung der Robustheit (Duktilität) [cm<sup>2</sup>] (obere Bewehrung strichliert)



Erforderliche Querkraftbewehrung  $A_{sbz}$  um den Ermüdungsnachweis einzuhalten [cm<sup>2</sup>/m]

Nachfolgend ist das Standard-Nachweisprotokoll für Stab 3 am Ort 1 (Anschnitt, x = 0,2 m) und Stab 8 am Ort 1 (Feldmitte) in Auszügen wiedergegeben.

**Nachweis der Längsbewehrung**

- (M) Mindestbewehrung für Robustheit nach EN 1992-2, 6.1 (109) (Charakt. K.)
- (R) Mindest-/erf. Bewehrung nach 7.3.2/4 zur Begrenzung der Rissbreite  
Bewehrungserhöhung aus dem Nachweis der Rissbreite ist mit "!" markiert  
Ap' Teil der Spannstahlfläche  $X_{il} \cdot A_p$ , um den erf.As verringert wurde  
Xil Verbundbeiwert für Spannstahl gemäß Gl. (7.5)
- (B) Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit  
Druckbewehrung ist bei überwiegender Biegung durch "\*" markiert  
In Querschnittsteilen nach 6.1.(5) wird die Betonstauchung nicht begrenzt  
Die Mindestlängsbewehrung nach 9.2.1.1 und 9.3.1.1 wird nicht ermittelt  
Bei Druckgliedern wird die Mindestbewehrung nach 9.5.2 berücksichtigt

Stab Nr.	Qu.	Ort	Bewehrung Lage	Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	
3	1	1	1	M	-1,37	265,35	0,00	.	0,00	
				R	0,00	0,00	0,00	.	0,00	
			2	M	-32185,62	-2624,16	0,00	.	0,00	
				R	-1,37	265,35	0,00	.	0,00	
			3	M	-32185,62	-2624,16	0,00	.	0,00	
				R	64,14	788,22	0,00	.	40,35	
	8	1	1	1	M	0,00	7936,54	0,00	.	0,00
					R	0,00	0,00	0,00	.	0,00
				2	M	-37924,11	-10267,04	0,00	.	0,00
					R	0,00	7936,54	0,00	.	0,00
				3	M	-37924,11	-10267,04	0,00	.	0,00
					R	12,00	21797,83	0,00	.	40,35
8	1	1	1	M	-35554,82	11048,54	0,00	.	0,00	
				R	0,00	0,00	0,00	.	0,00	
			2	M	-35554,82	11048,54	0,00	.	0,00	
				R	12,00	21797,83	0,00	.	40,35	
			3	M	-35554,82	11048,54	0,00	.	0,00	
				R	0,00	0,00	0,00	.	0,00	

**Nachweis der Schubbewehrung**

Der Mindestbewehrungsgrad nach Gl. (9.5N) wird berücksichtigt.

VRd, TRd Bemessungswert der maximal aufnehmbaren Querkraft, Torsion  
 Neigung Neigung cot Theta der Betondruckstreben gegen die Längsachse  
 Asb,Asl.T Erf. Bügelbewehrung aus Querkraft und Torsion, erf. Torsionslängsbew.  
 Asl Erf. Biegezugbewehrung gem. Bild 6.3 für erf. Asb.

Stab	Qy/	Nei-	Asb.y	Qz/	Nei-	Asb.z	Asl	Q/VRd+	Asb.T	Asl.T
Nr.	Ort	VRd	gung	VRd	gung	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	Mx/TRd	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]
3	1	0,00	1,75	0,00	0,11	1,75	44,73	.	.	.
8	1	0,00	1,75	0,00	0,01	1,75	44,73	.	.	.

**Nachweis gegen Ermüdung für Längsbewehrung und Spannstahl**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nummer der Lage  
 Typ P Spannstahl, Nummer des Spannstrangs  
 dSigma.s,eq Schädensäquivalente Spannungsschwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]  
 dSigma.s,zul = dSigma.Rsk,s / gamma.s,fat [MN/m<sup>2</sup>]  
 (vereinfacht)= dSigma.Rsk,s nach 6.8.6 (1) [MN/m<sup>2</sup>]

Stab	Stahl	As [cm <sup>2</sup> ]	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]					
Nr.	Qu.	Ort	Typ	Nr.	vorh.	erh.	equ.	zul.
3	1	1	S	1	0,00	.	.	140,87
			S	2	0,00	.	.	140,87
			S	3	40,35	.	1,31	140,87
			S	4	40,35	.	1,31	140,87
			P	1	159,60	.	0,17	104,35
			P	2	159,60	.	0,35	104,35
8	1	1	S	1	0,00	.	.	140,87
			S	2	0,00	.	.	140,87
			S	3	40,35	.	31,64	140,87
			S	4	40,35	.	31,65	140,87
			P	1	159,60	.	12,54	104,35
			P	2	159,60	.	12,54	104,35

**Nachweis gegen Ermüdung für Schubbewehrung**

Die Stahlspannungen werden auf der Grundlage eines Fachwerkmodells ermittelt.

Typ BY, BZ Schubbewehrung aus Qy, Qz [cm<sup>2</sup>/m]  
 dSigma.s,eq Schädensäquivalente Schwingbreite [MN/m<sup>2</sup>]  
 dSigma.s,zul = dSigma.Rsk,b / gamma.s,fat [MN/m<sup>2</sup>]  
 (vereinfacht)= dSigma.Rsk,b nach 6.8.6 (1) [MN/m<sup>2</sup>]

Stab	Bew.	Asb [cm <sup>2</sup> /m]	dSigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]				
Nr.	Qu.	Ort	Typ	vorh.	erh.	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
3	1	1	BY	0,00	.	.	63,48
			BZ	44,73	100,08	.	63,48
8	1	1	BY	0,00	.	.	63,48
			BZ	44,73	.	11,00	63,48

**Nachweis gegen Ermüdung für Beton unter Druck**

Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts.

Sigma.cd,min Betrag der schadensäquivalenten min. Betondruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.cd,max Betrag der schadensäquivalenten max. Betondruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.cd,zul = fcd,fat \* (1 - 0,43 \* (1 - Sigma.cd,min/Sigma.cd,max)<sup>2</sup>) [MN/m<sup>2</sup>]  
 o, u Lage des Qu.-Punkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

Stab	Sigma.cd,min	Sigma.cd,max	Sigma.cd,zul	Qu.-	Seite			
Nr.	Qu.	Ort	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	Pkt.	o	u
3	1	1	6,46	6,64	12,72	8	.	x
8	1	1	3,49	8,00	9,27	4	x	.

**Nachweis der Rissbreiten**

Der Nachweis erfolgt durch direkte Berechnung der Rissbreite.

wk Rechenwert der Rissbreite nach 7.3.4 [mm]  
 wmax Zulässige Rissbreite gemäß Vorgabe [mm]  
 Sigma.c Maximale Betonrandspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 (CK) Charakt. (seltene), (HK) Häufige, (QK) Quasi-ständige Kombination

Stab	Bew.	Nx	My	Mz	Sigma.c	wk	wmax			
Nr.	Qu.	K.	Ort	Lage	[kN]	[kNm]	[kNm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]
3	1	HK	1	.	-41150,8	-3641,36	0,00	-3,75	0,00	0,20
8	1	HK	1	.	-34131,7	-8446,68	0,00	0,89	-.-	0,20

**Nachweis der Dekompression**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.

(HK), (QK) Häufige Kombination, Quasi-ständige Kombination  
 dp Tiefe des Spannglieds mit Hüllrohr im überdrückten Beton [mm]  
 dp,min Mindestwert für dp nach 7.3.1 (105) [mm]

Stab Nr.	Qu.	Ort	Sigma.x [MN/m <sup>2</sup> ]		Drucktiefe [mm]		Spann- strang	Zustand	Situation
			oben	unten	dp	dp,min			
3	1	1 (I)	-3,83	-9,24	319,9	100	2	Bau	QK.1
8	1	1 (I)	2,41	-15,84	161,8	100	1	Bau	QK.1

**Nachweis der Betondruckspannungen**

Der Nachweis erfolgt im Zustand (II), falls die Zugspannung unter der maßgebenden Komb. den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet, anderenfalls im Zustand (I). Wenn die Beanspruchung im Zust. (II) nicht aufnehmbar ist, wird dies mit (I\*) markiert.

Sigma.x,min Beträgsgrößte Längsdruckspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma.x,zul = 0,60\*f<sub>ck</sub> für Charakt. K. (CK) nach 7.2 (2)  
 = 0,45\*f<sub>ck</sub> für Q.-ständige K. (QK) nach 7.2 (3)  
 (o,u) Lage des Querschnittspunkts: oberhalb, unterhalb des Schwerpunkts

Stab Nr.	Qu.	Ort	Sigma.x,min [MN/m <sup>2</sup> ]	Sigma.x,zul [MN/m <sup>2</sup> ]	Qu.- Seite		Zustand	Situation	
					Pkt. o	u			
3	1	1 (I)	-9,24	-16,20	7	.	x	Bau	CK.1
			(I)	-9,24	-16,20	7	.	x	Bau
8	1	1 (I)	-15,84	-16,20	7	.	x	Bau	CK.1
			(I)	-15,84	-16,20	7	.	x	Bau

**Nachweis der Stahlspannungen**

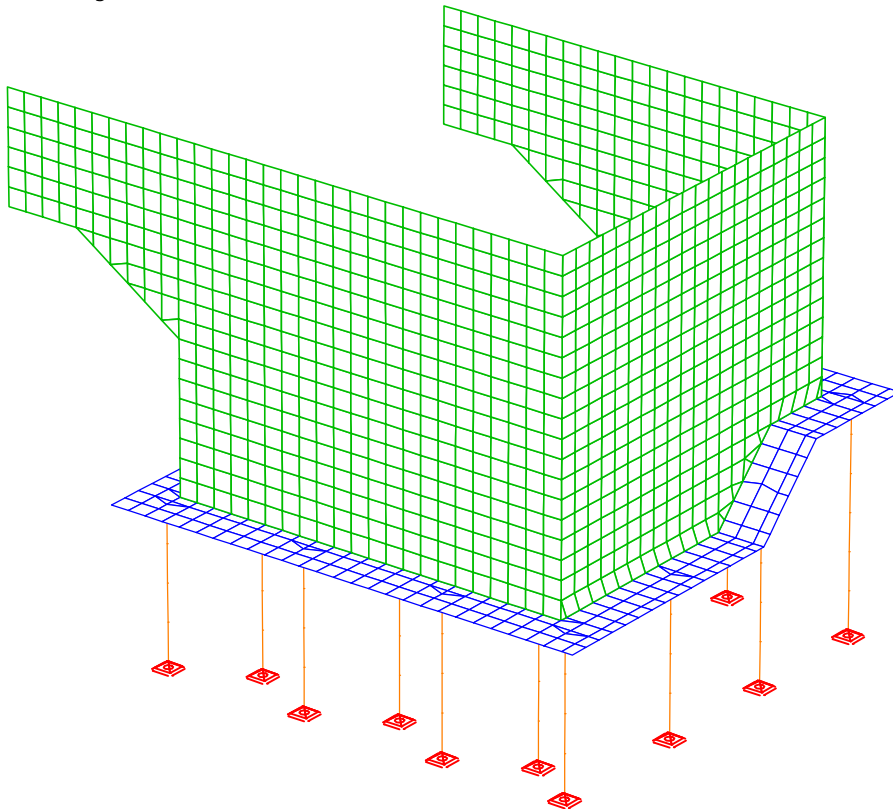
Der Nachweis erfolgt unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Spannstränge ohne Verbund bzw. Situationen vor dem Verpressen wird die Spannstahtspannung gemäß Gl. (5.43) nachgewiesen.

Typ S Längsbewehrung aus N und M, Nr. der Lage, Charakt. K. (CK)  
 Typ P Spannstaht, Nr. des Spannstrangs, Charakt. K. (CK)  
 Sigma.s,zul = 0,80 \* f<sub>yk</sub> bzw. 1,0 \* f<sub>yk</sub> (CK) nach 7.2 (5)  
 Sigma.p,zul = 0,75 \* f<sub>pk</sub> nach 7.2 (5)

Stab Nr.	Qu.	Ort	Stahl		As [cm <sup>2</sup> ]	Sigma.s [MN/m <sup>2</sup> ]	zul. [MN/m <sup>2</sup> ]	Situation
			Typ	Nr.				
3	1	1	S	1	0,00	.	400,00	CK.3
				2	0,00	.	400,00	CK.3
				3	40,35	-34,71	400,00	CK.3
				4	40,35	-34,71	400,00	CK.3
				1	159,60	1134,89	1275,00	CK.1
				2	159,60	1218,92	1275,00	CK.1
8	1	1	S	1	0,00	.	400,00	CK.1
				2	0,00	.	400,00	CK.1
				3	40,35	-4,13	400,00	CK.3
				4	40,35	-4,13	400,00	CK.3
				1	159,60	1178,49	1275,00	CK.1
				2	159,60	1197,71	1275,00	CK.1

## Brückenwiderlager

Das Beispiel zeigt die Anwendung der EN 1992-2 bei einem Widerlager einer Straßenbrücke. Die Konstruktion besteht aus Widerlagerflügeln, einer Lagerbank und einer Pfahlkopfplatte mit Pfählen. Die Abmessungen können den nächsten Abbildungen entnommen werden.



### Statisches System

#### Material

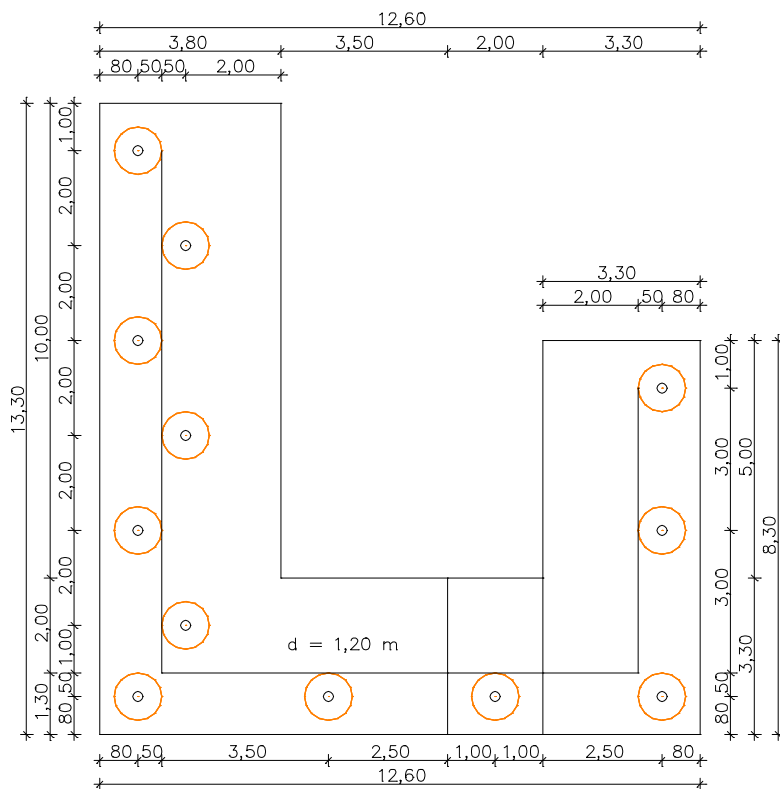
Beton	C 30/37-EN (Flächen), C 40/50-EN (Pfähle)
Betonstahl	BSt 500/550, Achsabstand vom Rand 8 cm
Bettung	Horizontales Bettungsmodul 50 MN/m <sup>3</sup>

#### Querschnitt

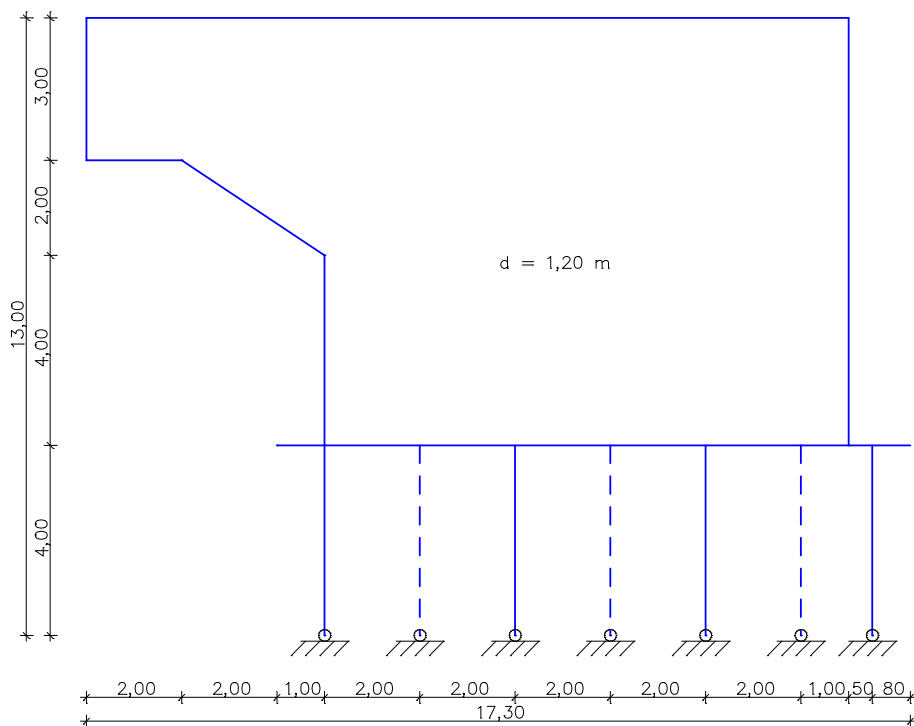
Flügelwände	d = 1,2 m (Querschnitt 1)
Lagerbank	d = 1,5 m (Querschnitt 2)
Pfahlkopfplatte	d = 1,2 m (Querschnitt 3)
Pfähle	∅ = 1,0 m (Querschnitt 4)
Expositionsklasse	XC4

Das abgebildete FEM-System wird mit Schalenelementen in Verbindung mit Biegestäben generiert. Die Grundlage für die Erzeugung des Tragwerks war eine 3D-Zeichnung aus Rändern und Modellflächen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich die Modellobjekte auf den Mittellinien bzw. -flächen der Tragwerksteile befinden, da die Elemente über diese beschrieben werden.

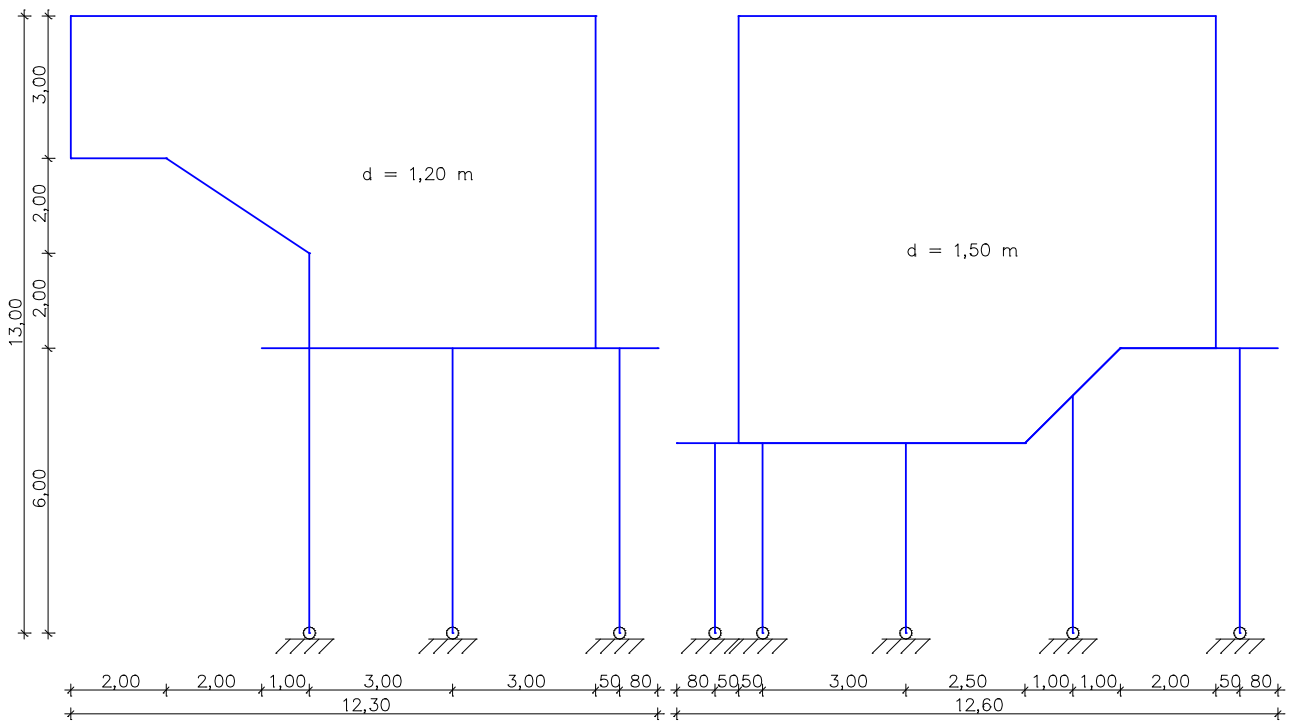
**Abmessungen**



Aufsicht der Pfahlkopfplatte



Ansicht der langen Flügelwand



Ansicht der kurzen Flügelwand und der Lagerbank

## Nachweise

Im Rahmen dieses Beispiels werden folgende Nachweise geführt:

Grenzzustand der Tragfähigkeit

- Biegung mit Längskraft
- Querkraft
- Versagen ohne Vorankündigung (Robustheit)

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite
- Berechnung der Rissbreite
- Begrenzung der Betondruckspannungen
- Begrenzung der Betonstahlspannungen

Auf Grund der Durchdringung werden die Nachweise nicht für die Pfahlkopfplatte geführt. Die notwendigen Vorgaben sind weiter unten aufgeführt.

## Lasten

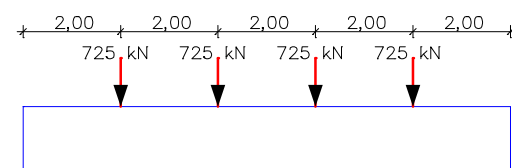
Auf Grund des Umfangs wurden die Einwirkungen auf die maßgeblichen Lasten beschränkt.

- Lastfall 1 G: Eigenlast
- Lastfall 2 G: Erddruck
- Lastfall 3 G: Überbau
- Lastfall 4 Q: UDL-Gleichlast
- Lastfall 5 Q: TS-Stellung 1
- Lastfall 6 Q: TS-Stellung 2

### Lastdaten Lastfall 1: G: Eigenlast

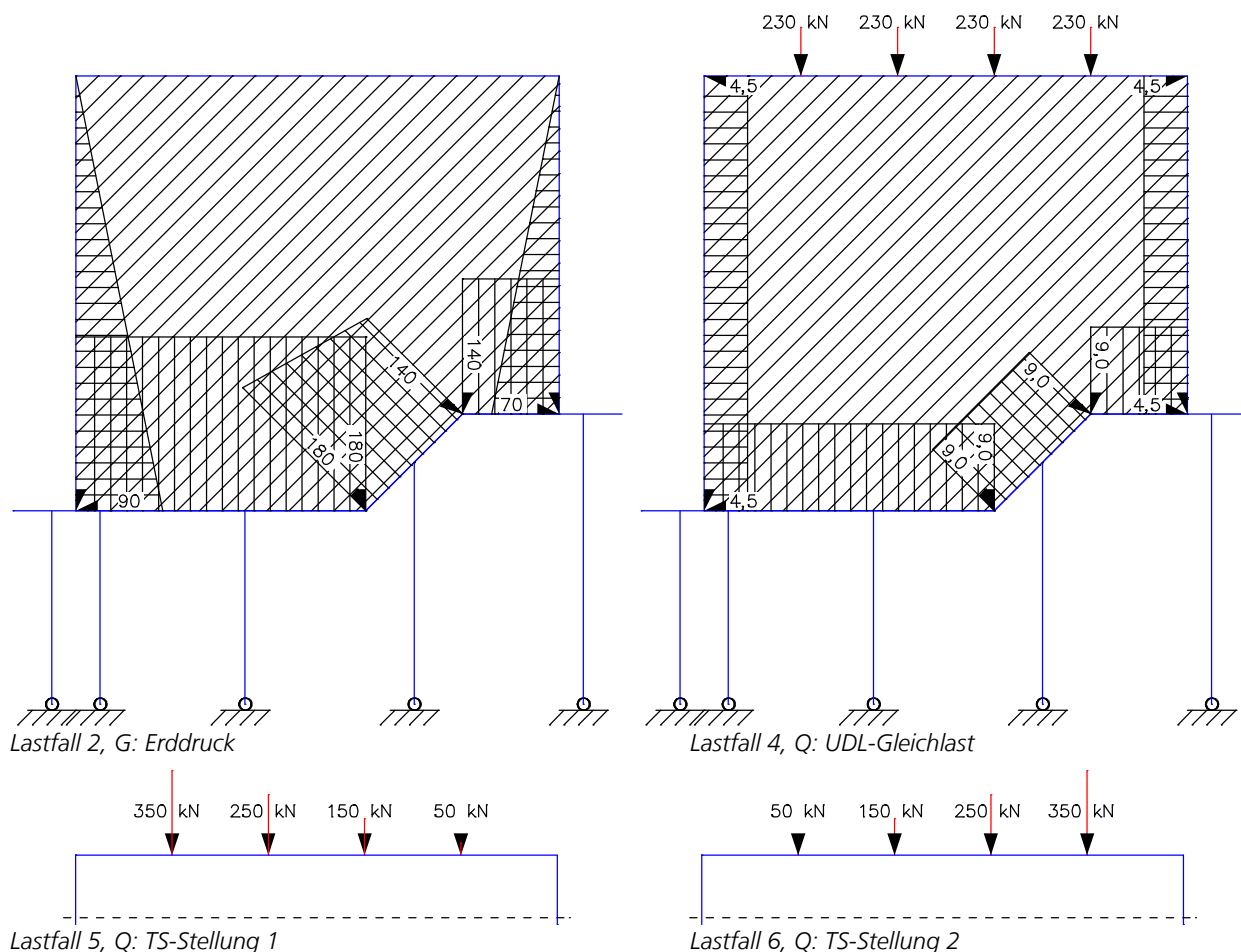
LfdNr	Eigenlast (EG) aus Material- und Querschnittsbeschreibung		
	Wichtungsfaktoren in Richtung		
	X [-]	Y [-]	Z [-]
1	0,0000	0,0000	1,0000

Lastfall 1, G: Eigenlast



Lastfall 3, G: Überbau





Nachfolgend sind die für die Nachweise definierten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen wiedergegeben.

**EN 1992-2 Einwirkungen**

**G1 - Ständige Einwirkung**

- 1 G: Eigenlast
- 2 G: Erddruck

**G2 - Überbau**

- 3 G: Überbau

**QUDL - Verkehr, Lastmodell 1 Flächenlast, 1. Variante, inklusiv**

- 4 Q: UDL-Gleichlast

**QTS - Verkehr, Lastmodell 1 Tandemsystem, 1. Variante, exklusiv**

- 5 Q: TS-Stellung 1
- 6 Q: TS-Stellung 2

**Ständige und vorübergehende Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	Bau	G1
2)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Ständige und vorübergehende Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
QTS, QUDL	1,35	0

**Ständige und vorübergehende Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QU DL
a)	1	1

**Charakteristische (seltene) Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Charakteristische (seltene) Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QU DL	1	0

**Charakteristische (seltene) Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QU DL
a)	1	1

**Häufige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2 + QK

QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte.

**Häufige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QU DL	1	0

**Häufige Kombination, Kombinationsbeiwerte**

Variante	QTS	QU DL
a)	0,75	0,4

**Quasi-ständige Kombination, Situationen**

Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	End	G1 + G2

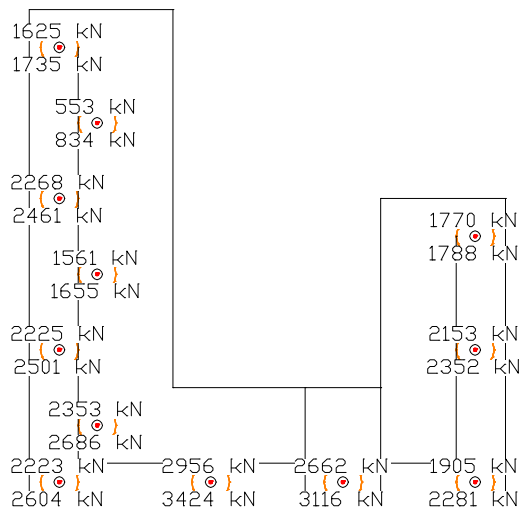
**Quasi-ständige Kombination, Sicherheitsbeiwerte**

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1	1
G2	1	1
QTS, QU DL	1	0

Auf Grund der geringen Druckkräfte und der hohen Biegemomente ist in einigen Bereichen bei der Tragsicherheit der Bauzustand (G1) maßgebend.

Nachfolgend sind beispielhaft die Auflagerreaktionen  $R_z$  für die Charakteristische (seltene) Kombination dargestellt.

1. Seltene (charakteristische) Situation



Auflagerreaktionen  $R_z$

Bemessungsvorgaben EN 1992-2

Qu.	Expos. klasse	Vorspannung des Bauteils	Bewehrung M R B Q T	Ermüd. S P C	Riss-br.	De-komp.	Spannungen Druck S P
1	XC4	Nicht vorgesp.	x x x x .	. . .	x	.	x x .
2	XC4	Nicht vorgesp.	x x x x .	. . .	x	.	x x .
4	XC4	Nicht vorgesp.	. x x x .	. . .	x	.	x x .

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (T) Torsionsbewehrung aus Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit.
- (S) Betonstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Spannungs- und Ermüdungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis.

Vorgaben für den Nachweis der Längs- und Schubbewehrung

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft: (ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- Asl Vorh. Biegezugbewehrung nach Bild 6.3, autom. Erhöhung bis Maximum.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.

Qu.	Beton	Roh-dichte [kg/m³]	Bem. M,N	fyk [MPa]	cot Theta	Bem. wie Pl.	Asl [cm²] Bild 6.3	Red. Vor-spg.
1	C30/37-EN	.	SY	500	1,75	.	0,00 0,00	.
2	C30/37-EN	.	SY	500	1,75	.	0,00 0,00	.
4	C40/50-EN	.	DG	500	1,75	.	0,00 .	.

Schubquerschnitte

- bw.nom Rechnerische Querschnittsbreite bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- h.nom Rechnerische Querschnittshöhe bei Vorspannung nach 6.2.3(6).
- kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d.
- z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.
- tef Wanddicke des Torsionskastens.
- K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl.(6.29).

Qu.	Breite [m]		Nutzhöhe [m]		Höhe [m]		Nutzhöhe		Torsionsquerschn. [m]		
	bw	bw.nom	bn	kd	h	h.nom	d	kd	z1	z2	tef K.
1	1,000	.	.	.	1,200	.	1,120	0,90	.	.	.
2	1,000	.	.	.	1,500	.	1,420	0,90	.	.	.
4	0,707	.	0,627	0,90	0,707	.	0,627	0,90	0,547	0,547	0,180

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
 Xi1 Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
 k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
 kt Beiwert für die Dauer der Lasteinwirkung bei Berechnung der Rissbreite.  
 Faktor Abminderungsfaktor für  $f_{ctm}$  nach Kap. 7.3.2 ( $A_{s,min}$ ) bzw. 7.3.4 ( $w_k$ ).  
 sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (7.11).

Qu.	wmax [mm]	ds [mm]	Beiwerte			sr,max [mm]	fctm-Faktor		Kombination für Nachweis	
			Xi1	k	kt		A <sub>s,min</sub>	w <sub>k</sub>	A <sub>s,min</sub>	w <sub>k</sub>
1	0,30	16,0	.	0,65	0,4	.	0,71	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse
2	0,30	16,0	.	0,65	0,4	.	0,71	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse
4	0,30	16,0	.	0,65	0,4	.	0,71	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse

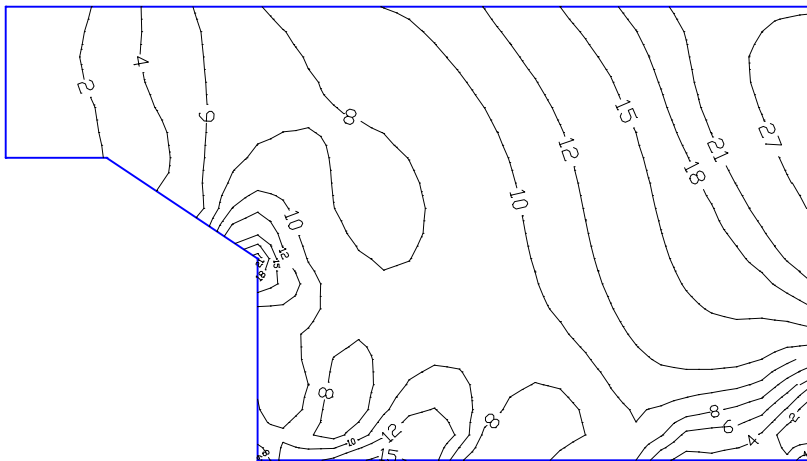
**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

Sigma.c Betondruckspannung im Gebrauchszustand.  
 Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.  
 (CK), (QK) Charakteristische, Quasi-ständige Kombination.

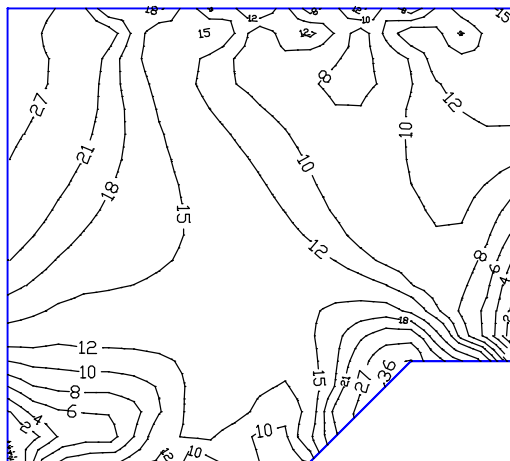
Qu.	fck(t) [MN/m²]	zul.sigma.c(t) (CK, QK)	zul.sigma.c (CK)	zul.sigma.c (QK)	zul.sigma.s (CK)	Dekompression Spannung
1	.	.	0,60 fck	.	0,80 fyk	.
2	.	.	0,60 fck	.	0,80 fyk	.
4	.	.	0,60 fck	.	0,80 fyk	.

**Ergebnisse**

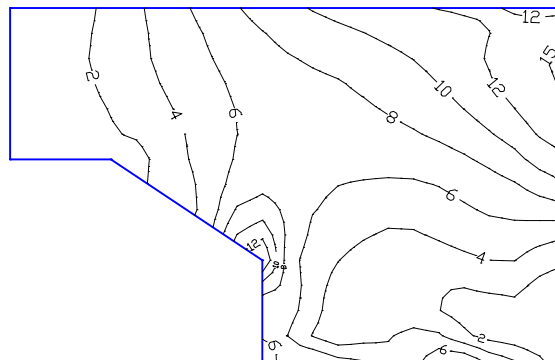
Den Verlauf der erforderlichen Längsbewehrung zeigen die nächsten Abbildungen.



Lange Flügelwand

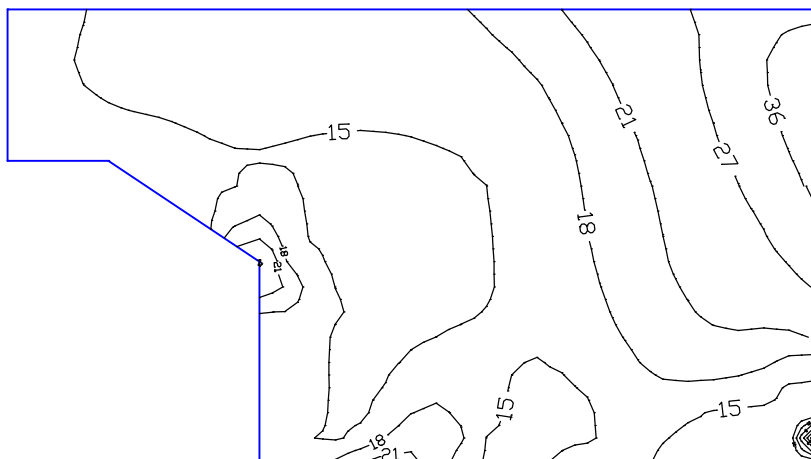


Lagerbank

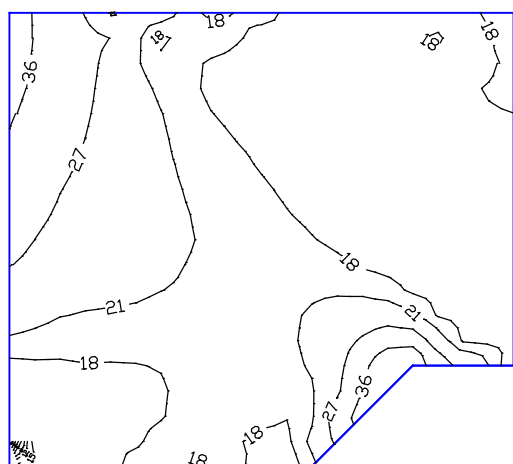


Kurze Flügelwand

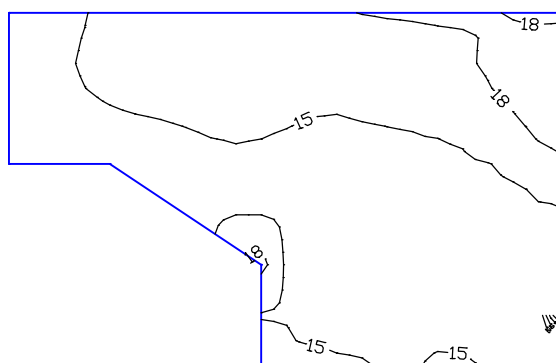
Erforderliche horizontale innere Längsbewehrung für die Tragfähigkeit [cm²/m]



Lange Flügelwand

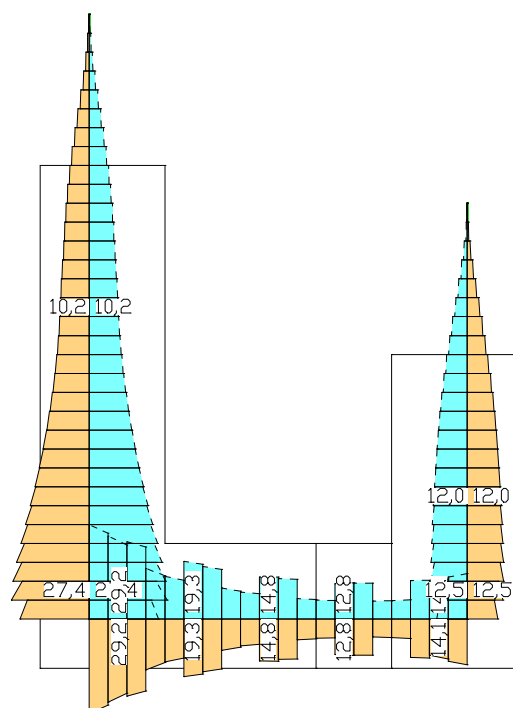


Lagerbank



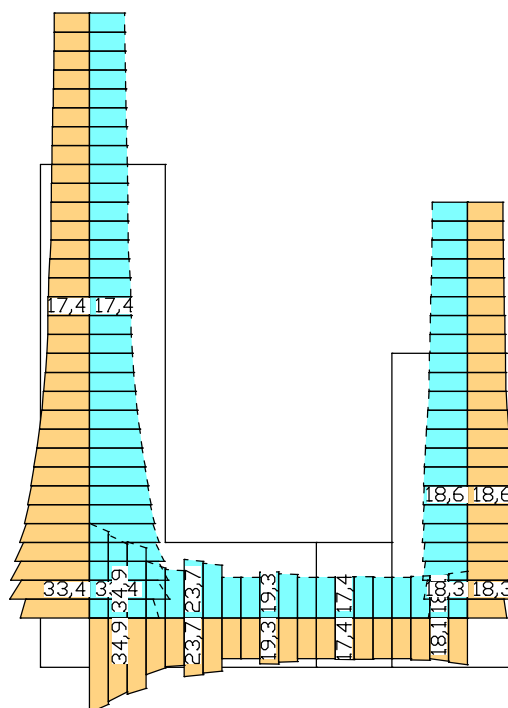
Kurze Flügelwand

Maximal erforderliche horizontale innere Längsbewehrung [cm<sup>2</sup>/m]



Bewehrung für die Tragfähigkeit

Horizontale Längsbewehrung entlang der Oberkante [cm<sup>2</sup>/m]



Maximal erforderliche Bewehrung



## Literaturhinweise

- Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 22/2012  
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS)  
vom 26. November 2012. BMVBS, Bonn 2012.
- DIN EN 1990/NA:2010/A1:2012-08  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.
- DIN EN 1991-2/NA:2012-08  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.
- DIN EN 1992-1-1/NA:2013/A1:2015-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2015.
- DIN EN 1992-2/NA:2013-04  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2013.
- Einführungserlass des Eisenbahnbundesamtes  
zur Umstellung auf die Eurocodes vom 30. November 2012.  
Eisenbahnbundesamt, Bonn 2012.
- EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1991-1-1:2002  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.  
Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2002.
- EN 1991-2:2003  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2004.
- EN 1992-1-1:2004/A1:2014  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2014.
- EN 1992-2:2005/AC:2008  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1998-1:2004  
Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben –  
Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2006.
- Heft 466 - Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton.  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 1996.

Heft 600 Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2).

Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.

Beuth Verlag, Berlin 2012.

ÖNORM B 1990-1:2013-01

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –

Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 und nationale Ergänzungen.

Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2013.

ÖNORM B 1990-2:2010-12

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung – Teil 2: Brückenbau.

Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990/A1 und nationale Ergänzungen.

Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2010.

ÖNORM B 1991-2:2011-04

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.

Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen.

Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2011.

ÖNORM B 1992-1-1:2011-12

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken –

Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau.

Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.

Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2011.

ÖNORM B 1992-2:2014-09

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken –

Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.

Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.

Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2014.

Rossner, W.; Graubner, C.-A.

Spannbetonbauwerke.

Teil 3: Bemessungsbeispiele nach DIN 1045-1 und DIN-Fachbericht 102.

Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.

Rossner, W.; Graubner, C.-A.

Spannbetonbauwerke.

Teil 4: Bemessungsbeispiele nach Eurocode 2.

Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2012.

Zilch, K.; Rogge, A.

Bemessung der Stahlbeton- und Spannbetonbauteile nach DIN 1045-1.

Beton-Kalender 2002, Bd. 1, S. 217-359.

Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2002.

Zilch, K.; Zehetmaier, G.

Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1.

Springer-Verlag, Berlin 2006.



# Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise

## Grundlagen

Die Brückennachweise gemäß Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken (NRR - Ausgabe Mai 2011 mit 1. Ergänzung April 2015) sind als Ergänzung zur FEM-Analyse 3D konzipiert und anwendbar für den Nachweis bestehender Straßenbrücken. Als Tragwerksmodelle sind Stab-, Flächen- und Volumentragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton zugelassen. Innerhalb eines Tragwerksmodells sind verschiedenartige Bauteile kombinierbar:

- Nicht vorgespannte Bauteile
- Vorspannte Bauteile mit nachträglichem Verbund
- Vorspannte Bauteile ohne Verbund
- Bauteile mit externer Vorspannung
- Bauteile in Mischbauweise

Als Grundlage der Nachrechnung dient nach Kapitel 4.2 der Richtlinie eine der beiden Basisnormen:

- DIN Fachbericht 102:2009
- DIN EN 1992-2:2010/NA:2013

Die gestufte Nachweisführung erfolgt im Programm alternativ nach folgenden Verfahren:

- Stufe 1 unter Berücksichtigung aller Vorschriften der Basisnorm
- Stufe 2 unter Berücksichtigung ergänzender Regelungen:
  - Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite
  - Streufaktoren für die Einwirkungen aus Vorspannung
  - Nachweise für Querkraft, Torsion, Rissbreite, Dekompression und Ermüdung

In beiden Stufen sind die Verkehrslastmodelle nach Kapitel 10.1 nutzbar.

Bei der Materialauswahl nach Kapitel 11.2 wird gemäß Basisnorm differenziert:

- Normalbeton nach DIN FB 102, Tabelle 3.1, und Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10, für die Bemessung nach DIN Fachbericht 102
- Normalbeton und Leichtbeton nach DIN EN 1992-1-1, Tabellen 3.1 und 11.3.1, für die Bemessung nach DIN EN 1992-2

Die Nachweisführung erfolgt im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle und Lastmodellvarianten den Einwirkungsgruppen zuzuordnen. In den gewünschten Bemessungssituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente.

Die Dialoge zu den Einwirkungen, den Sicherheitsbeiwerten und zur Wahl der Nachweisstufe werden über die Berechnungseinstellungen aufgerufen. Die detaillierten Nachweisvorgaben und Bewehrungsangaben sind im Rahmen der Querschnittsdefinition einzugeben.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden alle Nachweise am Polygonquerschnitt geführt. Allgemeine Hinweise zur Anwendung von Bemessungsobjekten sind dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

Im Ordner *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* der Datenbasis ist zusätzlich eine Einzelbemessung für frei definierte Polygonquerschnitte oder Verbundquerschnitte möglich.

In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften des DIN Fachberichts 102 als Basisnorm zitiert. Auf Bestimmungen der DIN EN 1992-2 wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthält. Die betreffenden Passagen werden entweder in eckige Klammern gesetzt oder durch senkrechten Strich am Text markiert.

## Lastmodelle

Zur Definition der nachweisrelevanten vertikalen Verkehrseinwirkungen wird durch die Straßenbauverwaltung gemäß Kapitel 10.1.2 der Richtlinie ein Ziellastniveau festgelegt, das sich an der durchschnittlichen täglichen Stärke des Schwerverkehrs und der Verkehrsart orientiert. Je nach Anzahl der Fahrstreifen ergeben sich daraus nach Tabelle 10.1 oder Tabelle 10.2 folgende alternative Lastmodelle als Ziellastniveau:

- Verkehrslastmodell LM1 nach DIN Fachbericht 101:2009
- Verkehrslastmodell LMM nach DIN EN 1991-2/NA:2011
- Brückenklasse BK 60/30 nach DIN 1072:1985
- Brückenklasse BK 60 nach DIN 1072:1967
- Brückenklasse BK 30/30 nach DIN 1072:1985

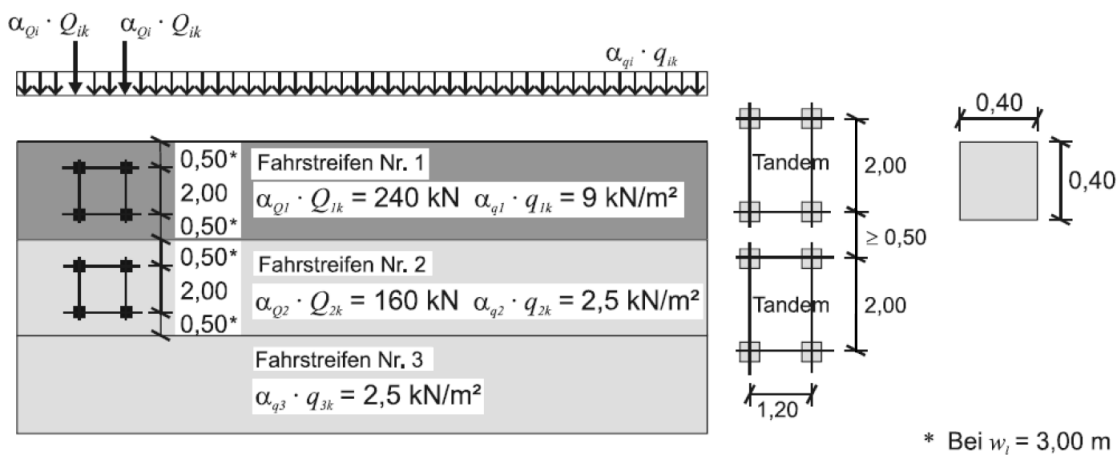
Im Ermüdungsnachweis kommt gemäß Kapitel 10.1.4 das Ermüdungslastmodell 3 nach DIN Fachbericht 101 bzw. DIN EN 1991 zur Anwendung.

Die Bearbeitungsschritte zur Definition der Lastmodelle werden nachfolgend beschrieben.

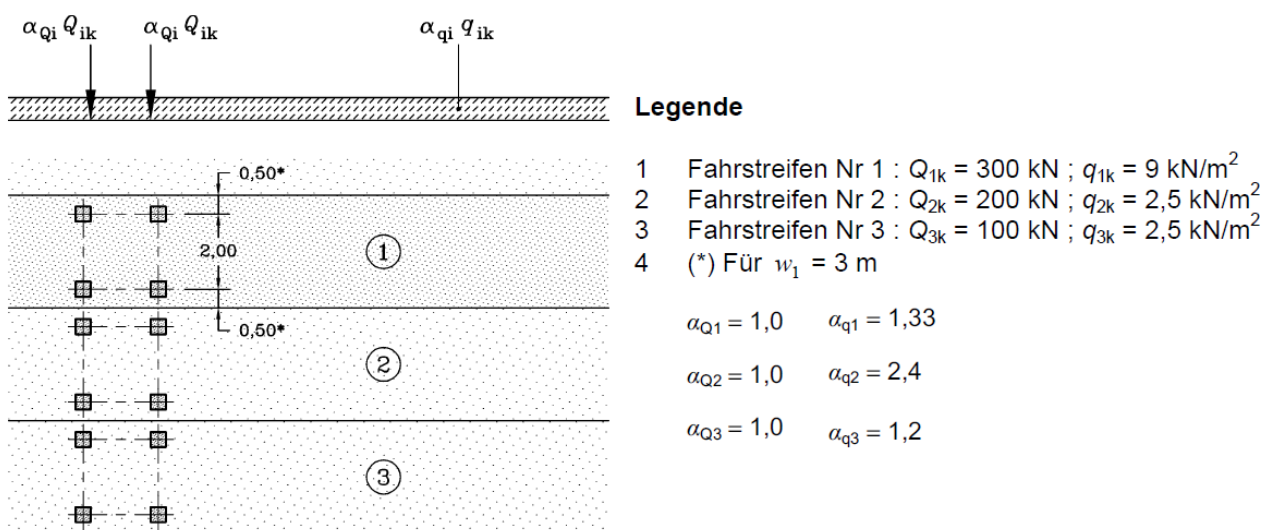
## Ziellastniveaus LM1 und LMM

Das Lastmodell 1 nach DIN Fachbericht 101 (LM1) bzw. das modifizierte Lastmodell 1 nach DIN EN 1991-2/NA (LMM) besteht aus zwei Teilen:

- Doppelachse (Tandemsystem TS)
- Gleichmäßig verteilte Flächenlast UDL



Verkehrslastmodell LM1 nach DIN Fachbericht 101, Abb. 4.2



Modifiziertes Verkehrslastmodell 1 (LMM) nach DIN EN 1991-2/NA, Bild 4.2a

Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt. Da nicht in allen Fällen von vornherein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, können unterschiedliche Varianten von Laststellungen definiert werden.

Die Bearbeitung des Lastmodells 1 erfolgt über den Ordner *Nachrechnungsrichtlinie* der Datenbasis. Mit der Option *Neu* des Kontextmenüs des Lastmodells 1 wird eine neue Variante von Laststellungen angelegt und der Eingabedialog gestartet.

Die angepassten Grundwerte des Tandemsystems ( $\alpha_{Qi} \cdot Q_{ik}$ ) und die Lastordinaten der UDL-Lasten ( $\alpha_{qi} \cdot q_{ik}$ ) werden mit dem Kontextmenüpunkt *Eigenschaften* des Lastmodells 1 eingestellt.

Lastmodell LM1 nach DIN FB 101

Lastmodell LMM nach DIN EN 1991-2/NA

Bei der FEM-Berechnung werden alle vertikalen Lastanteile des Lastmodells 1 als Flächenlasten behandelt und in getrennten Lastfällen berechnet, um später die extremalen Reaktionen ermitteln zu können.

Mit der Option *Projizierte Lasten anwenden* werden die vertikalen Lasten auf die Elemente in globaler z-Richtung projiziert. Daher ist die Last über den Elementen anzuordnen (siehe *Freie Flächenlast n-Eck*). Es werden nur Elemente belastet, die nicht durch andere Elemente verdeckt werden. Dies gilt auch für eine teilweise Überdeckung.

Lastmodell 1:

### Aus

Beendet die Darstellung des Lastmodells 1.

### TS Neu

Eingabe einer neuen Stellung des Tandemsystems (siehe auch Tandemsystem). Die Stellungen des Tandemsystems schließen sich gegenseitig aus.

### UDL Neu

Fortlaufende Eingabe von vier- oder dreieckigen Lastflächen der UDL-Last. Die Teilflächen der UDL-Last können gleichzeitig wirken. Die Eingabe ist für UDL2 (Fahrstreifen 2) voreingestellt. Über das Kontextmenü der Lastfläche können andere Fahrstreifen oder eine Restfläche gewählt werden.

### UDL Gen

Generieren neuer Lastflächen der UDL-Last. Das viereckige Generierungsgebiet wird mit identischer Anzahl von Lastflächen auf den gegenüberliegenden Rändern eingeteilt.

## Tandemsystem des Lastmodells 1

**Tandemsystem (1)**

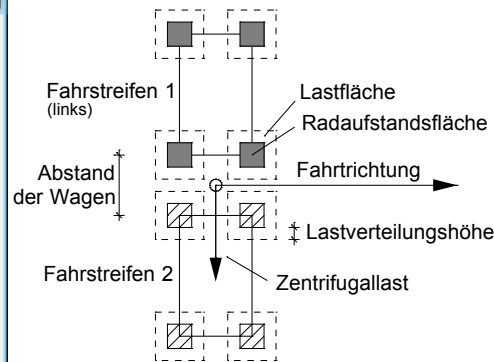
Abstand der Wagen:  m

Fahrstreifen:

Zentrifugallast:  kN

Lastverteilungshöhe:  m

Punkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	1,5	2,5	0
2	3,5	2,5	0
3	1,5	3,5	0



Eingabedialog und Prinzipskizze des Tandemsystems im Lastmodell 1 nach FB 101.

### Abstand der Wagen

Abstand der Schwerpunkte der Radaufstandsflächen (siehe Abbildung).

### Fahrstreifen

Anordnung der Fahrstreifen von links nach rechts.

### Zentrifugallast

Lastgröße  $Q_t$  dieser Stellung des Tandemsystems. Sie wirkt senkrecht zur Fahrtrichtung. Ihre exzentrische Lage wird nicht erfasst.

### Lastverteilungshöhe

Ergibt in Verbindung mit den Radaufstandsflächen die Lastflächen des Tandemsystems (siehe Abbildung).

### Punkt

1. Bezugspunkt des Tandemsystems
2. Punkt der lokalen x-Achse (Fahrtrichtung)
3. Punkt in lokaler x-y Ebene

## Ziellastniveaus BK 60/30, BK 60, BK 30/30

Für die Ziellastniveaus BK 60/30, BK 60 und BK 30/30 sind entsprechend Kapitel 10.1.2 (7) der Richtlinie die Verkehrsregel-lasten nach DIN 1072 als charakteristische Einwirkungen mit den dort angegebenen Fahrstreifenbreiten anzusetzen.

	Brückenkategorie 60/30	Brückenkategorie 30/30	
1			<p>Eine einzelne Achse</p>
	<p>Gesamtlast: 600 kN Radlast: 100 kN Ersatzflächenlast: <math>p' = 33,3 \text{ kN/m}^2</math></p>	<p>Gesamtlast: 300 kN Radlast: 50 kN Ersatzflächenlast: <math>p' = 16,7 \text{ kN/m}^2</math></p>	<p>Achslast: 130 kN (siehe Erläuterungen zu Abschnitt 3.3.1 in Beiblatt 1 zu DIN 1072)</p>
2	<p>Lastschema für die Fahrbahnfläche zwischen den Schrammborden</p>		
	<p>HS Hauptspur mit Schwingbeiwert <math>\varphi</math> NS Nebenspur ohne Schwingbeiwert <math>\varphi</math> Restflächen <math>p_2 = 3 \text{ kN/m}^2</math> ohne Schwingbeiwert <math>\varphi</math> (<math>\varphi</math> siehe Abschnitt 3.3.4)</p>		

Verkehrsgelastlasten nach DIN 1072:1985, Tabelle 1

Zur Eingabe dieser Lastmodelle wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

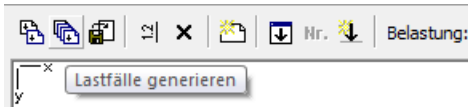
- Öffnen eine neuen Lastfalls
- Eingabe der Radlasten gemäß Lastbild
- Speichern der Lastkonfiguration in der Datenbank zur späteren Verwendung

Eingabe und Speicherung von SLW-Lasten nach DIN 1072, Tabelle 1, am Beispiel BK 60/30

Bei Bedarf sind folgende Vereinfachungen möglich:

- Eingabe einer Ersatzflächenlast je SLW anstelle der Radlasten
- Definition der SLW-Lastordinaten als Überlasten zu den Grundlasten der Haupt- und Nebenspur

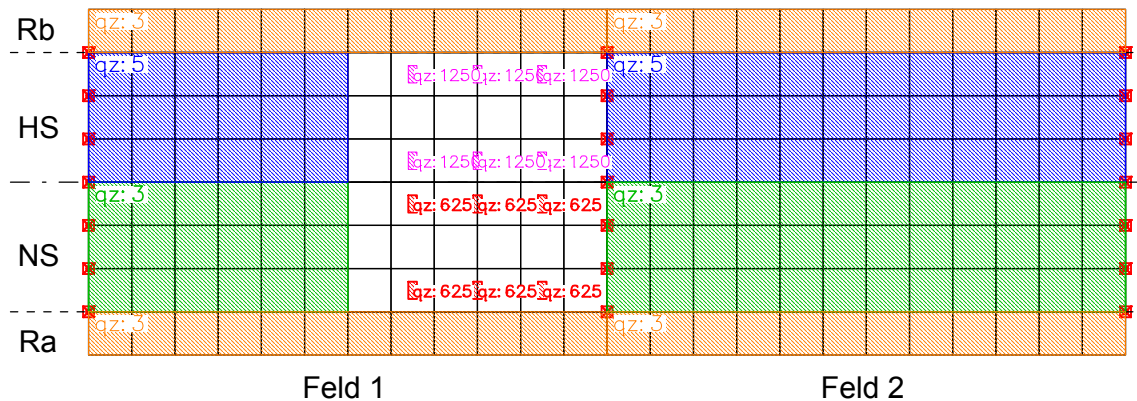
Die Eingabe der Grundlasten erfolgt feldweise und getrennt nach Hauptspur, Nebenspur und Restflächen. Die Laststellungen der SLW können innerhalb des Lastdialogs generiert werden.



Das nachfolgende Beispiel zeigt die inklusiv wirkende Feldlasten mit exklusiven SLW-Laststellungen auf einer zweifeldrigen Brückenplatte. Im Wirkungsbereich der SLW wird der Schwingbeiwert nach DIN 1072, Kapitel 3.3.4, zu  $\phi = 1$  angenommen.

**Lastfall-Bezeichnung**

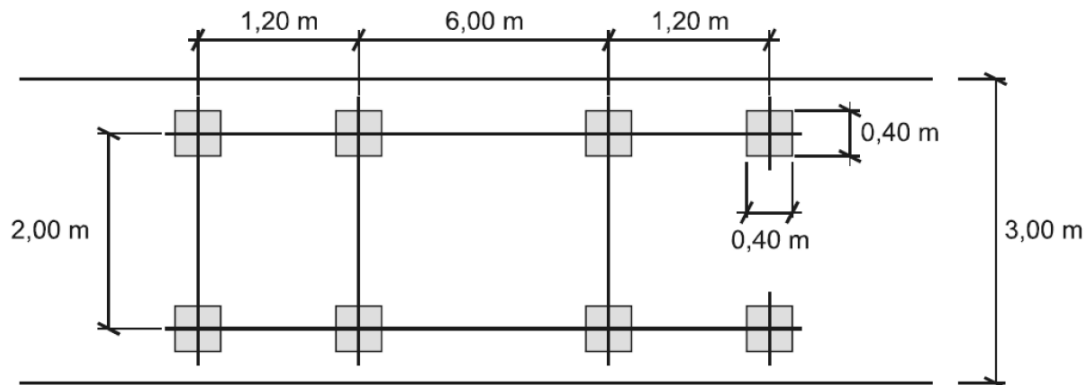
Lastfall	Bezeichnungstext
4	11 BK 60/30 - Feld 1 - q.HS=5 kN/m <sup>2</sup>
5	12 BK 60/30 - Feld 1 - q.NS=3 kN/m <sup>2</sup>
6	13 BK 60/30 - Feld 1 - q.Ra=3 kN/m <sup>2</sup>
7	14 BK 60/30 - Feld 1 - q.Rb=3 kN/m <sup>2</sup>
8	21 BK 60/30 - Feld 2 - q.HS=5 kN/m <sup>2</sup>
9	22 BK 60/30 - Feld 2 - q.NS=3 kN/m <sup>2</sup>
10	23 BK 60/30 - Feld 2 - q.Ra=3 kN/m <sup>2</sup>
11	24 BK 60/30 - Feld 2 - q.Rb=3 kN/m <sup>2</sup>
12	101 BK 60/30 - Feld 1 - SLW (1)
13	102 BK 60/30 - Feld 1 - SLW (2)
14	103 BK 60/30 - Feld 1 - SLW (3)
15	201 BK 60/30 - Feld 2 - SLW (1)
16	202 BK 60/30 - Feld 2 - SLW (2)
17	203 BK 60/30 - Feld 2 - SLW (3)



Beispiel für die Anordnung des Lastmodells BK 60/30 auf einer Brückenplatte

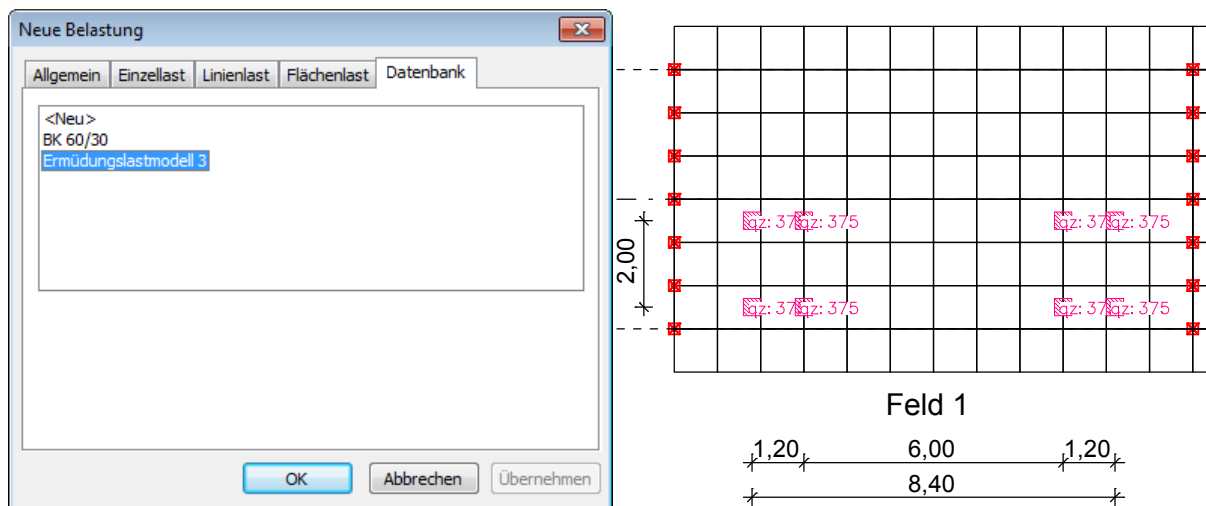
## Ermüdungslastmodell 3

Das Ermüdungslastmodell 3 besteht aus vier Achsen mit einer Achslast von je 120 kN. Die Aufstandsfläche jedes Rades ist ein Quadrat mit 0,40 m Seitenlänge. Die Einzellasten dürfen nach Fachbericht 101, Abb. 4.6 bzw. Abb. 4.7, verteilt werden.



Ermüdungslastmodell 3 nach DIN Fachbericht 101, Abb. 4.10, bzw. DIN EN 1991-2/NA, Bild 4.8

Zur Eingabe empfiehlt sich zunächst ebenfalls, die Lastkonfiguration in der Datenbank zu speichern. Anschließend kann das gespeicherte Lastmodell abgerufen und an beliebigen Positionen platziert und generiert werden.



Abrufen und Platzieren des in der Datenbank gespeicherten Ermüdungslastmodells 3

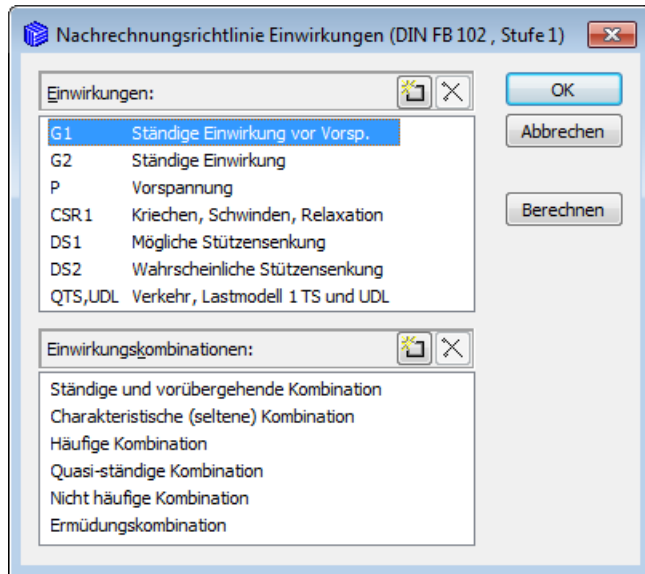
Weitere Ermüdungslastmodelle können bei Bedarf in gleicher Weise definiert werden.

## Eingaben

### Einwirkungen und Einwirkungskombinationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die maßgeblichen Einwirkungskombinationen.

Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



#### Einwirkungen

Liste der definierten Einwirkungen. Folgende Einwirkungen können definiert werden:

- *G1* bis *G9*: Ständige Einwirkungen
- *P*: Vorspannung
- *QTS,UDL*: Verkehr, Lastmodell 1 TS und UDL
- *QI*: Verkehr, Bremsen und Anfahren
- *Qt*: Verkehr, Zentrifugallast
- *T*: Temperatur
- *W*: Wind
- *DS1*: Mögliche Stützensenkung
- *DS2*: Wahrscheinliche Stützensenkung
- *CSR1, CSR2*: Kriechen, Schwinden und Relaxation zu verschiedenen Zeitpunkten
- *A*: Außergewöhnliche Einwirkung
- *E*: Erdbeben
- *Q1* bis *Q9*: Andere veränderliche Einwirkung
- *Qfat*: Zyklische Ermüdungseinwirkung

Die Einwirkungen *DS1* und *DS2* ebenso wie die Einwirkungen *Q*, *T* und *W* werden in den Bemessungssituationen nur berücksichtigt, wenn sie ungünstig wirken.

#### Einwirkungskombinationen

Liste der definierten Einwirkungskombinationen.



Fügt eine neue Einwirkung bzw. Einwirkungskombination hinzu.



Entfernt die markierte Einwirkung bzw. Einwirkungskombination.

#### Berechnen

Berechnet die definierten Einwirkungskombinationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Kombinationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls.

Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch neube-

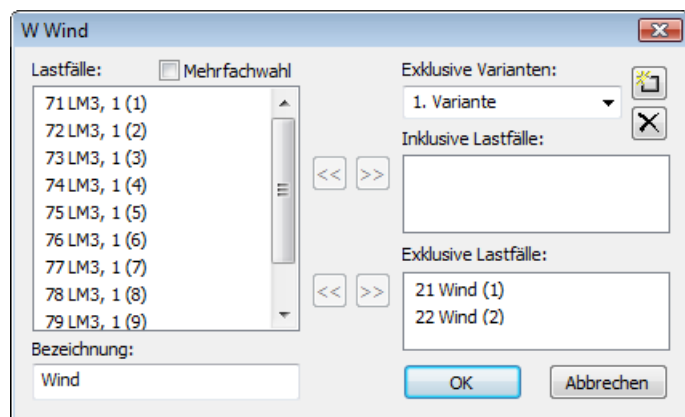


rechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert. In der nachfolgenden Tabelle ist die Verwendung der Kombinationen in den verschiedenen Nachweisen der Basisnormen dargestellt.

Kombination	Tragfähigkeit	DIN FB 102	DIN EN 1992-2
Ständig & vorüb. Außergewöhnlich Erdbeben	Längsbewehrung	4.3.1	3.1.6, 6.1
	Querbewehrung	4.3.2	6.2
	Torsionsbewehrung	4.3.3	6.3
Charakt. (selten)	Robustheitsbewehrung		6.1(110)
Nicht häufig	Robustheitsbewehrung	4.3.1.3	
Häufig	Ermüdung vereinfacht	4.3.7.4/5	6.8.6
Ermüdung	Beton	A.106.3.2	6.8.7, NA.NN.3.2
	Betonstahl	4.3.7.5	6.8.4, NA.NN.2
	Spannstahl	4.3.7.5	6.8.4, NA.NN.2
Kombination	Gebrauchstauglichkeit	DIN FB 102	DIN EN 1992-2
Charakt. (selten)	Rissbreite Klasse A	4.4.2.4	Tab. 7.103DE 7.2(102) 7.2(5) 7.2(5)
	Betonrandzugspannungen	4.4.0.3	
	Betondruckspannungen	4.4.1.1	
	Betonstahlspannungen		
	Spannstahlspannungen		
Nicht häufig	Betondruckspannungen	4.4.1.2	
	Betonstahlspannungen	4.4.1.3	
	Dekompression Klasse A	4.4.2.1	
	Rissbreite Klasse B	4.4.2.4	
Häufig	Hauptzugspannungen	4.4.0.3	7.3.1(NA.111)  Tab. 7.101DE
	Dekompression Klasse B	4.4.2.1	
	Rissbreite Klasse C, D	4.4.2.4	
	Rissbreite		
Quasi-ständig	Spannstahlspannungen	4.4.1.4	7.4 7.2(3) Tab. 7.101DE
	Dekompression Kl. C	4.4.2.1	
	Dekompression Kl. D	ARS 6/09	
	Rissbreite Klasse E	4.4.2.4	
	Verformungen	4.4.3	
	Betondruckspannungen	4.4.1.2	
Dekompression			

## Definition einer Einwirkung

Die Zuordnung der Lastfälle zu den Einwirkungen geschieht nach Auswahl oder Neueingabe einer Einwirkung. Dabei stehen je nach Art der Einwirkung unterschiedliche Dialoge zur Verfügung, von denen nachfolgend ein Beispiel dargestellt ist. Die möglichen Dialogoptionen werden anschließend erläutert.



### Lastfälle

Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen markieren, um sie der aktuellen Einwirkung hinzuzufügen.



### Mehrfachauswahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

### Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

### Exklusive Varianten

Eine exklusive Variante besteht aus inklusiven und exklusiven Anteilen. Die Varianten schließen sich gegenseitig aus. Mit den Schaltflächen  bzw.  können Einwirkungsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden.

### Inklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

### Exklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

### Bewegliche Lasten benutzen

Die Einwirkungen des Lastmodells 1 können entweder mit Hilfe von *beweglichen Lasten* oder normalen Lastfällen erfasst werden. Die *beweglichen Lasten* werden über einen eigenen Dialog beschrieben (siehe Lastmodell 1). Bei der Verwendung von normalen Lastfällen wird vereinfachend angenommen, dass die vertikalen ( $Q_{TS}$ ) und horizontalen ( $Q_t$ ) Einwirkungen des Tandemsystems unabhängig wirken.

### Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls

Der Spannkraftverlust wird als konstante prozentuale Minderung der Vorspannung definiert.

### CS als konstante Minderung der Vorspannung

Alternativ zur Definition von CS-Lastfällen kann der Einfluss des Kriechens und Schwindens durch eine konstante prozentuale Minderung der Vorspannung berücksichtigt werden.

### Interne Vorspannung

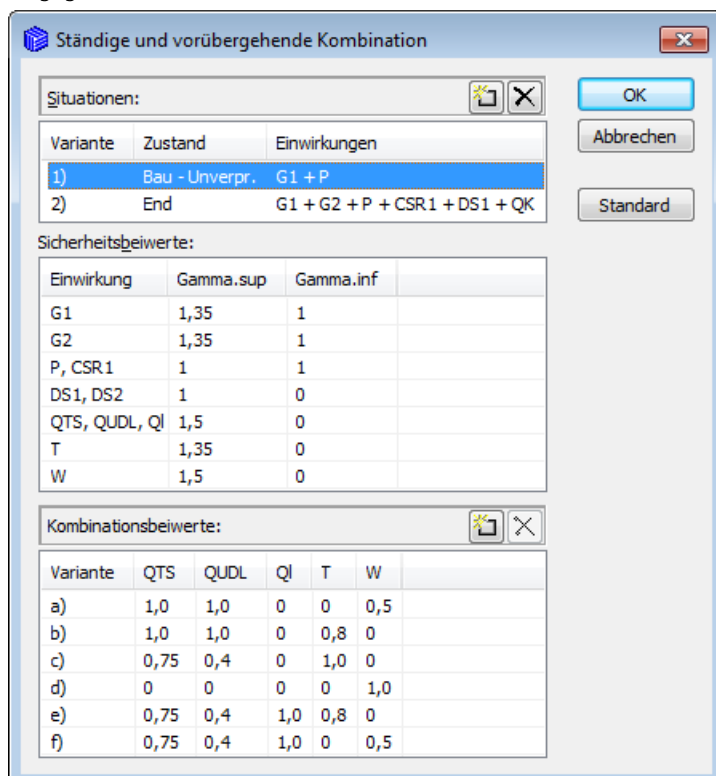
Gewählte Lastfälle, welche die interne Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

### Externe Vorspannung

Gewählte Lastfälle, welche die externe Vorspannung beschreiben. Die Reaktionen der einzelnen Lastfälle werden addiert.

## Definition einer Einwirkungskombination

Je nach gewähltem Nachweis sind unterschiedliche Einwirkungskombinationen erforderlich, die mit nachfolgendem Dialog eingegeben werden.



Variante	Zustand	Einwirkungen
1)	Bau - Unverpr.	G1 + P
2)	End	G1 + G2 + P + CSR1 + DS1 + QK



  

Einwirkung	Gamma.sup	Gamma.inf
G1	1,35	1
G2	1,35	1
P, CSR1	1	1
DS1, DS2	1	0
QTS, QUDL, QI	1,5	0
T	1,35	0
W	1,5	0

Variante	QTS	QUDL	QI	T	W
a)	1,0	1,0	0	0	0,5
b)	1,0	1,0	0	0,8	0
c)	0,75	0,4	0	1,0	0
d)	0	0	0	0	1,0
e)	0,75	0,4	1,0	0,8	0
f)	0,75	0,4	1,0	0	0,5

### Situationen

Liste der Bemessungs- bzw. Nachweissituationen. Jede Situation kann entweder für den Bau- oder den Endzustand gültig sein. Für Spannbetontragwerke mit nachträglichem Verbund lässt sich festlegen, dass die Spannglieder noch unverpresst sind. Die Einwirkung QK bedeutet veränderliche Einwirkungen entsprechend der Tabelle der Kombinationsbeiwerte. Mit den Schaltflächen  bzw.  können Situationen hinzugefügt bzw. gelöscht werden. Durch Doppelklick auf eine Situation lässt sich diese nachträglich bearbeiten.



### Sicherheitsbeiwerte

Tabelle der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{\text{sup}}$  und  $\gamma_{\text{inf}}$  für die Einwirkungen. In Nachweisstufe 1 werden die Werte nach DIN FB 101, Tabelle C.1 [DIN EN 1990/A1, Tabelle A.2.4.(B)], in Nachweisstufe 2 die Beiwerte nach Tabelle 10.8 und Kapitel 12.3.2 der Richtlinie vorgeschlagen. Für Lastmodelle nach DIN 1072 ist  $\gamma_{\text{sup}} = 1,50$  zu wählen.

	1	2	4
	Lastmodell	Auswirkung	Veränderliche Einwirkung $\gamma_Q$
1	LMM	günstig	0
2	(LM1 nach DIN EN 1991-1/NA)	ungünstig	1,35
3	LM1	günstig	0
4	(DIN FB 101)	ungünstig	1,50
5	≤ BK 60/30	günstig	0
6	(DIN 1072)	ungünstig	1,50

Tabelle 10.8 der Nachrechnungsrichtlinie. Zeile 1 bis 4 entspricht den Vorgaben des DIN Fachberichts 101 bzw. der DIN EN 1991-2

### Kombinationsbeiwerte

Tabelle der Kombinationsbeiwerte für die veränderlichen Einwirkungen. In Nachweisstufe 1 werden die Werte nach DIN FB 101, Tabelle C.2 [DIN EN 1990/A1, Tabelle A.2.1], in Nachweisstufe 2 die Beiwerte nach Kapitel 12.3.2 der Richtlinie vorgeschlagen. Mit den Schaltflächen  bzw.  können Kombinationsvarianten hinzugefügt bzw. gelöscht werden. In der Berechnung werden ausschließlich die hier aufgeführten Varianten berücksichtigt.

### Standard

Die Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte werden mit den für die Basisnorm und die Nachweisstufe empfohlenen Werten belegt. Als Nachweissituation werden alle relevanten Einwirkungen im Endzustand ausgewählt.

## Querschnittseingaben

Die Querschnittseingaben umfassen alle spezifischen Festlegungen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Eine Übersicht der Bemessungsvorgaben kann im Abschnitt *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* der Datenbasis aufgerufen werden.

## Nachweise

Im nachfolgenden Dialog wird festgelegt, welche Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für den Querschnitt vorgesehen sind. In den Berechnungseinstellungen kann diese Auswahl für das gesamte Tragwerk übersteuert werden.

### Vorspannung des Bauteils

Die Art der Vorspannung kann für jeden Querschnitt getrennt gewählt werden:

- *Nicht vorgespannt*
- *Nachträglicher Verbund*
- *Ohne Verbund*
- *Extern*
- *Mischbauweise*

### Anforderungsklasse

Die Nachweisbedingungen für den Dekompressions- und Rissbreitennachweis sind in DIN FB 102, Tabelle 4.118, über Anforderungsklassen festgelegt (Kapitel 4.4.0.3 (103)). Die Mindestanforderungsklasse ergibt sich in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung nach ARS 6/2009. Wenn für Anforderungsklasse D abweichend von Tabelle 4.118 der Dekompressionsnachweis gewählt wird, führt das Programm den Nachweis gemäß ARS 6/2009 für die quasi-ständige Einwirkungskombination.

DIN EN 1992-2:

Für die Nachweisbedingungen im Dekompressions- und Rissnachweis ist Tabelle 7.101DE maßgebend.

### Biegung und Längskraft

Sofern die vorgegebene, d.h. die im Querschnitt vorhandene Bewehrung unter Berücksichtigung der Dehnungsreserven im Spannstahl zur Aufnahme der Beanspruchung nicht ausreicht, wird die Bewehrung automatisch erhöht. Die Bemessung erfolgt dabei je nach Benutzerwahl mit oder ohne Berücksichtigung der vorgegebenen Bewehrungsverhältnisse. Mit dem Bemessungsergebnis werden die Betonstahl- und Spannstahlspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nachgewiesen.

### Robustheit

Dieser Nachweis ermittelt die Mindestbewehrung gegen ein Versagen ohne Vorankündigung nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1, Gleichung (6.101a)], die auch als Robustheitsbewehrung bezeichnet wird.

### Ausnutzung Biegung, Querkraft

Der Nachweis ermittelt die vom Querschnitt aufnehmbaren Biegemomente und Querkräfte sowie die Ausnutzung der vorgegebenen, d.h. der im Querschnitt vorhandenen Biege- und Querkraftbewehrung.

## Stahlzugspannungen

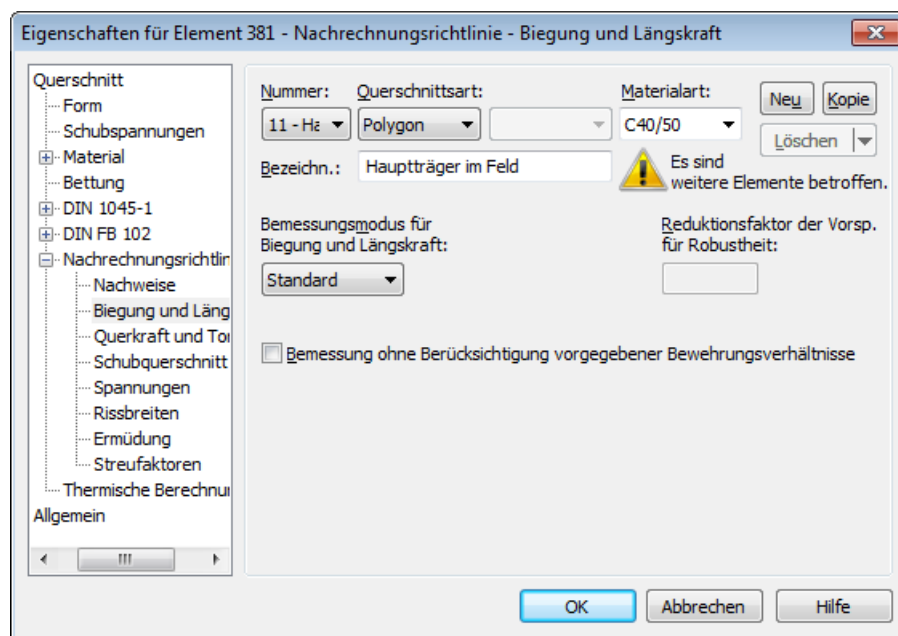
Bei Bauteilen mit interner Vorspannung werden neben den Betonstahlspannungen auch die Spannstahlspannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen.

## Mindest-Rissbewehrung, Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch Berechnung nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.4]. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung als Maximum aus Biegebewehrung, Robustheitsbewehrung und Mindest-Rissbewehrung nach Kapitel 4.4.2.2 [Kapitel 7.3.2] angesetzt. Sofern gewählt wird letztere bei Bedarf erhöht, um die Rissbreite einzuhalten.

## Biegung und Längskraft

Die Einstellungen gelten für alle Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.



### Bemessungsmodus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.1.2.1 [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.5.2 (2)], durchgeführt.

### Reduktionsfaktor der Vorsp. für Robustheit

Für die Anordnung der Robustheitsbewehrung sind die Vorschriften des DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.3 (108) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1 (110)], maßgebend. Danach soll bei Ermittlung der Zugzone die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung unberücksichtigt bleiben. Da diese bei Flächentragwerken nicht bestimmbar ist, kann ersatzweise die Vorspannung mit einem Reduktionsfaktor abgemindert werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes liegt im Ermessen des Anwenders.

### Bemessung ohne Berücksichtigung vorgegebener Bewehrungsverhältnisse

Falls gewählt, erfolgt eine bei der Bemessung erforderliche Bewehrungserhöhung ohne Berücksichtigung der durch die Grundbewehrung vorgegebenen Bewehrungsverhältnisse.

## Querkraft und Torsion

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe für die Schubbemessung von Flächenelementen.

### cot Theta, Methode

$\cot \Theta$  definiert die Neigung der Betondruckstreben gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.4.4 (1)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (2)]. Das Programm schlägt den Wert 1 vor (45° Druckstrebenneigung). Davon abweichend kann der Anwender einen Wert zwischen 4/7 und 3 frei wählen (vgl. Kapitel 12.4.3.3 der Richtlinie). Die Vorgabe eines größeren Wertes hat in aller Regel eine geringere erforderliche Querkraftbewehrung  $A_{sw}$ , eine geringere aufnehmbare Querkraft  $V_{Rd,max}$  und ein größeres Versatzmaß  $a_1$  nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.2.1.3 (3)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.2.1.3 (2)], zur Folge. In Nachweisstufe 1 sollte der Wert  $\cot \Theta = 1$  nicht unterschritten werden. Für den Nachweis stehen folgende Berechnungsmethoden zur Auswahl:

- *Standard*: Der Eingabewert wird auf den nach DIN FB 102, Gl. (4.122) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.107aDE)] für Querkraft, Torsion und kombinierte Beanspruchungen jeweils zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit beanspruchungabhängiger Druckstrebenneigung).
- *Konstant*: Der Nachweis erfolgt ohne weitere Begrenzung mit dem für  $\cot \Theta$  eingegebenen Wert (vgl. Auslegung Nr. 24 des NABau zu DIN 1045-1).
- *Std./45°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  wie oben begrenzt. Für Torsion wird gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2(3)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2 (102)], vereinfachend eine konstante Druckstrebenneigung von 45° angenommen.
- *Std./30°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  wie oben begrenzt. Für Torsion wird vereinfachend eine konstante Druckstrebenneigung von 30° angenommen, wie es in Kapitel 12.4.3.4 (2) der Richtlinie für Nachweisstufe 2 zugelassen ist.
- *NRR Gl. 12.12,15*: Für die Begrenzung von  $\cot \Theta$  ist in Nachweisstufe 2 die Gl. (12.12) bzw. Gl. (12.15) der Richtlinie maßgebend.
- *NRR/45°, NRR/30°*: Für Querkraft wird  $\cot \Theta$  nach Gl. (12.12) bzw. Gl. (12.15) der Richtlinie begrenzt, für Torsion wird vereinfachend ein konstanter Druckstrebenwinkel von 45° oder 30° angenommen.

Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.

### Biegezugbew. Asl

Die anzurechnende Biegezugbewehrung nach DIN FB 102, Bild 4.12 [DIN EN 1992-2, Bild 6.3].

### Asl automatisch erhöhen bis

Bei Flächen kann optional ein Größtwert angegeben werden, bis zu dem das Programm automatisch den vorgenannten Eingabewert erhöht, um Bügelbewehrung zu vermeiden [cm²].

### Stahlgüte der Bügel

- *420S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 420 \text{ MN/m}^2$ .
- *500S*: Betonstabstahl mit  $f_{yk} = 500 \text{ MN/m}^2$ .
- *500M*: Betonstahlmatten mit  $f_{yk} = 500 \text{ MN/m}^2$ .
- *Allgemein*: Frei definierbare Stahlgüte [MN/m²].

### Faktor für $\rho_{w,min}$

Der Mindestbewehrungsgrad  $\rho_{w,min}$  richtet sich nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.2.2 (4)\*P, und wird über einen Faktor in Bezug auf die Grundwerte  $\rho$  nach Tab. 5.7 festgelegt. Der Faktor wird bei Stäben und Bemessungsobjekten mit 1 und bei Flächenelementen gemäß Kapitel 5.4.3.3 (2)\*P mit 0,6 vorgeschlagen. Er kann zwischen 0 und 1,6, dem Sollwert für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt, frei gewählt werden.

DIN EN 1992-2:

Der Mindestbewehrungsgrad  $\rho_{w,min}$  wird über einen Faktor in Bezug auf den Grundwert für Balken nach DIN EN 1992-2, Kapitel 9.2.2 (5) festgelegt. Bei Platten mit  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  ist mindestens der 0,6-fache Wert der Mindestbewehrung von Balken erforderlich. Für gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt ist nach Gleichung (9.5bDE) der 1,6-fache Wert anzusetzen.

### Bemessung wie Platten

Stäbe bzw. Bemessungsobjekte werden wie Platten behandelt, d.h. es wird gemäß DIN FB 102, Kapitel 5.4.3.3 (2)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.1 (4)], keine Mindestquerkraftbewehrung ermittelt, wenn rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist.

### Verlegemaß $c_{v,l}$

In DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.4.2 (2)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.1 (10)], wird der innere Hebelarm  $z$  auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,l} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,l}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,l}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Das Programm schlägt für  $c_{v,l}$  den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ , vor.

### Getrennter Nachweis für x- und y-Richtung

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 (5)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.1 (10)], darf bei zweiachsig gespannten Platten der Querkraftnachweis in den Spannrichtungen x und y getrennt geführt werden. Die problemgerechte Orientierung der Bewehrungsrichtungen obliegt dem Anwender.

### Hebelarm aus Biegebemessung

Normalerweise wird für den Querkraftnachweis bei Flächenelementen der Hebelarm  $z$  vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Alternativ kann der Hebelarm aus der Biegebemessung verwendet werden. Das Programm ermittelt an jedem Nachweisort für beide Bewehrungsrichtungen den größten Hebelarm je Nachweissituation und begrenzt ihn auf den Bereich  $0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$ . Beim Nachweis für die resultierende Querkraft  $q_T$  wird das Minimum aus  $z_x$  und  $z_y$  benutzt.

### vorh. Bewehrung

Die vorhandenen Querkraftbewehrungen  $A_{sw,y}$  und  $A_{sw,z}$  dienen zur Bestimmung des Schubbrisswinkels  $\beta_T$  in Gl. (12.13) der Richtlinie und damit zur Begrenzung des Druckstrebenwinkels  $\cot \Theta$  nach Gl. (12.12) bzw. (12.15) in Nachweisstufe 2. Die Eingabewerte dienen ferner zum Nachweis der aufnehmbaren Querkräfte und der Ausnutzungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

### Querkraftnachweis

In Nachweisstufe 2 darf bei Spannbetonbauteilen in ungerissenen Bereichen der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit unter Vernachlässigung der Querkraftbewehrung durch Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen gemäß Kapitel 12.4.3.3 (9) der Richtlinie erbracht werden. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

### Faktor für $P_0$

Beim Nachweis der Querkrafttragfähigkeit durch Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen ist nach Kapitel 12.2.2 (5) der Richtlinie an Arbeitsfugen mit Spanngliedkopplungen der statisch bestimmte Anteil  $P_0$  der Vorspannung mit dem Faktor 0,75 abzumindern.

### Spannstahl auf Torsionsbew. anrechnen

Nach Kapitel 12.4.3.4 (3) der Richtlinie darf in Nachweisstufe 2 Spannstahl auf die Torsionslängsbewehrung angerechnet werden, wenn sich die Spannglieder innerhalb der effektiven Wanddicke  $t_{eff}$  befinden und sie gleichmäßig über die Wand des Ersatzquerschnitts verteilt sind. Der rechnerische Spannungszuwachs wird programmseitig gemäß Vorschrift begrenzt. Die sachgerechte Auswahl der anrechenbaren Spannglieder obliegt dem Anwender.

## Schubquerschnitt

Bei Polygonquerschnitten werden für die Querkraft- und Torsionsbemessung zusätzliche Querschnittsabmessungen benötigt. Diese werden nachfolgend erläutert. Bei Querschnitten mit interner Vorspannung oder vom Rechteck abweichender Form sollten die vom Programm vorgeschlagenen Abmessungen überprüft werden.

### Breite

Querschnittsbreite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$ .

### Höhe

Querschnittshöhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$ .

### Nutzhöhe

Statisch wirksame Höhe zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_z$ .

### Nutzbreite

Statisch wirksame Breite zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit für  $Q_y$ .

### Nom. Breite, Nom. Höhe

Die nominelle Breite bzw. Höhe intern vorgespannter Bauteile gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 (8)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (6)] zur Berücksichtigung der Hüllrohrdurchmesser bei der Berechnung des Bemessungswertes der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$ .

### Faktor kb, Faktor kd

Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe  $bn$  bzw. Nutzhöhe  $d$  im Nachweis der Quertragfähigkeit für  $Q_y$  bzw.  $Q_z$ .

### Hebelarm

Der Hebelarm  $z$  kann auf folgende Arten definiert werden:

- $kd * Nutzhöhe$ ,  $kb * Nutzbreite$ : Die Berechnung erfolgt mit den eingegebenen Größen.
- *aus Biegebemessung*: Das Programm ermittelt in der Biegebemessung an jedem Nachweisort den größten Hebelarm je Bemessungssituation. Dieser ist als Abstand zwischen den Schwerpunkten der Betondruck- und Stahlzugkräfte definiert.
- *NRR Gl. 12.16*: In der Biegebemessung wird entsprechend Gl. (12.16) der Richtlinie ein mit dem Kraftzuwachs in den Spanngliedern gewichteter Hebelarm ermittelt. Am Nachweisort ist je Bemessungssituation das Maximum aus den Schnittkraftsätzen mit Spannstahl in der Zugzone II maßgebend. Wenn für alle Schnittkraftsätze der Spannstahl in der Druckzone liegt, wird der Hebelarm nach Gl. (12.16) zu  $z = z_s$  ermittelt (vgl. Maurer et al. 2012).
- $0,9 * dp$ : Im Nachweis für  $Q_z$  wird der Hebelarm über die Nutzhöhe  $d_p$  der Spannglieder bestimmt. Dabei wird  $d_p$  als der über die Spanngliedflächen gewichtete Mittelwert am Nachweisort angenommen (vgl. Rossner/Graubner 2005, S. 252).

Der maßgebende Hebelarm wird gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.4.2 (2)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (1)], auf den



Bereich  $0,1 \cdot d \leq z \leq \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$  begrenzt und im ausführlichen Nachweisprotokoll dokumentiert.

### Kernquerschnitt $A_k = z_1 \cdot z_2$

Abmessungen des Kernquerschnitts für die Berechnung der Torsionsbewehrung.

### t<sub>ef</sub>

Die effektive Wandstärke des Torsionsquerschnitts nach DIN FB 102, Bild 4.15 [DIN EN 1992-2, Bild 6.11].

### Kastenquerschnitt

Angabe zur Festlegung des Faktors  $\alpha_{c,red}$  in DIN FB 102, Gl. (4.40), zur Bestimmung der Ausnutzung des Torsionsquerschnitts nach Gl. (4.47a) bzw. (4.47b) und zur Überprüfung der Hauptdruckspannungen gemäß Kapitel 4.3.3.2.2 (2).

DIN EN 1992-2:

Auswahl der für Kastenquerschnitte geltenden Regeln zum Nachweis der Maximaltragfähigkeit nach Kapitel 6.3.2(4) und erforderlichen Bewehrung nach Kapitel 6.3.2(5) bei kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion. Bei Kastenquerschnitten wird gemäß Kapitel 6.3.2 (NA.106) zusätzlich die Hauptdruckspannung aus Biegung, Längskraft und Torsion nachgewiesen.

## Spannungen

### zul $\sigma_c$

Die Betondruckspannung  $\sigma_c$  ist in den Bau- und Endzuständen nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (103)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (2)], auf  $0,60 \cdot f_{ck}$  unter der nichthäufigen [charakteristischen] Einwirkungskombination zu begrenzen. Diese Grenze darf um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone z.B. durch Querbewehrung umschürt ist. Falls die Gebrauchstauglichkeit durch Kriechen wesentlich beeinflusst wird, soll nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (104)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (3)] zusätzlich die Grenze  $0,45 \cdot f_{ck}$  unter der quasi-ständigen Kombination eingehalten werden.

### zul $\sigma_c(t)$

Zulässige Betondruckspannung  $\sigma_c(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  der Einleitung der Vorspannung gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (102)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.2.2(5), Gl. (5.42)]. Übersteigt die Druckspannung den Wert  $0,45 \cdot f_{c(t)}$ , so soll die Nichtlinearität des Kriechens berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt der Eintragung der Vorspannung wird im Programm bei der Bemessungssituation „G1+P“ angenommen.

### f<sub>c</sub>(t)

Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t$  der Eintragung der Vorspannung gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (102)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.2.2 (5)].

### **Betonstahlspannungen**

Die Zugspannungen in der Bewehrung dürfen nach DIN FB 102, Kapitel 4.1.1.3 (105), unter der nicht-häufigen Einwirkungskombination den Wert  $0,8 \cdot f_{yk}$  nicht übersteigen.

DIN EN 1992-2:

Die Zugspannungen in der Bewehrung dürfen nach Kapitel 7.2(5) unter der charakteristischen Einwirkungskombination den Wert  $0,8 \cdot f_{yk}$  nicht übersteigen. Bei Spannungen aus indirekter Einwirkung darf die Grenze zu  $1,0 \cdot f_{yk}$  angenommen werden.

### **Dekompression, Spannung**

Maßgebliche Spannung für den Dekompressionsnachweis bei Flächenelementen ( $\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$ ).

### **Hauptzugspannungen nur im Bereich von Längsdruck**

Mit dieser Option lassen sich die Anwendungsvorschriften des DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3(6)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1 (NA.112)], nutzen. Diese lassen bei vorgespannten Bauteilen zu, den Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen zu begrenzen, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen (vgl. auch DIN 4227, Kapitel 12.2 (1)). Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

### **Av**

Fläche des Vollquerschnitts zur Berechnung der Normalspannung aus Längskraft gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.1 (109) [DIN EN 1992-2: vgl. Rossner/Graubner 2012, S. 228], wenn die Querschnittsabmessungen auf die mitwirkende Plattenbreite reduziert wurden. Falls alternativ der Querschnitt als Vollpolygon mit Angabe der mitwirkende Breite definiert wurde, ist die Eingabe von  $A_v$  gesperrt (s. auch Kapitel *Strukturbeschreibung/Polygonquerschnitt*).

### **Hinweis**

In Nachweisstufe 2 können nach Kapitel 12.5.3 (2) der Richtlinie verminderte Anforderungen an den Nachweis der Dekompression gestellt werden.

## Rissbreiten

Die Vorgaben gelten für die Berechnung der Mindestbewehrung und den Nachweis der Rissbreite.

### Querschnittsrand

Der Grenzwert der rechnerischen Rissbreite  $w_{\max}$ , der größte vorhandene Stabdurchmesser  $\max. d_s$  und der Rissabstand  $s_{r,\max}$  können für Querschnittsränder und Bewehrungsrichtungen unterschiedlich definiert werden.

*Standard*

Die Standard-Definition gilt für nicht spezifizierte Ränder und Richtungen.

*Oben, unten, x, y*

Definition für den oberen oder unteren Rand in Bewehrungsrichtung  $x$  oder  $y$ .

<Hinzufügen>

Startet den Dialog zum Hinzufügen eines Querschnittsrands.

<Löschen>

Löscht den angezeigten Querschnittsrand.

### w<sub>max</sub>

Grenzwert für die rechnerische Rissbreite nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3 (103), Tabelle 4.118 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1, Tabelle 7.101DE]. Das Programm schlägt den Tabellenwert vor, der sich aus der gewählten Anforderungsklasse und der Vorspannung des Bauteils ergibt. Nach Freischaltung des Eingabefeldes kann dieser Wert modifiziert werden, um z.B. die verminderten Anforderungen in Nachweisstufe 2 gemäß Kapitel 12.6 der Richtlinie zu berücksichtigen.

### max. ds

Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (6)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.3 (2)].

### sr,max

Bei der Berechnung der Rissbreite wird der Rissabstand  $s_{r,\max}$  standardmäßig nach DIN FB 102, Gleichung (4.203) [DIN EN 1992-2, Gleichung (7.11)] ermittelt. Alternativ kann vom Anwender eine Obergrenze für vorgegeben werden, um z.B. die Besonderheiten gemäß Kapitel 4.4.2.4 (5)\* [Kapitel 7.3.4 (4), (5)] zu berücksichtigen.

### Beiwert xi1

Der Verbundbeiwert  $\xi_1$  nach DIN FB 102, Gleichung (4.197) [DIN EN 1992-2, Gleichung (7.5)], legt fest, in welchem Maße Spannstahl gemäß Kapitel 4.4.2.2 (7)\* [Kapitel 7.3.2(3)] auf die Mindestrissbewehrung angerechnet werden kann. Er geht ferner in die Berechnung des effektiven Bewehrungsgrads nach Gleichung (4.200a) [Gleichung (7.10)] und damit in die direkte Berechnung der Rissbreite ein. Bei Flächenelementen ist die Eingabe gesperrt, da hier Spannstahl generell nicht angerechnet wird.

### Festlegung der Betonzugzone

Die Festlegung der Zugbereiche, in denen risseverteilende Mindestbewehrung nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2], einzulegen ist, kann entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination (EK) oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen.

### Dickes Bauteil

Gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (9) [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2 (5)], darf bei dicken Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gleichung (4.197a) [Gleichung (NA.7.5.1)] berechnet werden. Damit können sich Einsparungen gegenüber der Berechnung nach Gleichung (4.194) [Gleichung (7.1)] ergeben.

### Beiwert $k$

Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Betonzugspannungen im Querschnitt in Abhängigkeit von der Bauteildicke  $h$  gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (5)\*.

DIN EN 1992-2:

Bei Zwang innerhalb des Bauteils darf  $k$  gemäß Kapitel 7.3.2 (2) mit 0,8 multipliziert werden, wobei für  $h$  das Minimum aus Höhe und Breite des Querschnitts oder Teilquerschnitts anzusetzen ist. Bei Zugspannungen infolge außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs gilt  $k = 1,0$ .

### Faktor für $f_{ctm}$

Mit diesem Faktor wird die wirksame Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  in Bezug auf den Mittelwert der Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  festgelegt, und zwar getrennt für die Berechnung der Mindestbewehrung und die Berechnung der Rissbreite. Wenn der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, sollte zur Berechnung der Mindestbewehrung mindestens eine Zugfestigkeit von 3,0 MN/m<sup>2</sup> für Normalbeton und von 2,5 MN/m<sup>2</sup> für Leichtbeton angenommen werden. Diese Bedingung wird programmseitig erfüllt, sofern der Abminderungsfaktor mit 1,0 vorgegeben wird.

### Einwirkungskombination

Die Einwirkungskombination (EK) für den Nachweis der Rissbreite ergibt sich in der Regel aus der gewählten Anforderungsklasse und der Vorspannung des Bauteils. Alternativ kann eine davon abweichende Kombination gewählt werden.

### Ohne Bewehrungserhöhung

Normalerweise wird zur Einhaltung der geforderten Rissbreite bei Bedarf die Rissbewehrung automatisch erhöht. Mit diesem Schalter lässt sich die Bewehrungserhöhung deaktivieren.

### Lastdauer; $k_t$

DIN EN 1992-2:

Mit dieser Auswahl wird der Faktor  $k_t$  in Gleichung (7.9) zur Berechnung der Rissbreite festgelegt. Für Brücken ist stets der Faktor  $k_t = 0,4$  anzunehmen.

### Hinweis

Nach Kapitel 12.6 (2) der Richtlinie können bei vorläufig eingeschränkter Nutzungsdauer der Bauwerke verminderte Anforderungen an die zulässigen Grenzwerte der Rissbreiten gestellt werden. In Nachweisstufe 2 darf nach Kapitel 12.5.3 (3) auf den Nachweis der Mindestbewehrung verzichtet und die Rissbreite statt dessen mit der vorhandenen Bewehrung und der tatsächlichen Betonfestigkeit nachgewiesen werden

## Ermüdung

### $d\sigma_{Rsk,s}$ , $d\sigma_{Rsk,b}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}$  ( $N^*$ ) der Längsbewehrung und Schubbewehrung bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.8 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.4]. Im Dialog wird der Wert nach Tabelle 4.117 [Tabelle 6.3N], Zeile 1, vorgeschlagen. Für die Schubbewehrung wird dabei der Biegerollendurchmesser mit dem vierfachen Stabdurchmesser angenommen.

### $d\sigma_{Rsk,p}$

Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{Rsk}$  ( $N^*$ ) des Spannstahls bei  $N^*$  Lastzyklen entsprechend den Wöhlerlinien nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.7 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.4]. Im Dialog wird der Wert nach Tabelle 4.116, Zeile 4 [Tabelle 6.4DE, Zeile 4 für Klasse 1], vorgeschlagen.

### $\lambda_s$ , $\lambda_b$ , $\lambda_p$

Korrekturbeiwert  $\lambda_s$  zur Ermittlung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  aus der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_s$  des Stahls gemäß DIN FB 102, Kapitel A.106.2 (102)P und A.106.3.1 (101)P [DIN EN 1992-2, Kapitel NN.2.1 (102)] für Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl.

### $\lambda_c$

Korrekturbeiwert  $\lambda_c$  zur Berechnung der schadensäquivalenten Betonspannungen gemäß DIN FB 102, Kapitel A.106.3.2 (102) [DIN EN 1992-2, Kapitel NN.3.2 (102)].

### $\eta$

Erhöhungsfaktor  $\eta$  für die Betonstahlspannung der Längsbewehrung. Er dient zur Berücksichtigung des unterschiedlichen Verbundverhaltens von Beton- und Spannstahl gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.3 (3)P, Gl. (4.193) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.2 (1), Gl. (6.64)].

### $f_{cd,fat}$

Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4 (101)P, Gl. (4.188) [DIN EN 1992-1, Kapitel 6.8.7 81), Gl. 6.76)]. Im allgemeinen gilt:

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

mit

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{0,2(1-\sqrt{28/t_0})}, \quad t_0 = \text{Zeitpunkt der Erstbelastung des Betons.}$$

Im Dialog wird  $f_{cd,fat}$  für  $t_0 = 28$  und  $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_{c,fat}$  vorgeschlagen.

### $k_0$

Bei Stäben und Bemessungsobjekten ist der statisch bestimmte Anteil der Vorspannung abzumindern. Im Dialog wird der

Grundwert 0,9 gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.2 (103) P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3 (81)P] vorgeschlagen. An Spanngliedkopplungen ist der Grundwert weiter abzumindern.

### Vereinfachter Nachweis

Im vereinfachten Nachweis ist gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.2 (103) P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.2 (2)], die häufige Kombination mit den für die Gebrauchsnachweise benutzten Verkehrslasten maßgebend. Der Nachweis für Beton richtet sich nach Kapitel 4.3.7.4 [Kapitel 6.8.7 (2)], die zulässige Spannungsschwingbreite für Stahl wird im Dialog gemäß Kapitel 4.3.7.5 (101) [Kapitel 6.8.6 (81)] vorgeschlagen. Für Schubbewehrung wird dieser Wert wie in Tabelle 4.117 [Tabelle 6.3.DE] gemindert.

### Bemessungsvarianten einschränken

Bei Flächenelementen können die Varianten zur Ermittlung der Schwingbreite auf korrespondierende Sätze von Bemessungsschnittgrößen beschränkt werden. Eine nähere Erläuterung ist im Abschnitt „Nachweise gegen Ermüdung / Besonderheit bei Flächentragwerken“ zu finden.

### Faktor für Qfat

Erhöhungsfaktor für die in  $Q_{fat}$  definierte zyklische Ermüdungseinwirkung, der bei der Berechnung der schadensäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s,eq}$  des Betonstahls und Spannstahls berücksichtigt wird. Damit lassen sich z.B. die Vorschriften für den Ermüdungsnachweis von Straßenbrücken nach DIN FB 102, Kapitel A.106.2 (101) P [DIN EN 1992-2, Kapitel NN.2.1 (101)] anwenden.

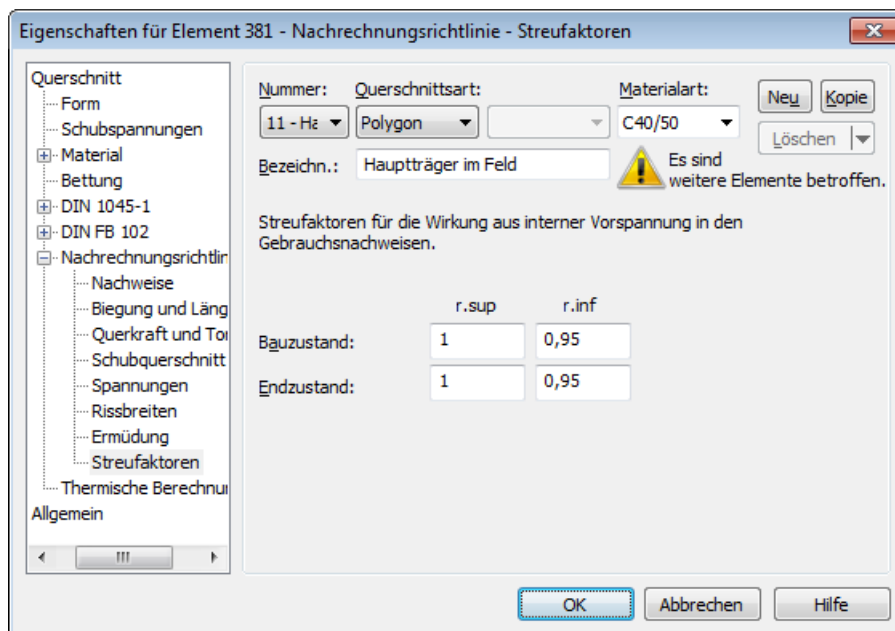
### Ohne Bewehrungserhöhung

Normalerweise wird zur Einhaltung der geforderten Schwingbreite bei Bedarf die Bewehrung automatisch erhöht. Mit diesem Schalter lässt sich die Bewehrungserhöhung deaktivieren.

### Querkraftnachweis

Der Nachweis wird z.Z. für die Spannungsschwingbreite der Bewehrung geführt.

## Streufaktoren



Die Beiwerte zur Berücksichtigung der Streuung der Vorspannkraft sind in Abhängigkeit von der Art der Vorspannung festgelegt. Im Dialog werden die Werte nach DIN FB 102, Kapitel 2.5.4.2 (3)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.9 (1)P] für nachträglichen Verbund vorgeschlagen. Die definierten Streufaktoren werden für die Wirkungen aus interner Vorspannung bei folgenden Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt:

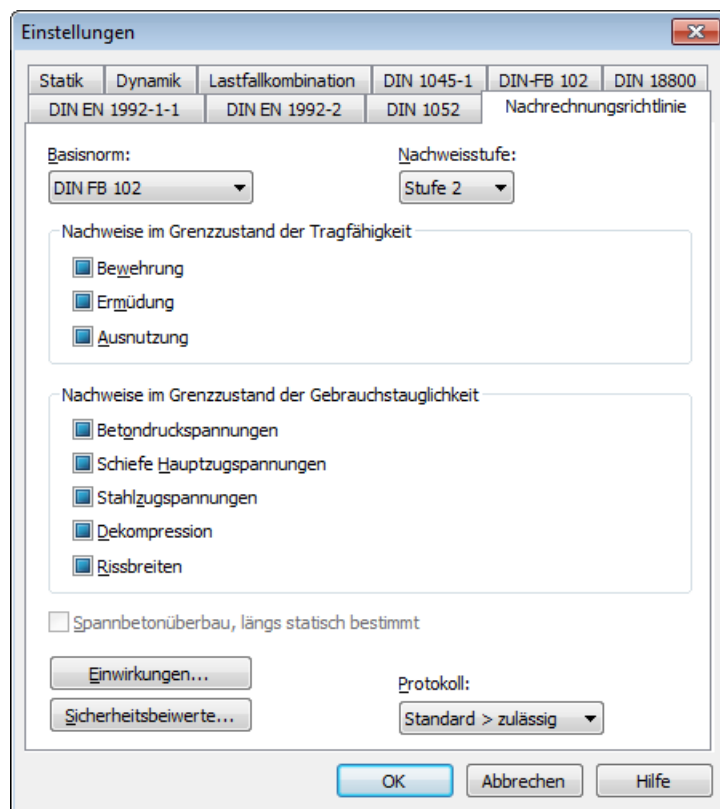
- Nachweis der Dekompression und der Betondruckspannungen
- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite
- Nachweis der Rissbreite
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen

Für die Wirkungen aus externer Vorspannung werden die Streufaktoren mit  $r_{sup} = r_{inf} = 1$  angenommen.

In Nachweisstufe 2 werden die reduzierten Streufaktoren nach Kapitel 12.5.3 (1) der Richtlinie vorgeschlagen.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *Nachrechnungsrichtlinie* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Basisnorm

Maßgebende Norm für die Nachweisführung gemäß Kapitel 4.2 (2) der Richtlinie.

### Nachweisstufe

Maßgebende Stufe für die Nachweisführung gemäß Kapitel 4.2 (2) der Richtlinie.

### Nachweisauswahl

Bei der Nachweisauswahl sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Der Nachweis wird gemäß Einstellung im Querschnittsdialog geführt (s. Querschnittseingaben).
- Der Nachweis wird für alle Querschnitte des Tragwerks geführt.
- Der Nachweis wird für keinen Querschnitt des Tragwerks geführt.

Zugehörige Querschnittseinstellungen werden dabei folgendermaßen zusammengefasst:

Bewehrung	Biegung und Längskraft Querkraft Torsion Robustheit
Ausnutzung	Ausnutzung für Biegung Ausnutzung für Querkraft
Ermüdung	Ermüdung für Beton Ermüdung für Betonstahl und Spannstahl
Rissbreiten	Mindest-Rissbewehrung Berechnung der Rissbreite

Mit der Funktion *Bemessungsvorgaben* im Ordner *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* der Datenbasis kann eine Nachweisübersicht angezeigt werden.

### Spannbetonüberbau

Auswahl zur Festlegung der Nachweisbedingungen gemäß DIN EN 1992-2, Tabelle 7.101DE.

**Einwirkungen...**

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

**Sicherheitsbeiwerte...**

Startet den Dialog zur Änderung der Teilsicherheitsbeiwerte.

**Protokoll**

- *Nicht erstellen*: Vom Nachweisprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Protokoll mit tabellarischer Ausgabe der Ergebnisse.
- *Ausführlich*: Zusätzliche Ausgabe der maßgeblichen Kombinationsschnittgrößen an den Nachweisorten.
- *Standard* > *zulässig*: Beschränkung des Standardprotokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.
- *Ausführlich* > *zulässig*: Beschränkung des ausführlichen Protokolls auf Nachweisorte mit Überschreitungen zulässiger Grenzwerte.

**Hinweis**

Abhängig von der gewählten Basisnorm und der Nachweisstufe werden für die Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte sowie für die Nachweisvorgaben Standardwerte eingestellt, deren Unterschiede sich aus nachfolgender Tabelle ergeben. Für beide Normen und Nachweisstufen identische Werte sind nicht aufgeführt.

	Nachweisstufe 1		Nachweisstufe 2	
	DIN FB 102	DIN EN 1992-2	DIN FB 102	DIN EN 1992-2
Betonstahl $\gamma_s$ , ständige K. - außergewöhnliche Komb. - Ermüdung	1,15 1,0 1,15		1,05 1,0 1,05	
Spannstahl $\gamma_s$ , ständige K. - außergewöhnliche Komb. - Ermüdung (Zul. EC2) - Ermüdung (Zul. DIN 4227)	1,15 1,0 1,15 1,25		1,1 1,0 1,1 1,1	
Ständige Einwirkung $\gamma_G$	1,35		1,2	
Lastmodell LM1 / LMM $\gamma_Q$	1,5	1,35	1,5	1,35
Temperatureinwirkung $\psi_0$	0,8 <sup>1)</sup>		0,8	
Windeinwirkung $\psi_0$	0,6	0,5	0,6	0,5
Druckstrebenneigung $\cot \theta$	$4/7 \leq \cot \theta \leq 7/4$ Gl. (4.122)	$1 \leq \cot \theta \leq 7/4$ Gl. (6.107aDE)	$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ <sup>2)</sup> NRR Gl. (12.12)	
Hebelarm $z$	$k \cdot$ Nutzhöhe		NRR Gl. (12.16)	
Querkraftnachweis über $\sigma_1$	gesperrt		zugelassen	
Anrechnung von $A_p$ auf $A_{sl,T}$	gesperrt		zugelassen	
Rissbreite $w_k$	Tab. 4.118	Tab. 7.101DE	Tab. 4.118 <sup>3)</sup>	Tab. 7.101DE <sup>3)</sup>
Streufaktoren Bauzustand	1,10 / 0,95	1,10 / 0,90	1,00 / 0,95	
Streufaktoren Endzustand	1,10 / 0,90		1,00 / 0,95	

<sup>1)</sup> DIN EN 1992-2: vgl. ARS 22/2012, Anlage 2, Buchstabe B), Absatz (2)

<sup>2)</sup>  $\cot \theta \leq 3$  nach Gl. (12.15) bei eingeschränkter Nutzungsdauer von 20 Jahren zulässig (Nachweisklasse C)

<sup>3)</sup>  $w_k = 0,3$  mm für Stahlbeton mit eingeschränkter Nutzungsdauer von 20 Jahren zulässig (Nachweisklasse C)



## Einzelbemessung

Mit der Einzelbemessung lassen sich unabhängig vom Gesamtsystem einzelne Querschnitte mit vorgegebenen Schnittgrößen untersuchen. Die nachfolgend aufgeführten Angaben sind in der Tabelle *Einzelbemessung* im Ordner *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* der Datenbasis einzugeben.

### Querschnitt

Nummer des zu bemessenden Querschnitts. Es können Polygon- und Verbundquerschnitte bemessen werden.

### Kombination

Bemessungssituation:

- 0: Ständige und vorübergehende Bemessungssituation
- 1: Außergewöhnliche Bemessungssituation

### Nsd, Mysd, Mzsd

Schnittgrößen, die bemessen werden. Bei Polygonquerschnitten beziehen sich die Schnittgrößen auf den Schwerpunkt, bei Verbundquerschnitten auf den Querschnittsnullpunkt.

### Modus

- *Standard*: Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Normalkraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich ermittelt.
- *Symmetrisch*: Bemessung für symmetrische Bewehrung. Im Gegensatz zum Normalmodus werden, wenn eine Bewehrungserhöhung erforderlich ist, alle Bewehrungslagen erhöht. Vorgegebene Verhältnisse zwischen Bewehrungslagen bleiben erhalten.
- *Druckglied*: Für Druckglieder wird eine symmetrische Bemessung unter Berücksichtigung der Mindestbewehrung nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.1.2.1 (1)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.5.2 (2)] durchgeführt.
- *Dehnungen*: Dehnungszustand für vorhandene Betonstahllagen ermitteln.
- *Dehnungen GZG*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird in der Druckzone eine lineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons verwendet.
- *Dehnungen GZG2*: Dehnungszustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für vorhandene Betonstahllagen ermitteln. Dabei wird eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons nach DIN FB 102, Bild 4.1 [DIN EN 1992-2, Bild 3.2] verwendet, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.
- *Aufnehmbare Belastung*: Ermittlung der aufnehmbaren Belastung in Grenzzustand der Tragfähigkeit.
- *Inaktiv*: Bemessung inaktiv.

Die Berechnung wird bei geöffneter Eingabetabelle mit dem Menüpunkt *Einzelbemessung* oder mit der Seitenansicht ausgeführt.

## Vorgespannte Tragwerke

### Interne Vorspannung

Bei interner Vorspannung werden die Spannstränge einschließlich der Spannverfahren und Spannweisungen über die Funktion *Vorspannung* des Tragwerksmenüs eingegeben und durch Definition eines Lastfalls mit der Lastart *Vorspannung* bei der FEM-Berechnung berücksichtigt. Näheres dazu ist dem Handbucheil *Spannbeton* zu entnehmen.

Die Unterscheidung zwischen Vorspannung mit und ohne Verbund erfolgt in den Querschnittseingaben und den Vorgaben für den Lastfall *Kriechen und Schwinden*.

### Externe Vorspannung, Mischbauweise

Externe Vorspannung lässt sich durch direkte Eingabe der äußeren Kräfte berücksichtigen. Bei Mischbauweise sind die zusätzlichen im Verbund liegenden Spannglieder wie oben beschrieben einzugeben.

### Streuung der Wirkungen aus Vorspannung

Bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt für den Bemessungswert der Vorspannkraft nach DIN FB 102, Kapitel 2.5.4.2 (6)P [[DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.8 (1)]:

$$P_d = \gamma_p \cdot P_{m,t}$$

mit

$P_{m,t}$  Mittelwert der Vorspannkraft zur Zeit  $t$  inkl. Spannkraftverlusten aus Reibung, Ankerschlupf, Kriechen und Schwinden sowie Relaxation.

$\gamma_p$  Teilsicherheitsbeiwert der Vorspannkraft mit  $\gamma_p = 1$  nach DIN FB 102, Kapitel 2.3.3.1 (101)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 2.4.2.2 (1)].

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden in DIN FB 102, Kapitel 2.5.4.2 (3)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.9 (1)] zwei charakteristische Werte der Vorspannkraft festgelegt:

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{m,t} \quad \text{Oberer charakteristischer Wert.}$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{m,t} \quad \text{Unterer charakteristischer Wert.}$$

Die Streufaktoren der internen Vorspannung werden im Querschnittsdialog getrennt für Bau- und Endzustände definiert. Sie kommen bei folgenden Nachweisen zur Anwendung:

- Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite.
- Nachweis der Rissbreite.
- Nachweis der Dekompression.
- Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen.

In Nachweisstufe 1 sind gemäß DIN FB 102, Kapitel 2.5.4.2 (3)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.9 (1)P] folgende Werte anzusetzen:

- für externe Spannglieder:

$$r_{sup} = r_{inf} = 1,00.$$

- für Spannglieder im sofortigen Verbund und ohne Verbund:

$$r_{sup} = 1,05 \text{ und } r_{inf} = 0,95.$$

- für Spannglieder im nachträglichen Verbund:

$$r_{sup} = 1,10 \text{ und } r_{inf} = 0,90.$$

In Nachweisstufe 2 sind nach Kapitel 12.5.3 (1) der Richtlinie für interne Spannglieder abgeminderte Werte zugelassen:

$$r_{sup} = 1,00 \text{ und } r_{inf} = 0,95.$$

## Kriechen und Schwinden

Die Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens erfolgt ebenso wie die Vorspannung durch Definition eines entsprechenden Lastfalls (Lastart *Kriechen und Schwinden*) in der FEM-Berechnung. Dabei ist neben dem kriecherzeugenden Dauerlastfall anzugeben, ob die Schnittkraftumlagerung zwischen Beton und Spannstahl berücksichtigt werden soll. Diese Option ist nur bei im Verbund liegenden Spanngliedern sinnvoll.

Die Eingabe der maßgeblichen Kriech- und Schwindbeiwerte für die Berechnung des Lastfalls *Kriechen und Schwinden* erfolgt im Querschnittsdialog. Alternativ können dort die Beiwerte gemäß Heft 525, Kapitel 9.1.4 [DIN EN 1992-2, Anhang B], berechnet werden.

Berechnungsgrundlage für die im Programm verwendeten Ansätze zur Erfassung von Betonkriechen und Schwinden ist ein zeitabhängiges Spannungs-Dehnungs-Gesetz nach Trost.

$$\sigma_b(t) = \frac{E_b}{1+\rho \cdot \varphi} (\varepsilon_b(t) - \varphi \cdot \varepsilon_{b,0} - \varepsilon_{b,s})$$

Hierin bedeuten:

$\sigma_b(t)$  Betonspannung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .

$E_b$  E-Modul des Betons.

$\rho$  Relaxationskennwert nach Trost für den Zeitpunkt  $t$  (i.d.R.  $\rho = 0,80$ ).

$\varphi$  Kriechbeiwert für den Zeitpunkt  $t$ .

$\varepsilon_b(t)$  Betondehnung aus Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t$ .

$\varepsilon_{b,0}$  Betondehnung aus kriecherzeugenden Dauerlasten.

$\varepsilon_{b,s}$  Betondehnung aus Schwinden.

Unter Beachtung dieser Beziehungen werden eine zeitabhängige Gesamtsteifigkeitsmatrix und zugehörige Lastvektoren aufgebaut, aus denen sich die Schnittgrößen und Verformungen des Betons ergeben. Sofern im Lastfall gewählt, werden im weiteren die resultierenden Spannungsänderungen im Spannstahl ermittelt. Ein eventueller Einfluss aus der Relaxation des Spannstahls bleibt dabei unberücksichtigt. Nach Zilch/Rogge (2002, S. 256) lässt sich dieser getrennt berechnen (s. nächster Abschnitt) und mit den Änderungen aus Kriechen und Schwinden zu den gesamten zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenfassen:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \Delta\sigma_{pr} + E_p \cdot \Delta\varepsilon_{cpt}$$

mit

$\Delta\sigma_{pr}$  Spannkraftverlust aus Relaxation des Spannstahls.

$\Delta\varepsilon_{cpt}$  Dehnungsänderung des Betons aus Kriechen und Schwinden.

$E_p$  E-Modul des Spannstahls.

## Relaxation des Spannstahls

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.2.3.5.5 [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.6], ist neben den Spannungsverlusten aus Kriechen und Schwinden des Betons die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  in den Spanngliedern an der Stelle x infolge Relaxation zu berücksichtigen. Diese darf für ein Verhältnis Ausgangsspannung zu charakteristischer Zugspannung ( $\sigma_{p0}/f_{pk}$ ) der bauaufsichtlichen Zulassung entnommen werden mit einer Ausgangsspannung von

$$\sigma_{p0} = \sigma_{pg0} - 0,3 \Delta\sigma_{p,csr} \quad (4.11)$$

mit

$\Delta\sigma_{p,csr}$  Spannungsänderung in den Spanngliedern aus Kriechen, Schwinden und Relaxation an der Stelle x zum Zeitpunkt t .

$\sigma_{pg0}$  Anfängliche Spannung in den Spanngliedern aus Vorspannung und ständigen Einwirkungen.

Da die gesamten Spannkraftverluste vorab nicht bekannt sind, ist der Eingangswert  $\Delta\sigma_{p,csr}$  für Gl. (4.11) zu schätzen und gegebenenfalls iterativ zu korrigieren (vgl. König et al. 2003, S. 38). Alternativ darf nach Fachbericht zur Vereinfachung und auf der sicheren Seite liegend der zweite Ausdruck in Gl. (4.11) vernachlässigt werden.

DIN EN 1992-2:

Die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{pr}$  darf mit den Angaben der Zulassung des Spannstahls für das Verhältnis Ausgangsspannung zu charakteristischer Zugfestigkeit ( $\sigma_{p0}/f_{pk}$ ) bestimmt werden. Als Ausgangsspannung darf  $\sigma_{p0} = \sigma_{pg0}$  angenommen werden, wobei  $\sigma_{pg0}$  die anfängliche Spannstahlspannung aus Vorspannung und den ständigen Einwirkungen ist.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft Spannkraftverluste aus Relaxation.

Rechenwerte der Spannkraftverluste $\Delta\sigma_{pr}$ in % der Anfangsspannung $\sigma_{p0}$ für Spannstahlitzen St 1570 / 1770 mit sehr niedriger Relaxation							
$\sigma_{p0}/f_{pk}$	Zeitspanne nach dem Vorspannen in Stunden						
	1	10	200	1000	5000	$5 \cdot 10^5$	$10^6$
0,45							
0,50							
0,55						1,0	1,2
0,60					1,2	2,5	2,8
0,65				1,3	2,0	4,5	5,0
0,70			1,0	2,0	3,0	6,5	7,0
0,75		1,2	2,5	3,0	4,5	9,0	10,0
0,80	1,0	2,0	4,0	5,0	6,5	13,0	14,0

Für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 4227 ergibt sich im Beispiel für  $t = \infty$  bei der nach DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65, zulässigen Ausnutzung von 0,55 ein Spannungsverlust von etwa 1%, der in der Regel vernachlässigt werden kann.

Spannglieder mit neuer Zulassung dürfen nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (5)], bis zu 0,65 ausgenutzt werden. Daraus resultieren deutlich höhere, durchaus relevante Spannkraftverluste.

Die Spannkraftverluste werden in den Einwirkungen CSR1 und CSR2 des Dialogs *Nachrechnungsrichtlinie Einwirkungen* definiert.

## Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Es stehen folgende Nachweise zur Verfügung:

- Bemessung für Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein (DIN FB 102, Kapitel 4.3.1; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1)
- Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Vorankündigung (DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1 (109))
- Bemessung für Querkraft (DIN FB 102, Kapitel 4.3.2; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2)
- Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach dem Hauptspannungskriterium (Kapitel 12.4.3.3 (8) der Richtlinie)
- Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung mit Anrechnung von Spannstahl (DIN FB 102, Kapitel 4.3.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3; Kapitel 12.4.3.4 der Richtlinie)
- Nachweis der Hauptdruckspannung für kombinierte Beanspruchung (DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2 (2); DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2(NA.106))
- Nachweis der aufnehmbaren Belastung (Kapitel 4.3.1 (3) der Richtlinie)
- Nachweis des Ausnutzungsgrads der Bewehrung (Kapitel 4.3.1 (3) der Richtlinie)

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach DIN FB 101, Kapitel 9.4.2 [DIN EN 1990, Kapitel 6.4.3], berücksichtigt:

- Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_P \cdot P_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (9.10) \quad [(6.10)]$$

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{GAj} \cdot G_{kj} + \gamma_{PA} \cdot P_k + A_d + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.11) \quad [(6.11b)]$$

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \gamma_1 \cdot A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.12) \quad [(6.12b)]$$

Der Wichtungsfaktor für die Erdbebeneinwirkung wird gemäß DIN 4149, Gl. (37), zu  $\gamma_1 = 1$  angenommen.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

## Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe sind mit folgenden Werten vorbelegt, die mit der Schaltfläche *Standard* wiederhergestellt werden können:

- Nachweisstufe 1: DIN FB 102, Kapitel 2.3.3.2 [DIN EN 1992-2, Kapitel 2.4.2.4]
- Nachweisstufe 2: Kapitel 12.3.3 der Richtlinie

In den Bemessungssituationen infolge Erdbeben gelten gemäß DIN 4149:2005-04, Kapitel 8.1.3 (3), die Beiwerte der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation. Ab den Festigkeitsklassen *C55/67* und *LC55/60* findet Vorschrift 5.3.3 (9) der DIN 1045-1 Anwendung, wenn als Basisnorm DIN FB 102 gewählt wurde.

## Spannungs-Dehnungslinien

Bei der Querschnittsbemessung kommen die folgenden Kennlinien zur Anwendung:

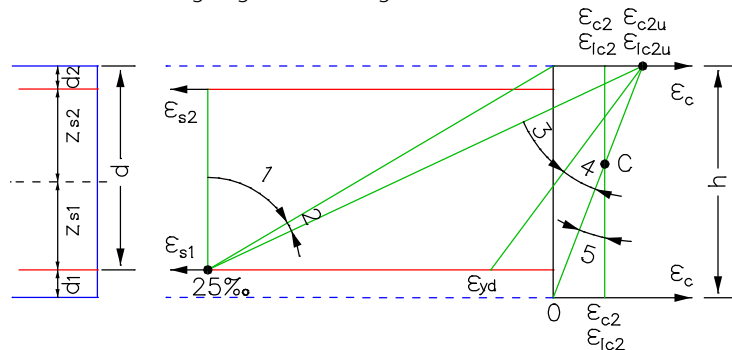
- *Beton*: Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN FB 102, Bild 4.2.
- *Betonstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 4.5 b) mit ansteigendem oberem Ast.
- *Spannstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach Bild 4.6 b), mit horizontalem oberem Ast gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.2.3.3.3 (6)\*.

DIN EN 1992-2:

- *Beton*: Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN EN 1992-2, Bild 3.3. Dabei ist der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit  $f_{cd}$  in EN 1992-2, Gleichung (3.15), zu  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$  mit  $\alpha_{cc} = 0,85$  für Normalbeton und  $\alpha_{cc} = 0,75$  für Leichtbeton definiert.
- *Betonstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach DIN EN 1992-2, Bild 3.8 mit ansteigendem oberem Ast, wobei die Maximalspannung zu  $k \cdot f_{yk} / \gamma_s$  mit  $k = 1,05$  nach Tabelle C.1, Klasse A, angenommen wird.
- *Spannstahl*: Spannungs-Dehnungs-Linie nach DIN EN 1992-2, Bild 3.10, mit horizontalem oberem Ast gemäß Kapitel 3.3.6(7) der Norm.

## Bemessung für Biegung mit oder ohne Längskraft und Längskraft allein

Die Bemessung für Längskraft und Biegemoment erfolgt nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.1 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1]. Die für jede Schnittkraftkombination erforderliche Bewehrung am Stahlbetonquerschnitt wird iterativ, nach Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen, unter Beachtung der in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Grenzdehnungslinien ermittelt. Das endgültige Resultat ergibt sich aus dem Extremwert aller berechneten Bewehrungen.



### Dehnungsbereiche für die Bemessung

Der Anwender steuert durch die Vorgabe der Bewehrungsgeometrie und die Auswahl eines von drei Bemessungsmodi das Ergebnis der Bemessung.

DIN EN 1992-2:

Bei Querschnitten, die einer Drucknormalkraft ausgesetzt sind, wird die Mindestexzentrizität nach Kapitel 6.1 (4) berücksichtigt.

### Modus Standard

Dies ist der Normalmodus zur Bemessung für Biegung mit Längskraft im gesamten Beanspruchungsbereich. Die Bewehrung wird soweit wie möglich im Zugbereich eingelegt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und zur Begrenzung der Druckzonenhöhe nach DIN FB 102, Kapitel 2.5.3.4.2 (5) [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.4 (NA.5) und NA.11.5.2 (1)] wird im Dehnungsbereich 3 Druckbewehrung ermittelt, so dass für die Stahldehnung  $\epsilon_{s1}$  gilt:

$$\epsilon_{s1} \geq \max \left( \epsilon_{yd}, \frac{\epsilon_{c2u}}{x/d} - \epsilon_{c2u} \right) \quad [‰]$$

mit

$\epsilon_{yd}$  Zum Bemessungswert der Festigkeit  $f_{yd}$  gehörende Stahldehnung.

$x/d$  Bezogene Druckzonenhöhe.

≤ 0,45 bei Betonfestigkeitsklassen bis C50/60.

≤ 0,35 bei Betonfestigkeitsklassen ab C55/67 und für Leichtbeton.

In den Dehnungsbereichen 4 und 5 wird wie bei symmetrischer Bemessung verfahren.

### Modus Symmetrisch

Im Gegensatz zur Standardbemessung wird in allen Dehnungsbereichen, falls erforderlich, die Bewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen bestimmten Bewehrungslagen bleiben erhalten, sofern dies in den Bemessungsvorgaben nicht abgewählt wurde.

### Modus Druckglied

Die Bemessung wird symmetrisch durchgeführt. Zusätzlich wird die nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.1.2.1 (1)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.5.2 (2)] verlangte Mindestbewehrung ermittelt:

$$A_{s,\min} = 0,15 \cdot N_{\text{Ed}} / f_{\text{yd}} \geq 0,003 A_c$$

mit

$N_{\text{Ed}}$  Bemessungswert der aufzunehmenden Längskraft.

$f_{\text{yd}}$  Bemessungswert der Festigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze.

Die Betonstauchung nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.2 (1)P(X) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1 (5)] kann nicht überprüft werden.

### Berücksichtigung von Spanngliedern im Verbund

In der Bemessung von Stäben und Bemessungsobjekten werden die Schnittgrößen des Betonquerschnitts um die statisch bestimmten Anteile gemindert, wie sie sich aus Vorspannung abzüglich der Verluste aus Kriechen, Schwinden und Relaxation des Spannstahls (CSR) ergeben. Ausgenommen sind die Situationen vor dem Verpressen der Spannglieder. In den verbleibenden Schnittgrößen für den Verbundquerschnitt sind dann nur noch die Zwängungsanteile aus  $P+CSR$  und die äußeren Lasten enthalten. Die durch den Benutzer lagemäßig festgelegte Schlaffstahlbewehrung wird bei Bedarf solange erhöht, bis die Verbundschnittgrößen aufgenommen werden können.

Die Lage der Spannstränge im Querschnitt, die Spannkraftverluste aus CSR, die statisch bestimmten Anteile sowie die Schnittgrößen des Betonquerschnitts und Verbundquerschnitts werden im ausführlichen Protokoll ausgegeben.

Da bei Flächentragwerken eine Trennung in statisch bestimmte und unbestimmte Anteile der Schnittgrößen aus Vorspannung nicht möglich ist, wird bei der Bemessung der Längsbewehrung die Vorspannung vollständig auf der Einwirkungsseite berücksichtigt, während auf der Widerstandsseite nur Schlaffstahl und Beton wirksam werden. Die Dehnungsreserven der im Verbund liegenden Spannglieder bleiben folglich ungenutzt.

## Mindestbewehrung gegen Versagen ohne Vorankündigung

Ein Versagen ohne Ankündigung kann bei Spannbetontragwerken durch Einbau einer Mindestbewehrung (Robustheitsbewehrung) gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1(109)], verhindert werden. Diese wird wie folgt ermittelt:

$$A_s = M_{\text{r,ep}} / (f_{\text{yk}} \cdot z_s)$$

mit

$M_{\text{r,ep}}$  Rissmoment, bei dem ohne Wirkung der Vorspannung am Querschnittsrand eine Zugspannung von  $f_{\text{ctk};0,05} = 0,7 \cdot f_{\text{ctm}}$  auftritt.

$z_s$  Hebelarm der inneren Kräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Die Robustheitsbewehrung soll nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.1.3 (108) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.1 (110)] in den Bereichen angeordnet werden, in denen unter der nichthäufigen [charakteristischen] Einwirkungskombination Zugspannungen im Beton auftreten. Dabei soll die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung berücksichtigt, die statisch bestimmte Wirkung jedoch vernachlässigt werden.

Im Programm werden alle Spannungen am Bruttoquerschnitt ermittelt. Die statisch bestimmte Wirkung der Vorspannung kann nur bei Stäben und Bemessungsobjekten in Abzug gebracht werden. Bei Flächenelementen wird die Vorspannung ersatzweise mit dem Reduktionsfaktor gemäß Benutzervorgabe abgemindert.

Das Rissmoment ergibt sich zu  $M_{\text{r,ep}} = W_y \cdot f_{\text{ctk};0,05}$ , der Hebelarm  $z_s$  der inneren Kräfte wird vereinfachend zu  $0,9 \cdot d$  angenommen. Die ermittelte Bewehrung wird gleichmäßig auf die in der Zugzone liegenden Bewehrungslagen verteilt. Im Bemessungsmodus *Symmetrisch* erhalten die übrigen Lagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten, sofern dies in den Bemessungsvorgaben nicht abgewählt wurde. Für Querschnitte mit Bemessungsmodus *Druckglied* wird keine Robustheitsbewehrung nachgewiesen, da bei der Bemessung für Biegung und Längskraft bereits Mindestdruckbewehrung ermittelt wird.

## Mindestoberflächenbewehrung für vorgespannte Bauteile

Bei vorgespannten Bauteilen ist nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.0 [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.1 (NA.104)] unabhängig von den Vorschriften für die Robustheits- oder Rissbewehrung stets eine Mindestoberflächenbewehrung anzuordnen. Die nach den Tabellen 5.7 und 5.7.a [Tabelle NA.J.4.1] ermittelte Bewehrung kann im Programm durch Vorgabe einer Grundbewehrung in der Betonstahlbeschreibung berücksichtigt werden.

## Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft umfasst die Ermittlung der Querkraftbewehrung und den Nachweis der Betondruckstreben nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.2 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2]. Es gelten folgende Besonderheiten:

- Die Neigung der Querkraftbewehrung wird mit 90° angenommen.
- In Nachweisstufe 1 wird bei der Bemessung der Wert für  $\cot \Theta$  auf den nach DIN FB 102, Gl. (4.122) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.107aDE)], zulässigen Bereich begrenzt (Verfahren mit veränderlicher bzw. beanspruchungsabhängiger Druckstrebenneigung), sofern im Querschnittsdialog nicht der Nachweis mit einem konstanten Wert gewählt wurde. Die tatsächlich wirksame Neigung der Betondruckstreben wird für jeden Nachweisort im Protokoll ausgegeben.
- In Nachweisstufe 2 wird der Wertebereich gemäß Gl. (12.11) bzw. Gl. (12.14) der Richtlinie erweitert. Alternativ kann die Berechnung nach Gl. (12.12) bzw. Gl. (12.15) gewählt werden, um den Schubrißwinkel  $\beta_f$  nach Gl. (12.13) zu berücksichtigen, der programmseitig mit dem vorgegebenen Querkraftbewehrungsgrad ermittelt wird.
- In der berechneten Bügelbewehrung ist die Mindestbewehrung nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.2.2 (3)\*P und (4)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.2.2 (5)], enthalten, wobei der Grundwert des Bewehrungsgrads mit dem Faktor gemäß Benutzereingabe gewichtet wird. Bei Flächen wird Mindestbewehrung nur dann ermittelt, wenn Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich ist. Bei Stäben wird für die Richtung, für die  $M = Q = 0$  ist, keine Mindestbewehrung berechnet.
- Platten- und Schalenelemente werden für die Querkraft  $q_T = \sqrt{(q_x^2 + q_y^2)}$  bemessen. Für die zugehörige Längskraft wird, je nachdem was ungünstig wirkt, die Hauptdruck- oder die Hauptzugkraft eingesetzt. Falls gewählt, wird alternativ der Nachweis gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2(5)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.1 (10)], getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y geführt. Für die zugehörige Längskraft wird dann die in Bewehrungsrichtung wirkende Normalkraft eingesetzt. Wenn Querkraftbewehrung erforderlich ist, wird diese aus beiden Richtungen addiert.
- Es erfolgt **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 Absatz (10) und (11) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.1 (8)].
- Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden die maßgebenden Werte des Ersatzrechtecks unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie vom Anwender definiert. Die Beiwerte zur Berechnung des inneren Hebelarms  $z$  aus der Nutzhöhe und Nutzhöhe sind ebenfalls vorzugeben. Alternativ kann der Hebelarm aus der Biegebemessung benutzt werden. In Nachweisstufe 2 ist ergänzend ein gewichteter Hebelarm gemäß Gl. (12.16) der Richtlinie wählbar.
- Bei Flächenelementen wird normalerweise mit dem Hebelarm  $z = 0,9 d$  gerechnet. Falls gewählt, wird alternativ der Hebelarm aus der Biegebemessung verwendet.
- Gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.4(2)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (1)], wird der innere Hebelarm auf das Maximum aus  $z = d - c_{v,1} - 30$  mm und  $z = d - 2c_{v,1}$  begrenzt. Dabei ist  $c_{v,1}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone. Wenn  $c_{v,1}$  nicht angegeben ist, nimmt das Programm statt dessen den kleinsten Achsabstand der Längsbewehrung vom Querschnittsrand,  $d_1$ .
- Bei Querschnitten mit interner Vorspannung wird der Bemessungswert der Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 (8)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (6)], mit dem Nennwert  $b_{w,nom}$  der Querschnittsbreite ermittelt.
- Die Quertragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  wird gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 (4)P nur für Querkräfte  $V_{Ed} > V_{Rd,ct}$  geprüft.
- Die Notwendigkeit einer Querkraftbewehrung wird nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.2 (1)], untersucht. Dabei erfolgt ebenfalls **keine** Verminderung der Einwirkung auflagnaher Lasten.
- DIN EN 1992-2:  
Die Interaktion von Querkraft und Querbiegung nach Kapitel 6.2.106 in den Stegen von Hohlkastenquerschnitten wird nicht geprüft. Gleiches gilt für den Sonderfall gerader Spannglieder nach Bild 6.101.

Nachfolgend sind die verwendeten Formeln aus DIN FB 102 wiedergegeben. Die korrespondierenden Gleichungsnummern der EN 1992-2 sind eckige Klammern gesetzt.

### Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,15 / \gamma_c \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4.118a) \quad [(6.2.a)]$$

mit einem Mindestwert von

$$V_{Rd,ct,min} = [\eta_1 \cdot v_{min} - 0,12 \sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$



$$v_{\min} = \frac{\kappa_1}{\gamma_c} \cdot \sqrt{\kappa^3 \cdot f_{ck}} \quad (4.118b)$$

[(6.3a/bDE)]

Dabei ist

$\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert für bewehrten Beton nach DIN FB 102, Kapitel 2.3.3.2 (1)P, Tab. 2.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 2.4.2.4, Tab. 2.1DE].

$\kappa_1$  = 0,0525 für  $d \leq 600$  mm  
 = 0,0375 für  $d \geq 800$  mm  
 Im Bereich  $600 \text{ mm} < d < 800$  mm darf  $\kappa_1$  linear interpoliert werden.

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$V_{Rd,ct}$  der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung.

$\eta_1$  = 1,0 für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10 [DIN EN 1992-2, Gl. (11.1)].

$\rho_1$  der Längsbewehrungsgrad mit

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$A_{sl}$  die Fläche der Zugbewehrung, die mindestens um das Maß  $d$  über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt und dort wirksam verankert wird, siehe DIN FB 102, Bild 4.12 [DIN EN 1992-2, Bild 6.3]. Bei Vorspannung mit sofortigem Verbund darf die Spannstahlfläche voll auf  $A_{sl}$  angerechnet werden.

$b_w$  die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts in mm.

$d$  die statische Nutzhöhe der Biegebewehrung im betrachteten Querschnitt in mm.

$f_{ck}$  der charakteristische Wert der Betondruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>.

$\sigma_{cd}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit  
 $\sigma_{dc} = N_{Ed} / A_c$  in N/mm<sup>2</sup>.

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung ( $N_{Ed} < 0$  als Längsdruckkraft).

### Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

In Nachweisstufe 1 ist die Neigung  $\theta$  der Druckstreben im Normalfall wie folgt zu begrenzen:

$$4/7 \leq \cot \Theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 7/4 \quad (4.122)$$

$$1,0 \leq \cot \Theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 7/4 \quad [(6.107aDE)]$$

mit

$$V_{Rd,c} = c_j \cdot 0,48 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}\right) \cdot b_w \cdot z \quad (4.123)$$

[(6.7bDE)]

Dabei ist

$c_j$  = 0,5

$\eta_1$  = 1,0 für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10 [DIN EN 1992-2, Gl. (11.1)].

$\sigma_{cd}$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts mit  
 $\sigma_{dc} = N_{Ed} / A_c$  in N/mm<sup>2</sup>.

$N_{Ed}$  der Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung ( $N_{Ed} < 0$  als Längsdruckkraft).

$V_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft.

In Nachweisstufe 2 gilt gemäß Kapitel 12.4.3.3 der Richtlinie für  $\cot \Theta$  die Untergrenze 4/7. Die Obergrenze darf auf 2,5, bei Betonbrücken mit einer Nutzungsdauer von bis zu 20 Jahren auf 3,0 erhöht werden. Alternativ kann  $\Theta$  mit dem Schub-

rissswinkel  $\beta_r$  nach Gleichung (12.12) bzw. Gl. (12.15) bestimmt werden:

$$\frac{4}{7} \leq \cot \Theta \leq \cot \beta_r + \frac{V_{Rd,c}}{(A_{sw} / s_w) \cdot z \cdot f_{yd}} \leq 2,5 \quad (12.12)$$

$$\cot \beta_r = 1,2 + \frac{f_{cd}}{70 \rho_w \cdot f_{yd}} - 1,4 \cdot \frac{\sigma_c}{f_{cd}} \leq 2,25 \quad (12.13)$$

Dabei ist

$\rho_w$  der geometrische Bewehrungsgrad

$\sigma_c$  der Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts (Druckspannungen negativ).

Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse ergeben sich die Bemessungswerte der Querkrafttragfähigkeit gemäß DIN FB 102 [DIN EN 1992-2] nach folgenden Gleichungen:

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \Theta \quad (4.27)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \Theta + \tan \Theta} \quad (4.26)$$

Dabei ist

$V_{Rd,sy}$  der Bemessungswert der durch die Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung begrenzten aufnehmbaren Querkraft.

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung.

$s_w$  der Abstand der zur Bauteilachse rechtwinkligen Bewehrung in Richtung der Bauteilachse gemessen.

$z$  der innere Hebelarm.

$\cot \Theta$  die Neigung der Druckstreben des Fachwerks.

$V_{Rd,max}$  der Bemessungswert der durch die Druckstrebenfestigkeit begrenzten aufnehmbaren Querkraft. Die Spannungen in den Druckstreben sind nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.4.2 (4)\*P zu begrenzen auf den Wert

$$\sigma_c \leq \alpha_c \cdot f_{cd} \quad (4.21)$$

$\alpha_c$  der Abminderungsbeiwert für die Druckstrebenfestigkeit.

$\alpha_c = 0,75 \eta_1$  mit  $\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tab. 10 [DIN EN 1992-2, Gl. (11.1)].

Der Zugkraftanteil in der Längsbewehrung infolge Querkraft ergibt sich nach DIN FB 102, Bild 4.13 [DIN EN 1992-2, Gl. (6.18)], zu

$$\Delta F_{sd} = 0,5 \cdot |V_{Ed}| \cdot (\cot \Theta - \cot \alpha)$$

### Querkraftbewehrung

Der Querkraftbewehrungsgrad ergibt sich aus

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \quad (5.16)$$

Dabei ist

$\rho_w$  der Bewehrungsgrad der Querkraftbewehrung.

$\alpha$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und Balkenachse.

$\min \rho_w$  der Mindestwert von  $\rho_w$  nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.2.2 (4)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 9.2.2 (5)].

Allgemein:  $\rho_w = 1,0 \rho$

Platten:  $\rho_w = 0,6 \rho$

Gegliederte Querschnitte mit vorgespanntem Zuggurt:  $\rho_w = 1,6 \rho$

$\rho$  der Grundwert nach DIN FB 102, Tabelle 5.7 [DIN EN 1992-2, Gl. (9.5aDE)].

## Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach dem Hauptspannungskriterium

In Nachweisstufe 2 darf bei Spannbetonbauteilen gemäß Kapitel 12.4.3.3 (8) der Richtlinie der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit unter Vernachlässigung der Querkraftbewehrung auf Grundlage des Hauptspannungskriteriums geführt werden. Die Anwendung ist auf ungerissene Querschnittsbereiche gemäß Absatz (8), Buchstabe a) bis c) beschränkt. Die Auswahl dieser Nachweismethode erfolgt im Querschnittsdialog. Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

Der Nachweis erfolgt für Stäbe und Bemessungsobjekte und gilt als erbracht, wenn die Hauptzugspannungen in Nachweishöhe "i" das Kriterium nach Absatz (9), Gl. (12.19) erfüllen:

$$\sigma_{I,Ed,i} \leq k_1 \cdot f_{ctd} \quad (12.19)$$

Dabei ist

$$\sigma_{I,Ed,i} = 0,5 \cdot \sigma_{cx,Ed,i} + \sqrt{0,25 \cdot \sigma^2 + (\tau_{V,Ed,i} + \tau_{T,Ed})^2}$$

$$\sigma_{cx,Ed,i} = N_{Ed} / A_c + M_{Ed} / I_y \cdot z_i$$

$$\tau_{V,Ed,i} = (V_{Ed} \cdot S_{y,i}) / (I_y \cdot b_{w,i})$$

$$\tau_{T,Ed} = T_{Ed} / W_T$$

$z_i$  vertikaler Abstand des Nachweisschnitts von der Schwereachse des Querschnitts.

$I_y$  Flächenmoment 2. Grades.

$S_{y,i}$  Flächenmoment 1. Grades in der entsprechenden Nachweishöhe.

$b_{w,i}$  Querschnittsbreite unter Berücksichtigung etwaiger Hüllrohre gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.2.2 (8)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.2.3 (6)].

$W_T$  Torsionswiderstandsmoment für den ungerissenen Betonquerschnitt, bei Kastenprofilen unter Berücksichtigung etwaiger Hüllrohre.

$f_{ctd} = \alpha_{cd} \cdot f_{ctk;0,05} / \gamma_c$  (Bemessungswert der Betonzugfestigkeit).

$\gamma_c = 1,5$

$k_1, \alpha_{cd}$  Beiwerte nach Tabelle 12.2.

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens sind nach Absatz (10) die Einwirkungen aus Vorspannung mit  $r_{cp} \cdot P_{m,t}$  zu ermitteln. Der Vorfaktor  $r_{cp}$  ergibt sich nach Tabelle 12.2 in Abhängigkeit vom vorhandenen Querkraftbewehrungsgrad

$\rho_{w,prov}$

1	2	3	4
<b>Querkraftbewehrungsgrad</b>	<b><math>k_1</math></b>	<b>Abminderungsfaktor <math>r_{cp}</math></b>	<b><math>\alpha_{ct}</math></b>
$\rho_{w,prov} \geq \min \rho_w$	1,0	$\frac{0,20 \cdot f_{ck}}{P_{m,t} / A_c} \leq 1,0$	1,0
$0,5 \min \rho_w \leq \rho_{w,prov} < \min \rho_w$	1,0	$\frac{(1 + \rho_{w,prov} / \min \rho_w) \cdot 0,10 \cdot f_{ck}}{P_{m,t} / A_c} \leq 1,0$	1,0
$\rho_{w,prov} < 0,5 \min \rho_w$	0,8	$\frac{0,15 \cdot f_{ck}}{P_{m,t} / A_c} \leq 1,0$	0,85

Tabelle 12.2 der Nachrechnungsrichtlinie

Die Beiwerte  $k_1$ ,  $\alpha_{cd}$  und  $r_{cp}$  werden programmseitig mit der im Querschnittsdialog vorgegebenen Querkraftbewehrung  $A_{sw,prov}$ , dem dort ebenfalls definierten Mindestbewehrungsgrad  $\rho_{w,min}$  und der am Nachweisort maßgebenden Vorspannkraft  $P_{m,t}$  ermittelt.

## Bemessung für Torsion und kombinierte Beanspruchung

Die Bemessung für Torsion erfolgt nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3]. Sie beinhaltet die Ermittlung der Schrägzugbewehrung, die Ermittlung der Längsbewehrung, den Nachweis der Betondruckstreben unter maximaler Torsionsbeanspruchung und den Nachweis der Betondruckstreben bei gleichzeitig wirkender Querkraft. In Nachweisstufe 2 wird optional Spannstahl auf die Längsbewehrung angerechnet.

Der zu Grunde liegende Ersatzquerschnitt wird, unabhängig von der normalen Querschnittsgeometrie, vom Anwender definiert.

### Druckstrebenneigung

Die Druckstrebenneigung wird nach DIN FB 102, Gleichung (4.122), bestimmt. Dazu ist für  $V_{Ed}$  die Schubkraft für reine Torsion nach Gleichung (4.142) und für kombinierte Beanspruchung nach Gleichung (4.242) einzusetzen.

$$V_{Ed,T} = \frac{T_{Ed} \cdot z}{2A_k} \quad (4.142)$$

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + \frac{V_{Ed} \cdot t_{eff}}{b_w} \quad (4.242)$$

Dabei ist

- $V_{Ed,T}$  die Schubkraft in einer Wand des Nachweisquerschnittes infolge eines Torsionsmomentes.
- $A_k$  die durch die Mittellinien der Wände eingeschlossene Fläche.
- $z$  die Höhe der Wand, definiert durch den Abstand der Schnittpunkte der Wandmittellinie mit den Mittellinien der angrenzenden Wände.
- $V_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft.
- $t_{eff}$  die effektive Dicke einer Wand;  $t_{eff}$  ist gleich dem doppelten Abstand von der Mittellinie zur Außenfläche, aber nicht größer als die vorhandene Wanddicke (s. Bild 4.15).

DIN EN 1992-2:

Bei kombinierter Beanspruchung aus Torsion und anteiliger Querkraft ist in Gleichung (6.7aDE) für  $V_{Ed}$  die Schubkraft der Wand  $V_{Ed,T+V}$  nach Gleichung (NA.6.27.1) und in Gleichung (6.7bDE) für  $b_w$  die effektive Dicke der Wand  $t_{ef}$  einzusetzen.

Mit dem gewählten Winkel  $\Theta$  ist der Nachweis sowohl für Querkraft als auch für Torsion zu führen. Die so ermittelten Bewehrungen sind zu addieren.

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + V_{Ed} \cdot t_{ef} / b_w \quad (NA.6.27.1)$$

Alternativ kann im Querschnittsdialog für Torsion eine Druckstrebenneigung von 45° bzw. 30° (DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2 (3)\*P, bzw. Nachrechnungsrichtlinie, Kapitel 12.4.3.4 (2)) oder für Querkraft und Torsion ein konstanter Wert  $\cot \Theta$  gewählt werden.

### Torsionsbewehrung

Die erforderliche Bewehrung ist gemäß DIN FB, Kapitel 4.3.3 (7)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2 (3)], zu ermitteln:

$$T_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot 2A_k \cdot \cot \Theta \quad (4.43)$$

[(6.28)]

$$T_{Rd,sy} = \frac{A_{sl}}{u_k} \cdot f_{yd} \cdot 2A_k \cdot \tan \Theta \quad (4.44)$$

[(NA.6.28.1)]

Dabei ist

- $T_{Rd,sy}$  der Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmomentes des Querschnitts.
- $A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Torsionsbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse.
- $s_w$  der Abstand der Torsionsbewehrung in Richtung der Bauteilachse gemessen.
- $A_{sl}$  die Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung.
- $u_k$  der Umfang der Fläche  $A_k$ .
- $\Theta$  die Neigung der Druckstreben des Fachwerks.

Für einen näherungsweise rechteckigen Vollquerschnitt ist nach DIN FB 102, Kapitel 5.4.2.2, Tabelle 5.7 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2 (5)], nur die Mindestbewehrung erforderlich, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten sind:

$$T_{Ed} \leq V_{Ed} \cdot \frac{b_w}{4,5} \quad (4.48) \quad [(NA.6.31.1)]$$

$$V_{Ed} \left[ 1 + \frac{4,5 T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w} \right] \leq V_{Rd,ct} \quad (4.49) \quad [(NA.6.31.2)]$$

DIN EN 1992-2:

Die vorgenannten Bedingungen werden durch Gleichung (6.31) ergänzt:

$$T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1,0 \quad (6.31)$$

Dabei ist

$T_{Rd,c}$  das Torsionsrissmoment, das nach Zilch (2006, S. 290) zu  $T_{Rd,c} = f_{ctd} \cdot W_T$  ermittelt wird.

$V_{Rd,c}$  der Querkraftwiderstand nach Gleichung (6.2).

### Druckstreben­tragfähigkeit

Um die Druckstreben­tragfähigkeit eines auf Torsion und Querkraft beanspruchten Bauteils nicht zu überschreiten, sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

$$\left[ \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \right]^2 + \left[ \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right]^2 \leq 1 \text{ für Kompaktquerschnitte} \quad (4.47a) \quad [(NA.6.29.1)]$$

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \quad \text{für Kastenquerschnitte} \quad (4.47b) \quad [(6.29)]$$

Dabei ist

$V_{Rd,max}$  der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (4.26) [Gl. (6.9)].

$T_{Rd,max}$  der Bemessungswert des maximal aufnehmbaren Torsionsmoments des Querschnitts.

mit

$$T_{Rd,max} = \frac{\alpha_{c,red} \cdot f_{cd} \cdot 2A_k \cdot t_{eff}}{\cot \Theta + \tan \Theta} \quad (4.40)$$

$\alpha_{c,red} = 0,7 \alpha_c$  allgemein ( $\alpha_c = 0,75 \eta_1$ ;  $\eta_1 = 1,0$  für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10).

$\alpha_{c,red} = \alpha_c$  bei Kastenquerschnitten mit Bewehrung an den Innen- und Außenseiten der Wände.

DIN EN 1992-2:

$$T_{Rd,max} = 2 v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \quad (6.30)$$

mit

$\alpha_{cw}$  nach Gleichung (6.9)

$v = \eta_1 \cdot 0,75$  für Kastenquerschnitte

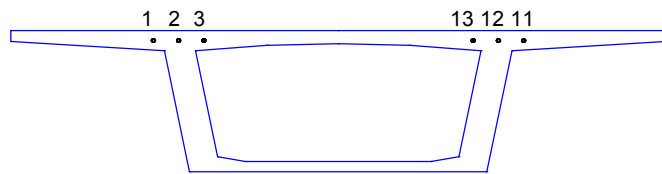
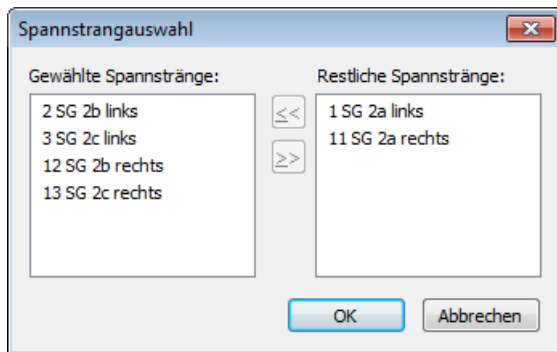
$v = \eta_1 \cdot 0,525 \cdot \min(1,0; 1,1 - f_{ck}/500)$  gemäß NDP zu 6.2.2(6) in allen anderen Fällen.

$\eta_1 = 1$  für Normalbeton, nach Gl. (11.1) für Leichtbeton.

### Anrechnung von Spannstahl auf die Torsionslängsbewehrung

In Nachweisstufe 2 darf nach Kapitel 12.4.3.4 (3) der Richtlinie Spannstahl auf die Torsionslängsbewehrung angerechnet werden, wenn sich die Spannglieder innerhalb der im Torsionsnachweis verwendeten effektiven Wanddicke  $t_{eff}$  befinden und die Spannglieder regelmäßig über die nachzuweisende Wand des dünnwandigen Ersatzquerschnitts verteilt sind. Unregelmäßig im Torsionskasten verteilte Spannglieder dürfen bis zu einem Abstand von 350 mm von der Längsbewehrung angerechnet werden.

Die sachgerechte Auswahl der anrechenbaren Spannglieder obliegt dem Anwender. Hierzu wird im Querschnittsdialog auf der Registerkarte *Querkraft und Torsion* der nachfolgende Dialog aufgerufen. Zur Beurteilung, welche Spannglieder die Anwendungsvoraussetzungen erfüllen, kann eine Spannstrangansicht am jeweiligen Nachweisort dienen.



Im Nachweis wird gemäß Kapitel 12.4.3.4 (4) der Richtlinie programmseitig sichergestellt, dass der Spannstahl infolge Biegung und Torsion nicht über seine Streckgrenze hinaus beansprucht wird und der aus Torsion resultierende Spannungszuwachs im Spannstahl die Streckgrenze der Betonstahlbewehrung nicht überschreitet. Der angerechnete Spannstahl wird im ausführlichen Protokoll ausgewiesen.

### Hinweis

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.1(7)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2 (2)], darf die Torsionslängsbewehrung in Druckgurten entsprechend den vorhandenen Druckkräften abgemindert werden. In Zuggurten ist sie zur übrigen Längsbewehrung zu addieren.

## Nachweis der Hauptdruckspannung für kombinierte Beanspruchung

Wenn Torsion gleichzeitig mit Querkraften, Biegemomenten und Normalkräften auftritt, kann dies nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.2.2 (2) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.3.2 (NA.106)], besonders bei Kastenträgern zu kritischen Hauptspannungen in der Druckzone führen. In diesen Fällen dürfen in ungerissenen Bereichen die Hauptdruckspannungen  $\sigma_2$  den Wert

$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$  nicht überschreiten. Die Hauptdruckspannungen sind dabei nach Zustand I aus der mittleren Längsspannung  $\sigma_{Ed}$  und der Schubspannung  $\tau_{Ed,T+V}$  aus Querkraft und Torsion zu ermitteln.

Im Programm wird der Nachweis im Zuge der Torsionsbemessung geführt, wenn auf der Registerkarte *Schubquerschnitt* des Querschnittsdialogs die Option *Kastenquerschnitt* aktiviert ist. Dazu wird die Längsdruckspannung  $\sigma_{Ed}$  im Abstand  $t_{eff} / 2$  vom Querschnittsrand ermittelt und die Schubspannung aus Torsion zu  $\tau_{Ed} = T_{Ed} / (2 \cdot A_k \cdot t_{eff})$  angenommen. Die Ausnutzung  $\sigma_2 / f_{cd}$  wird protokolliert und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Nachweis der aufnehmbaren Belastung

Zur Beurteilung der Beanspruchbarkeit des Tragwerks mit der gegebenen Vorspannung und der vorhandenen Bewehrung werden die folgenden Nachweise für alle Stäbe und Bemessungsobjekte des Tragwerks durchgeführt.

### Aufnehmbare Biegemomente

Die Bestimmung der aufnehmbaren Biegemomente untersucht alle Nachweissituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Dabei gelten folgende Besonderheiten:

- Beschränkung auf Endzustände, sofern solche in den Nachweissituationen definiert sind
- Beschränkung auf verpresste Situationen bei Vorspannung mit Verbund
- Berücksichtigung der vorhandenen Bewehrung gemäß Betonstahlbeschreibung
- Nutzung der verfügbaren Restdehnung von im Verbund liegenden Spannmitgliedern
- Abzug der Spannkraftverluste aus CSR gemäß Nachweissituation
- Spannungs-Dehnungslinie für Beton nach DIN FB 102, Bild 4.2 [DIN EN 1992-2, Bild 3.3]

Mit dem am Nachweisort im Querschnitt vorhandenen Betonstahl und den im Verbund liegenden Spannmitgliedern werden die Dehnungszustände unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts bestimmt. Unter der gegebenen Vorspannung, den äußeren Normalkräften und jeweils einem Biegemoment gemäß Nachweissituation wird für das jeweils andere Biegemoment das negative und positive Extremum iterativ ermittelt.

Als Ergebnis liegen die vom Querschnitt aufnehmbaren Biegemomente  $M_{Rd,y,min}$ ,  $M_{Rd,y,max}$ ,  $M_{Rd,z,min}$  und  $M_{Rd,z,max}$  vor. Im Anschluss werden alle Situationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchlaufen, um mit dem einwirkenden Moment  $M_{Ed}$  und dem Widerstand  $M_{Rd}$  die maximale Ausnutzung  $M_{Ed} / M_{Rd}$  des Querschnitts zu bestimmen. Die Momente und Ausnutzungen sind im Abschnitt *Aufnehmbare Belastung* des Datenbaums tabellarisch und graphisch abrufbar.

### Aufnehmbare Querkräfte

Die Ermittlung der aufnehmbaren Querkräfte erfolgt am Fachwerkmodell mit dem im Querschnittsdialog definierten Ersatzquerschnitt. Dabei wird die gewählte Methode zur Bestimmung der Druckstrebenneigung  $\cot \theta$  und des inneren Hebelarms  $z$  berücksichtigt. Falls für den Hebelarm der Wert aus der Biegebemessung oder nach Gl. (12.16) der Richtlinie gewählt wurde, werden die Ergebnisse der Dehnungszustände aus der oben beschriebenen Berechnung der aufnehmbaren Biegemomente herangezogen.

Zur Berechnung der aufnehmbaren Querkräfte werden für alle Nachweissituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Widerstände  $V_{Rd,y}$  und  $V_{Rd,z}$  bestimmt. Dazu wird jeweils das Maximum des Widerstands  $V_{Rd,ct}$  ohne Querkraftbewehrung und des Widerstands  $V_{Rd,s}$  mit Querkraftbewehrung ermittelt und durch die maximale Tragfähigkeit der Betondruckstreben  $V_{Rd,max}$  nach oben begrenzt. Als vorhandene Querkraftbewehrung werden die im Querschnittsdialog vorgegebenen Werte  $A_{sw,y,prov}$  und  $A_{sw,z,prov}$  angenommen.

Anschließend werden alle Situationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchlaufen, um mit der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$  und dem Widerstand  $V_{Rd}$  die maximale Ausnutzung  $V_{Ed} / V_{Rd}$  des Querschnitts zu ermitteln. Die Querkräfte und Ausnutzungen sowie die für die Berechnung maßgebenden Hebelarme  $z$  und Druckstrebenneigungen  $\cot \theta$  sind im Abschnitt *Aufnehmbare Belastung* des Datenbaums tabellarisch und graphisch abrufbar.

## Nachweis des Ausnutzungsgrads der Bewehrung

Neben der Berechnung der aufnehmbaren Belastung dient der Ausnutzungsgrad der vorhandenen Biege- und Querkraftbewehrung zur Beurteilung der Beanspruchbarkeit des Tragwerks.

Der Ausnutzungsgrad kann für Stäbe und Bemessungsobjekte ermittelt werden. Dazu sind folgende Benutzereingaben erforderlich:

- Vorgabe der vorhandenen Biegebewehrung in der Betonstahlbeschreibung
- Vorgabe der vorhandenen Querkraftbewehrung im Querschnittsdialog

Zur Eingabekontrolle ist die vorgegebene Bewehrung über den Abschnitt *Betonstahlbewehrung/Grundbewehrung* des Datenbaums graphisch darstellbar.

Im Nachweis wird für alle Situationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Biege- und Querkraftbemessung zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung unter Berücksichtigung der im Querschnittsdialog getroffenen Einstellungen durchgeführt. Dabei wird die Biegebewehrung ohne Ansatz einer Grundbewehrung ermittelt. Als Ergebnis stehen folgende Größen zur Verfügung:

$A_{s,oben,erf} / A_{s,oben,vorh}$	Ausnutzung der oberen Biegebewehrung
$A_{s,unten,erf} / A_{s,unten,vorh}$	Ausnutzung der unteren Biegebewehrung
$A_{sb,y,erf} / A_{sb,y,vorh}$	Ausnutzung der Bügelbewehrung für Querkraft $Q_y$
$A_{sb,z,erf} / A_{sb,z,vorh}$	Ausnutzung der Bügelbewehrung für Querkraft $Q_z$

Als obere bzw. untere Biegebewehrung ist hier die Summe aller Betonstahllagen oberhalb bzw. unterhalb des Schwerpunkts des Querschnitts definiert. Die Ausnutzungen sind im Abschnitt *Betonstahlbewehrung* des Datenbaums tabellarisch und graphisch abrufbar.

## Nachweise gegen Ermüdung

Es stehen folgende Nachweise zur Verfügung:

- Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl (DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.5 und 6.8.6)
- Ermüdung von Beton unter Längsdruckbeanspruchung (DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.7)
- Ermüdung der Betondruckstreben unter Querkraft und Torsion (DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4; DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.7 (3))

Für die Nachweise können vom Benutzer alternativ zwei Verfahren gewählt werden:

- Vereinfachter Nachweis gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4 und 4.3.7.5 (101) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.6 (2) und DIN EN 1990, Gl. (6.15b)], für die häufige Einwirkungskombination mit den im Gebrauchszustand relevanten Verkehrslasten.
- Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5 (102) und Anhang 106 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.5 und Anhang NA.NN], mit der speziell definierten zyklischen Einwirkung  $Q_{fat}$  entsprechend DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3, Gl. (6.69).

Die Betondruckspannungen im Zustand II werden in beiden Fällen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie nach DIN FB 102, Bild 4.1 [DIN EN 1992-2, Bild 3.2], mit  $f_c = f_{cm}$  ermittelt. Die Streuung der Vorspannung wird nicht berücksichtigt.

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.2 (103)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3. (1)P], ist für den Nachweis der 0,9-fache statisch bestimmte Anteil der Vorspannkraft anzusetzen. An Arbeitsfugen mit Spanngliedkopplung ist der statisch bestimmte Anteil weiter abzumindern. Die Festlegung des maßgeblichen Abminderungsfaktors erfolgt im Querschnittsdialog.

## Nachweiskombinationen

Im Nachweis gegen Ermüdung kommen alternativ folgende Kombinationen zur Anwendung:

- Häufige Kombination gemäß DIN FB 101, Kapitel 9.5.2 [DIN EN 1990, Kapitel 6.5.3] für vereinfachte Nachweise nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4/5 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.5.3].

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } P_k \text{ "+" } \psi_{11} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.17) \quad [(6.15b)]$$

- Ermüdungskombination gemäß DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3, Gleichung (6.69), für Nachweise mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5 (102) und Anhang 106 [DIN EN 1992-2, Anhang NN].

$$\left( \sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } P_k \text{ "+" } \psi_{11} \cdot Q_{k1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \right) \text{ "+" } Q_{fat} \quad (6.69)$$

Dabei sind  $Q_{k,1}$  und  $Q_{k,i}$  nicht-zyklische, nicht-ständige Einwirkungen und  $Q_{fat}$  die zyklische Einwirkung aus dem maßgebenden Ermüdungslastmodell.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Im Nachweis ist das Extremum aus allen Kombinationen und Situationen maßgebend.

Bei Straßenbrücken entspricht  $Q_{fat}$  dem Ermüdungslastmodell 3 gemäß DIN FB 101, Kapitel 4.6 [DIN EN 1991-2, Kapitel 4.6.4]. Die Erhöhungsfaktoren nach Kapitel 4.6.1 (7) [Kapitel 4.6.1 (6)] der Norm sind bei der Eingabe der Lastordinaten zu berücksichtigen, während die Faktoren nach DIN FB 102, Kapitel A.106.2 (101)P [DIN EN 1992-2, Kapitel NN.2.1 (101)], im Querschnittsdialog definiert werden.



## Ermüdung von Längsbewehrung, Schubbewehrung und Spannstahl

Der Ermüdungsnachweis wird nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8], geführt. Die Ermittlung der Stahlspannungen erfolgt für Längsbewehrung aus Biegung und Längskraft sowie für Spannstahl in Stäben und Bemessungsobjekten unter Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts. Für Schub- und Längsbewehrung aus Querkraft- und Torsion werden die Spannungen gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.3 (4)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3 (3)], auf der Grundlage eines Fachwerkmodells mit der Druckstrebenneigung  $\tan \Theta_{\text{fat}} = \sqrt{\tan \Theta}$  nach Gl. (4.187) [Heft 600 des DAfStb, Gl. (H.6-26)] berechnet. Spannstahlspannungen in Flächenelementen werden am ungerissenen Betonquerschnitt ermittelt. Für Spannglieder ohne Verbund und externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

### Vereinfachter Nachweis

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5 (101) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.6], kann ausreichender Widerstand gegen Ermüdung angenommen werden, wenn unter der häufigen Einwirkungskombination die Spannungsschwingbreite für ungeschweißte Bewehrungsstäbe  $70 \text{ MN/m}^2$  nicht übersteigt.

DIN EN 1992-1-1:

Die Bedingung nach Kapitel 6.8.6 (3) für Kopplungen in Spannbetonbauteilen wird programmseitig nicht überprüft.

### Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten

Der Nachweis gilt nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.5 (102) [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.5 (3)], als erbracht, wenn für Betonstahl und Spannstahl gilt:

$$\gamma_{F,\text{fat}} \cdot \gamma_{Ed,\text{fat}} \cdot \Delta\sigma_{s,\text{equ}} \leq \Delta\sigma_{\text{Rsk}}(N^*) / \gamma_{s,\text{fat}} \quad (4.191) \quad [(6.71)]$$

mit

$$\gamma_{F,\text{fat}} = \gamma_{Ed,\text{fat}} = 1$$

$$\gamma_{s,\text{fat}} = 1,15 \text{ für Betonstahl und Spannstahl mit neuer Zulassung.}$$

$$= 1,25 \text{ für Spannstahl mit Zulassung nach DIN 4227-1 gem. ARS 11/03 (13).}$$

In Nachweisstufe 2 darf nach Kapitel 12.3.3 der Teilsicherheitsbeiwert zu 1,05 für Betonstahl und 1,1 für Spannstahl angenommen werden.

$$\Delta\sigma_{\text{Rsk}}(N^*) \quad \text{Zulässige charakteristische Spannungsschwingbreite bei } N^* \text{ Lastzyklen gemäß den Wöhlerlinien nach Tabelle 4.116 [Tabelle 6.4N] für Spannstahl bzw. Tabelle 4.117 [Tabelle 6.3N] für Betonstahl.}$$

$$\Delta\sigma_{s,\text{equ}} \quad \text{Schadensäquivalente Schwingbreite mit } \Delta\sigma_{s,\text{equ}} = \lambda_s \cdot \Delta\sigma_s \text{ gem. Gl. (A.106.1) bzw. Gl. (A.106.6) [Gl. (NN.101) bzw. Gl. (NN.106)].}$$

$$\lambda_s \quad \text{Korrekturbeiwert gemäß Anhang A.106.2 bzw. A.106.3 [Anhang NN.2 bzw. NN.3].}$$

$$\Delta\sigma_s \quad \text{Berechnete Schwingbreite aus der zyklischen Einwirkung } Q_{\text{fat}}.$$

### Berechnungsmethode

Als vorhandene Längsbewehrung wird das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung angenommen. Falls damit die Beanspruchung aus der Ermüdungskombination im Zustand II nicht aufnehmbar ist, wird mit der vorhandenen Bewehrung und den Nachweisschnittgrößen eine erneute Bemessung durchgeführt.

Die sich aus dem Dehnungszustand im Zustand II bzw. am Fachwerkmodell ergebende maximale Spannungsschwingbreite je Stahllage wird für jede Nachweissituation getrennt ermittelt. Bei Längsbewehrung wird das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl durch Erhöhung mit dem Beiwert  $\eta$  nach DIN FB 102, Gl. (4.193) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.64)], berücksichtigt. Wenn bei Längs- oder Schubbewehrung die resultierende Schwingbreite die zulässige Spannungsschwingbreite übersteigt, wird die erforderliche Bewehrung solange iterativ erhöht, bis der Nachweis für alle Situationen erfüllt ist, sofern dies in den Querschnittseinstellungen nicht abgewählt wurde. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* wird die Längsbewehrung an allen vordefinierten Orten eingelegt. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten, sofern dies in den Bemessungsvorgaben nicht abgewählt wurde.

Die zulässigen Spannungsschwingbreiten sowie die Beiwerte  $\eta$  und  $\lambda$  werden vom Benutzer im Querschnittsdialog vorgegeben. Die für den Nachweis maßgebliche, gegebenenfalls erhöhte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll ausgegeben und für die graphische Darstellung gespeichert.

## Ermüdung von Beton unter Längsdruckbeanspruchung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruckbeanspruchung erfolgt für Biegung und Längskraft nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.3 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.7], am gerissenen Querschnitt. Dabei wird die endgültige Längsbewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis für Betonstahl berücksichtigt. Bei Straßenbrücken braucht der Nachweis gemäß Kapitel 4.3.7.1 (102), Buchstabe (g), [Kapitel 6.8.1 (102), Buchstabe g)], nicht geführt zu werden, wenn im Gebrauchszustand die Betondruckspannung auf  $0,6f_{ck}$  begrenzt wird.

### Vereinfachter Nachweis

Der Nachweis gilt als erbracht, wenn nach DIN FB 102 Gl. (4.188), bzw. DIN 1045-1 Gl. (123) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.77)], eingehalten wird.

$$\frac{\max|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \cdot \frac{\min|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 \quad \text{für Beton bis C50/60 oder LC50/55} \quad (4.188) \quad [(6.77)]$$

$$\frac{\max|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \cdot \frac{\min|\sigma_{cd}|}{f_{cd,fat}} \leq 0,8 \quad \text{für Beton ab C55/67 oder LC55/60} \quad (123) \quad [(6.77)]$$

mit

$\max|\sigma_{cd}|, \min|\sigma_{cd}|$  Bemessungswerte der maximalen und minimalen Betondruckspannung unter der häufigen Einwirkungskombination. Im Fall von Zugspannungen ist  $\min|\sigma_{cd}|$  zu Null anzunehmen.

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot (1 - f_{ck} / 250)$$

Bemessungswert der Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung. Dieser Wert wird im Querschnittsdialog vorgegeben.

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{0,2(1-\sqrt{28/t_0})}$$

Beiwert für die Nacherhärtung des Betons.

$t_0$  Zeitpunkt der zyklischen Erstbelastung des Betons in Tagen.

### Nachweis über schadensäquivalente Betondruckspannungen

Der Nachweis wird gemäß DIN FB 102, Anhang A.106.3.2 [DIN EN 1992-2, Anhang NN.3.2], nach dem für Eisenbahnbrücken angegebenen Verfahren geführt. Ausreichender Ermüdungswiderstand darf demnach angenommen werden, wenn folgender Ansatz erfüllt ist:

$$E_{cd,max, equ} + 0,43\sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1 \quad (A.106.12) \quad [(NN.112)]$$

mit

$$R_{equ} = \min|\sigma_{cd, equ}| / \max|\sigma_{cd, equ}|$$

$$E_{cd,max, equ} = \gamma_{Ed, fat} \cdot \max|\sigma_{cd, equ}| / f_{cd, fat}$$

Dabei ist  $\max|\sigma_{cd, equ}|$  bzw.  $\min|\sigma_{cd, equ}|$  die obere bzw. untere Druckspannung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite mit  $N = 10^6$  Zyklen.

Die obere und untere Spannung der schadensäquivalenten Schwingbreite soll wie folgt ermittelt werden.

$$\max|\sigma_{cd, equ}| = |\sigma_{c, perm}| + \lambda_c (\max|\sigma_{c, 71}| - |\sigma_{c, perm}|) \quad (A.106.13)$$

$$\min|\sigma_{cd, equ}| = |\sigma_{c, perm}| - \lambda_c (|\sigma_{c, perm}| - \min|\sigma_{c, 71}|) \quad [(NN.113)]$$

Dabei ist

$|\sigma_{c, perm}|$  die betragsmäßige Druckspannung unter der Ermüdungskombination ohne Lastmodell 71.

$\max|\sigma_{c, 71}|, \min|\sigma_{c, 71}|$  die betragsmäßig größte bzw. kleinste Druckspannung unter der Ermüdungskombination einschließlich des dynamischen Faktors  $\Phi_2$  nach DIN FB 101.

$\lambda_c$  der Korrekturfaktor zur Berechnung der durch Lastmodell 71 hervorgerufenen Spannungen.

Bei Anwendung des obigen Verfahrens für Straßenbrücken tritt an Stelle des Lastmodells 71 das maßgebende Ermüdungslastmodell.

## Ermüdung der Betondruckstreben unter Querkraft und Torsion

### Bauteile mit Querkraftbewehrung

Der Ermüdungsnachweis für Beton unter Druckbeanspruchung nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.7], ist auch für den Nachweis der Betondruckstreben von Bauteilen mit Querkraftbewehrung nach Kapitel 4.3.7.4 (102)P [Kapitel 6.8.7 (3)], anwendbar. Dabei ist die Betondruckfestigkeit  $f_{cd, \text{fat}}$  bei reiner Querkraftbeanspruchung mit dem Faktor  $\alpha_c = 0,75 \cdot \eta_1$  [ $v_1 = 0,75 \cdot \eta_1$ ] abzumindern. Bei kombinierter Beanspruchung aus Querkraft und Torsion gilt ein Reduktionsfaktor  $\alpha_{c, \text{red}} = 0,7 \cdot \alpha_c \cdot \eta_1$  [ $v \cdot \alpha_{cw} \cdot \eta_1 = 0,525 \cdot \eta_1$ ]. Der Beiwert  $\eta_1$  ist für Normalbeton zu 1, für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10 [DIN EN 1992-2, Gl. (11.1)], anzunehmen.

Die Bemessungswerte  $\sigma_{cd, \text{max}}$  und  $\sigma_{cd, \text{min}}$  der maximalen bzw. minimalen Druckspannung dürfen im Fall lotrechter Bügel ( $\alpha = 90^\circ$ ) mit einem für Querkraft und Torsion gleich anzunehmenden Druckstrebenwinkel  $\theta$  nach folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\sigma_{cd, T} &= \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot t_{ef}} \cdot (\cot \Theta + \tan \Theta) \\ \sigma_{cd, V} &= \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} \cdot (\cot \Theta + \tan \Theta) \\ \sigma_{cd, \text{max}} &= \begin{cases} \max \sigma_{cd, T} + \text{zug } \sigma_{cd, V} \\ \max \sigma_{cd, V} + \text{zug } \sigma_{cd, T} \end{cases} \\ \sigma_{cd, \text{min}} &= \begin{cases} \min \sigma_{cd, T} + \text{zug } \sigma_{cd, V} \\ \min \sigma_{cd, V} + \text{zug } \sigma_{cd, T} \end{cases}\end{aligned}$$

Das Programm führt den Nachweis abhängig von der Benutzerauswahl entweder nach der vereinfachten Methode gemäß DIN FB 102, Gl. (4.188) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.77)], für die häufige Kombination oder über schadensäquivalente Schwingbreiten gemäß DIN FB 102, Anhang A.106.3.2 [DIN EN 1992-2, Anhang NN.3.2], für die Ermüdungskombination nach DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.3, Gl. (6.69).

### Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Bei Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung darf nach DIN FB 102, Kapitel 4.3.7.4 (103)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 6.8.7 (4)], ein ausreichender Widerstand gegen Ermüdung des Betons bei Querkraftbeanspruchung angenommen werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

$$\text{für } \frac{V_{Ed, \text{min}}}{V_{Ed, \text{max}}} \geq 0: \frac{|V_{Ed, \text{max}}|}{|V_{Rd, ct}|} \leq 0,5 + 0,45 \cdot \frac{|V_{Ed, \text{min}}|}{|V_{Rd, ct}|} \leq 0,9 \text{ bis C50/60} \quad (4.189)$$

$$\leq 0,8 \text{ ab C55/67} \quad [(6.78)]$$

$$\text{für } \frac{V_{Ed, \text{min}}}{V_{Ed, \text{max}}} < 0: \frac{|V_{Ed, \text{max}}|}{|V_{Rd, ct}|} \leq 0,5 - \frac{|V_{Ed, \text{min}}|}{|V_{Rd, ct}|} \quad (4.190)$$

$$[(6.79)]$$

Dabei ist

$V_{Ed, \text{max}}$  der Bemessungswert der maximalen Querkraft unter häufiger Einwirkungskombination.

$V_{Ed, \text{min}}$  der Bemessungswert der maximalen Querkraft unter häufiger Einwirkungskombination in dem Querschnitt, in dem  $V_{Ed, \text{max}}$  auftritt.

$V_{Rd, ct}$  Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft ohne Schubbewehrung nach DIN FB 102, Gl. (4.118) [DIN EN 1992-2, Gl. (6.2a)].

Der Nachweis kann nur geführt werden, wenn die vereinfachte Methode für die häufige Kombination gewählt wurde.

## Besonderheit bei Flächentragwerken

Bei Flächentragwerken kann der Dehnungszustand am gerissenen Betonquerschnitt unter allgemeiner Beanspruchung nicht eindeutig ermittelt werden. Die Bemessung erfolgt deshalb getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y mit den oben näher erläuterten Bemessungsschnittgrößen nach Wolfensberger/Thürlimann bzw. nach Rüsç. Mit der so ermittelten Bewehrung kann die Tragfähigkeit als gesichert angenommen werden.

Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite für Betonstahl und Beton kann diese Methode im Fall von Drill- oder Scherbeanspruchungen zu unrealistischen Ergebnissen führen, wie am folgenden Beispiel deutlich wird:

Gegeben seien zwei identische Sätze von Plattenschnittgrößen:

Satz	$m_x$ [kNm/m]	$m_y$ [kNm/m]	$m_{xy}$ [kNm/m]
1	300	200	100
2	300	200	100

Daraus folgen nach Wolfensberger/Thürlimann als Bemessungsvarianten für die x-Richtung:

Satz	Variante	$m$ [kNm/m]
1	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$
2	1	$m_x +  m_{xy}  = 400$
	2	$m_x -  m_{xy}  = 200$

Die Drillmomente erzeugen eine Variation der Bemessungsmomente und damit rein rechnerisch eine Spannungsschwingbreite. Im Ermüdungsnachweis könnte dadurch eine Bewehrungserhöhung aufgrund scheinbarer Überbeanspruchung notwendig werden. Bei Bemessungsnormalkräften gilt dies für die Scherkräfte sinngemäß.

Mit der Benutzerauswahl **Bemessungsvarianten einschränken** im Querschnittsdialog lässt sich der beschriebene Effekt vermeiden. In diesem Fall werden bei der Ermittlung der Schwingbreite nur noch die korrespondierenden Varianten verglichen, im Beispiel also nur die jeweils ersten und die jeweils zweiten Varianten der beiden Sätze. Bei konstanter Beanspruchung wird somit die Schwingbreite korrekt zu Null ermittelt.

**Diese Alternative kann allerdings nicht sicherstellen, dass immer alle denkbaren Spannungsschwankungen erfasst werden. Die Ergebnisse sind deshalb mit besonderer Aufmerksamkeit zu bewerten. Im ausführlichen Protokoll werden dazu die für den Nachweis maßgeblichen Varianten und Bemessungsschnittgrößen angegeben.**

Bei Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen nach Rüsç für schiefwinklige Bewehrung gelten die dargestellten Zusammenhänge entsprechend.

## Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Einzelnen werden folgende Nachweise geführt:

- Begrenzung der Betondruckspannungen (DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2)
- Begrenzung der Betonstahlspannungen (DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2)
- Begrenzung der Spannstahlspannungen (DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.4; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2)
- Nachweis der Dekompression (DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.1; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1)
- Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite (DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2)
- Nachweis der Rissbreite (DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.4)
- Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen (DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1)
- Begrenzung der Verformungen (DIN FB 102, Kapitel 4.4.3; DIN EN 1992-2, Kapitel 7.4)

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach DIN FB 101, Kapitel 9.5.2 [DIN EN 1990, Kapitel 6.5.2], berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische (seltene) Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \cdot Q_{ki} \quad (9.16)$$

[(6.14b)]

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.17)$$

[(6.15b)]

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (9.18)$$

[(6.16b)]

- Kombination für nicht häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi'_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{1i} \cdot Q_{ki} \quad (9.19)$$

DIN EN 1992-2:

Zusätzlich werden die Nachweiskombinationen gemäß Tab. 7.101DE berücksichtigt.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Soweit erforderlich, wird die im Nachweis vorgeschriebene Kombination automatisch aus den Querschnittsvorgaben ermittelt. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Spannungsberechnung

Am ungerissenen Betonquerschnitt wird angenommen, dass sich Beton und Stahl unter Zug- und Druckbeanspruchung elastisch verhalten. Bei Annahme eines gerissenen Betonquerschnitts werden die Betondruckspannungen nach DIN FB 102, Bild 4.1 mit  $f_c = f_{cm}$  [DIN EN 1992-2, Bild 3.2], bestimmt, wobei für Dehnungen ab  $\epsilon_{c1}$  ein horizontaler Verlauf angenommen wird.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen werden die Betonspannungen am Bruttoquerschnitt berechnet. Der Nachweis der Stahlspannungen erfolgt für Betonstahl durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt und für Spannstahl am ungerissenen Betonquerschnitt.

## Stäbe und Bemessungsobjekte

Die ohne Nachweis darstellbaren Spannungen der Einwirkungskombinationen werden immer am Bruttoquerschnitt und ohne Berücksichtigung des eingegebenen Vollquerschnitts berechnet.

In den Nachweisen werden dagegen die Spannungen wie folgt ermittelt und graphisch dargestellt bzw. protokolliert:

- Beim Nachweis der Rissbewehrung und der Rissbreite erfolgt die Ermittlung der Betonspannung am Bruttoquerschnitt.
- Beim Nachweis der Dekompression, der Betondruckspannungen und der schiefen Hauptzugspannungen erfolgt die Berechnung der Biegespannung
  - ohne interne Spannglieder am Bruttoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern ohne Verbund am Nettoquerschnitt,
  - mit internen Spanngliedern im Verbund für die Situationen vor dem Verpressen am Nettoquerschnitt, ansonsten am ideellen Querschnitt.
- Der Nachweis der Betonstahl- und Spannstahlspannungen erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands am gerissenen Betonquerschnitt.

Beim Nachweis der Rissbewehrung und Rissbreite, der Dekompression, der Betondruck- und Hauptzugspannungen wird die Längskraft auf die Fläche des Vollquerschnitts bezogen (vgl. Rossner/Graubner 2012, S.228).

## Begrenzung der Betondruckspannungen

Der Nachweis der Betondruckspannungen erfolgt nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2]. Gemäß Kapitel 4.4.1.1 (5) [Kapitel 7.1 (2)] wird der gerissene Zustand angenommen, wenn die im ungerissenen Zustand unter der seltenen Einwirkungskombination berechnete Zugspannung den Wert  $f_{ctm}$  überschreitet.

Die Berechnung im gerissenen Zustand erfolgt durch Ermittlung des Dehnungszustands mit der endgültigen Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis). Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden im Verbund liegende Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind. Bei Flächenelementen wird, da der allgemeine Dehnungszustand nicht eindeutig bestimmbar ist, die Druckspannung für beide Bewehrungsrichtungen getrennt ermittelt und der Extremwert nachgewiesen.

Für Bau- und Endzustände ist die Betondruckspannung  $\sigma_c$  nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (103)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (102)], auf  $0,60 f_{ck}$  unter der nichthäufigen [charakteristischen] Kombination zu begrenzen. Die Grenze darf um 10% erhöht werden, wenn die Betondruckzone z.B. durch Querbewehrung umschnürt ist.

Falls die Spannung im Beton unter quasi-ständiger Kombination die Grenze  $0,45 f_{ck}$  nicht übersteigt, darf nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (104)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (3)], von linearem Kriechen ausgegangen werden, anderenfalls ist nichtlineares Kriechen zu berücksichtigen. Beide Bedingungen werden nach Benutzervorgabe berücksichtigt.

In Spannbetonbauteilen nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.2 (102)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 5.10.2.2], ist die maximale Betondruckspannung bei Eintragung des Mittelwerts der Vorspannung auf  $0,60 f_{c(t)}$  zu beschränken. Übersteigt die Betondruckspannung den Wert von  $0,45 f_{c(t)}$ , ist die Nichtlinearität des Kriechens zu berücksichtigen. Dabei bezeichnet  $f_{c(t)}$  den Mittelwert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.

Im Programm wird der Zeitpunkt der Einleitung der Vorspannung bei der Situation  $G1+P$  angenommen. Falls in der maßgebenden Kombination eine Situation  $G1+P$  definiert ist, wird für diese Situation die Betonspannung je nach Benutzervorgabe gegen den Grenzwert  $0,45 f_{c(t)}$  oder  $0,60 f_{c(t)}$  geprüft. Der Wert für  $f_{c(t)}$  wird ebenfalls im Dialog festgelegt.

## Begrenzung der Betonstahl- und Spannstahlspannungen

### Betonstahl

Bei Betonstahl wird gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.3, die Begrenzung der Stahlspannung unter der nicht häufigen Kombination auf  $0,80 f_{yk}$  nachgewiesen. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt am gerissenen Betonquerschnitt. Im Verbund liegende Stabspannglieder werden auf der Widerstandsseite berücksichtigt, sofern sie verpresst sind.

DIN EN 1992-2:

Die Zugspannungen in der Bewehrung dürfen nach Kapitel 7.2 (5) unter der charakteristischen Einwirkungskombination den Wert  $0,8 \cdot f_{yk}$  nicht übersteigen. Bei Spannungen aus indirekter Einwirkung darf die Grenze zu  $1,0 \cdot f_{yk}$  angenommen werden.

### Spannstahl

Bei Spanngliedern im Verbund wird die Begrenzung der Stahlspannung unter der quasi-ständigen Kombination nachgewiesen, und zwar für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen und für Flächenelemente am ungerissenen Betonquerschnitt, wobei folgende Grenzen gelten:

- $0,65 f_{pk}$  gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.1.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.2 (5)] für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 1045-1 und EC2
- $0,75 \beta_s$  bzw.  $0,55 \beta_z$  gemäß DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65, für Spannglieder mit Zulassung nach DIN 4227

DIN EN 1992-2:

Zusätzlich wird gemäß Kapitel 7.2 (NA.6) geprüft, ob unter der charakteristischen Kombination das Minimum aus  $0,9 \cdot f_{p0,1k}$  und  $0,8 \cdot f_{pk}$  nicht überschritten wird.

Für Situationen vor dem Verpressen und für Spannglieder ohne Verbund wird die Spannung  $\sigma_{pm0}$  gemäß DIN FB 102, Gl. (4.6) bzw. DIN 4227, Tab. 9, Zeile 65 [DIN EN 1992-2, Gl. (5.43)], nachgewiesen. Für externe Spannglieder wird kein Nachweis geführt.

### Hinweis

Ergänzend zum Nachweis im Gebrauchszustand werden die Spannstahlspannungen für die ständige und vorübergehende Kombination in den Situationen nach dem Verpressen mit dem Mittelwert der Vorspannung berechnet. Die Ermittlung des Dehnungszustands erfolgt für Stäbe und Bemessungsobjekte am gerissenen Betonquerschnitt mit den für den Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebenden Spannungs-Dehnungslinien. Dabei wird als Bewehrung das Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis angenommen. Bei Flächenelementen wird von einem ungerissenen Betonquerschnitt ausgegangen. Aus der graphischen Spannungsdarstellung lässt sich entnehmen, in welchen Bereichen und in welchem Umfang Spannstahlreserven nutzbar sind. Dabei ist die Ausnutzung eines Spannglieds als Quotient aus der ermittelten Spannung und dem Grenzwert  $f_{p0,1k} / \gamma_s$  definiert.

## Nachweis der Dekompression

Der Nachweis ist für vorgespannte Bauteile der Anforderungsklassen A-C mit den Kombinationen nach DIN FB 102, Tabelle 4.118, am ungerissenen Querschnitt zu führen.

Für Spannbetonbrücken mit Kastenquerschnitt der Anforderungsklasse D ist nach ARS6/2009 (4) der Nachweis der Dekompression für eine spezielle quasi-ständige Einwirkungskombination zu führen, die sich programmseitig durch Definition einer entsprechenden Situation berücksichtigen lässt.

DIN EN 1992-2:

Die Nachweisbedingungen ergeben sich je nach gewählter Tragwerksart gemäß Tabelle 7.101DE.

Bei Flächenelementen wird je nach Benutzerauswahl die Hauptzugspannung  $\sigma_1$  oder eine der Längszugspannungen  $\sigma_x$  bzw.  $\sigma_y$  überprüft. Mit letzterer kann der Nachweis auf die Richtung der Vorspannung beschränkt werden, wenn die Schnittkraftsysteme entsprechend ausgerichtet sind (vgl. Reg.-Nr. 069 der Erfahrungssammlung des NABau). Im übrigen gelten die oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

Bei der Festlegung der Spannungsgrenzen ist nach Bauzustand und Tragwerkstyp zu unterscheiden.

### Bauzustand nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3 (102)P und 4.4.2.1 (107)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1]

- Bei ausschließlich verbundloser Vorspannung sind die Zugspannungen an dem Rand, der dem Spannglied am nächsten liegt, auf die Werte der Tabelle 4.118a, in allen anderen Fällen auf  $0,85 f_{ctk;0,05}$  zu begrenzen.
- Kastenbrücken der Klasse D: Am oberen und unteren Querschnittsrand werden Zugspannungen  $\sigma_c \leq 0,85 f_{ctk;0,95}$  zugelassen (vgl. ARS 6/2009 (4)).

DIN EN 1992-2:

Im Bauzustand sind je nach Ausführung des Bauteils Randspannungen von  $0,85 \cdot f_{ctk;0,05}$  oder die in Tabelle 7.103DE angegebenen Grenzspannungen zugelassen.

**Endzustand nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.1 (106)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1 (105)]**

Bei Bauwerken der Klassen A-C und Kastenbrücken der Klasse D dürfen keine Zugspannungen an dem Rand auftreten, der dem Spannglied am nächsten liegt.

Der betreffende Querschnittsrand wird im Programm wie folgt ermittelt:

- Stäbe und Bemessungsobjekte: Wenn der dem Spannglied nächstgelegene Randpunkt oberhalb des Schwerpunkts liegt, wird die Spannung auf der Oberseite, anderenfalls auf der Unterseite des Querschnitts nachgewiesen.
- Flächenelemente: Der Nachweis wird für den oberen bzw. unteren Querschnittsrand geführt, wenn das dem Nachweispunkt nächstgelegene Spannglied oberhalb bzw. unterhalb der Schwereebene des betrachteten Elements liegt. Spannglieder außerhalb des Elements werden dabei in einer Entfernung bis zur fünffachen Querschnittshöhe berücksichtigt.

Bei nicht eindeutiger Spanngliedführung wird der Nachweis für beide Seiten geführt.

**Besonderheit in Nachweisstufe 2**

Nach Kapitel 12.5.3 (2) der Richtlinie darf in Stufe 2 der Nachweis alternativ unter Berücksichtigung der am Bauwerk festgestellten Betonfestigkeit und unter Einhaltung der Betonzugfestigkeit  $f_{ctk;0,05}$  am Querschnittsrand geführt werden. Bei Bedarf kann dies durch Kontrolle der Randspannungen aus der maßgebenden Einwirkungskombination in der graphischen Oberfläche erfolgen.

**Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung**

Wird in Brückenlängsrichtung vorgespannt und die Brückenquerrichtung als nicht vorgespannte Konstruktion ausgeführt, ist nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3 (4)P [DIN EN 1992-2, Tabelle 7.101DE], nachzuweisen, dass unter der seltenen Einwirkungskombination die im Zustand I ermittelten Betonzugspannungen in Brückenquerrichtung die Werte der Tabelle 4.118a [Tabelle 7.103DE] nicht überschreiten.

Der Nachweis kann bei Bedarf durch Kontrolle der Randspannungen aus der seltenen Kombination in der graphischen Oberfläche erfolgen.

**Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite**

Die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite wird in DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2] geregelt. Sie ist nach Kapitel 4.4.2.2 (5)\* [Kapitel 7.3.2 (1)] in den Bereichen einzulegen, wo Zug zu erwarten ist. Die Festlegung der Zugbereiche kann im Querschnittsdialog entweder durch Wahl einer Einwirkungskombination oder einer Zwangseinwirkung (Biegung, zentrischer Zug) erfolgen. In den Bemessungsmodi *Symmetrisch* und *Druckglied* erhalten die nicht gezogenen Betonstahllagen ebenfalls Bewehrung. Vorgegebene Verhältnisse zwischen einzelnen Bewehrungslagen bleiben erhalten, sofern dies in den Bemessungsvorgaben nicht abgewählt wurde.

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (4)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2] soll bei profilierten Querschnitten jeder Teilquerschnitt (Gurte und Stege) einzeln nachgewiesen werden. Dies ist unter Berücksichtigung beliebiger polygonaler Querschnittsgeometrien nicht möglich. Das Programm ermittelt deshalb die Mindestbewehrung immer am Gesamtquerschnitt. Bei rechteckigen Vollquerschnitten kommt dabei Gleichung (4.195) [Gleichung (7.2)], in allen anderen Fällen Gleichung (4.195a) [Gleichung (7.3)] zur Anwendung.

**Ermittlung der Mindestbewehrung**

Die Ermittlung der Mindestbewehrung  $A_s$  erfolgt nach Gleichung (4.194) [Gleichung (7.1)] der Norm:

$$A_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s \quad (4.194) \quad [(7.1)]$$

Dabei ist

$k_c$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor der Erstrissbildung.

Für Rechteckquerschnitte und Stege von Plattenbalken und Hohlkästen: (4.195)

$$k_c = 0,4 (1 + \sigma_c / (k_1 \cdot f_{ct,eff})) \leq 1 \quad [(7.2)]$$

Für Zuggurte von Plattenbalken und Hohlkästen: (4.195a)

$$k_c = 0,9 \cdot F_{cr} / A_{ct} / f_{ct,eff} \geq 0,5 \text{ (vgl. Zilch/Rogge 2002, S. 277)} \quad [(7.3)]$$

mit der Zugkraft  $F_{cr}$  im Zuggurt im Zustand I unmittelbar vor Rissbildung mit der Randspannung  $f_{ct,eff}$ . Die Zugkraft wird durch Integration der Zugspannungen innerhalb der Fläche  $A_{ct}$  gewonnen.



$\sigma_c$	die Betonspannung in Höhe der Schwerelinie des Querschnitts oder Teilquerschnitts im ungerissenen Zustand unter der Einwirkungskombination, die am Gesamtquerschnitt zur Erstrissbildung führt ( $\sigma_c < 0$ bei Druckspannungen).
$k_1$	= $1,5 h/h'$ für Drucknormalkraft, = $2/3$ für Zugnormalkraft.
$h$	die Höhe des Querschnitts oder Teilquerschnitts.
$h'$	= $\min(h; 1 \text{ m})$ .
$k$	der Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen gem. Eingabe.
$A_{ct}$	die Fläche der Betonzugzone bei Erstrissbildung im Zustand I. Das Programm skaliert hierzu die Biegemomente der Einwirkungskombination soweit, dass die maximale Randspannung im Zustand I den Wert $f_{ct,eff}$ annimmt.
$f_{ct,eff}$	die effektive Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter gem. II-4.4.2.2 (5)*: $f_{ct,eff} = 0,5 f_{ctm}$ bei einem Alter von 3 - 5 Tagen, $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ bei einem Alter von 6 - 28 Tagen, $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ mindestens jedoch $3 \text{ MN/m}^2$ , bei einem Alter von mehr als 28 Tagen.
$\sigma_s$	die maximal zulässige Spannung in der Betonstahlbewehrung in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser des Betonstahls.

Im Querschnittsdialog wird der größte vorhandene Stabdurchmesser  $d_s$  angegeben. Daraus ergibt sich mit Gleichung (4.196) [Gleichung (7.6DE)] der modifizierte Grenzdurchmesser  $d_s^*$  als Eingangswert für DIN FB 102, Tabelle 4.120 [DIN EN 1992-2, Tabelle 7.2DE]:

$$d_s = d_s^* \cdot k_c \cdot k \cdot h_t / (4(h-d)) \cdot f_{ct,eff} / f_{ct0} \geq d_s^* \cdot f_{ct,eff} / f_{ct0} \quad (4.196) \quad [(7.6DE)]$$

Dabei ist

$d_s^*$  der Grenzdurchmesser der Bewehrung nach Tabelle 4.120 [Tabelle 7.2DE].

$h$  die Bauteilhöhe.

$d$  die statische Nutzhöhe.

$h_t$  die Höhe der Zugzone im Querschnitt bzw. Teilquerschnitt vor Beginn der Erstrissbildung.

$f_{ct0}$  die Zugfestigkeit des Betons, auf die die Tabellenwerte bezogen sind ( $f_{ct0} = 3,0 \text{ MN/m}^2$  [ $f_{ct0} = 2,9 \text{ MN/m}^2$ ]).

Gemäß *Zilch/Rogge* (2002, S. 277) wird der Ausdruck  $k_c \cdot k \cdot h_t / (4(h-d))$  verallgemeinert zu  $0,6 \cdot k_c \cdot k \cdot A_{ct} / A_{c,eff}$  mit der effektiven Zugzone  $A_{c,eff}$  nach Bild 4.137 [Bild 7.1]. Mit dem modifizierten Grenzdurchmesser  $d_s^*$  und der zulässigen Rissbreite  $w_k$  ergibt sich aus Tabelle 4.120 [Tabelle 7.2DE] die zulässige Betonstahlspannung  $\sigma_s$  für Gleichung (4.194) [Gleichung (7.1)].

Wenn gleichzeitig der Nachweis der Rissbreite zu führen ist, überprüft das Programm, ob durch Einlegen der ermittelten Mindestbewehrung die vorgegebene Rissbreite nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.4], eingehalten wird. Bei Bedarf wird die Mindestbewehrung bis zum Erreichen der Nachweisgrenze iterativ erhöht. Im Protokoll wird die erhöhte Bewehrung dann durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (9) [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2 (NA.5)], darf bei dickeren Bauteilen unter zentrischem Zwang die Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach Gl. (4.197a) [Gl. (NA.7.5.1)] berechnet werden, wobei der Wert nach Gl. (4.197b) nicht unterschritten werden darf. Es braucht jedoch nicht mehr Bewehrung eingelegt zu werden, als sich nach Gl. (4.194) [Gl. (7.1)] ergibt. Die vorgenannten Regelungen kommen gemäß Benutzerauswahl zur Anwendung, während die Möglichkeit zur Bewehrungsminderung für langsam erhärtende Betone nach Absatz (10) [Absatz (NA.6)] ungenutzt bleibt.

### Besonderheit bei Spannbetontragwerken

In einem Quadrat von 300 mm [DIN EN 1992-2: 150 mm] Seitenlänge um ein Spannglied im sofortigen oder nachträglichen Verbund darf nach Abschnitt DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (7)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2 (3)], die in diesem Bereich erforderliche Mindestbewehrung um den Betrag  $\xi_1 \cdot A_p$  verringert werden.

Dabei ist

$A_p$  die Querschnittsfläche des Spannstahls im Spannglied.

$\xi_1$  das Verhältnis der Verbundfestigkeiten von Spannstahl und Betonstahl.

Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden Spanngliedlagen im Verbund, sofern sie in der Nachweissituation verpresst sind, mit dem im Querschnittsdialog eingegebenen Wert für  $\xi_1$  angerechnet. Bei Flächenelementen kann Spannstahl generell nicht berücksichtigt werden.

Nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.2 (3)\* [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.2 (NA.104)], ist bei Bauteilen mit Vorspannung im Verbund die Mindestbewehrung nicht in Bereichen erforderlich, in denen unter der seltenen (charakteristischen) Einwirkungskombination und den charakteristischen Werten der Vorspannung Betondruckspannungen am Querschnittsrand auftreten, die dem Betrag nach größer als  $1 \text{ MN/m}^2$  sind. Diese Bedingung wird im Programm automatisch berücksichtigt.

### Besonderheit in Nachweisstufe 2

Nach Kapitel 12.5.3 (4) der Richtlinie darf in Stufe 2 auf den Nachweis der Mindestbewehrung verzichtet werden. Statt dessen kann der Nachweis der Rissbreite mit der planmäßig vorhandenen Bewehrung ggfs. unter Ansatz der tatsächlichen, am Bauwerk festgestellten charakteristischen Betonfestigkeit nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.4] für die maßgebende Einwirkungskombination geführt werden.

## Berechnung der Rissbreite

Der Nachweis der Rissbreite erfolgt durch direkte Berechnung nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4 [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.4], mit der Einwirkungskombination gemäß Benutzerauswahl. Der Grenzdurchmesser und die maßgebende Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  werden im Querschnittsdialog eingegeben.

In Abhängigkeit von der Betonrandspannung  $\sigma_c$  im Zustand I sind folgende Risszustände zu unterscheiden (vgl. Heft 525, S. 191, und Leitfaden zum DIN FB 102, S. 24):

$\sigma_c \leq f_{ct,eff}$  Stadium der Einzelrissbildung

$\sigma_c > f_{ct,eff}$  Stadium der abgeschlossenen Rissbildung

mit

$f_{ct,eff}$  Effektive Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter.

Durch Begrenzung des maximalen Rissabstands und der Differenz der Dehnungen sind die Formeln in DIN FB 102, Kapitel 4.4.2.4, gemäß Heft 525, S. 104, sowohl für das Stadium der Einzelrissbildung als auch für das abgeschlossene Rissbild anwendbar. Im Programm wird deshalb die Rissbreite für alle Fälle mit  $\sigma_c > 0$  nachgewiesen.

Die Durchführung des Nachweises gliedert sich programmseitig in folgende Schritte:

- Dehnungszustand II unter der Nachweiskombination mit Spannungs-Dehnungs-Linie gemäß DIN FB 102, Bild 4.1 [DIN EN 1992-2, Bild 3.2], ermitteln. Bei Stäben und Bemessungsobjekten werden dabei alle im Verbund liegenden Spannglieder auf der Widerstandsseite berücksichtigt.
- Effektive Zugzone  $A_{c,eff}$  bestimmen (siehe nächster Abschnitt), Betonstahllagen und Spannstahllagen innerhalb  $A_{c,eff}$  ermitteln.
- Bewehrungsgrad berechnen:

$$eff \rho = (A_s + \xi_1^2 \cdot A_p) / A_{c,eff} \quad (4.200a) \quad [(7.10)]$$

$$\rho_{tot} = (A_s + A_p) / A_{c,eff} \quad (4.200b)$$

mit

$\xi_1$  Verbundbeiwert lt. Benutzervorgabe.

$A_s, A_p$  Betonstahl, Spannstahl innerhalb  $A_{c,eff}$

- Für jede Betonstahllage einzeln bestimmen:

#### Differenz der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = [\sigma_s - 0,4 f_{ct,eff} / eff \rho (1 + \alpha_E \cdot eff \rho)] / E_s \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (4.202) \quad [(7.9)]$$

mit

$$\alpha_E = E_s / E_{cm}$$

$$\sigma_s = \sigma_2 + 0,4 f_{ct,eff} (1/eff \rho - 1/\rho_{tot}) \quad (4.199)$$

$\sigma_2$  Betonstahlspannung aus Dehnungszustand II.

$f_{ct,eff}$  Wirksame Betonzugfestigkeit gemäß Vorgabe.

#### Maximaler Rissabstand

$$s_{r,max} = d_s / (3,6 eff \rho) \leq \sigma_s \cdot d_s / (3,6 f_{ct,eff}) \quad (4.203) \quad [(7.11)]$$

Wenn im Querschnittsdialog eine Obergrenze für den Rissabstand angegeben wurde, lassen sich damit die Besonderheiten der Gleichung (4.204) [Gleichung (7.13) und (7.14)] berücksichtigen.

#### Rechenwert der Rissbreite

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4.201) \quad [(7.8)]$$

Im Protokoll wird die Lage mit der größten rechnerischen Rissbreite nachgewiesen.

- Bei gezogenem Querschnitt erfolgt die Untersuchung für jede der beiden effektiven Zugzonen getrennt. Das Maximum wird im Protokoll ausgegeben.

Falls der Nachweis der Mindestbewehrung zu Begrenzung der Rissbreite nicht gewählt ist, ermittelt das Programm automatisch eine zur Einhaltung der Rissbreite erforderliche Rissbewehrung, sofern dies in den Querschnittseinstellungen nicht abgewählt wurde. Dazu erfolgt eine Bemessung mit der für die Berechnung der Rissbreite maßgebenden Nachweiskombination. Die so ermittelte Bewehrung wird im Nachweisprotokoll durch Ausrufungszeichen „!“ gekennzeichnet.

Die Rissbreite wird dann für die endgültige Längsbewehrung (Maximum aus Robustheits-, Riss- und Biegebewehrung einschließlich einer evtl. Erhöhung aus dem Ermüdungsnachweis) nachgewiesen und für die graphische Darstellung gespeichert.

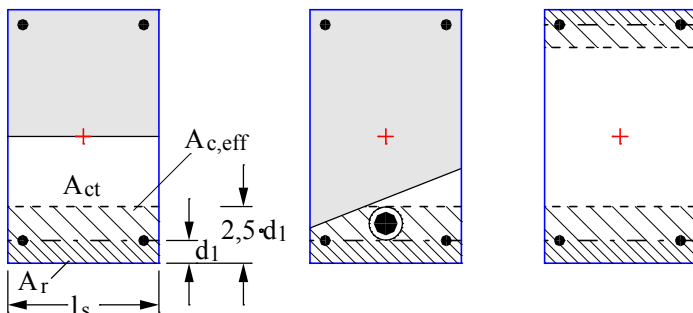
## Ermittlung des Wirkungsbereichs $A_{c,eff}$

Die effektive Zugzone  $A_{c,eff}$  definiert nach DIN FB 102, Bild 4.137 [DIN EN 1992-2, Bild 7.1], den Bereich eines rechteckigen, einachsig beanspruchten Betonquerschnitts, in dem die Modellannahmen nach Heft 466 anwendbar sind (vgl. auch Heft 525, Erläuterung zu DIN 1045-1, Bild 53). Die Übertragung dieses Modells auf beliebige Querschnitte und Beanspruchungssituationen ist programmseitig möglich, liegt jedoch im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders.

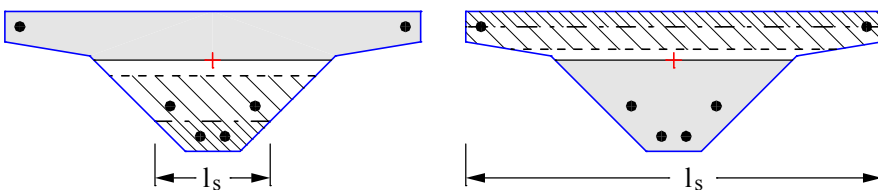
Bei der Bestimmung von  $A_{c,eff}$  wird im Programm folgendermaßen vorgegangen:

- Zugzone  $A_{ct}$  im Zustand I ermitteln, bei Berechnung der Mindestbewehrung mit der zum Erstriss führenden Beanspruchung, bei Berechnung der Rissbreite mit der Nachweiskombination gemäß Anforderungsklasse.
- Schwerelinie der Bewehrung als Regressionsgrade durch die Betonstahllagen in der Zugzone bestimmen. Bei Flächenelementen wird eine horizontale Linie durch den Schwerpunkt der gezogenen Bewehrungslagen angenommen.
- Abgeschnittene Restfläche  $A_r$  bis zum Rand und Summe der Schnittlängen  $l_s$  ermitteln. Die mittlere Überdeckung wird dann zu  $d_1 = A_r / l_s$  angenommen, allerdings nicht kleiner als der kleinste Randabstand der Betonstahllagen in der Zugzone.
- Schwerelinie um den Betrag  $1,5 \cdot d_1$  parallel verschieben. Bei Flächenelementen wird  $2,5 \cdot d_1 \leq (h-x) / 2$  eingehalten ( $x$  = Druckzonenhöhe).
- Das sich so ergebende Polygon wird mit der Zugzone verschnitten und definiert dann die effektive Zugzone  $A_{c,eff}$ .
- Wenn alle Betonstahllagen des Querschnitts gezogen sind, werden zwei Zonen ermittelt, und zwar eine für die Lagen oberhalb des Schwerpunkts und eine zweite für die Lagen unterhalb des Schwerpunkts. Die Fläche jeder Zone wird auf  $A_c / 2$  begrenzt.
- Falls im Querschnittsdialog die Mindestbewehrung für dickere Bauteile unter zentrischem Zwang gewählt wurde, ergibt sich die Höhe von  $A_{c,eff}$  gemäß DIN FB 102, Bild 4.137 d) [DIN EN 1992-2, Bild NA.7.1 d)] zu  $h_{eff} \geq 2,5 d_1$ .

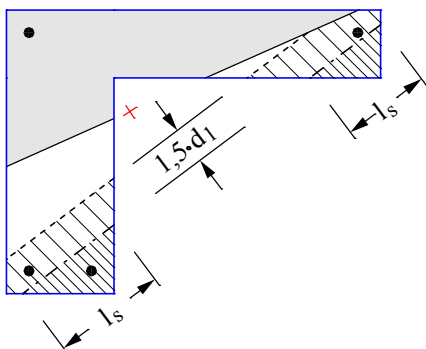
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die vom Programm ermittelten effektiven Zugzonen in typischen Situationen. Der letzte Fall (Randbalken) weicht von den Modellannahmen in Heft 466 jedoch soweit ab, dass eine Anwendung fragwürdig ist.



Effektive Zugzonen am Rechteckquerschnitt unter einachsiger Biegung, Normalkraft mit Doppelbiegung und zentrischem Zug



Effektive Zugzonen an einem Brückenquerschnitt unter einachsiger Biegung



Effektive Zugzone an einem Randbalken unter einachsiger Biegung

## Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen

Bei vorgespannten Straßenbrücken mit schlanken Stegen ist nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3 (5)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1 (NA.111)], die Schubbrissbildung zu begrenzen. Es ist nachzuweisen, dass die schiefen Hauptzugspannungen unter der Wirkung von Querkraft und Torsion die Werte von  $f_{ctk;0,05}$  nicht überschreiten. Der Nachweis ist im Zustand I für die häufige Kombination zu führen. Optional lassen sich im Querschnittsdialog die Anwendungsvorschriften des DIN FB 102, Kapitel 4.4.0.3 (6)P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.3.1 (NA.112)], wählen. Diese lassen bei vorgespannten Bauteilen zu, den Nachweis auf den Bereich von Längsdruckspannungen zu begrenzen, sofern keine zugbeanspruchten Gurte anschließen (vgl. auch DIN 4227, Kapitel 12.2 (1)). Die Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen obliegt dem Anwender.

### Stäbe und Bemessungsobjekte

Im Programm werden durch Querschnittsanalyse alle Schubkenngrößen aus Querkraft und Torsion für den Querschnittsrand ermittelt. Die Schubspannungen aus Querkraft werden gemäß Auswahl im Querschnittsdialog entweder nach der Theorie dickwandiger Profile oder durch Mittelung über die Querschnittsbreite bestimmt. Die schiefe Hauptzugspannung lässt sich dann für jeden Querschnittspunkt berechnen:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2 + 4\tau_{xz}^2}$$

mit

$\sigma_x$  Längsspannung aus Biegung und Längskraft unter Beachtung der oben angegebenen Regeln zur Spannungsberechnung.

$\tau_{xy}$  Randschubspannung in Richtung y aus Querkraft und Torsion.

$\tau_{xz}$  Randschubspannung in Richtung z aus Querkraft und Torsion.

Der Winkel zwischen  $\sigma_1$  und  $\sigma_x$  ergibt sich zu:

$$\tan 2\vartheta_1 = \frac{-2\tau}{\sigma_x}$$

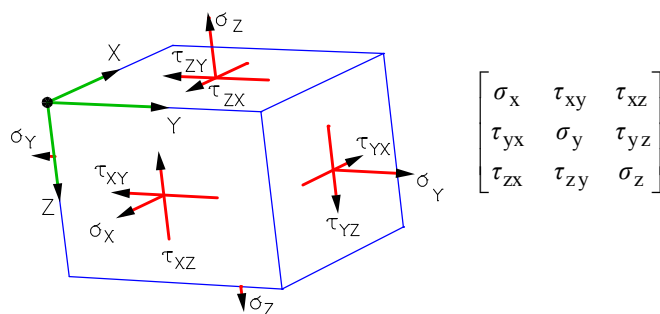
mit

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2} \text{ als resultierende Randschubspannung.}$$

Im Protokoll wird der Maximalwert für  $\sigma_1$  mit dem zugehörigen Querschnittspunkt nachgewiesen.

### Flächenelemente

Bei Flächenelementen wird der Nachweis für die Hauptzugspannungen am Bruttoquerschnitt geführt. Der räumliche Spannungszustand ist durch folgenden Spannungstensor beschrieben:



mit

$\sigma_x, \sigma_y$  Längsspannungen aus Biegung und Normalkraft.

$\sigma_z = 0$ .

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$  Schubspannung aus Drillmoment und Scherkraft mit linearem Verlauf über die Querschnittshöhe.

$\tau_{xz} = \tau_{zx}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_x$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_x / h$  in der Schwereebene.

$\tau_{yz} = \tau_{zy}$  Schubspannung aus Querkraft  $q_y$  mit parabelförmigem Verlauf über die Querschnittshöhe und dem Höchstwert  $1,5 \cdot q_y / h$  in der Schwereebene.

Durch schichtweise Bestimmung des Spannungstensors und Lösung des Eigenwertproblems für die drei Hauptspannungen wird die maximale Hauptspannung  $\sigma_1$  mit ihrer Höhenlage  $z$  bezüglich der Querschnittsoberkante ermittelt. Diese werden zusammen mit den zugehörigen Spannungskomponenten im Ergebnisprotokoll nachgewiesen.

## Begrenzung der Verformungen

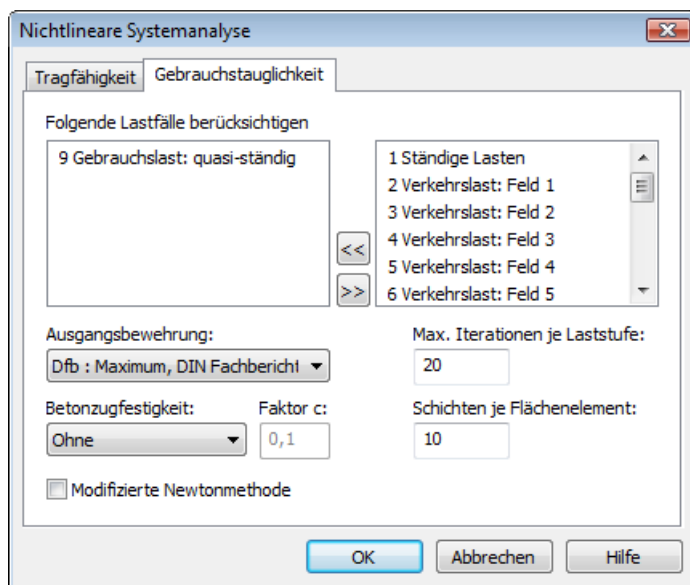
Nach DIN FB 102, Kapitel 4.4.3.1 (1)\*P [DIN EN 1992-2, Kapitel 7.4.1], dürfen die Verformungen eines Bauteils oder Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild beeinträchtigen. Geeignete Grenzwerte sind in Abstimmung mit dem Bauherrn zu vereinbaren.

Die Durchbiegungen sollen gemäß DIN FB 102, Kapitel 4.3.3.1 (106) unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination bestimmt werden. Die eingesetzte Berechnungsmethode soll nach Kapitel 4.4.3.2 (103)P den „tatsächlichen Verhältnissen und Randbedingungen des Tragwerks“ entsprechen. Heft 525, Abschnitt 11.3.2, verweist auf entsprechende Literaturstellen.

Im Programmsystem InfoCAD kann ein wirklichkeitsnaher Nachweis im Rahmen der Nichtlinearen Systemanalyse für Stab- und Schalentragwerke unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten geführt werden. Der Widerstand von im Verbund liegenden Spanngliedern geht z.Zt. nicht in die Berechnung ein.

Die Bearbeitung erfolgt in folgenden Schritten:

- Definition von Nachweissituationen über die Funktion *Lastgruppe* im Belastungsdialog durch Zusammenstellung der maßgebenden Einzellastfälle. Dabei sind die veränderlichen Lasten mit den Kombinationsbeiwerten  $\psi_2$  für die quasi-ständige Kombination zu wichten.
- Auswahl der Nachweislastfälle im Dialog *Nichtlineare Systemanalyse / Gebrauchstauglichkeit* der Berechnungseinstellungen für die FEM-Berechnung.
- Einstellen der im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Bewehrung im Auswahlfeld *Ausgangsbewehrung* (Maximum aus Biegung, Robustheit, Rissesicherung und Ermüdung).
- Ausführen der FEM-Berechnung zur Ermittlung der Verformungen im Zustand II.
- Überprüfung der graphisch oder tabellarisch wiedergegebenen Systemverformungen.



Eine ausführliche Beschreibung der Nichtlinearen Systemanalyse ist dem entsprechenden Handbuchkapitel zu entnehmen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Die sich ergebende Biege-, Robustheits- und Rissbewehrung, das resultierende Maximum sowie die Querkraft- und Torsionsbewehrung werden ebenfalls für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt.

Im Protokoll werden zu jedem Berechnungsort die Bemessungsschnittgrößen und erforderlichen Bewehrungen bzw. nachgewiesenen Spannungen oder Rissbreiten ausgegeben. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte werden als Warnungen gemeldet und am Nachweisort gekennzeichnet. Das ausführliche Protokoll dokumentiert zusätzlich die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen.

### Spannungen bei Stäben und Bemessungsobjekten

$\sigma_x$	Längsspannungen in den Nachweisen der Dekompression und der Betondruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_1, \sigma_x, \tau_{\max}$	Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und Schubspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_2$	Schiefe Hauptdruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_s, \Delta\sigma_s$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd}, \Delta\sigma_{cd}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,y}, \Delta\sigma_{sb,z}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus $Q_y$ und $Q_z$ [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{sb,T}, \Delta\sigma_{sl,T}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung aus Torsion und für Torsionslängsbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Spannungen bei Flächenelementen

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_1$	Längsspannungen in x- oder y-Richtung bzw. Hauptzugspannungen im Nachweis der Dekompression (abhängig von Benutzervorgabe) [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_2$	Hauptdruckspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_1, \sigma_x, \sigma_y$	Schiefe Hauptzugspannungen und zugehörige Längs- und Schubspannungen [MN/m <sup>2</sup> ].
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	
$\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sx}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in x-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sy}$	Spannungen und Schwingbreiten für Betonstahl in y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_p, \Delta\sigma_p$	Spannungen und Schwingbreiten für Spannstahl [MN/m <sup>2</sup> ].
$\sigma_{cd,x}, \Delta\sigma_{cd,x}$	Spannungen und Schwingbreiten im Ermüdungsnachweis für Beton unter Längsdruck in
$\sigma_{cd,y}, \Delta\sigma_{cd,y}$	x- und y-Richtung [MN/m <sup>2</sup> ].
$\Delta\sigma_{s,b}$	Schwingbreiten für Schubbewehrung [MN/m <sup>2</sup> ].

### Biegebewehrung

$A_s$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> ] bei Stäben und Bemessungsobjekten.
$a_{sx}, a_{sy}$	Biegebewehrung [cm <sup>2</sup> /m] bei Flächenelementen in x- und y-Richtung.

### Bewehrung aus Querkraft

$a_{sb}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_r$ .
$a_{sbx}, a_{sby}$	Bügelbewehrung [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] von Flächenelementen aus $q_x$ und $q_y$ .
$A_{sb,y}, A_{sb,z}$	Bügelbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [cm <sup>2</sup> /m] aus $Q_y$ und $Q_z$ .
$A_{sl}$ für $a_{sb}=0$	Längsbewehrung [cm <sup>2</sup> ] von Flächenelementen.
$z_y, z_z$	Innerer Hebelarm [m] für Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .
$\Delta F_{sd,y}, \Delta F_{sd,z}$	Zugkraftanteil [kN] in der Längsbewehrung gemäß DIN FB 102, Bild 4.13 [DIN EN 1992-2, Gl. (6.18)], infolge Querkraft $Q_y$ und $Q_z$ .

### Torsionsbewehrung

$A_{sb,T}$	Torsionsbügelbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [ $\text{cm}^2/\text{m}$ ] aus $M_x$ .
$A_{sl,T}$	Torsionslängsbewehrung von Stäben und Bemessungsobjekten [ $\text{cm}^2$ ] aus $M_x$ .

### Bemessungswerte

$V_{Rd,ctr}$ $v_{Rd,ct}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft ohne Schubbewehrung [kN bzw. kN/m].
$v_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Flächen [kN/m].
$V_{Rd,max}$	Aufnehmbare Bemessungsquerkraft der Betondruckstreben bei Stäben und Bemessungsobjekten [kN].

### Rissbreiten

$w_{k,oben}$	Berechnete Rissbreite an der Ober- und Unterseite des Querschnitts,
$w_{k,unten}$	bei Flächenelementen jeweils getrennt für die Bewehrungsrichtungen x und y.

### Aufnehmbare Belastung

$M_{Rd}$	Aufnehmbares Biegemoment [kNm].
$V_{Rd}$	Aufnehmbare Querkraft [kNm].
$M_{Ed} / M_{Rd}$	Querschnittsausnutzung durch Biegung.
$V_{Ed} / V_{Rd}$	Querschnittsausnutzung durch Querkraft.

### Ausnutzung der Bewehrung

$A_{s,erf} / A_{s,vorh}$	Ausnutzung der Längsbewehrung durch Biegung und Längskraft.
$A_{sb,erf} / A_{sb,vorh}$	Ausnutzung der Bügelbewehrung durch Querkraft.



# Beispiele

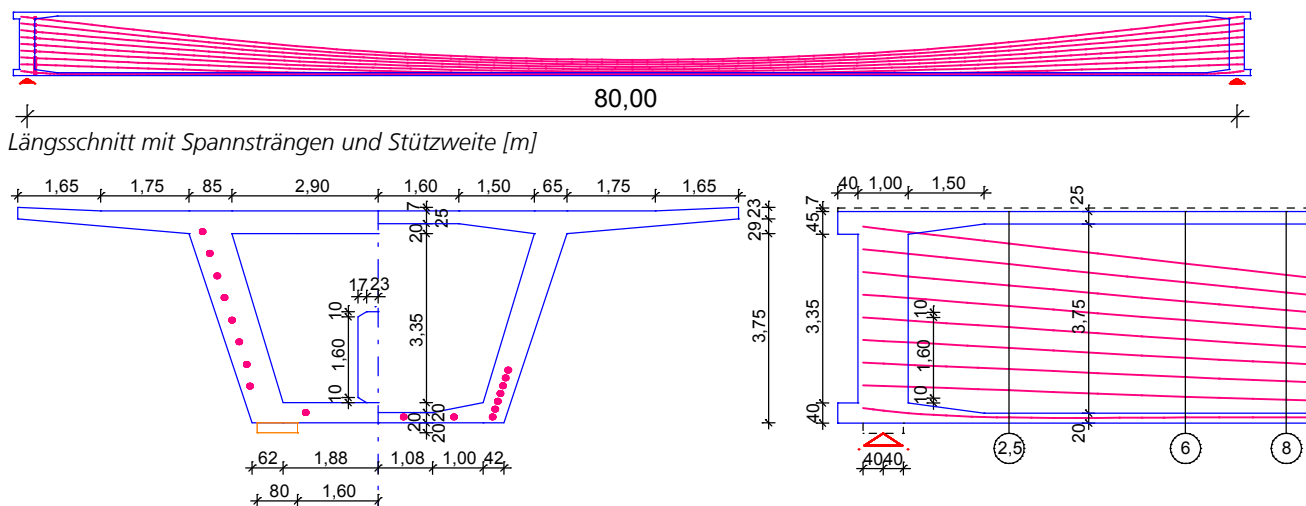
## Spannbetonbrücke mit Hohlkastenquerschnitt

Dieses Beispiel zeigt die Funktionen und Fähigkeiten des Programmmoduls *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* anhand einer Spannbetonbrücke auf.

Das Beispiel wurde in Anlehnung an Teil 1 des Buches  
 Wolfgang Rossner, Carl-Alexander Graubner  
 Spannbetonbauwerke Teil 1: Bemessungsbeispiele nach DIN 4227

**Beispiel 1 Hohlkasten einer Straßenbrücke**  
 Einfeldträger mit beschränkter Vorspannung und nachträglichem Verbund  
 Ernst & Sohn, Berlin 1992

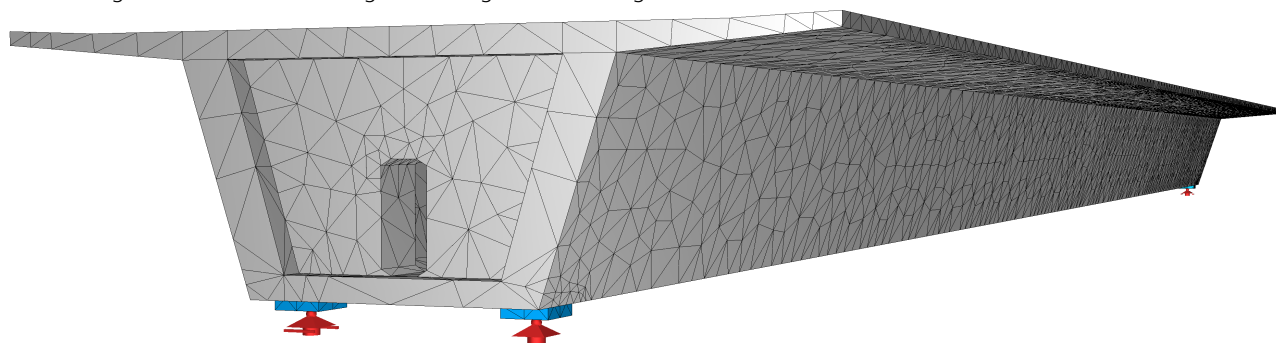
gewählt.



Abmessungen am Anschnitt, Feldmitte sowie im Längsschnitt mit Spannsträngen [m]

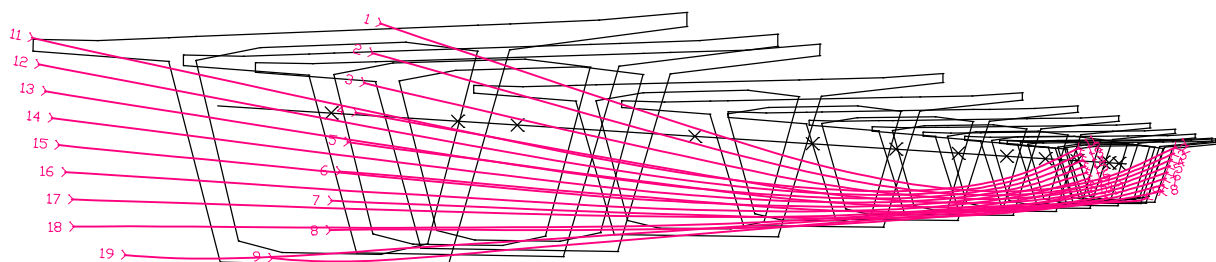
### Finite-Elemente-Modell

Zu berechnen ist eine einfeldrige Straßenbrücke mit Hohlkastenquerschnitt aus C 35/45 (original B 45) mit nachträglichem Verbund. Als Berechnungsmodell wird abweichend vom Literaturbeispiel ein Volumenmodell mit finiten Tetraederelementen gewählt. Damit wird das Tragverhalten in Längs- und Querrichtung einschließlich der Querschnittsverformung realitätsnah erfasst. Für die Nachweise wird ein Bemessungsobjekt verwendet, das die Volumenspannungen in den Bemessungsschnitten zu stabförmigen Schnittgrößen aufintegriert.



3D-Ansicht des Finite-Elemente-Modells

Zusätzlich zum FE-Modell werden das Bemessungsobjekt mit den querschnittsabhängigen Nachweisvorgaben sowie die Einwirkungen für die Nachweise eingegeben. Die Orte der Bemessungsschnitte entsprechen denen in der Literatur.

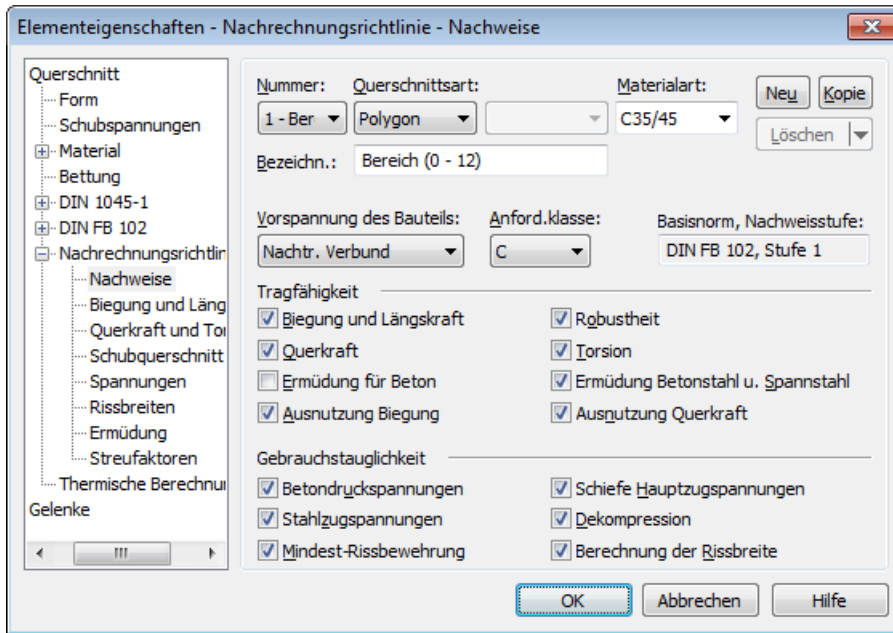


3D-Ansicht des Bemessungsobjektes und der Spannstränge

**Bemessungsobjekt 1**

Anfangspunkt: 0,000 / 0,000 / 1,476; Endpunkt: 80,000 / 0,000 / 1,476 [m]  
 Drehung bezüglich Standardausrichtung: 0,00 [°]

Querschnitte	xi [-]	x [m]	y [m]	z [m]	Dreh. [°]	Querschnitt
1	0,031	2,500	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)
2	0,075	6,000	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)
3	0,100	8,000	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)
4	0,200	16,000	0,000	-1,476	0,00	5 Polygon Bereich (12-16)
5	0,300	24,000	0,000	-1,476	0,00	7 Polygon Bereich (20-24)
6	0,400	32,000	0,000	-1,476	0,00	1 Polygon Feld (24-56)
7	0,500	40,000	0,000	-1,476	0,00	1 Polygon Feld (24-56)
8	0,600	48,000	0,000	-1,476	0,00	1 Polygon Feld (24-56)
9	0,700	56,000	0,000	-1,476	0,00	7 Polygon Bereich (20-24)
10	0,800	64,000	0,000	-1,476	0,00	5 Polygon Bereich (12-16)
11	0,900	72,000	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)
12	0,925	74,000	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)
13	0,969	77,500	0,000	-1,476	0,00	4 Polygon Bereich (0 - 12)

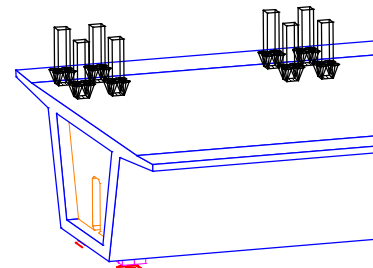


Auswahl der Tragfähigkeits- und Gebrauchsnachweise für Querschnitt 1

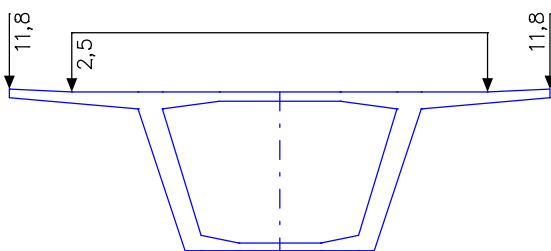
**Lastfälle**

Es werden folgende Lastfälle berücksichtigt:

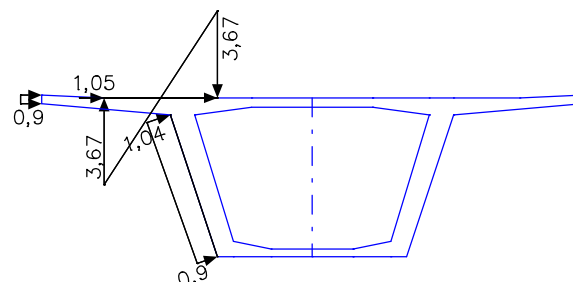
- 1 Eigenlast (G1)
- 2 Ausbaulasten (G2)
- 3 Vorspannung (P)
- 4 G1+G2+P
- 5 Kriechen und Schwinden ( $\phi = 2,4, \epsilon_{cs} = -23,7 \cdot 10^{-5}$ )
- 11 Wind in Richtung +y mit Verkehrsband
- 12 Wind in Richtung -y mit Verkehrsband
- 21-24 Bremslast 2,07 kN/m<sup>2</sup> in Fahrspur 1 der 1./2. Variante ( $\pm x$ )
- 101-142 Ermüdungslastmodell 3 auf Fahrspur 1 der 1./2. Variante (alle 3,58 m)



Ermüdungslastmodell 3, 1. Stellung



Lastfall 2: Ausbaulasten [kN/m] bzw. [kN/m<sup>2</sup>]



Lastfall 11: Wind in Richtung +y [kN/m<sup>2</sup>]

### Lastmodell 1

In diesem Beispiel wird das Lastmodell 1 entsprechend DIN-Fachbericht definiert. Diese Lasten sollen sowohl in Brückenlängs- wie in Querrichtung in ungünstigster Stellung aufgebracht werden. In Querrichtung werden die Laststellungen durch die Einteilung der Fahrbahn in rechnerische Fahrstreifen bestimmt. Da nicht in allen Fällen von vorne herein die maßgebende Fahrstreifeneinteilung bekannt ist, werden in diesem Beispiel zwei zur Brückenlängsachse symmetrische Varianten von Laststellungen definiert.

- Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise
Im Ordner *DIN-Fachbericht 101* wird mit der rechten Maustaste auf *Lastmodell 1 / DIN Fachbericht 101* geklickt und im Kontextmenü die Option *Neu* gewählt.
- Einstellungen
- Lastmodell 1 (Bewegliche Lasten)
- DIN Fachbericht 101
- DIN EN 1991
- Einwirkungen
- Querschnittswerte
- Bemessungsvorgaben

Es wird die 1. Variante des Lastmodells entsprechend DIN-Fachbericht 101 angelegt und der Eingabedialog gestartet.



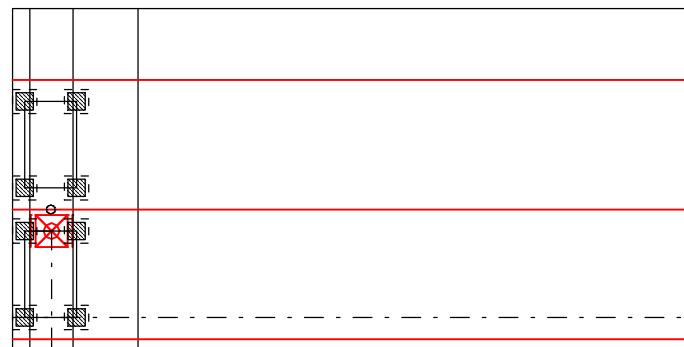
Nach Klicken auf *TS neu* können Schwerpunkt und Fahrtrichtung des 1. Tandemsystems festgelegt werden.

**Tandemsystem (1)**

Abstand der Wagen:  m    Fahrstreifen:     Zentrifugallast:  kN

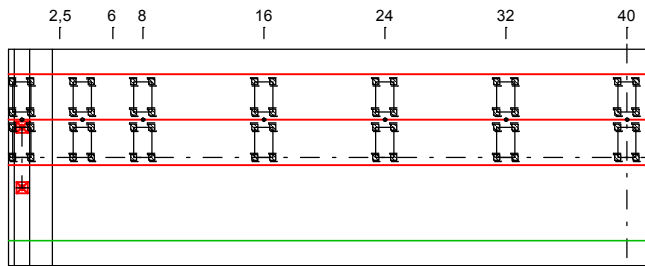
Lastverteilungshöhe:  m

Punkt	x [m]	y [m]	z [m]
1	-0,02	-2,5	0
2	20,43	-2,5	0
3	-0,02	-1,5	0



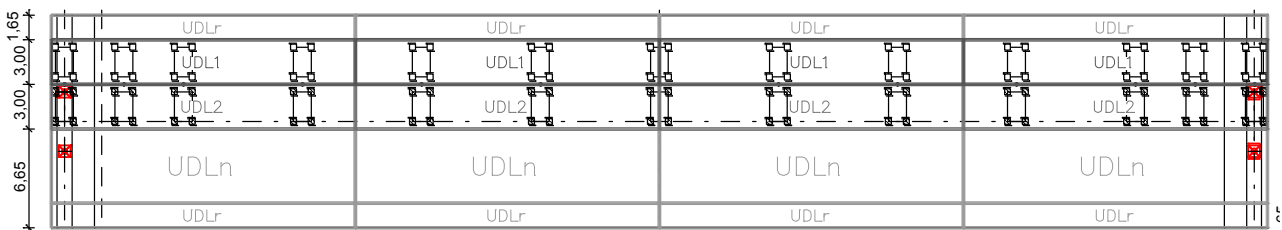
1. Tandemstellung der 1. Variante des Lastmodells 1

Die Eigenschaften der Tandemsystemstellung werden im Dialog eingestellt. Der Fahrstreifen 1 wird in Fahrtrichtung links angenommen und durch eine dunkle Schraffur gekennzeichnet. Die sich aus der Lastverteilungshöhe ergebende Fläche wird gestrichelt dargestellt.



Nach Markieren des Tandemsystems lassen sich die gewünschten Laststellungen durch Kopieren oder Generieren erzeugen. Dabei können die üblichen Fangfunktionen wie *Mitte* oder *Ende* angewendet werden.

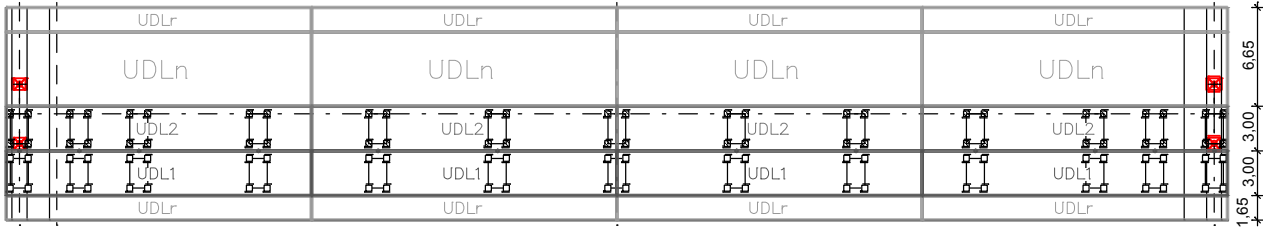
Anschließend werden nach Klick auf die Option *UDL Gen* die Lastflächen des UDL-Systems ergänzt. Zunächst werden alle Lastflächen als UDL2 (Fahrstreifen 2) angenommen. Nach Doppelklicken auf die entsprechende UDL-Fläche ist hierfür *Fahrstreifen 1* bzw. Fahrstreifen *n* oder *r* einzustellen.



Lastmodell 1, 1. Variante

Damit ist die 1. Variante des Lastmodells 1 definiert. Zur Eingabe der 2. Variante ist mit der rechten Maustaste erneut in der Datenbasis auf *Lastmodell 1* zu klicken und im Kontextmenü die Option *Neu* zu wählen.

Mittels der Zwischenablage können alle TS- und UDL-Stellungen auch in die 2. Variante kopiert und anschließend verändert werden (hier: Rotation um 180°).

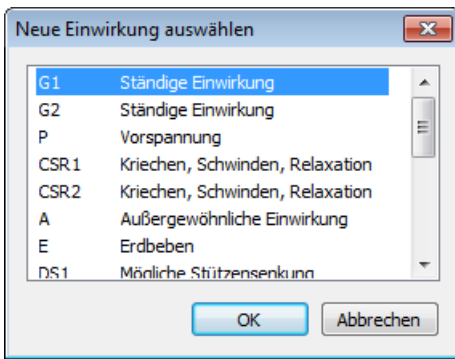


Fertiges Lastmodell 1, 2. Variante

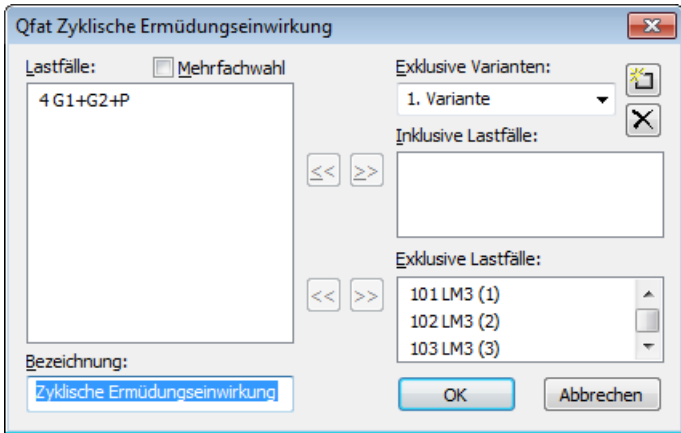
Das Lastmodell 1 ist damit vollständig beschrieben und kann berechnet werden. Dies erfolgt zusammen mit den Lastfällen im Rahmen der FEM-Berechnung. Die Ergebnisse aller Laststellungen werden einzeln abgespeichert und in einem Ordner **Lastmodell 1 (Bewegliche Lasten)** zusammengefasst.

### Kombination der Einwirkungen

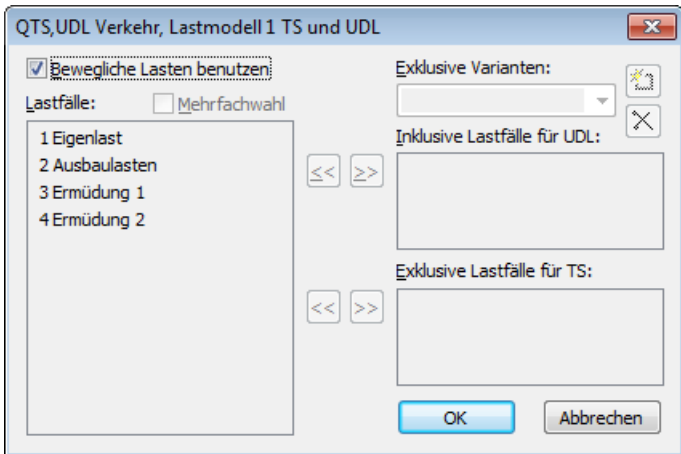
Zur Beschreibung der Einwirkungen und deren Kombination ist in der Datenbasis die Option *Einwirkungen* zu öffnen und dann auf *Einfügen* zu klicken.



Die zu betrachtenden Einwirkungen werden im Dialog ausgewählt. Anschließend werden ihnen Lastfälle zugeordnet.



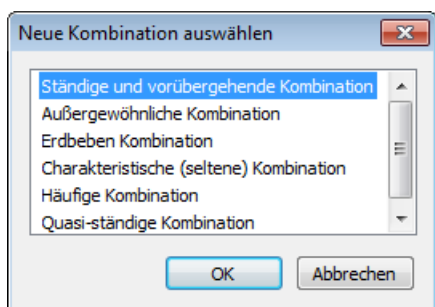
Bei veränderlichen Einwirkungen lassen sich mehrere Lastfälle zu inklusiven und exklusiven Gruppen zusammenfassen. Zusätzlich können bei Bedarf mehrere sich gegenseitig ausschließende Varianten definiert werden.



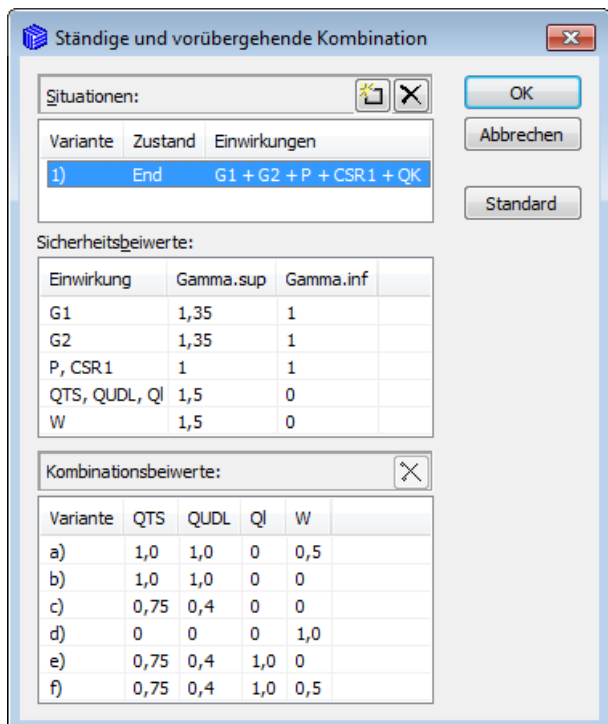
Die veränderlichen Einwirkungen QTS und QUDL werden direkt aus dem Lastmodell 1 genommen.

Dazu muss die Option *Bewegliche Lasten benutzen* aktiviert werden.

Alternativ können auch frei definierte Lastfälle oder Kombinationen verwendet werden.

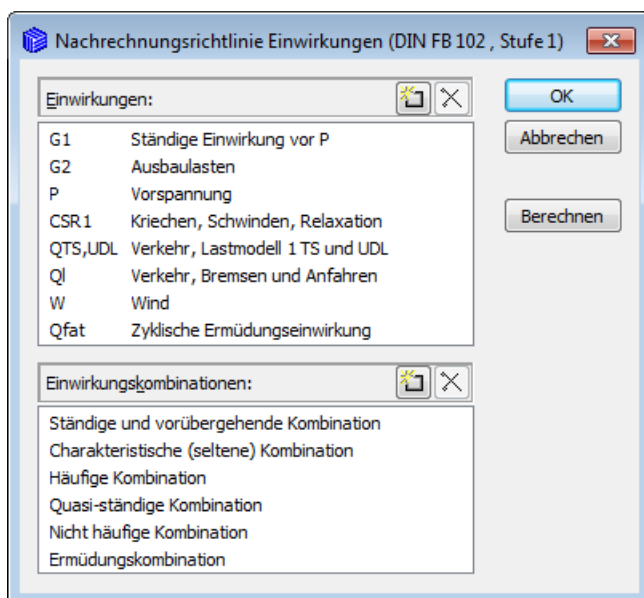


Nachdem den Einwirkungen die zugehörigen Lasten zugeordnet worden sind, werden die für die Nachweise benötigten Kombinationen ergänzt.



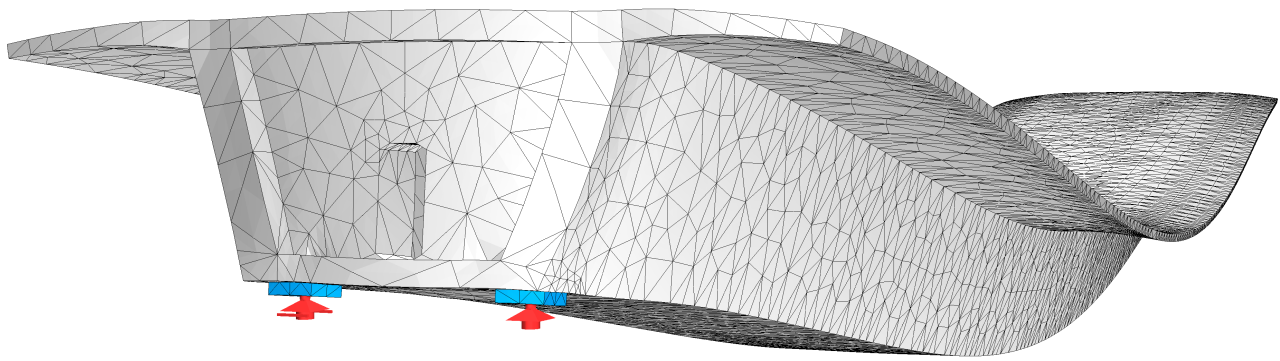
Gemäß Fachbericht 101/102 ergeben sich mit den Sicherheits- und Kombinationsbeiwerten die abgebildeten Varianten.

Der Vorschlag kann hier mit *OK* akzeptiert werden, um mit der Auswahl weiterer Kombinationen fortzufahren.

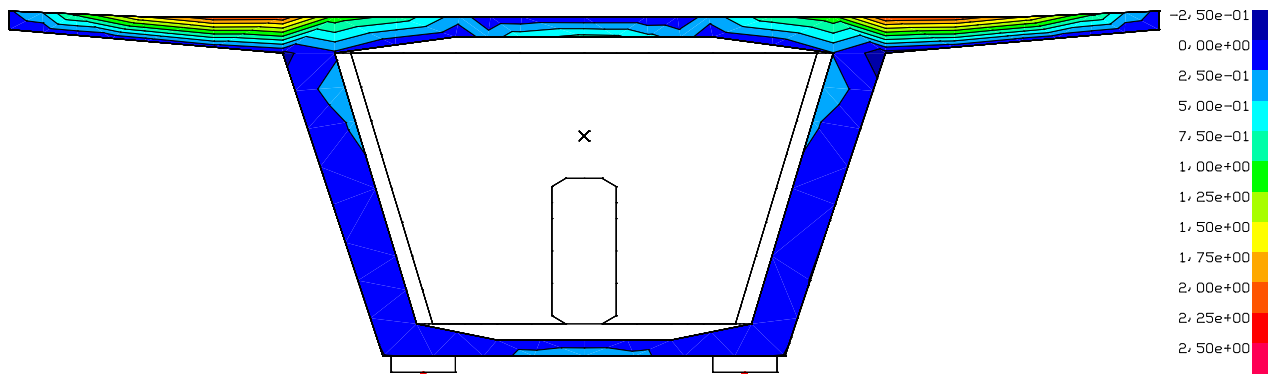


Dialog mit allen für dieses Beispiel erforderlichen Einwirkungen und Einwirkungskombinationen.

Nachfolgend werden Ergebnisse am Volumenmodell unter Dauerlast dargestellt.



Deformation unter Dauerlast G1+G2+P (200-fach überhöhte Darstellung)



Verteilung der Hauptzugspannung  $\sigma_1$  der Volumenelemente unter Dauerlast G1+G2+P in Feldmitte [MN/m<sup>2</sup>]

### Nachweise nach Stufe 1

Gemäß Kapitel 4.2 der Richtlinie erfolgt die gestufte Nachrechnung zunächst in Stufe 1 mit den Vorschriften des DIN FB 102 als Basisnorm. Der Start des Nachweisprogramms *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* erfolgt aus dem Berechnungsmenü. Die Ergebnisse sind anschließend aus der Datenbasis abrufbar.

#### Bemessungsvorgaben Nachrechnungsrichtlinie (DIN FB 102, Stufe 1)

Qu.	Klasse, Vorspannung des Bauteils	Bewehrung M R B Q T	Ausn. B Q	Ermüdung B Q T P C	Ri. br.	De-ko.	Spannungen Druck H-Zug B P
1	C Nachtr. Verbund	x x x x x	x x	x x x x .	x	x	x x x x
2	C Nachtr. Verbund	x x x x x	x x	x x x x .	x	x	x x x x
3	C Nachtr. Verbund	x x x x x	x x	x x x x .	x	x	x x x x
4	C Nachtr. Verbund	x x x x x	x x	x x x x .	x	x	x x x x

- (M) Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Robustheit.
- (R) Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.
- (B) Längsbewehrung aus Bemessung sowie im Ermüdungs- und Spannungsnachweis.
- (Q) (Mindest-)Querkraftbewehrung im Tragfähigkeits- und Ermüdungsnachweis.
- (T) Torsionsbewehrung im Tragfähigkeits- und Ermüdungsnachweis.
- (P) Spannstahl im Ermüdungs- und Spannungsnachweis.
- (C) Beton im Ermüdungsnachweis für Längsdruck.

#### Vorgaben für den Nachweis der Längsbewehrung

- M,N Bemessungsmodus für Biegung und Längskraft:  
(ST) Standard, (SY) Symmetrisch, (DG) Druckglied.
- Red. Reduktionsfaktor der Vorspannung zur Bestimmung der Zugzone für die Verteilung der Robustheitsbewehrung bei Flächenelementen.
- Bem. Bemessung ohne Berücksichtigung vorgegebener Bewehrungsverhältnisse.

Qu.	Beton	Modus für M,N	Bem. ohne Bew.verh.	Red. Vspg. Robustheit
1	C35/45	ST	x	.
2	C35/45	ST	x	.
3	C35/45	ST	x	.
4	C35/45	ST	x	.

#### Vorgaben für den Nachweis der Schubbewehrung

- fyk Stahlgüte der Bügel.
- Theta Neigung der Betondruckstreben. Der eingegebene Wert für cot Theta wird programmseitig auf den Wertebereich nach Gl. (II-4.122) begrenzt.
- Pl. Balken werden wie Platten bemessen.
- As1 Vorh. Biegezugbewehrung nach Abb. 4.12, autom. Erhöhung bis Maximum.
- cv1 Verlegemaß der Längsbewehrung zur Begrenzung des Hebelarms z.
- Fak. Mindestbewehrungsgrad min rhov = Faktor \* rho mit rho nach Tabelle 5.7.
- As, S1 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit durch Querkraftbewehrung oder durch Nachweis der Hauptzugspannungen gemäß NRR 12.4.3.3(9).
- x,y Getrennter Querkraftnachweis für die Bewehrungsrichtungen x und y.
- Asw Vorhandene Querkraftbewehrung.
- Anr. Anrechnung von Spannstahl Ap auf Torsionslängsbew. nach NRR 12.4.3.4(3).
- Red. Reduktionsfaktor für den statisch best. Anteil P0 der Vorspannung nach NRR 12.2.2(5) im Nachweis der Hauptzugspannungen.

Qu.	fyk [MPa]	cot Theta	Bem.			Fak.			vorh. Bew.		Anr.	Red. P0
			wie Pl.	Asl [cm²] vorh.	cvl max [mm]	rhov min	Nachweis As Sl x,y	Asw.y	Asw.z			
1	500	1,75	. 247,70	. 74	1,60	x . .	21,68	53,60	. .	. .		
2	500	1,75	. 247,70	. 74	1,60	x . .	17,09	44,00	. .	. .		
3	500	1,75	. 247,70	. 74	1,60	x . .	15,70	28,28	. .	. .		
4	500	1,75	. 247,70	. 74	1,60	x . .	15,70	22,62	. .	. .		

**Schubquerschnitte**

bw.nom Nennwert der Querschnittsbreite bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
h.nom Nennwert der Querschnittshöhe bei Vorspannung nach II-4.3.2.2 (8)\*P.  
kb, kd Faktor zur Berechnung des inneren Hebelarms z aus der Nutzhöhe bn bzw. der Nutzhöhe d.  
z1, z2 Höhe und Breite des Kernquerschnitts für Torsion.  
tef Wanddicke des Torsionskastens.  
K. Kastenquerschnitt; Ermittlung der Tragfähigkeit nach Gl. (4.47b).

Qu.	Breite [m]		Nutzbreite bn [m]	Kb	Höhe [m]		Nutzhöhe d [m]		Torsionsquerschn. [m]		tef	K.
	bw	bw.nom			h	h.nom	z1	z2				
1	1,100	0,916	5,680	0,90	0,450	0,450	4,100	0,90	4,000	5,680	0,200	x
2	1,100	0,916	5,680	0,90	0,450	0,450	4,100	0,90	4,000	5,680	0,200	x
3	1,100	0,916	5,680	0,90	0,450	0,450	4,100	0,90	4,000	5,680	0,200	x
4	1,100	0,916	5,680	0,90	0,450	0,450	4,100	0,90	4,000	5,680	0,200	x

**Vorgaben für den Nachweis der Betonspannungen und Betonstahlspannungen**

Av Fläche des Vollquerschnitts zur Ber. der Normalsp. aus Längskraft.  
fck(t) Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.  
Sigma.c(t) Betondruckspannung zum Zeitpunkt t der Eintragung der Vorspannung.  
Sigma.c Betonruckspannung im Gebrauchszustand.  
Sigma.x Betonspannung aus Biegung und Längskraft in Stabrichtung.  
Sigma.s Betonstahlspannung im Gebrauchszustand.  
H-Zug Hauptzugspannung nur im Bereich von Längsdruckspannung nachweisen.  
(NK),(QK) Nichthäufige, Quasi-ständige Kombination.

Qu.	Av [m²]	fck(t) [MN/m²]	zul.sigma.c(t)		zul.sigma.c		zul.sigma.s		Dekompr. Spannung	H-Zug L.druck
			(NK, QK)	(NK)	(QK)	(NK)				
1	10,06	35,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fck	0,80 fck	Sigma.x	.	
2	10,06	35,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fck	0,80 fck	Sigma.x	.	
3	10,06	35,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fck	0,80 fck	Sigma.x	.	
4	10,06	35,00	0,45 fck(t)	0,60 fck	0,45 fck	0,80 fck	0,80 fck	Sigma.x	.	

**Vorgaben für den Nachweis der Rissbreiten**

ds Größter vorhandener Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung.  
Xil Verbundbeiwert für Spannstahl bei Stabquerschnitten.  
k Beiwert zur Berücksichtigung nichtlinear verteilter Zugspannungen.  
Faktor Abmind.faktor für fctm nach Kap. 4.4.2.2 (As,min) bzw. 4.4.2.4 (wk).  
sr,max Oberer Grenzwert für den maximalen Rissabstand nach Gl. (4.203).  
As fix Keine Bewehrungserhöhung bei Überschreitung der zulässigen Rissbreite.  
DB Dickes Bauteil nach Kap. 4.4.2.2(9) zur Bestimmung von As,min.

Qu.	wmax [mm]	ds [mm]	Beiwerte		sr,max [mm]	fctm-Faktor		Kombin. für Nachweis		As DB fix
			Xil	k		As,min	wk	As,min	wk	
1	0,20	25,0	1,00	1,00	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse	x .
2	0,20	25,0	1,00	1,00	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse	x .
3	0,20	25,0	1,00	1,00	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse	x .
4	0,20	25,0	1,00	1,00	.	1,00	1,00	gem. Klasse	gem. Klasse	x .

**Vorgaben für den Nachweis gegen Ermüdung**

Die Betondruckspannungen werden nach Abb. 4.1 mit fc = fcm berechnet.

fcd,fat Betondruckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Belastung.  
dSigma.Rsk,s Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Längsbewehrung.  
dSigma.Rsk,b Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite der Schubbewehrung.  
dSigma.Rsk,p Zulässige charakt. Spannungsschwingbreite des Spannstahls.  
Lambda.s,b,p Zug. Korrekturbeiwerte für schadensäquivalente Schwingbreite.  
Lambda.c Korrekturbeiwert für schadensäquivalente Betonspannungen.  
Eta Erhöhungsfaktor für Betonstahlspannung nach II-4.3.7.3 (3)P.  
Nachw.SPCTQH Nachweis für (S) Längsbewehrung, (P) Spannstahl, (C) Beton, (T) Torsionsbew., (Q) Querkraftbew., (H) Hauptzugspannung.  
(x) Nachweis über schadensäquivalente Schwingbreiten - Ermüdungskomb.  
(+) Vereinfachter Nachweis nach II-4.3.7.4/5 - häufige Kombination.  
(a), (b) Nachweis der Hauptzugsp. nach NRR 12.7.4.2(7), (8) - häufige Komb.  
Fak. Qfat Faktor für Qfat zur Ber. der schadensäquivalenten Schwingbreite für Betonstahl und Spannstahl nach Anhang II-A.106.  
k0 Abminderungsfaktor für den statisch best. Anteil der Vorspannung nach II-4.3.7.2 (103)P.  
As fix Keine Bewehrungserhöhung bei Überschreitung von dSigma.Rsk.

Qu.	Nachw. SPCTQH	fcd,fat [MN/m²]	dSigma.Rsk [MN/m²]			Lambda			Eta	Fak. Qfat	k0	As fix	
			s	b	p	s	b	p					
1	xx.xx.	.	175,00	175,00	120,00	1,38	1,50	1,62	.	1,00	1,40	0,90	x
2	xx.xx.	.	175,00	175,00	120,00	1,38	1,50	1,62	.	1,00	1,40	0,90	x
3	xx.xx.	.	175,00	175,00	120,00	1,38	1,50	1,62	.	1,00	1,40	0,90	x
4	xx.xx.	.	175,00	175,00	120,00	1,38	1,50	1,62	.	1,00	1,40	0,90	x

**Streuung der Wirkungen aus Vorspannung**

Die Streuung der Vorspannung wird bei folgenden Nachweisen berücksichtigt:  
- Nachweis der Dekompression, der Betondruck- und Hauptzugspannungen  
- Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite  
- Nachweis der Rissbreite  
Alle anderen Nachweise benutzen den Mittelwert Pm,t der Vorspannung.



Qu.	Vorspannung des Bauteils	Bauzustand		Endzustand	
		r.sup	r.inf	r.sup	r.inf
1	Nachtr. Verbund	1,10	0,95	1,10	0,90
2	Nachtr. Verbund	1,10	0,95	1,10	0,90
3	Nachtr. Verbund	1,10	0,95	1,10	0,90
4	Nachtr. Verbund	1,10	0,95	1,10	0,90

Nachfolgend ist exemplarisch das ausführliche Protokoll des Nachweises der schiefen Hauptzugspannungen am Ort 7 (Feldmitte) des Bemessungsobjektes abgedruckt:

**Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen für die häufige Kombination**

Sigma1,max Maximale Hauptzugspannung im Zustand I [MN/m<sup>2</sup>]  
 Sigma1,zul = fctk;0,05 nach II-4.4.0.3 (5/6)P [MN/m<sup>2</sup>]  
 y, z Punkt am Querschnittsrand mit max. Sigma1 [m]  
 Sigma.x Zugehörige Längsspannung aus Biegung und Normalkraft [MN/m<sup>2</sup>]  
 Tau.xy, Zugehörige Randschubspannungen aus Querkraft und Torsion  
 Tau.xz in y- und z-Richtung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Tau.max Zugehörige resultierende Schubspannung [MN/m<sup>2</sup>]  
 Thetal Winkel zwischen Sigma1 und der Längsspannung Sigma.x [°]

**Ort 7**

Bemessungsobjekt 1, x = 40,00 m (Objektlänge 80,00 m)  
 Querschnitt 4: Polygon - C35/45, 18 Spannstränge im Verbund  
 fctk;0,05=2,24; Av=10,0645  
 r.sup/inf(Bau)=1,1/0,95; r.sup/inf(End)=1,1/0,9

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	10,065	0,000	1,476	22,6285	114,8643	0,0000
netto:	9,860	0,000	1,430	21,5732	113,8754	-0,0000
ideell:	10,593	0,000	1,589	25,2263	117,4234	0,0000

Abstand des 0-Punkts von der Objektachse:	y [m]	z [m]	Querschnittsdrehung um die Objektachse:	[°]
	0,000	-1,476		0,00

**1. Häufige Kombination (HK.1): G1+G2+P+CSR1+QK, Endzustand verpresst**

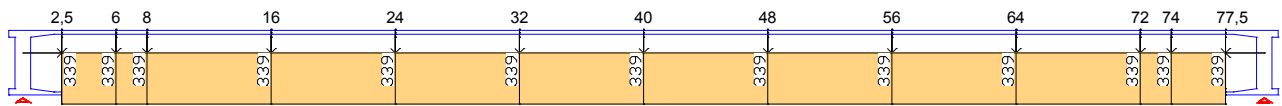
Betonschnittgrößen

	Nx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]	
Nx-	-91933,14	54274,55	-151,28	-338,81	-14,21	-267,91	r.sup
Nx+	-75208,60	91879,58	63,89	-497,04	-15,75	278,04	r.inf
My-	-91928,20	34442,12	2468,25	157,88	-8,69	-16,93	r.sup
My+	-75210,96	102090,99	97,40	233,00	-41,27	-66,17	r.inf
Mz-	-75214,01	72108,97	-2511,92	123,88	-21,31	-17,18	r.inf
Mz+	-91928,20	34442,12	2468,25	157,88	-8,69	-16,93	r.sup
Mx-	-75210,25	91026,84	-21,89	-1488,56	-14,12	313,47	r.inf
Mx+	-91927,10	53359,86	-40,94	1773,16	-16,06	309,51	r.sup
Qy-	-91924,63	60629,16	173,52	373,44	-46,18	-26,52	r.sup
Qy+	-75215,28	85514,24	-420,01	-101,78	-3,18	-78,55	r.inf
Qz-	-75217,58	91025,77	-161,90	-905,32	-10,68	-484,10	r.inf
Qz+	-91923,60	53359,76	24,62	-892,57	-17,83	448,75	r.sup

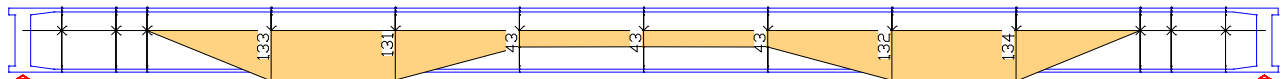
**Nachweis der schiefen Hauptzugspannung**

Sigma1,max : 3,10 [MN/m<sup>2</sup>] > Sigma1,zul : 2,24 [MN/m<sup>2</sup>]  
 zug. Sigma.x : 3,10 [MN/m<sup>2</sup>] Qu.punkt y : 2,500 [m]  
 zug. Tau.xy : 0,00 [MN/m<sup>2</sup>] z : 4,200 [m]  
 zug. Tau.xz : 0,00 [MN/m<sup>2</sup>] Punktlage : unterh. Schwerp.  
 zug. Tau.max : 0,00 [MN/m<sup>2</sup>] Zustand : End  
 zug. Thetal : -0,05 [°] Situation : HK.1,My+

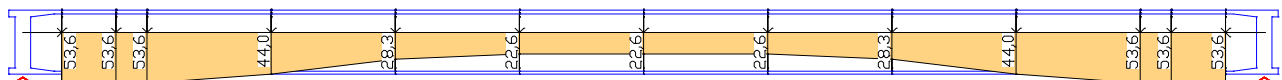
Eine Auswahl von Ergebnissen ist nachfolgend dargestellt.



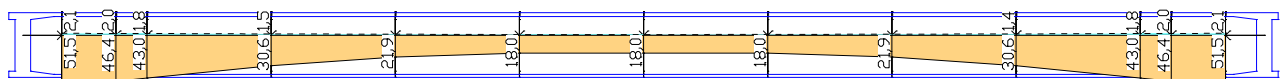
Biegebewehrung vorh. A<sub>s</sub>; Grundbewehrung im ganzen Querschnitt (DIN FB, Stufe 1) [cm<sup>2</sup>]



Biegebewehrung erf. A<sub>s</sub>; Maximum (DIN FB, Stufe 1) [cm<sup>2</sup>] (nach Abzug der Grundbewehrung jeder Lage)

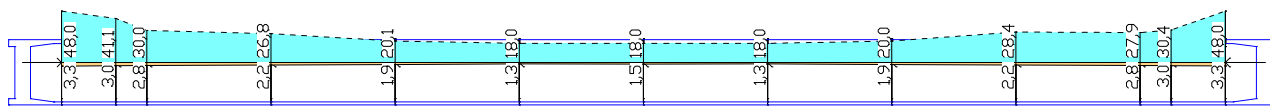


Bügelbewehrung vorh. A<sub>sb,z</sub>; Grundbewehrung (DIN FB, Stufe 1) [cm<sup>2</sup>/m]

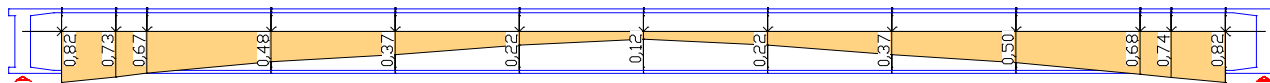


Bügelbewehrung erf. A<sub>sb,z</sub>, zugehörig A<sub>sb,7</sub> (strichliert); Tragfähigkeit ohne Grundbewehrung (DIN FB, Stufe 1) [cm<sup>2</sup>/m]

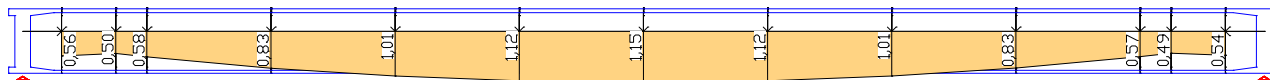




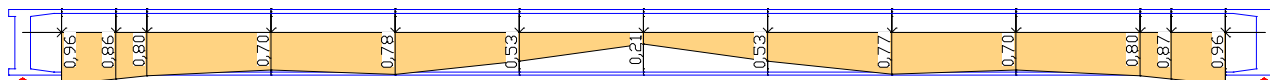
Bügelbewehrung erf.  $A_{sb,T}$ , zugehörig  $A_{sb,z}$  (strichliert); Tragfähigkeit ohne Grundbewehrung (DIN FB, Stufe 1) [cm<sup>2</sup>/m]



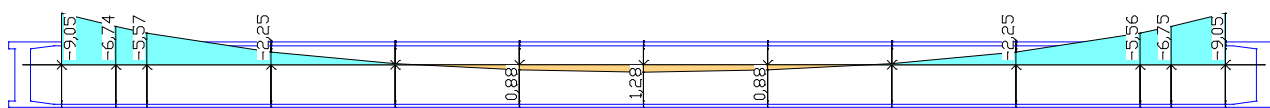
Ausnutzung  $Q/V_{Rd,max} + M_x/T_{Rd,max}$ ; Maximum (DIN FB, Stufe 1)



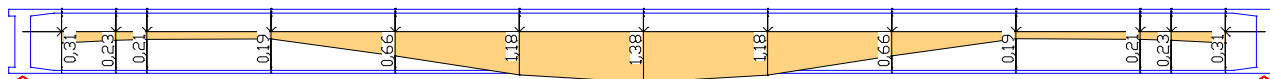
Ausnutzung der Hauptdruckspannungen  $\sigma_2/\sigma_{2,zul}$  aus Biegung, Längskraft und Torsion; Tragfähigkeit (DIN FB, Stufe 1)



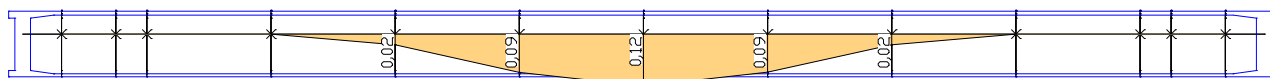
Ausnutzung der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Ed,z}/V_{Rd,z}$ ; Tragfähigkeit (DIN FB, Stufe 1)



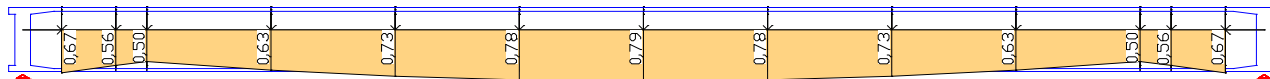
Dekompression  $\sigma_{x,u}$ ; Quasi-ständige Situation (DIN FB, Stufe 1) [MN/m<sup>2</sup>]



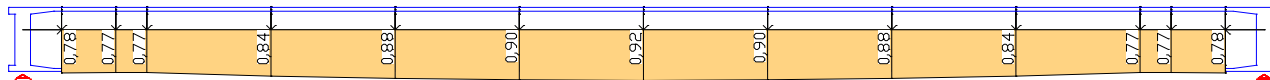
Ausnutzung der schiefen Hauptzugspannungen  $\sigma_1/\sigma_{1,zul}$ ; Häufige Situation (DIN FB, Stufe 1)



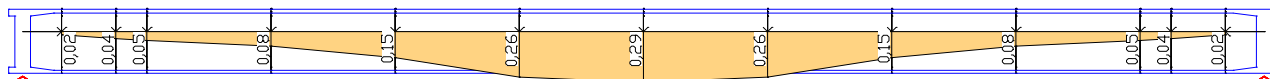
Ausnutzung der Rissbreite  $w_{k,unten}/w_{k,zul}$ ; Maximum (DIN FB, Stufe 1)



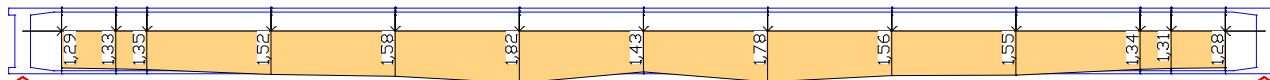
Ausnutzung der Betondruckspannungen  $\sigma_x/\sigma_{x,zul}$ ; Quasi-ständige (DIN FB, Stufe 1)



Ausnutzung der Spannstahlspannungen  $\sigma_p/\sigma_{p,zul}$ ; Quasi-ständige (DIN FB, Stufe 1)



Ausnutzung der Schwingbreite für Spannstahl  $\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_{p,zul}$ ; Ermüdungskombination (DIN FB, Stufe 1)



Ausnutzung der Schwingbreite  $\Delta\sigma_{sbT}/\Delta\sigma_{sbT,zul}$  für Bügelbewehrung aus Torsion; Ermüdungskombination (DIN FB, Stufe 1)

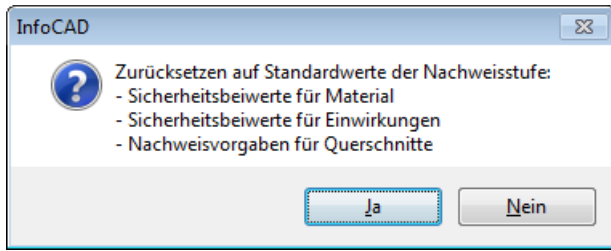
In Nachweisstufe 1 konnten folgende Nachweise nicht eingehalten werden:

- Die erforderliche Biegebewehrung erf.  $A_s$  ist größer als die vorhandene Biegebewehrung.
- Die erforderliche Bügelbewehrung  $A_{sb,z} + A_{sb,T}$  ist größer als die vorhandene Bügelbewehrung ( $51,5 + 2 \cdot 2,1 = 55,7 > 53,6$ ).
- Die Ausnutzung der Hauptdruckspannungen  $\sigma_2/\sigma_{2,zul}$  ist größer 1.
- Im Dekompressionsnachweis ist  $\sigma_{x,u}$  größer 0.
- Die Ausnutzung der schiefen Hauptzugspannungen  $\sigma_1/\sigma_{1,zul}$  ist größer 1.
- Die Ausnutzung der Schwingbreite  $\Delta\sigma_{sbT}/\Delta\sigma_{sbT,zul}$  für Bügelbewehrung aus Torsion ist größer 1.

Somit ist ein Nachweis in Stufe 2 erforderlich.

## Nachweise nach Stufe 2

In den Berechnungseinstellungen wird die Nachweisstufe 2 festgelegt.



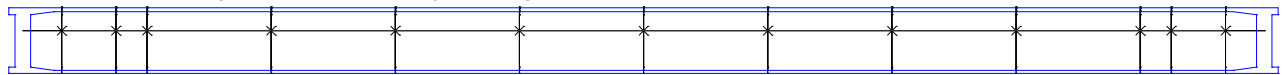
Nach Akzeptieren des erscheinenden Dialogs mit *Ja* werden die im Abschnitt *Berechnungseinstellungen* erläuterten Änderungen vorgenommen.

Des Weiteren werden in diesem Beispiel in den Querschnitten folgende Eigenschaften geändert:

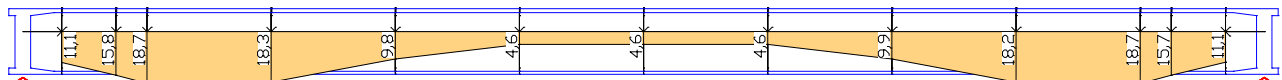
- Der Nachweis der Mindest-Rissbewehrung wird gemäß Kapitel 12.5.3 (4) der Richtlinie ausgewählt.
- Die gewünschte Druckstrebenneigung  $\cot \theta$  wird auf 2,5 gesetzt.
- Es werden alle Spannstahllagen auf die Torsionslängsbewehrung angerechnet.

Der Start des Nachweisprogramms *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* erfolgt wiederum aus dem Berechnungsmenü. Die Ergebnisse sind anschließend ebenfalls aus der Datenbasis abrufbar.

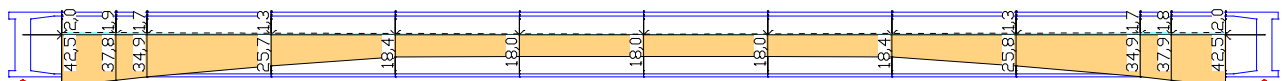
Eine Auswahl von Ergebnissen ist nachfolgend dargestellt.



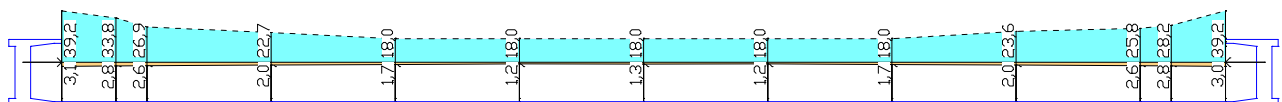
Biegebewehrung erf.  $A_s$ ; Maximum (DIN FB, Stufe 2) [cm<sup>2</sup>] (nach Abzug der Grundbewehrung)



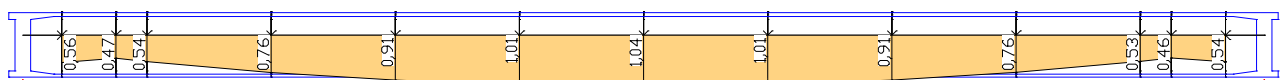
Ungenutzte vorhandene Bügelbewehrung  $A_{sb,z}$ ; Tragfähigkeit (DIN FB, Stufe 2) [cm<sup>2</sup>/m]



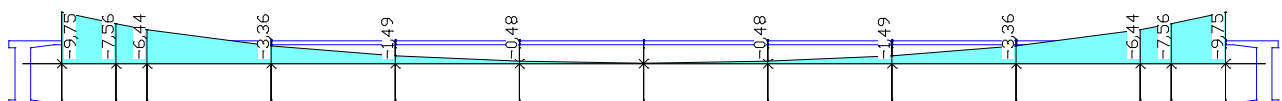
Bügelbewehrung erf.  $A_{sb,z}$ , zugehörig  $A_{sb,T}$  (strichliert); Tragfähigkeit ohne Grundbewehrung (DIN FB, Stufe 2) [cm<sup>2</sup>/m]



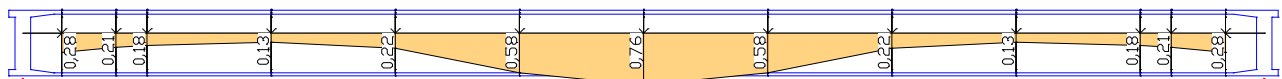
Bügelbewehrung erf.  $A_{sb,T}$ , zugehörig  $A_{sb,z}$  (strichliert); Tragfähigkeit ohne Grundbewehrung (DIN FB, Stufe 2) [cm<sup>2</sup>/m]



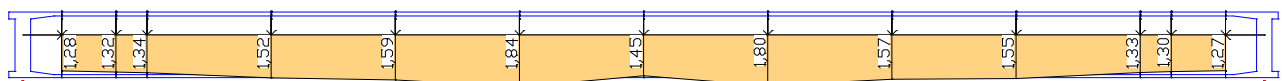
Ausnutzung der Hauptdruckspannungen  $\sigma_2/\sigma_{2,zul}$  aus Biegung, Längskraft und Torsion; Tragfähigkeit (DIN FB, Stufe 2)



Dekompression  $\sigma_{x,u}$ ; Quasi-ständige Situation (DIN FB, Stufe 2) [MN/m<sup>2</sup>]



Ausnutzung der schiefen Hauptzugspannungen  $\sigma_1/\sigma_{1,zul}$ ; Häufige Situation (DIN FB, Stufe 2)



Ausnutzung der Schwingbreite  $\Delta\sigma_{sbT}/\Delta\sigma_{sbT,zul}$  für Bügelbewehrung aus Torsion; Ermüdungskombination (DIN FB, Stufe 2)

Im Unterschied zu den Nachweisergebnissen nach Stufe 1 sind nach Stufe 2 bis auf den Nachweis der Ausnutzung der Schwingbreite  $\Delta\sigma_{sbT}/\Delta\sigma_{sbT,zul}$  für Bügelbewehrung aus Torsion alle Nachweise eingehalten. Die Überschreitung der Ausnutzung der Hauptdruckspannungen liegt im Rahmen der Nachweisgenauigkeiten und ergibt sich in den Kragarmen.

Die Ausnutzung für Bügelbewehrung aus Torsion wurde mit der erforderlichen Bügelbewehrung für Torsion geführt. Würde

man die Ausnutzung auf die ungenutzte Bügelbewehrung beziehen, ergäben sich an der ungünstigsten Nachweisstelle folgende Werte.

$$\Delta\sigma_{sbT}/\Delta\sigma_{sbT,zul} \cdot 2 \cdot erf. A_{sb,T} / (vorh. A_{sb,z} - erf. A_{sb,z}) = 1,84 \cdot 2 \cdot 1,2 / 4,6 = 0,96 < 1,0$$

**Damit sind alle Nachweise erfüllt!**

## Einzelbemessung Spannbeton nach Stufe 2

In diesem Beispiel sollen die Stahlspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für einen Schnittkraftsatz des Beispiels *Spannbetonbrücke mit Hohlkastenquerschnitt* mit der Einzelbemessung nach *Nachrechnungsrichtlinie Brückennachweise* nachvollzogen werden.

Aus dem ausführlichen Nachweisprotokoll für das Bemessungsobjekt am Ort 7 (Feldmitte) des Beispiels können die nachweisrelevanten Werte entnommen werden.

### Ort 7

Bemessungsobjekt 1, x = 40,00 m (Objektlänge 80,00 m)  
 Querschnitt 4: Polygon - C35/45, 18 Spannstränge im Verbund  
 Stahl 4; Bemessungsmodus: Standard  
 (M) fctk;0,05=2,24; zs,o/u=3,7401/3,69608; fyk,o/u=500/500  
 (R) wk,zul=0,2; ds=25; k=1; fct,eff=3,2; Av=10,0645; Xil=1  
 r.sup/inf(Bau)=1/0,95; r.sup/inf(End)=1/0,95  
 (B) fck=35

Querschnittswerte	A [m <sup>2</sup> ]	ys [m]	zs [m]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
brutto:	10,065	0,000	1,476	22,6285	114,8643	0,0000
netto :	9,860	0,000	1,430	21,5732	113,8754	-0,0000
ideell:	10,593	0,000	1,589	25,2263	117,4234	0,0000

Abstand des 0-Punkts von der Objektachse:	y [m]	z [m]	Querschnittsdrehung um die Objektachse:	[°]
	0,000	-1,476		0,00

### Spannstränge im Verbund

Nr.	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	βs [MN/m <sup>2</sup> ]	βz [MN/m <sup>2</sup> ]	y [m]	z [m]	Ap [mm <sup>2</sup> ]	Hüllr. d [mm]	Spannkraft [kN]	Neigung [°]
1	195000	1570	1770	2,575	3,156	5320	85	5127,03	0,00
2	195000	1570	1770	2,523	3,311	5320	85	5152,77	0,00
3	195000	1570	1770	2,471	3,466	5320	85	5148,85	0,00
4	195000	1570	1770	2,420	3,621	5320	85	5173,34	0,00
5	195000	1570	1770	2,368	3,776	5320	85	5179,04	0,00
6	195000	1570	1770	2,316	3,931	5320	85	5190,12	0,00
7	195000	1570	1770	2,265	4,086	5320	85	5203,14	0,00
8	195000	1570	1770	1,500	4,086	5320	85	5185,58	0,00
9	195000	1570	1770	0,500	4,086	5320	85	5097,08	0,00
11	195000	1570	1770	-2,575	3,156	5320	85	5127,03	0,00
12	195000	1570	1770	-2,523	3,311	5320	85	5152,77	0,00
13	195000	1570	1770	-2,471	3,466	5320	85	5148,85	0,00
14	195000	1570	1770	-2,420	3,621	5320	85	5173,34	0,00
15	195000	1570	1770	-2,368	3,776	5320	85	5179,04	0,00
16	195000	1570	1770	-2,316	3,931	5320	85	5190,12	0,00
17	195000	1570	1770	-2,265	4,086	5320	85	5203,14	0,00
18	195000	1570	1770	-1,500	4,086	5320	85	5185,58	0,00
19	195000	1570	1770	-0,500	4,086	5320	85	5097,08	0,00

### 1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G1+G2+P+CSR1+QK, Endzustand verpresst

Spannkraftverluste aus CSR in den Spannsträngen

Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]	Nr.	CSR[%]
1	12,37	2	11,70	3	11,08	4	10,42
6	9,15	7	8,51	8	8,59	9	8,76
12	11,70	13	11,08	14	10,41	15	9,79
17	8,52	18	8,59	19	8,76	-	-

Stat. best. Anteil (P+CSR) : Nx0=-83586,30; My0=-188368,82; Mz0=-1,71 [kN, kNm]

Betonquerschnittsgrößen			Verbundquerschnittsgrößen		
Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]
Nx- : -83960,06	121187,40	3491,43	-373,76	309556,22	3493,14
Nx+ : -83181,84	91248,22	-3608,02	404,47	279617,04	-3606,31
My- : -83951,81	51909,46	3699,10	-365,51	240278,28	3700,81
My+ : -83564,30	192101,30	382,28	22,00	380470,12	383,99
Mz- : -83571,11	100725,06	-7493,53	15,20	289093,88	-7491,82
Mz+ : -83571,50	52305,99	7442,52	14,80	240674,81	7444,23

### Nachweis der Längsbewehrung

Bewehrung Lage Typ	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	max Sc [MN/m <sup>2</sup> ]	kc	Ap' [cm <sup>2</sup> ]	erf.As [cm <sup>2</sup> ]	Situation
1	B -83951,81	51909,46	3699,10	.	.	.	45,70	SK.1,My-
2	B -83951,81	51909,46	3699,10	.	.	.	24,55	SK.1,My-
3	B -83571,50	52305,99	7442,52	.	.	.	47,10	SK.1,Mz+
4	B -83571,50	52305,99	7442,52	.	.	.	24,55	SK.1,Mz+
5	B -83571,50	52305,99	7442,52	.	.	.	45,70	SK.1,Mz+
6	B -83564,30	192101,30	382,28	.	.	.	36,20	SK.1,My+
7	B -83564,30	192101,30	382,28	.	.	.	36,20	SK.1,My+
8	B -83564,30	192101,30	382,28	.	.	.	24,55	SK.1,My+
9	B -83564,30	192101,30	382,28	.	.	.	29,80	SK.1,My+
10	B -83564,30	192101,30	382,28	.	.	.	24,55	SK.1,My+

### Berechnungsablauf im Nachweisprogramm:

1. Der statisch bestimmte Anteil aus Vorspannung und Kriechen & Schwinden ((P + CSR) · cos α · Schwerpunktsabstand) wird von den Betonschnittgrößen abgezogen.
2. Damit erhält man die Verbundschnittgrößen (statisch unbestimmter Anteil aus P + CSR zuzüglich den Schnittgrößen aus äußerer Last).
3. Bemessen wird mit den Verbundschnittgrößen. Dabei wird der Spannstahl mit den Spannkraftverlusten aus CSR auf der Widerstandsseite berücksichtigt.

### Einzelbemessung gemäß Nachrechnungsrichtlinie

Die Bemessung erfolgt mit der Spannungs-Dehnungslinie entsprechend der in den Berechnungseinstellungen gewählten Basisnorm sowie den definierten Teilsicherheitsbeiwerten für die Nachweistufe. Hierzu sind folgende Eingaben erforderlich:

1. Definition eines neuen Querschnitts mit zusätzlichen Stahllagen an den Orten der Spannstränge. Hierfür wird zunächst Querschnitt 4 zu Querschnitt 14 kopiert.
2. Anschließend werden die neuen Stahllagen in Querschnitt 14 ergänzt. Die Werte für  $E, f_{yk} = \beta_s, y, z$  und  $A_s = A_p$  sind am Nachweisort protokolliert. Als Vorspannkraft  $Z_{v0}$  wird die im Protokoll ausgewiesenen Spannkraft abzüglich der Spannkraftverluste eingegeben (z.B.  $5127,03 \cdot (100-12,37)/100 \cdot \cos 0 = 4492,82$ ).

#### Betonstahl Stäbe 14

	E-Modul [MN/m²]	f <sub>yk</sub> [MN/m²]	y [m]	z [m]	A <sub>s</sub> [cm²]	Z <sub>v0</sub> [kN]
1	200000	500	-5,500	0,150	45,700	0,00
2	200000	500	-3,425	0,074	24,550	0,00
3	200000	500	0,000	0,125	47,100	0,00
4	200000	500	3,425	0,074	24,550	0,00
5	200000	500	5,500	0,150	45,700	0,00
6	200000	500	-2,892	2,125	36,200	0,00
7	200000	500	2,892	2,125	36,200	0,00
8	200000	500	-2,355	4,127	24,550	0,00
9	200000	500	0,000	4,100	29,800	0,00
10	200000	500	2,355	4,127	24,550	0,00
11	195000	1570	2,575	3,156	53,200	4492,82
12	195000	1570	2,523	3,311	53,200	4549,90
13	195000	1570	2,471	3,466	53,200	4578,36
14	195000	1570	2,420	3,621	53,200	4634,28
15	195000	1570	2,368	3,776	53,200	4672,01
16	195000	1570	2,316	3,931	53,200	4715,22
17	195000	1570	2,265	4,086	53,200	4760,35
18	195000	1570	1,500	4,086	53,200	4740,14
19	195000	1570	0,500	4,086	53,200	4650,58
20	195000	1570	-2,575	3,156	53,200	4492,30
21	195000	1570	-2,523	3,311	53,200	4549,90
22	195000	1570	-2,471	3,466	53,200	4578,36
23	195000	1570	-2,420	3,621	53,200	4634,80
24	195000	1570	-2,368	3,776	53,200	4672,01
25	195000	1570	-2,316	3,931	53,200	4715,22
26	195000	1570	-2,265	4,086	53,200	4759,83
27	195000	1570	-1,500	4,086	53,200	4740,14
28	195000	1570	-0,500	4,086	53,200	4650,58

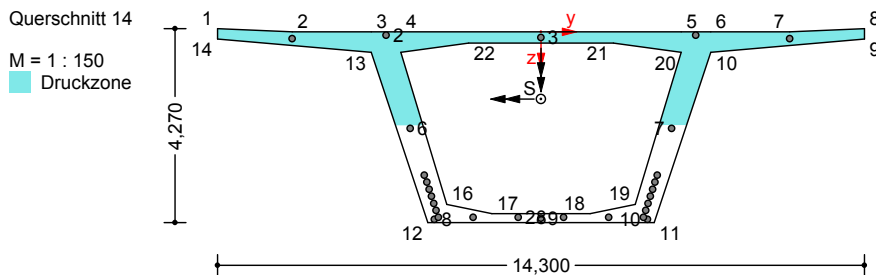
Der E-Modul wird nur für vorgespannte Stahllagen benutzt.

y, z Koordinaten des Betonstahls  
 A<sub>s</sub> Grundbewehrung  
 Z<sub>v0</sub> Vorspannkraft einer vorgespannten Stahllage

3. Für die Einzelbemessung werden die Verbundschnittgrößen mit dem **statisch unbestimmten** Anteil aus P+CSR benötigt. Diese können ebenfalls dem Protokoll entnommen werden (Schnittkraftsatz My+).

Einzelbemessung nach Nachrechnungsrichtlinie [EBEM_NRR]							
	Quer-schnitt	Kombi-nation	Nsd [kN]	Mysd [kNm]	Mzsd [kNm]	Modus	Bezeichnung
1	14	0	22,00	380470,12	383,99	Standard	
2							

**Pos. 1 - Stahlbeton-Biegebemessung - Nachrechnungsrichtlinie (DIN FB 102, Stufe 2)**



Einwirkung N = 22,00 kN; My = 380470,12; Mz = 383,99 kNm  
 Widerstand N = 22,01 kN; My = 380470,11; Mz = 383,99 kNm  
 Kraftsystem ys / zs = 0,000 / 1,476 m  
 Festigkeit C35/45; gamma.c = 1,50; gamma.s = 1,05; gamma.p = 1,10  
 Bemessungsart Standard  
 Bewehrung 1296,50 cm<sup>2</sup>; 1,29 %; Betonfläche = 100645,00 cm<sup>2</sup>  
 Vorspannung N0 = -83586,79 kN; My0 = -188370,04; Mz0 = -1,25 kNm

Betonquerschnitt Punkt	y [m]	z [m]	eps[‰]	sigma[MPa]	Innere Kräfte	y [m]	z [m]	F [kN]
1	-7,150	-0,070	-1,67	-19,28	Druck	-0,003	0,313	-110642,97
2	-5,500	0,000	-1,61	-19,08	Zug	0,000	3,751	110664,97
3	-3,750	0,000	-1,61	-19,08	Hebelarm	0,003	3,438	
4	-3,100	0,000	-1,61	-19,08				
5	3,100	0,000	-1,61	-19,07				
6	3,750	0,000	-1,61	-19,07				
7	5,500	0,000	-1,61	-19,06				
8	7,150	-0,070	-1,66	-19,26				
9	7,150	0,160	-1,48	-18,49				
10	3,750	0,450	-1,25	-17,07				
11	2,500	4,200	1,68	0,00				
12	-2,500	4,200	1,68	0,00				
13	-3,750	0,450	-1,26	-17,10				
14	-7,150	0,160	-1,49	-18,52				
15	-3,100	0,450	-1,26	-17,10				
16	-2,083	3,800	1,37	0,00				
17	-1,083	4,000	1,52	0,00				
18	1,083	4,000	1,53	0,00				
19	2,083	3,800	1,37	0,00				
20	2,614	2,052	0,00	0,00				
21	3,100	0,450	-1,25	-17,08				
22	1,600	0,250	-1,41	-18,12				
23	-1,600	0,250	-1,41	-18,13				
24	-3,100	0,450	-1,26	-17,10				

Betonstahl Punkt	y [m]	z [m]	d1 [m]	Es,fyk [MPa]	Zv0 [kN]	eps[‰]	sigma[MPa]	As [cm <sup>2</sup> ]	
1	-5,500	0,150	0,150	200000	500	0,0	-1,49	-298,59	45,70
2	-3,425	0,074	0,074	200000	500	0,0	-1,55	-310,44	24,55
3	0,000	0,125	0,125	200000	500	0,0	-1,51	-302,05	47,10
4	3,425	0,074	0,074	200000	500	0,0	-1,55	-309,81	24,55
5	5,500	0,150	0,150	200000	500	0,0	-1,49	-297,57	45,70
6	-2,892	2,125	0,285	200000	500	0,0	0,06	11,00	36,20
7	2,892	2,125	0,285	200000	500	0,0	0,06	11,54	36,20
8	-2,355	4,127	0,074	200000	500	0,0	1,62	324,62	24,55
9	0,000	4,100	0,100	200000	500	0,0	1,60	320,68	29,80
10	2,355	4,127	0,074	200000	500	0,0	1,63	325,05	24,55
11	2,575	3,156	0,259	195000	1570	4492,8	0,87	1013,22	53,20
12	2,523	3,311	0,259	195000	1570	4549,9	0,99	1047,62	53,20
13	2,471	3,466	0,260	195000	1570	4578,4	1,11	1076,64	53,20
14	2,420	3,621	0,259	195000	1570	4634,3	1,23	1110,82	53,20
15	2,368	3,776	0,259	195000	1570	4672,0	1,35	1141,59	53,20
16	2,316	3,931	0,260	195000	1570	4715,2	1,47	1173,38	53,20
17	2,265	4,086	0,114	195000	1570	4760,4	1,59	1205,54	53,20
18	1,500	4,086	0,114	195000	1570	4740,1	1,59	1201,67	53,20
19	0,500	4,086	0,086	195000	1570	4650,6	1,59	1184,74	53,20
20	-2,575	3,156	0,259	195000	1570	4492,3	0,86	1012,66	53,20
21	-2,523	3,311	0,259	195000	1570	4549,9	0,98	1047,16	53,20
22	-2,471	3,466	0,260	195000	1570	4578,4	1,11	1076,19	53,20
23	-2,420	3,621	0,259	195000	1570	4634,8	1,23	1110,48	53,20
24	-2,368	3,776	0,259	195000	1570	4672,0	1,35	1141,16	53,20
25	-2,316	3,931	0,260	195000	1570	4715,2	1,47	1172,96	53,20
26	-2,265	4,086	0,114	195000	1570	4759,8	1,59	1205,03	53,20
27	-1,500	4,086	0,114	195000	1570	4740,1	1,59	1201,40	53,20
28	-0,500	4,086	0,086	195000	1570	4650,6	1,59	1184,65	53,20

## Literaturhinweise

- Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 2009 (ARS 2009)  
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Nr. 6/2009 vom 5. Juni 2009.  
Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund 2009.
- Auslegungen des Normenausschusses Bauwesen (NABau)  
zur DIN 1045-1. Stand: 1.6.2012.
- Bauer, T.; Müller, M.  
Straßenbrücken in Massivbauweise nach DIN-Fachbericht,  
Beispiele prüffähiger Standsicherheitsnachweise.  
Stahlbeton- und Spannbetonüberbau nach DIN-Fachbericht 101 und 102.  
2. aktualisierte Auflage. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2003.
- DIN 1045-1:2008-08  
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.  
Neuausgabe. Beuth Verlag, Berlin 2008.
- DIN 1072:1985-12  
Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen.  
Beuth Verlag, Berlin 1985.
- DIN 4149:2005-04  
Bauten in deutschen Erdbebengebieten.  
Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.  
Beuth Verlag, Berlin 2005.
- DIN 4227 Teil 1, Ausgabe Juli 1988  
Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung.  
Beuth Verlag, Berlin 1988.
- DIN 4227-1/A1 Teil 1, Ausgabe Dezember 1995  
Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung; Änderung A1.  
Beuth Verlag, Berlin 1995.
- DIN Fachbericht 101 - März 2009  
Einwirkungen auf Brücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Neuausgabe. Beuth Verlag, Berlin 2009.
- DIN Fachbericht 102 - März 2009  
Betonbrücken. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.  
Neuausgabe. Beuth Verlag, Berlin 2009.
- DIN EN 1990/NA:2010/A1:2012-08  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.
- DIN EN 1991-2/NA:2012-08  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.
- DIN EN 1992-1-1/NA:2013/A1:2015-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2015.
- DIN EN 1992-2/NA:2013-04  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2013.

- EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1991-1-1:2002  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.  
Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2002.
- EN 1991-2:2003  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2004.
- EN 1992-1-1:2004/A1:2014  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2014.
- EN 1992-2:2005/AC:2008  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1998-1:2004  
Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben –  
Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2006.
- Erfahrungssammlung des Normenausschusses Bauwesen (NABau)  
zu den DIN Fachberichten 101 und 102. Stand: 9.9.2011.
- Erfahrungssammlung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)  
zur "Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand". Stand: 3.11.2015.
- Fingerloos, F.  
DIN 1045 - Ausgabe 2008, Tragwerke aus Beton und Stahlbeton.  
Teil 1: Bemessung und Konstruktion - Kommentierte Kurzfassung.  
Herausgeber: Deutscher Beton- und Bautechnikverein e.V.  
3. vollständig überarbeitete Auflage, Beuth Verlag, Berlin 2008.
- Heft 525 - Erläuterungen zur DIN 1045-1  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton,  
1. Auflage - September 2003, Beuth Verlag, Berlin 2003.
- Heft 525 - Berichtigung 1:2005-05  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton,  
Beuth Verlag, Berlin 2005.
- Heft 466 - Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton.  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.  
Beuth Verlag, Berlin 1996.
- Heft 600 Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2).  
Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.
- König, G.; Maurer, R.; Kliver, J.; Bornmann, M.  
Leitfaden zum DIN-Fachbericht 102 Betonbrücken, Ausgabe März 2003.  
1. Auflage - November 2003. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- Maurer, R.; Zilch, K.; Hegger, J.; Zichner, T.; Dunkelberg, D.; Karakas, A.; Kolodziejczyk, A.  
Erläuterungen und Hintergründe zur Nachrechnungsrichtlinie - Betonbrücken.  
Bauingenieur 01-2012, S. 24-35.  
Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 2012.

- Novak, B.; Gabler, M.  
Leitfaden zum DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen auf Brücken, Ausgabe März 2003.  
1. Auflage - November 2003. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie).  
Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).  
Ausgabe Mai 2011.
- Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie).  
Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).  
1. Ergänzung. Ausgabe April 2015.
- Rossner, W.; Graubner C.-A.  
Spannbetonbauwerke.  
Teil 1: Bemessungsbeispiele nach DIN 4227.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1992.
- Rossner, W.; Graubner, C.-A.  
Spannbetonbauwerke.  
Teil 3: Bemessungsbeispiele nach DIN 1045-1 und DIN-Fachbericht 102.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.
- Rossner, W.; Graubner, C.-A.  
Spannbetonbauwerke.  
Teil 4: Bemessungsbeispiele nach Eurocode 2.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2012.
- Zilch, K.; Curbach, M. (Hrsg.)  
Einführung in die DIN 1045-1 - Anwendungsbeispiele.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2001.
- Zilch, K.; Rogge, A.  
Bemessung der Stahlbeton- und Spannbetonbauteile nach DIN 1045-1.  
Beton-Kalender 2002, Bd. 1, S. 217-359.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2002.
- Zilch, K.; Zehetmaier, G.  
Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1.  
Springer-Verlag, Berlin 2006.



# EN 1993-1-1 Stahlnachweise

## Grundlagen

Die Stahlnachweise nach EN 1993-1-1 (Eurocode 3) sind anwendbar für Hoch- und Ingenieurbauwerke unter Berücksichtigung der folgenden Normen:

- EN 1993-1-1:2005/A1:2014 als Basisdokument
- DIN EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Deutschland 2015-08
- ÖNORM EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Österreich B 1993-1-1:2007-02
- SS-EN 1993-1-1:2014 mit Nationalem Anhang Schweden 2011-04

Die Auswahl der gewünschten Vorschrift erfolgt im Dialog *Einstellungen* des Berechnungsmenüs. Bei der Materialauswahl stehen folgende Alternativen zur Verfügung:

- *S235-EN* bis *S450-EN* für Baustahl nach EN 1993-1-1, Tabelle 3.1
- *Stahl* für eine freie Definition der Materialeigenschaften

Die Nachweise am Gesamtsystem erfolgen im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle den Einwirkungen nach EN 1991:2002 (Eurocode 1), Teil 1, zuzuordnen. In den gewünschten Nachweissituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte nach EN 1990:2010 (Eurocode 0) automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente. Für jeden Schnittkraftsatz wird automatisch die Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Kapitel 5.5, ermittelt und wahlweise die elastische oder plastische Querschnittstragfähigkeit nach Kapitel 6.2 nachgewiesen. Ein Nachweis gegen Schubbeulen nach EN 1993-1-5 wird nicht geführt.

Als Querschnitte können die vordefinierten Stahlbauprofile, projektbezogene Parameter- und Polygonquerschnitte oder Profile aus der Anwenderdatenbank benutzt werden. Stäbe mit der Querschnittsart *Stab* werden nicht nachgewiesen, da für sie die Querschnittsgeometrie nicht bekannt ist.

Bei Flächenquerschnitten werden - ohne Nachweis - die extremalen Schnittgrößen für die definierten Einwirkungskombinationen ermittelt und zur graphischen Darstellung in der Datenbasis gespeichert.

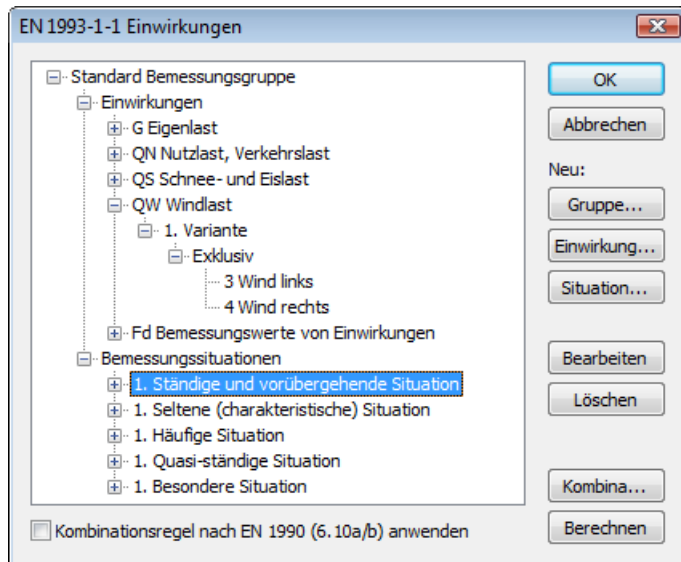
Der Biegeknick- und Biegedrillknicknachweis erfolgt am gabelgelagerten Ersatzstab mit einem eigenständigen Programm, das aus dem Ordner *Infograph* des Startmenüs aufgerufen wird.

In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften der EN 1993-1-1 zitiert. Auf die jeweiligen nationalen Festlegungen wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthalten. Die betreffenden Passagen werden durch senkrechten Strich am Text markiert.

# Eingaben für Nachweise am Gesamtsystem

## Einwirkungen und Bemessungssituationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die gewünschten Bemessungssituationen. Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



### Einwirkung...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Einwirkungen:

- Ständige Einwirkungen (G, GE, GH)
- Veränderliche Einwirkungen (QN, QS, QW, QT, QH, QD)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)
- Einwirkungen infolge Erdbeben (AE)
- Bemessungswerte von Einwirkungen (Fd)

In diesen Einwirkungen sind die Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Material bereits enthalten, wie z.B. beim Stabilitätsnachweis am Gesamttragwerk nach EN 1993-1-1, Kapitel 5.2.2(3). Sie werden exklusiv kombiniert.

### Gruppe...

Startet den Dialog zur Eingabe einer neuen Bemessungsgruppe. Optional können für bestimmte Bauteile (Querschnitte) eigene Einwirkungen und Bemessungssituationen definiert werden.

### Situation...

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Bemessungssituationen.

### Bearbeiten

Öffnet den Bearbeitungsdialog der markierten Einwirkung oder Situation.

### Löschen

Entfernt die markierte Einwirkung oder Situation.

### Kombinationen...

Startet den Dialog mit den ersten 999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung oder für die nichtlineare Analyse nutzen.

### Berechnen

Berechnet die definierten Bemessungssituationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Situationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls. Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

### Kombinationsregel nach EN 1990 (6.10a/b) anwenden

Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen wird optional nach Gl. (6.10a/b) kombiniert, anderenfalls nach Gl. (6.10).

## Definition einer Einwirkung

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Dialogfeld zur Eingabe einer veränderlichen Einwirkung. Die Dialogfelder für die weiteren Einwirkungsarten sehen entsprechend aus.

### Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

### Gamma.sup, Gamma.inf

Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{sup}$  und  $\gamma_{inf}$ .

SS EN 1990:

Im Programm werden die Teilsicherheitsbeiwerte so vorgeschlagen, wie sie sich nach § 2 für Sicherheitsklasse 3 aus  $\gamma_d \cdot \gamma_{sup}$  mit dem Abminderungsfaktor  $\gamma_d = 1,0$  nach § 6 ergeben. Niedrigere Sicherheitsklassen lassen sich bei Bedarf durch Eingabe geringerer Werte berücksichtigen.

### Kombinationsbeiwerte psi für:

Eingabefelder zur Auswahl der Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen. Die Schaltfläche ermöglicht die Einsicht und Änderung der gewählten Kombinationsbeiwerte  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  und  $\psi_2$ .

### Lastfälle

Liste der möglichen Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen. Die Auswahl geschieht durch Markieren und Betätigung der entsprechenden Schaltfläche oder Drag & Drop.

### Mehrfachauswahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

### Exklusive Varianten

Veränderliche Einwirkungen können aus mehreren exklusiven Varianten bestehen, die sich gegenseitig ausschließen. Die Varianten selber enthalten inklusive und exklusive Anteile. Mit den Schaltflächen oder können Einwirkungsvarianten hinzugefügt oder gelöscht werden.

### Inklusive Lastfälle

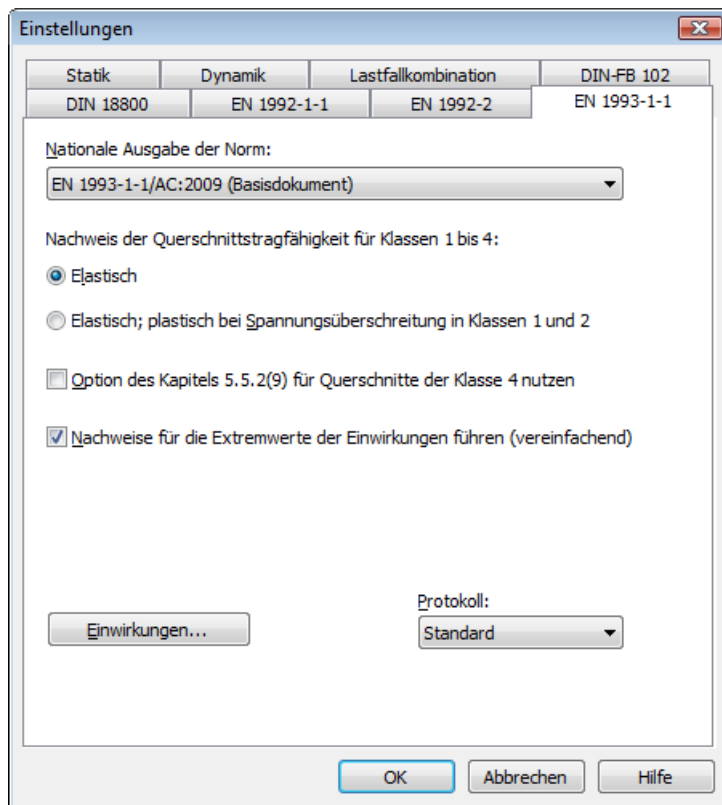
Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

### Exklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *EN 1993-1-1* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Nationale Ausgabe der Norm

Die gewählte Ausgabe kommt bei allen nachfolgenden Eingaben und Berechnungen zur Anwendung.

Im einzelnen stehen folgende Nachweise zur Auswahl:

#### Elastisch

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1 bis 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen. Für Klasse 4 erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten nach EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.

#### Elastisch; plastisch bei Spannungsüberschreitung in Klassen 1 und 2

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1 bis 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen. Wenn in den Klassen 1 und 2 die Vergleichsspannung den zulässigen Grenzwert überschreitet, wird die plastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen.

#### Option des Kapitels 5.5.2(9) für Querschnitte der Klasse 4 nutzen

Querschnitte der Klasse 4 werden wie Querschnitte der Klasse 3 behandelt, wenn das  $c/t$ -Verhältnis die mit dem Faktor nach Kapitel 5.5.2(9) erhöhten Grenzwerte für Klasse 3 nicht überschreitet.

#### Nachweise für die Extremwerte der Einwirkungen führen (vereinfachend)

Bei gesetzter Auswahl werden für jede Schnittkraftkomponente die minimalen und maximalen Werte gebildet. Mit diesen sowie den zugehörigen Werten erfolgt dann der Nachweis. Alternativ werden alle möglichen Kombinationen von Lastfällen gebildet und nachgewiesen. Dies ist bei einer größeren Anzahl von Lastfällen zeitaufwendig.

#### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

#### Protokoll

- *Nicht erstellen*: Vom Bemessungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll mit einer tabellarischen Ausgabe der ermittelten Ausnutzungen erstellt.
- *Ausführlich*: Dieses Protokoll unterscheidet sich vom Standard-Protokoll durch zusätzliche Ausgabe der untersuchten Schnittgrößenkombinationen.
- *Standard>zulässig*: Standard-Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.
- *Ausführlich>zulässig*: Ausführliches Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.

# Eingaben für Nachweise am Ersatzstab

## Einstellungen

### Anzahl der Berechnungsorte

Die Schnittgrößen werden an äquidistanten Punkten im Stab berechnet. Für jeden Berechnungsort werden dann die Nachweise mit den zugehörigen Schnittgrößen und dem zugehörigen  $M_{cr}$  geführt.

### Ausführliches Protokoll ausgeben

Bei der Berechnung wird ein ausführliches Protokoll mit allen erforderlichen Werten erstellt.

### Protokoll für alle Berechnungsorte ausgeben

Zusätzlich zum maßgebenden Berechnungsort werden die Ergebnisse aller Berechnungsorte ausgegeben.

### Blattnr.

Blattnummer, die auf der 1. zu druckenden Seite ausgegeben wird. Die Nummer wird bei jedem Druckvorgang inkrementiert. Durch Eingabe von „0“ kann die Nummerierung unterdrückt werden.

### Datum, Uhrzeit

Diese Informationen erscheinen automatisch im Standardrahmen.

### Projekt, Titel

Diese Texte erscheinen automatisch im Standardrahmen.

### Benutzername aus InfoCAD Seiteneinrichtung übernehmen

Bei gesetztem Haken wird der Benutzername automatisch aus der Datei *lgraph.dat* geholt und in den Standardrahmen eingefügt. Durch Entfernen des Hakens kann ein anderer Benutzername angegeben werden.

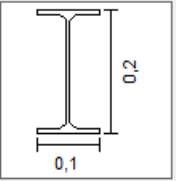
## Querschnitt & Material

Querschnitt

IPE 200

IPE

- I 80
- I 100
- I 120
- I 140
- I 160
- I 180
- I 200
- I 220
- I 240
- I 270
- I 300
- I 330



A = 28,5 cm<sup>2</sup>

I<sub>x</sub> = 7,02 cm<sup>4</sup>

I<sub>y</sub> = 1940 cm<sup>4</sup>

I<sub>z</sub> = 142 cm<sup>4</sup>

I<sub>w</sub> = 12990,0 cm<sup>6</sup>

Material

S235-EN

Gamma.M1:

1

f<sub>yk</sub> [N/mm<sup>2</sup>]:

235

E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]:

210000

G-Modul [N/mm<sup>2</sup>]:

81000

Benutzerdefiniertes Profil

bo [mm]:

480

h [mm]:

544

bu [mm]:

200

Eigenschaften:

to [mm]:

24

s [mm]:

12

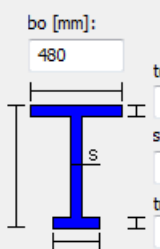
tu [mm]:

20

geschweißt

Abbrechen

OK



### Querschnitt

Auswahl eines Stahlbauprofils aus der Querschnittsbibliothek oder Eingabe eines benutzerdefinierten Profils durch Angabe vorgegebener Abmessungen.

### Benutzerdefiniertes Profil

Eigenschaften:

- *Geschweißt, gewalzt*: Angabe des Profiltyps für die Zuordnung der Knicklinien nach EN 1993-1-1, Tabellen 6.2 und 6.5.
- *Verdrehschweich, verdrehsteif*: Auswahl des Bauteiltyps gemäß EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.3 (1).

### Material

- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 1993-1-1, Tab. 3.1.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

### Gamma.M1

Mit dem materialbezogenen Beiwert  $\gamma_{M1}$  erhält man den Bemessungswert der Festigkeit  $f_{y,d}$ .

### f<sub>yk</sub>

Charakteristische Streckgrenze [N/mm<sup>2</sup>] gemäß EN 1993-1-1, Tab. 3.1 für Erzeugnisdicken  $t \leq 40$  mm. Davon abweichende Größen können durch Wahl der Materialart Stahl berücksichtigt werden.

### E-Modul

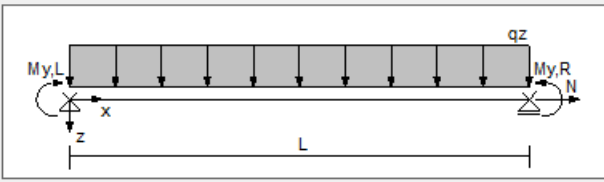
Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>].

### G-Modul

Schubmodul [N/mm<sup>2</sup>].

## Last & System

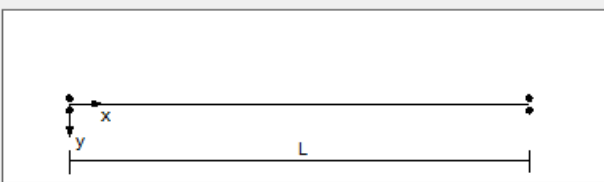
Last & System



Last in z-Richtung:

My,d links [kNm]:  qz,d [kN/m]:  My,d rechts [kNm]:

Länge L [m]:  Nd [kN]:



Last in y-Richtung:

Mz,d links [kNm]:  qy,d  Mz,d rechts [kNm]:

### Last in z-Richtung

- *Gleichlast*: Der Ersatzstab wird mit einer Gleichlast  $q_{z,d}$  [kN/m] belastet.
- *Einzellast*: Der Ersatzstab wird mit einer Einzellast  $F_{z,d}$  [kN/m] belastet. Der Lasthebelarm  $z_p$  wird bei dieser Auswahl immer gleich Null gesetzt.

### My,d links, My,d rechts

Stabendmomente  $M_{y,d}$  [kNm] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$ . Die Stabendmomente sind erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

### qz,d oder Fz,d

Streckenlast  $q_{z,d}$  [kN/m] oder Einzellast  $F_{z,d}$  [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$ .

### Nd

Normalkraft  $N_d$  [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  (Druck negativ). Es können nur Druckkräfte berücksichtigt werden. Die Normalkraft ist erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

### Länge L

Ersatzstablänge [m].

### Last in y-Richtung

- *Gleichlast*: Der Ersatzstab wird mit einer Gleichlast  $q_{y,d}$  [kN/m] belastet.
- *Einzellast*: Der Ersatzstab wird mit einer Einzellast  $F_{y,d}$  [kN/m] belastet.

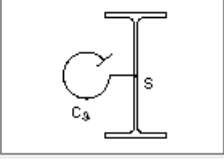
### Mz,d links, Mz,d rechts

Stabendmomente  $M_{z,d}$  [kNm] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$ . Die Stabendmomente sind erforderlichenfalls nach Theorie 2. Ordnung zu bestimmen.

### qy,d oder Fy,d

Streckenlast  $q_{y,d}$  [kN/m] oder Einzellast  $F_{y,d}$  [kN] inklusive der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$ .

## Biegedrillknickparameter

<b>Berechnungsverfahren</b> 2 - Anhang B Interaktionsbeiwerte: B.2 - verdrehweich Lastangriffspunkt zp Am Obergurt zp [m]: -0,1	<b>Drehbettung</b> Null  C_theta [kNm/m]: 0 <input type="button" value="Bearbeiten..."/>
--	---

### Berechnungsverfahren

- 1 - Anhang A: Ermittlung der Interaktionsbeiwerte  $k_{ij}$  mit dem Verfahren 1 nach EN 1993-1-1, Anhang A.
- 2 - Anhang B: Ermittlung der Interaktionsbeiwerte  $k_{ij}$  mit dem Verfahren 2 nach EN 1993-1-1, Anhang B.

ÖNORM B 1993-1-1:

Es soll Verfahren 2 angewendet werden.

SS EN 1993-1-1:

Es soll Verfahren 1 angewendet werden.

### Interaktionsbeiwerte

Bei Auswahl von Verfahren 2 ist zusätzlich anzugeben, ob das Bauteil gemäß EN 1993-1-1, Abschnitt 6.3.3 (1), verdrehsteif oder verdrehweich ist.

- B.1 - verdrehsteif: Die Interaktionsbeiwerte  $k_{ij}$  sind bei verdrehsteifen Bauteilen nach Tabelle B.1 zu ermitteln.
- B.2 - verdrehweich: Die Interaktionsbeiwerte  $k_{ij}$  sind bei verdrehweichen Bauteilen nach Tabelle B.2 zu ermitteln.

### Lastangriffspunkt zp

- Obergurt: Die Last greift am Obergurt an.
- Schubmittelpunkt: Die Last greift am Schubmittelpunkt an.
- Schwerpunkt: Die Last greift am Schwerpunkt an.
- Untergurt: Die Last greift am Untergurt an.
- Benutzerdefiniert: Lastangriffspunkt ist benutzerdefiniert.

### zp

Der Lasthebelarm  $z_p$  wird für den entsprechenden Lastangriffspunkt berechnet.

### Korrekturbeiwert kc

DIN EN 1993-1-1:

- Automatisch: Berechnung entsprechend der Momentenverteilung nach Tab. 6.6.
- Benutzerdefiniert: Beiwert  $0 \leq k_c \leq 1$ , z.B. gemäß Gl. (NA.4).

### Drehbettung

- Benutzerdefiniert: Es wird die vom Benutzer eingegebene Drehfeder  $C_{\theta,k}$  berücksichtigt.
- Berechnen: Die Drehfeder  $C_{\theta,k}$  wird aus den Eingabedaten (siehe Dialog Drehbettung) berechnet. Bei U-Profilen wird die Drehbettung aus der Profilverformung des gestützten Trägers nicht berücksichtigt.
- Null: Es wird keine Drehfeder berücksichtigt.

### Bearbeiten...

Startet den Dialog für die Eingabe der Drehfeder  $C_{\theta,k}$  [kNm/m].

### C.theta

Die Drehfeder  $C_{\theta,k}$  wird durch ein ideales Torsionsflächenmoment 2. Grades  $I_{T,ideell}$  berücksichtigt.

$$I_{T,ideell} = I_T + C_{\theta,k} \cdot L^2 / (\pi^2 \cdot G)$$

Mit  $I_{T,ideell}$  wird dann  $M_{cr}$  wie für Träger ohne Drehbettung berechnet. Diese Näherung ist nur für kleine Drehbettungswerte  $C_{\theta,k}$  anwendbar, z.B. für Drehbettungswerte für Trapezprofile, berechnet nach EN 1993-1-3, Kapitel 10.1.5.2; für größere Werte von  $C_{\theta,k}$  können die mit  $I_{T,ideell}$  berechneten Biegedrillknickmomente auf der unsicheren Seite liegen (siehe Meister).



## Drehbettung

Drehbettung nach EN 1993-1-3, Kapitel 10.1.5.2

Abstützendes Bauteil  
 Trapezblech

Faktor  $k$ , Bild 10.7: 2 Endfeld o. Material: S235-EN

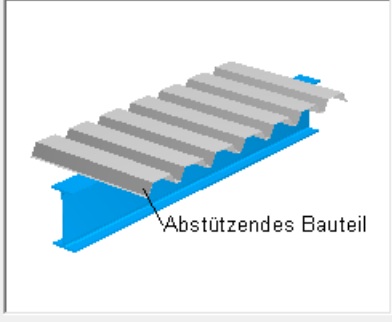
Stützweite  $s$  [m]: 2,5  $f_{yk}$  [N/mm<sup>2</sup>]: 240

$I_{eff}$  [cm<sup>4</sup>/m]: 250 E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]: 210000

Pfettenabstand  $e$  [m]:

Anschlusssteifigkeit  
 $C_{\theta, C, k} = C_{D, A}$  nach Gl. (10.17): 5,2 kNm/m

OK Abbrechen



### Abstützendes Bauteil

- *Trapezblech*
- *Pfetten*: Es wird keine Anschlusssteifigkeit berücksichtigt.

### Faktor $k$ , Bild 10.7

Faktor zur Ermittlung von  $C_{D, C}$  nach EN 1993-1-3, Gl. (10.16):

- 2 Endfeld o.:  $k = 2$ ; Endfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 oben.
- 3 Endfeld u.:  $k = 3$ ; Endfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 unten.
- 4 Innenfeld o.:  $k = 4$ ; Innenfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 oben.
- 6 Innenfeld u.:  $k = 6$ ; Innenfeld und Verdrehung nach EN 1993-1-3, Bild 10.7 unten.

### Stützweite $s$

Stützweite [m] des abstützenden Bauteils.

### $I_{eff}$

Das wirksame Flächenmoment 2. Grades [cm<sup>4</sup>/m] des abstützenden Bauteils.

### Pfettenabstand $e$

Abstand der Pfetten quer zur Tragrichtung [m].

### Material

Material des abstützenden Bauteils.

- *S235-EN, S275-EN, S355-EN, S450-EN*: Baustahl gemäß EN 1993-1-1, Tab.3.1.
- *Stahl*: Anwenderdefinierter Stahl.

### $f_{yk}$

Bei der Materialart *Stahl* ist zusätzlich die charakteristische Streckgrenze entsprechend EN 1993-1-1 einzugeben [N/mm<sup>2</sup>].

### E-Modul

Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>] des abstützenden Bauteils.

### $C_{\theta, C, k} = C_{D, A}$ nach Gl. (10.17)

Anschlusssteifigkeit [kNm/m] für Trapezbleche nach EN 1993-1-3, Gl. (10.17).

# Grenzzustände der Tragfähigkeit

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.4.3, berücksichtigt:

- Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen darf entweder nach Gleichung (6.10) oder mit der ungünstigeren der beiden Gleichungen (6.10a) und (6.10b) kombiniert werden.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Der Beiwert  $\xi$  ergibt sich nach Tabelle A.1.2(B) zu  $\xi = 0,85$ .

DIN EN 1990, ÖNORM B 1990:

Die Kombination erfolgt nach Gleichung (6.10).

SS EN 1990:

Die Gleichungen (6.10a) und (6.10b) sind anzuwenden. Der Beiwert  $\xi$  wird zu  $\xi = 0,89$  gesetzt.

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Für die Kombination kommt im Programm  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  zur Anwendung.

ÖNORM B 1990-1:

$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  ist maßgebend.

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

Zusätzlich steht für die Ergebnisse eines Stabilitätsnachweises nach Theorie 2. Ordnung eine

- Besondere Kombination

$$F_{d,1}; \dots; F_{d,n}$$

zur Verfügung, in der die Bemessungswerte der Einwirkungen ( $F_d$ ) exklusiv überlagert werden.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung

Die Berechnung nach der Theorie 2. Ordnung gemäß Kapitel 5.2.2 erfolgt im Rahmen der Schnittkraftermittlung. Dazu sind mit Hilfe von *Lastgruppen* geeignete Lastfälle aus maßgeblichen Beanspruchungen zusammenzustellen (s. auch Funktion *Kombinationen* im Einwirkungsdialog).

Da die Teilsicherheitsbeiwerte bereits bei der Schnittkraftermittlung zu berücksichtigen sind, müssen die Einwirkungen dort mit ihrem jeweiligen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G$  bzw.  $\gamma_Q$  sowie mit  $\gamma_{M0}$  gemäß Kapitel 6.1(1) multipliziert werden.

DIN EN 1993-1-1:

Anstelle von  $\gamma_{M0}$  ist der Wert  $\gamma_{M1} = 1,1$  anzusetzen.

Im Nachweis werden die nach Theorie 2. Ordnung berechneten Lastfälle einer Einwirkung  $F_d$  zugeordnet und in der *Besonderen Kombination* als exklusive Auswahl überlagert. Die Ergebnisse werden ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten gegen die charakteristischen Größen der Beanspruchbarkeiten geprüft.

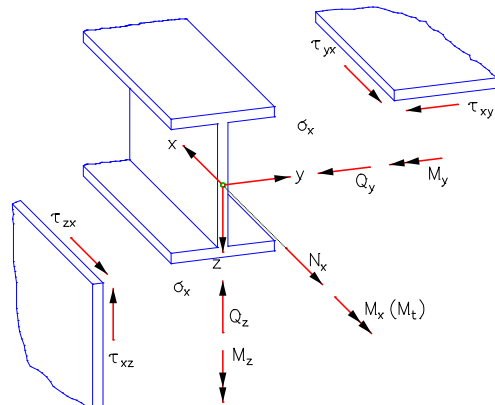
## Charakteristische Werte

Für Querschnitte aus Baustahl *S235-EN* bis *S450-EN* wird die Streckgrenze gemäß EN 1993-1-1, Tabelle 3.1, für Erzeugnisdicken  $t \leq 40$  mm angenommen. Wenn davon abweichende Größen zur Anwendung kommen sollen, ist die allgemeine Materialart *Stahl* zu wählen, die eine freie Definition aller Eigenschaften zulässt.

## Spannungsermittlung

### Koordinatensysteme

Die folgende Abbildung zeigt am Beispiel eines Stabes mit I-Querschnitt die Definition der Koordinatensysteme für Schnittgrößen, Beanspruchungen und Spannungen. Der Querschnittsrand ist als geschlossenes Polygon definiert.



Die Längskraft  $N_x$  verläuft durch den Schwerpunkt, die Querkräfte  $Q_y$  und  $Q_z$  durch den Schubmittelpunkt des Querschnitts, der hier mit dem Schwerpunkt zusammenfällt. Die Vektoren der Momente  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  und Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  verlaufen parallel zu den Koordinatenachsen.

### Längsspannungen

Die erforderlichen Querschnittswerte zur Ermittlung der Längsspannungen aus Längskraft und Biegung werden elementar mit der Umformungsmethode aus den Koordinaten des Polygonzugs ermittelt. Sie sind als Bruttoquerschnittswerte im Sinne der Vorschrift 6.2.2.1 der Norm anzusehen.

Im Einzelnen sind dies:

- $y_s, z_s$       Schwerpunktkoordinaten.
- $A$               Fläche des Querschnitts.
- $I_y, I_z$         Trägheitsmomente bezüglich der Koordinatenachsen.
- $I_{yz}$           Deviationsmoment.
- $I_1, I_2$         Trägheitsmomente bezüglich der Hauptachsen.
- $\varphi$              Verdrehungswinkel der Hauptachsen.
- $W_y, W_z$       Widerstandsmomente zur Berechnung der extremalen Längsspannungen aus  $M_y$ ,  $M_z$ .

Bei der Untersuchung eines Querschnitts werden die Spannungen an den automatisch festgelegten Berechnungspunkten ermittelt. Die Längsspannung  $\sigma$  für einen Punkt  $(y,z)$  des Querschnitts ergibt sich durch

$$\sigma(y,z) = N_x \frac{1}{A} + M_y \frac{\Delta z I_z - \Delta y I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} + M_z \frac{\Delta y I_y - \Delta z I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}$$

mit  $\Delta y = y - y_s$  und  $\Delta z = z - z_s$ .

## Schubspannungen

### Querkraft

Für die Beanspruchung infolge Querkraft wird die Differentialgleichung der sogenannten Schubverwölbung  $\omega_\tau$

$$\frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial z^2} = -\frac{Q_z z}{G I_y} \quad \text{bzw.} \quad -\frac{Q_y y}{G I_z}$$

mit Hilfe der Rand-Element-Methode numerisch gelöst. Daraus werden folgende Schubkenngrößen bestimmt:

$\tau_{Qy,1}$  Schubspannung für die Querkraft  $Q_y = 1$ .

$\tau_{Qz,1}$  Schubspannung für die Querkraft  $Q_z = 1$ .

$W_{qy}, W_{qz}$  Flächenwerte zur Berechnung der extremalen Schubspannungen aus  $Q_y$  und  $Q_z$  mit  $\tau_{Qy} = Q_y / W_{qy}$  und  $\tau_{Qz} = Q_z / W_{qz}$ .

Sofern im Querschnittsdialog gewählt, werden die Schubspannungen über die Querschnittsbreite gemittelt.

### Torsion

Für die Beanspruchung infolge St. Venant'scher Torsion ist die Differentialgleichung der Einheitsverwölbung  $\omega$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} = 0$$

maßgebend, deren Lösung die folgenden Kenngrößen liefert:

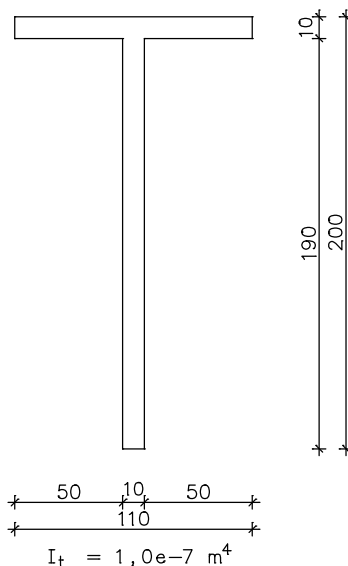
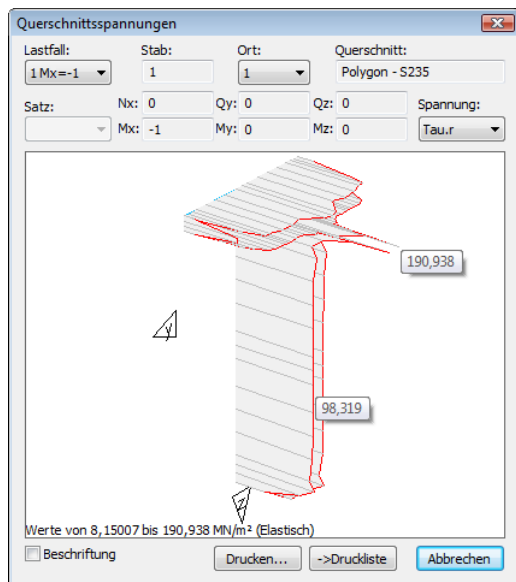
$I_t$  Torsionsträgheitsmoment.

$\tau_{Mx,1}$  Schubspannung für das Torsionsmoment  $M_x = 1$ .

$W_t$  Widerstandsmoment zur Berechnung der extremalen Schubspannung aus  $M_x$ .

Im Ausrundungsbereich von Walzprofilen oder in stumpfen Ecken von geschweißten Profilen ergeben sich danach größere Torsions-Schubspannungen als nach der Theorie dünnwandiger Profile. Im Querschnittsdialog lassen sich durch Angabe der maximalen Blechdicke (offene Profile) oder des Torsionswiderstandsmoments (Kastenprofile) die Spannungen optional auf den Maximalwert nach der Theorie dünnwandiger Profile begrenzen.

Nachfolgend ist beispielhaft der Spannungsverlauf für  $M_x = 1$  dargestellt (Funktion "Querschnittsspannungen"):



Der im Beispiel für den Steg numerisch ermittelte Wert entspricht der theoretischen Schubspannung für offene dünnwandige Querschnitte  $\tau = M_x \cdot t / I_t = 100 \text{ MN/m}^2$ . Der Spitzenwert von 190  $\text{MN/m}^2$  resultiert aus einer Singularität in den stumpfen Ecken.

Alle Einheitsschubspannungen werden an diskreten Punkten auf den Querschnittsrändern berechnet. Die Diskretisierung wird vom Programm automatisch vorgenommen. Die Einheitsschubspannungen sind Randspannungen, die längs der betrachteten Querschnittskante verlaufen. Ihr Vorzeichen orientiert sich an der Richtung der Kante. Die aus Querkraft und Torsion resultierende Schubspannung  $\tau$  lautet dann:

$$\tau = Q_y \cdot \tau_{Qy,1} + Q_z \cdot \tau_{Qz,1} + M_x \cdot \tau_{Mx,1}$$

## Querschnittsklassifizierung

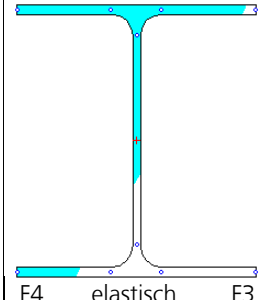
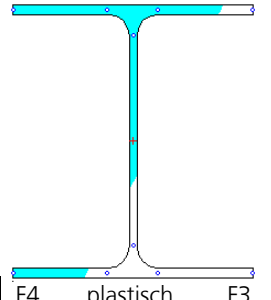
Die Klassifizierung erfolgt für Listenprofile und parametrisierte Stahlbauquerschnitte nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2. Dazu wird die Spannungsverteilung für die gleichzeitige Beanspruchung aus zweiachsiger Biegung mit Normalkraft in der Mittellinie der Querschnittsteile betrachtet. T-Profile werden wie einseitig gestützte Flansche nach Tab. 5.2 behandelt. Benutzerdefinierte Rechteck-, Polygon- und Datenbankquerschnitte werden ohne weitere Untersuchung in Klasse 3 eingestuft.

Ein Querschnitt wird generell durch die ungünstigste Klasse seiner druckbeanspruchten Querschnittsteile klassifiziert. Die in den Kapiteln 5.5.2(11) und 5.5.2(12) sowie 6.2.1(10) und 6.2.2.4(1) zugelassenen Ausnahmen werden im Programm nicht genutzt.

### Beispiel

Querschnitt: HEAA 360 – S355

Beanspruchung:  $N = -400 \text{ kN}$ ,  $M_y = 175 \text{ kNm}$ ,  $M_z = 65 \text{ kNm}$

Dehnungszustand		Steg	F1	F2	F3	F4
		$\epsilon$	0,81	0,81	0,81	0,81
		$\alpha$	0,70	1	0,66	0,78
		$\psi$	-0,45	0,58	-0,15	-0,52
		$c/t$	29	9,88	9,88	9,88
		1: $c/t \leq$	39,95	7,32	13,63	9,35
		2: $c/t \leq$	46,01	8,14	15,14	10,39
		3: $c/t \leq$	65,56	11,73	28,73	14,28
		<b>Klasse</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
			elastisch			plastisch

Unter der gegebenen Beanspruchung wird der Querschnitt wegen der Klassifizierung des Flansches F1 insgesamt in Klasse 3 eingestuft und ist somit nur elastisch nachweisbar.

## Elastische Querschnittstragfähigkeit

Die elastische Querschnittstragfähigkeit wird für alle Querschnitte der Klassen 1 bis 4 untersucht. Querschnitte der Klasse 4 werden nach Benutzerauswahl wie Querschnitte der Klasse 3 behandelt, wenn das  $c/t$ -Verhältnis die mit dem Faktor nach Kapitel 5.5.2(9) erhöhten Grenzwerte für Klasse 3 nicht überschreitet. Anderenfalls erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten nach EN 1993-1-5, Kapitel 4.3, unter Berücksichtigung der Zusatzmomente nach EN 1993-1-1, Gl. (6.4). Die effektiven Querschnittswerte werden unter gleichzeitiger Wirkung von  $N_{Ed}$  und  $M_{Ed}$  ohne Iteration ermittelt.

### Nachweis

Im Nachweis wird die Zulässigkeit der Vergleichsspannung mit dem Fließkriterium nach Gl. (6.1) geprüft:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (6.1)$$

Dabei ist

$\sigma_{x,Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Normalspannung in Längsrichtung am betrachteten Punkt.

$\sigma_{z,Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Normalspannung in Querrichtung am betrachteten Punkt.  $\sigma_{z,Ed} = 0$ .

$\tau_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Schubspannung am betrachteten Punkt.

$f_y$  der Nennwert der Streckgrenze nach Tab. 3.1.

$\gamma_{M0}$  der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten nach Kap. 6.1(1).

Spannungen aus der *Besonderen Kombination* werden gegen den Nennwert der Streckgrenze  $f_y$  geprüft, da der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M0}$  bereits bei der Schnittkraftermittlung berücksichtigt wurde.

## Plastische Querschnittstragfähigkeit

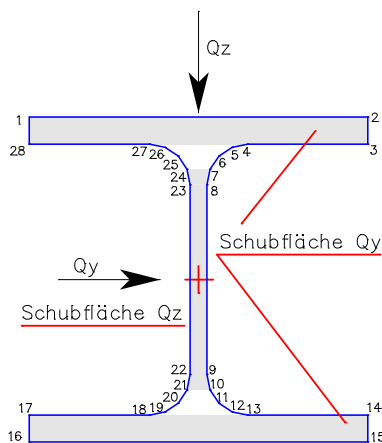
Die plastische Querschnittstragfähigkeit wird gemäß Benutzerauswahl für alle Querschnitte der Klassen 1 und 2 untersucht, sofern für den betrachteten Schnittkraftsatz die elastische Querschnittstragfähigkeit überschritten wird.

### Ermittlung der plastischen Grenzschnittgrößen

Die Untersuchung der plastischen Querschnittstragfähigkeit wird durch Vergleich der aufnehmbaren Schnittgrößen (Beanspruchbarkeit) mit den Beanspruchungsschnittgrößen eines Querschnitts geführt. Hierbei ist sicherzustellen, dass es zu keiner Überschreitung der Grenzschnittgrößen im plastischen Zustand kommt. Die Ermittlung der aufnehmbaren Schnittgrößen erfolgt durch Integration der Spannungen am Querschnittspolygon und Gleichgewichtsiteration unter folgenden Voraussetzungen:

- Linearelastische-idealplastische Spannungs-Dehnungsbeziehung.
- Ebenbleiben des Querschnitts.
- Huber-v.Mises-Fließbedingung.

Die Interaktion aller 6 Schnittgrößen  $N_x, Q_y, Q_z, M_x, M_y, M_z$  ist dabei zu berücksichtigen. Um dies zu gewährleisten, sind vereinfachende Annahmen bezüglich der Schubspannungsverteilung aus Querkraft und Torsion zu treffen, da eine geschlossene Lösung des Interaktionsproblems nicht zur Verfügung steht. Da im Stahlbau i.d.R. dünnwandige Profile vorliegen, können in guter Näherung Teilflächen definiert werden, die für die Abtragung der Schubspannungen herangezogen werden:



Für die Stahlbauprofile der Querschnittsbibliothek sind die Teilflächen vordefiniert und werden in der Querschnittstabelle des Protokolls ausgegeben. Dabei gelten im einzelnen folgende Annahmen:

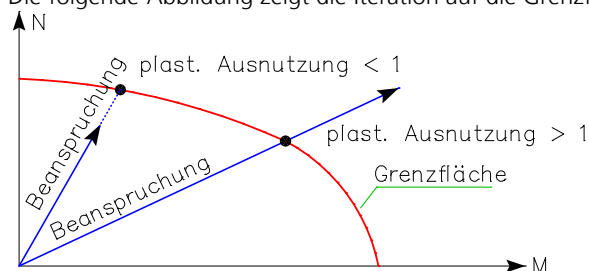
- Die Querkräfte erzeugen in ihrer zugehörigen Teilfläche konstante Schubspannungen  $\tau_{xy} = Q_y/A_{qy}$  bzw.  $\tau_{xz} = Q_z/A_{qz}$ .
- In den Teilflächen und der Restfläche ergeben sich aus dem Torsionsmoment  $M_x$  gebietsweise konstante Schubspannungszustände mit der maximalen Randschubspannung  $\tau_t$  des Gebiets.

Die Bemessungswerte der Festigkeiten werden jeweils gebietsweise um die oben beschriebene Schubspannung abgemindert. Für die Ermittlung der aufnehmbaren Schnittgrößen wird dann die im jeweiligen Gebiet noch verfügbare Festigkeit angesetzt. Die Berechnung der Schubkenngrößen erfolgt bei der Ermittlung der Querschnittswerte wie oben beschrieben.

Der dargestellte Berechnungsansatz liefert stets auf der sicheren Seite liegende Grenzschnittgrößen, wobei im Einzelfall unter Umständen nicht alle Reserven genutzt werden.

Damit der Anwender den Grad der plastischen Ausnutzung eines Querschnittes abschätzen kann, wird der Beanspruchungsvektor mit der Grenzfläche des 6-dimensionalen Schnittgrößenraums zum Schnitt gebracht. Hieraus kann ein Faktor für die plastische Ausnutzung berechnet werden, der bei Unterschreiten der Grenzfläche  $\leq 1$  und bei Überschreitung  $> 1$  ist.

Die folgende Abbildung zeigt die Iteration auf die Grenzfläche am Beispiel einer N-M-Interaktion.



## Nachweis

Im Nachweis wird geprüft, ob die Beanspruchungsschnittgrößen unter Beachtung der Interaktion aller Schnittgrößen die Grenzschnittgrößen im vollplastischen Zustand überschreiten. Die Vereinfachung nach EN 1993-1-1, Kapitel 6.2.10(2), kommt dabei nicht zur Anwendung. Die plastischen Grenzschnittgrößen werden in der *Besonderen Kombination* mit dem Nennwert der Streckgrenze  $f_y$ , in den übrigen Kombinationen mit dem Bemessungswert  $f_y / \gamma_{M0}$  berechnet.

## Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken

Der Nachweis der Tragsicherheit stabilitätsgefährdeter Stabwerke kann nach EN 1993-1-1, Abschnitt 5.2.2 (7b) am Einzelbauteil erfolgen. Im Programm wird der Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken gemäß Kapitel 6.3 am gabelgelagerten Ersatzstab durchgeführt. Die Stabendschnittgrößen sind aus der Berechnung des Gesamttragwerks unter Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung und globaler Imperfektionen zu ermitteln und auf den Ersatzstab aufzubringen. Als Knicklänge des Einzelbauteils darf die Systemlänge angesetzt werden.

Für den Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken am Ersatzstab gelten die nachfolgenden Voraussetzungen:

- Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt nach der Elastizitätstheorie.
- Der Ersatzstab wird als gerade angenommen.
- Querschnitt und Material sind über die Stablänge konstant.
- Die Querschnittsabmessungen sind klein gegenüber den übrigen Abmessungen.
- Die mathematische Krümmung wird linearisiert.
- Der Einfluss der Schubverformungen auf die Schnittgrößen bleibt unberücksichtigt.
- Die Belastung wird langsam auf ihren Endwert gesteigert und erfährt durch die Systemverformung keine Richtungsabweichung.
- Die Einwirkungen in z-Richtung greifen im Abstand  $z_p$  vom Schubmittelpunkt an.
- Die Einwirkungen in y-Richtung greifen im Schubmittelpunkt an.
- Der Ersatzstab ist beidseitig gabelgelagert.
- Blechbeulen wird nicht erfasst.
- Torsionseinwirkungen werden nicht erfasst.

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken kann für I-, U- und benutzerdefinierte Stahlprofile durchgeführt werden, für andere Querschnitte wird nur der Nachweis gegen Biegeknicken gemäß Kapitel 6.3.1 geführt.

## Berechnung der Beanspruchbarkeit

Zunächst wird für jeden Nachweisort mit den entsprechenden Schnittgrößen eine Querschnittsklassifizierung nach Kapitel 5.5 durchgeführt. Abhängig von der Querschnittsklasse werden nach Tabelle 6.7 die aufnehmbaren Schnittgrößen ermittelt. Bei Querschnitten der Klassen 1 und 2 erfolgt die Ermittlung der plastischen Schnittgrößen durch Integration der Spannungen am Querschnittspolygon, wie oben beschrieben.

Bei Querschnittsklasse 4 werden die Querschnittswerte mit der wirksamen Fläche der druckbeanspruchten Querschnittsteile ermittelt. Kommt es dabei zu einer Verschiebung der Hauptachsen des wirksamen Querschnitts gegenüber dem Bruttoquerschnitt, werden zudem die daraus resultierenden Zusatzmomente ( $\Delta M_{y,Ed}$ ,  $\Delta M_{z,Ed}$ ) ermittelt.

## Berechnung von $N_{cr}$

$N_{cr,y}$  und  $N_{cr,z}$  sind die idealen Verzweigungslasten für Knicken um die y- bzw. z-Achse. Diese werden im Programm nach folgenden Formeln berechnet:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

## Berechnung des idealen Biegedrillknickmomentes $M_{cr}$

Das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$  lässt sich z.B. nach Petersen mit folgender Gleichung ermitteln:

$$M_{cr} = M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left( \sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 \cdot z_p \right)$$

Diese Formel ist nur für doppelsymmetrische I-Profile anwendbar. Zusätzlich gestaltet sich bei allgemeinerem Momentenverlauf die Bestimmung des Momentenbeiwertes  $\zeta$  recht aufwendig. Bei einfachsymmetrischen Profilen ist eine Ermittlung von  $M_{cr}$  in der o.a. Form nicht mehr möglich.

Um bei Bedarf beliebige einfachsymmetrische Profile unter allgemeiner Beanspruchung berechnen zu können, wurde im vorliegenden Programmmodul eine Methode zur direkten Ermittlung von  $M_{cr}$  implementiert.

Die Lösung erfolgt durch Variation des elastischen Potentials  $\Pi$  unter Vernachlässigung der Terme aus der rechnerischen Durchbiegung  $w$ . Für die unbekannt Funktionen  $v$  und  $\varphi$  wird ein mehrgliedriger Reihenansatz gemacht, der die Randbedingungen erfüllt.

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ \left[ G I_x + (r_y - 2 z_m) M_y(x) \eta_{cr} \right] \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + E I_w \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 + E I_z \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + 2 M_y(x) \eta_{cr} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \varphi + q \eta_{cr} z_p \varphi^2 \right\} dx$$

Der geometrisch nichtlineare Anteil aus Einwirkungen in z-Richtung wird durch eine Gleichlast  $q_z$  erfasst. Diese wird so gewählt, dass das gleiche maximale Feldmoment erzeugt wird, wie durch die gegebene Einwirkung.

Das hieraus resultierende Eigenwertproblem liefert den kleinsten positiven Verzweigungslastfaktor  $\eta_{cr}$  und damit das gesuchte Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$ . Dieses wird für jede Nachweisstelle wie folgt berechnet.

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

Das beschriebene Verfahren bietet den Vorteil, dass der Benutzer keine Angaben zum Momentenbeiwert  $\zeta$  machen muss.



# Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.5.3, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

## Begrenzung der Verformungen

Nach EN 1993-1-1, Kapitel 7.2, sollen die vertikalen und horizontalen Verformungen in Abstimmung mit dem Auftraggeber entsprechend EN 1990, Anhang A1.4, begrenzt werden. Nach A.1.4.3(3) ist für diesen Nachweis die quasi-ständige Kombination maßgebend.

ÖNORM B 1990-1, Kapitel 4.2.1:

Unter quasi-ständiger Kombination darf die Durchbiegung unter Berücksichtigung der Langzeitverformung in der Regel 1/250 der Stützweite nicht übersteigen. Für die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Sonderfälle kann eine Begrenzung auf 1/500 der Stützweite unter der häufigen oder der quasi-ständigen Kombination notwendig sein.

SS EN 1993-1-1, §§ 16, 17:

Bei dünnwandigen Konstruktionen darf unter der häufigen Kombination mit reversibler Grenzlast die Verformung 1/200 der Stützweite nicht überschreiten.

Die Einhaltung der vorgenannten Restriktionen kann in der graphischen oder numerischen Verformungsdarstellung geprüft werden. Dazu lassen sich im Abschnitt *Knotendeformationen* des Ergebnisbaums die Verformungen für alle maßgebenden Nachweissituationen abrufen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Das ausführliche Protokoll gibt zusätzlich für jeden Berechnungsort die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen aus.

### Spannungen

$\sigma_x, \sigma_y$  Extremale Normalspannungen aus Biegung und Normalkraft.

$\sigma_{xy}$  Extremale Schubspannungen aus Drillmoment und Schubkraft.

$\tau_{xy}, \tau_{xz}$  Extremale Schubspannungen aus Querkraft und Torsion.

$\sigma_v$  Maximale Vergleichsspannung.

$\sigma_1, \sigma_2$  Extremale Hauptspannungen.

Alle Spannungen werden in [MN/m<sup>2</sup>] ausgegeben.

### Ausnutzungen

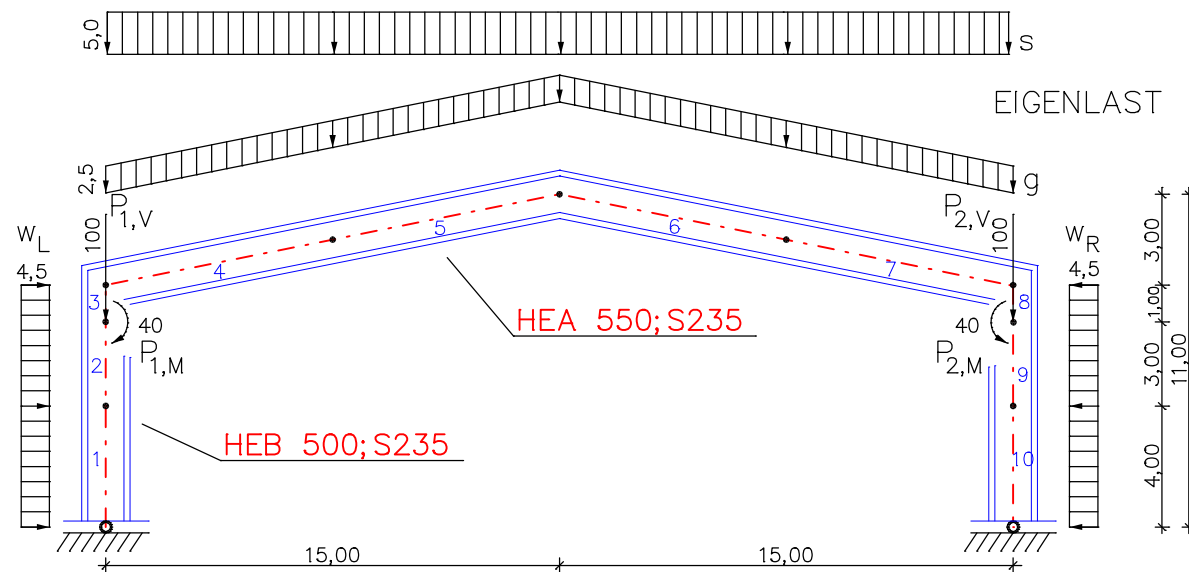
Die Ausnutzung ist definiert als das Verhältnis zwischen der Beanspruchung  $E_d$  und - abhängig von der Benutzerauswahl - der elastischen oder plastischen Beanspruchbarkeit  $R_d$  eines Querschnitts. Im Abschnitt *Spannungen/Stahlnachweise* des Ergebnisbaums stehen folgende Größen zur Verfügung:

- Ausnutzung der Stäbe für jede einzelne Nachweissituation.
- Maximale Ausnutzung der Stäbe aus allen Nachweissituationen.
- Maximale Ausnutzung der Querschnitte aus allen Nachweissituationen.

## Beispiele

### Stahnnachweise am Gesamtsystem

Am unten dargestellten Hallenrahmen werden eine Stabwerksanalyse sowie ein Stabilitätsnachweis nach Theorie 2. Ordnung durchgeführt. Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erfolgt plastisch bei Spannungsüberschreitung in Klassen 1 und 2, anderenfalls elastisch.



Statisches System und Abmessungen

#### Summe der aufgebrachtten Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fz [kN]
1	Eigenlast	0,000	200,250
	Auflagerreaktionen	-0,000	200,250
2	Schnee	0,000	150,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	150,000
3	Wind links	36,000	0,000
	Auflagerreaktionen	36,000	-0,000
4	Wind rechts	-36,000	0,000
	Auflagerreaktionen	-36,000	0,000
5	Kranbahn links	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	0,000	100,000
6	Kranbahn rechts	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	100,000
7	Kranbahn mitte (LF5+LF6)/2	0,000	100,000
	Auflagerreaktionen	-0,000	100,000
11	Th2+VV1 für My min,rechts;SK.1	32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	32,400	600,338
12	Th2+VV2 für My min,links;SK.1	-32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	-32,400	600,338
13	Th2 für My max,mitte;SK.1	0,000	495,338
	Auflagerreaktionen	0,000	495,338
14	Th2+VV1 für Nx min,rechts;SK.1	32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	32,400	600,338
15	Th2+VV2 für Nx min,links;SK.1	-32,400	600,338
	Auflagerreaktionen	-32,400	600,338

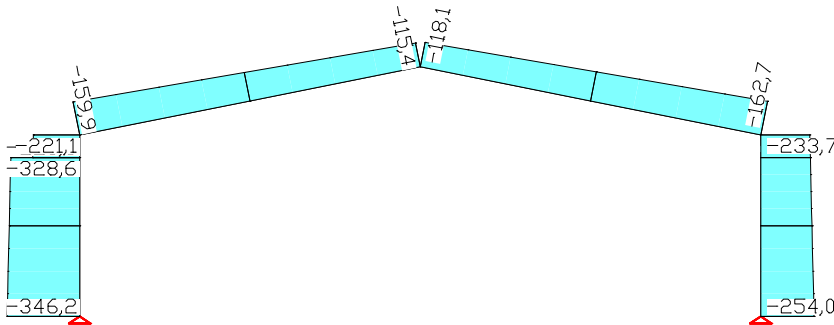
**Materialkennwerte**

Nr.	Material-Art	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m <sup>3</sup> ]	k <sub>bx</sub> [MN/m <sup>3</sup> ]	k <sub>bz</sub> [MN/m <sup>3</sup> ]	b <sub>x</sub> [m]	b <sub>z</sub> [m]
1	S235-EN	210000	1,200e-05	78,500	0,0	0,0	1,00	1,00
2	S235-EN	210000	1,200e-05	78,500	0,0	0,0	1,00	1,00

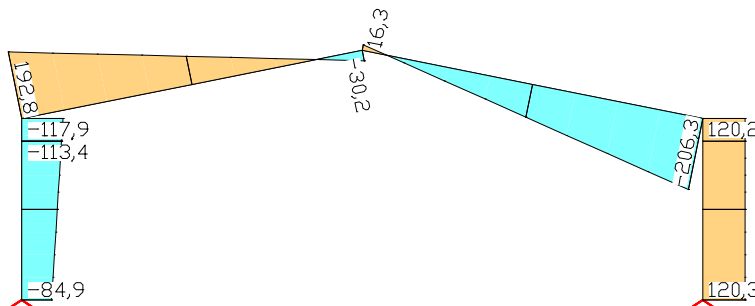
**Querschnittswerte**

Nr. 1	HEB 500	A = 2,390e-02 [m <sup>2</sup> ], I <sub>y</sub> = 1,072e-03 [m <sup>4</sup> ]
Nr. 2	HEA 550	A = 2,120e-02 [m <sup>2</sup> ], I <sub>y</sub> = 1,119e-03 [m <sup>4</sup> ]

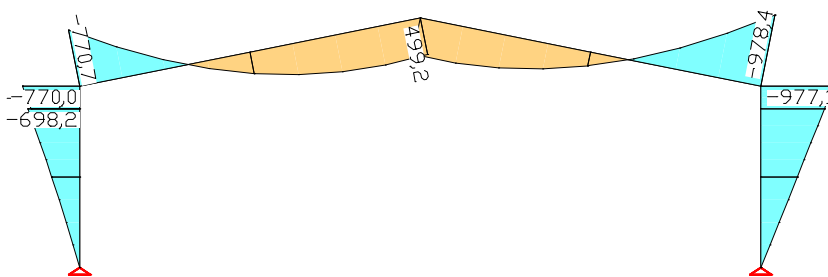
Für die Stabilitätsnachweise nach Theorie 2. Ordnung wurden entsprechend den Kombinationsinformationen zu den jeweiligen Schnittgrößen Lastgruppen zusammengestellt. Aus einem so erzeugten Lastfall 11 unter Berücksichtigung einer Vorverformung von I/200 nach rechts resultieren beispielhaft die folgenden Schnittgrößenverläufe:



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen  $N_x$



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen  $Q_z$



Lastfall 11, Th. 2. Ordnung, Schnittgrößen  $M_y$

Zur Durchführung der Nachweise sind die Einwirkungen zuzuordnen, wie sie im nachfolgenden Protokoll abgedruckt sind. Das Nachweisprogramm führt die erforderlichen Schnittgrößenkombinationen durch und weist die Querschnittstragfähigkeit nach.

**Nachweise nach EN 1993-1-1:2005/AC:2009**

Gemäß Kapitel 6.2.1 der Norm wird für die Klassen 1, 2, 3 und 4 die elastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen. Wenn in den Klassen 1 und 2 die Vergleichsspannung den zulässigen Grenzwert überschreitet, wird die plastische Querschnittstragfähigkeit nachgewiesen.

Für Querschnitte der Klasse 4 erfolgt der Nachweis mit effektiven Querschnittswerten gemäß EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.

Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach EN 1990:2010 kombiniert.

**Der Nachweis erfolgt für die Extremwerte der Einwirkungen.**

**Bezeichnungen im Ausdruck**

Sigma.x, Sigma.v: Längsspannungen, Vergleichsspannungen gemäß Gl. (6.1).  
 Tau.xy, Tau.xz : Schubspannungen aus Querkraft Qz.  
 A : Querschnittsfläche.  
 Iy, Iz, Iyz : Trägheitsmomente.  
 Aqz : Schubfläche für die Abtragung von Qz.  
 Wqz : Widerstandsgröße der ext. Schubspannung aus Qz.  
 Pl. Ausn. : Plastische Ausnutzung, Verhältnis der Beanspruchungs-  
 schnittgrößen zu den vollplastischen Grenzschnittgrößen.  
 y, z : Ort im Querschnittspolygon [m].

**Spannungsermittlung**

Es werden die Längs- und Schubspannungen für polygonal berandete, homogene Querschnitte infolge Längskraft, Biegemoment und Querkraft berechnet.

Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode. Die Berechnungspunkte für alle Spannungen sind Randpunkte des Querschnitts. Die ausgegebenen Schubspannungen

Bei folgenden Querschnitten werden die Schubspannungen aus Querkraft über die Querschnittsbreite gemittelt.

Querschnitt	Querschnitt	Querschnitt
1 HEB 500	2 HEA 550	-

**Querschnittsklassifizierung**

Die Klassifizierung erfolgt für Listenprofile nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2. T-Profile werden wie einseitig gestützte Flansche behandelt. Benutzerdefinierte Querschnitte werden generell in Klasse 3 eingestuft.

**Ermittlung der plastischen Grenzschnittgrößen**

Die plastischen Grenzschnittgrößen werden durch Integration am polygonal berandeten Querschnitt ermittelt. Dabei wird die Interaktion aller Schnittgrößen  $N_x$ ,  $Q_z$  und  $M_y$  berücksichtigt.

Zur Vereinfachung wird von einer in der zugehörigen Schubfläche konstanten Schubspannung  $\tau = Q_z/A_{qz}$  ausgegangen.

Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode am Querschnittsrand.

Als Fließbedingung gilt die Huber-v. Mises-Bedingung nach Gl. (6.1).

**Teilsicherheitsbeiwerte für Baustahl**

	gamma.M0
Ständige und vorüberg. Komb.	1,00
Außergew. Kombination	1,00
Besondere Kombination	1,00

**Charakteristische Materialkennwerte**

Streckgrenzen für Baustahl nach EN 1993-1-1, Tab. 3.1, für  $t \leq 40$  mm [MN/m<sup>2</sup>].  
 Grenzspannungen gemäß Gl. (6.19) und Gl. (6.42).

Material	fyk	Ständige K.		Außergew. K.		Besondere K.	
		Sigma.Rd	Tau.Rd	Sigma.Rd	Tau.Rd	Sigma.Rk	Tau.Rk
S235-EN	235	235,00	135,68	235,00	135,68	235,00	135,68

**Querschnittswerte**

Querschnitt	Material	A [mm <sup>2</sup> ]	Aqz [mm <sup>2</sup> ]	Iy [m <sup>4</sup> ]	Iz [m <sup>4</sup> ]	Iyz [m <sup>4</sup> ]
1 HEB 500	S235-EN	23900	5997	1,0720e-03	1,2620e-04	0,0000e+00
2 HEA 550	S235-EN	21200	5776	1,1190e-03	1,0820e-04	0,0000e+00

**EN 1993-1-1 Einwirkungen****Standard Bemessungsgruppe****G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lastfälle

-----  
 1 Eigenlast

**QN - Nutzlast, Verkehrslast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Fahrzeugverkehr - Kategorie G: Fahrzeuggewicht über 30 kN bis zu 160 kN  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,7 / 0,5 / 0,3

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 5 Kranbahn links
- 6 Kranbahn rechts
- 7 Kranbahn mitte (LF5+LF6)/2

**QS - Schnee- und Eislast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Schneelasten - Orte in CEN-Mitgliedsstaaten niedriger als 1000 m ü. NN  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,5 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 2 Schnee

**QW - Windlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Windlasten  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- 3 Wind links
- 4 Wind rechts

**Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen**

Lastfälle

- 11 Th2+VV1 für My min,rechts;SK.1
- 12 Th2+VV2 für My min,links;SK.1
- 13 Th2 für My max,mitte;SK.1
- 14 Th2+VV1 für Nx min,rechts;SK.1
- 15 Th2+VV2 für Nx min,links;SK.1

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

- G - Eigenlast
- QN - Nutzlast, Verkehrslast
- QS - Schnee- und Eislast
- QW - Windlast

**1. Quasi-ständige Situation**

Endzustand

- G - Eigenlast
- QN - Nutzlast, Verkehrslast
- QS - Schnee- und Eislast
- QW - Windlast

**1. Besondere Situation**

Endzustand

Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen

**Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe**

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Klasse Maßgebende Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.  
 3+ Die Klassen 1 und 2 wurden nicht untersucht, da wegen zulässiger elastischer Ausnutzung kein plastischer Nachweis erforderlich war.  
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung Ed und der Beanspruchbarkeit Rd.  
 SK,BK Ständige und vorüberg. Komb., Besondere Kombination

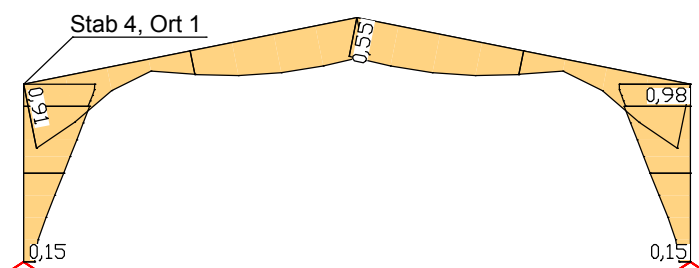
Stab	Qu.	Ort	Komb.	Klasse	Ausnutzung
1	1	1	BK.1	3+	0,15
		2	BK.1	3+	0,20
		3	BK.1	3+	0,31
		4	BK.1	3+	0,43
		5	BK.1	3+	0,55
2	1	1	BK.1	3+	0,55
		2	BK.1	3+	0,64
		3	BK.1	3+	0,73
		4	BK.1	3+	0,82
		5	BK.1	3+	0,92
3	1	1	BK.1	3+	0,89
		2	BK.1	3+	0,92
		3	BK.1	3+	0,95
		4	BK.1	3+	0,98
		5	SK.1	3+	0,98

Stab	Qu.	Ort	Komb.	Klasse	Ausnutzung
4	2	1	BK.1	1	0,91
		2	BK.1	3+	0,66
		3	BK.1	3+	0,33
		4	BK.1	3+	0,17
		5	BK.1	3+	0,33
5	2	1	BK.1	3+	0,33
		2	BK.1	3+	0,47
		3	BK.1	3+	0,54
		4	BK.1	3+	0,57
		5	BK.1	3+	0,55
6	2	1	BK.1	3+	0,55
		2	BK.1	3+	0,57
		3	BK.1	3+	0,54
		4	BK.1	3+	0,47
		5	BK.1	3+	0,33
7	2	1	BK.1	3+	0,33
		2	BK.1	3+	0,17
		3	BK.1	3+	0,33
		4	BK.1	3+	0,66
		5	BK.1	1	0,91
8	1	1	SK.1	3+	0,98
		2	BK.1	3+	0,98
		3	BK.1	3+	0,95
		4	BK.1	3+	0,92
		5	BK.1	3+	0,89
9	1	1	BK.1	3+	0,92
		2	BK.1	3+	0,82
		3	BK.1	3+	0,73
		4	BK.1	3+	0,64
		5	BK.1	3+	0,55
10	1	1	BK.1	3+	0,55
		2	BK.1	3+	0,43
		3	BK.1	3+	0,31
		4	BK.1	3+	0,20
		5	BK.1	3+	0,15

### Max. Querschnittsausnutzung

Klasse Maßgebende Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.  
 3+ Die Klassen 1 und 2 wurden nicht untersucht, da wegen zulässiger elastischer Ausnutzung kein plastischer Nachweis erforderlich war.  
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung  $E_d$  und der Beanspruchbarkeit  $R_d$ .  
 x Abstand vom Stabanfang [m].  
 SK,BK Ständige und vorüberg. Komb., Besondere Kombination

Querschnitt	Material	Stab	Ort	x[m]	Komb.	Klasse	Ausnutzung
1 HEB 500	S235-EN	3	5	1,00	SK.1	3+	0,98
2 HEA 550	S235-EN	4	1	0,00	BK.1	1	0,91



Maßgebende Ausnutzungen

Nachfolgend wird zusätzlich ein Auszug aus dem ausführlichen Protokoll für Stab 4 abgedruckt. Daraus wird ersichtlich, dass an diesem Ort die elastische Querschnittstragfähigkeit überschritten und deshalb der plastische Nachweis notwendig wurde.

### Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Klasse Querschnittsklasse nach EN 1993-1-1, Tab. 5.2.  
 3+ Die Klassen 1 und 2 wurden nicht untersucht, da wegen zulässiger elastischer Ausnutzung kein plastischer Nachweis erforderlich war.  
 S, F, W Querschnittsteil bei Listenprofilen: Steg, Flansch, Winkel.  
 A.eff, I.eff Effektive Querschnittswerte Klasse 4 gemäß EN 1993-1-5, Kapitel 4.3.  
 e.z Verschiebung des Schwerpunkts von A.eff gegen den Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts zur Bestimmung des Zusatzmoments nach Gl. (6.4).  
 Ausnutzung Verhältnis der Beanspruchung  $E_d$  und der Beanspruchbarkeit  $R_d$ .  
 x Abstand vom Stabanfang [m].

### Stab 4

#### Ort 1

Stab 4:  $x = 0,00$  m (Stablänge 7,65 m)  
 Querschnitt 2: HEA 550, S235-EN,  $f_{yk} = 235$  MN/m<sup>2</sup>,  $A = 21200$  mm<sup>2</sup>  
 Steg :  $c = 438,0$  mm,  $t = 12,5$  mm,  $c/t = 35,04$   
 Flansch:  $c = 116,7$  mm,  $t = 24,0$  mm,  $c/t = 4,86$

1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1)

	Nx [kN]	Qz [kN]	My [kNm]	Klasse				
				S	F	F	F	F
Nx-	-161,93	205,36	-948,10	1	1	1	1	1
Nx+	-56,82	75,44	-327,35	3	3	3	3	3
Qz-	-68,81	64,27	-180,96	3	3	3	3	3
Qz+	-161,93	205,36	-948,10	1	1	1	1	1
My-	-161,93	205,36	-948,10	1	1	1	1	1
My+	-68,81	64,27	-180,96	3	3	3	3	3

1. Besondere Kombination (BK.1)

	Nx [kN]	Qz [kN]	My [kNm]	Klasse				
				S	F	F	F	F
Nx-	-162,73	206,31	-978,36	1	1	1	1	1
Nx+	-152,16	201,39	-886,46	3	3	3	3	3
Qz-	-159,95	192,81	-770,75	3	3	3	3	3
Qz+	-162,73	206,31	-978,36	1	1	1	1	1
My-	-162,73	206,31	-978,36	1	1	1	1	1
My+	-159,95	192,81	-770,75	3	3	3	3	3

Normalspannungen [MN/m²]

Min. Sigma.x	: -243,74	Klasse	: 1
Sigma.x(Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,Nx-
Sigma.x(My)	: -236,07	Qu.punkt y [m]	: 0,150
		z [m]	: 0,270

Max. Sigma.x	: 228,39	Klasse	: 1
Sigma.x(Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,Nx-
Sigma.x(My)	: 236,07	Qu.punkt y [m]	: -0,150
		z [m]	: -0,270

Schubspannungen [MN/m²]

Ext. Tau.xy	: -5,53	Klasse	: 1
Tau.xy(Qz)	: -5,53	Situation	: BK.1,Nx-
		Qu.punkt y [m]	: -0,033
		z [m]	: 0,246

Ext. Tau.xz	: 34,05	Klasse	: 1
Tau.xz(Qz)	: 34,05	Situation	: BK.1,Nx-
		Qu.punkt y [m]	: 0,006
		z [m]	: -0,000

Vergleichsspannung [MN/m²]

Max. Sigma.v	: 243,90	Klasse	: 1
Sigma.x(Nx)	: -7,68	Situation	: BK.1,Nx-
Sigma.x(My)	: -236,07	Qu.punkt y [m]	: -0,045
Tau.xy(Qz)	: -5,13	z [m]	: 0,270
Tau.xz(Qz)	: 0,00		

Nachweis der Beanspruchbarkeit und der Ausnutzung

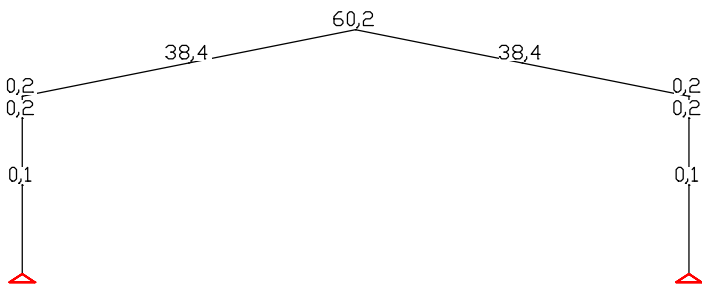
Elastisch	Ed	Rd	Ausnutzung
Nx [kN]	: -162,73	-156,79	: 1,04 > 1
Qz [kN]	: 206,31	198,78	Klasse : 1
My [kNm]	: -978,36	-942,65	Situation : BK.1,Nx-

Plastisch	Ed	Rd	Ausnutzung
Nx [kN]	: -162,73	-178,02	: 0,91
Qz [kN]	: 206,31	225,70	Klasse : 1
My [kNm]	: -978,36	-1070,30	Situation : BK.1,Nx-

Die plastische Ausnutzung ist maßgebend.

Begrenzung der Verformung

Die maximalen Durchbiegungen  $uz_{max}$  unter der quasi-ständigen Situation sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die größte Durchbiegung in Rahmenmitte beträgt  $1/498$  der Stützweite.

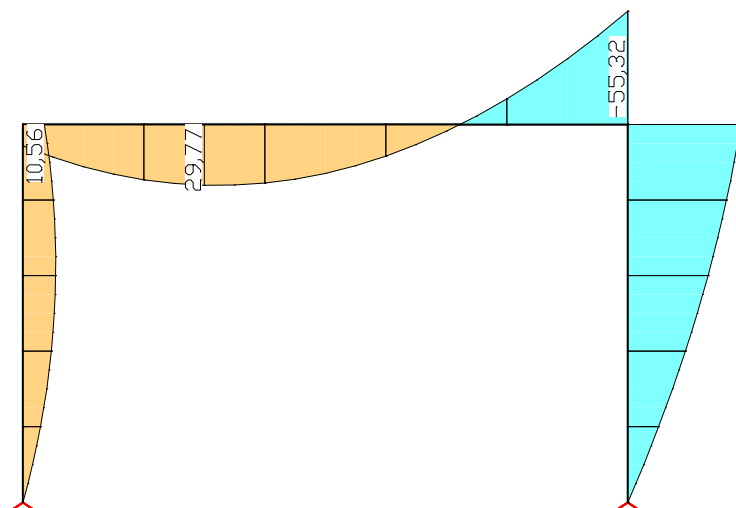
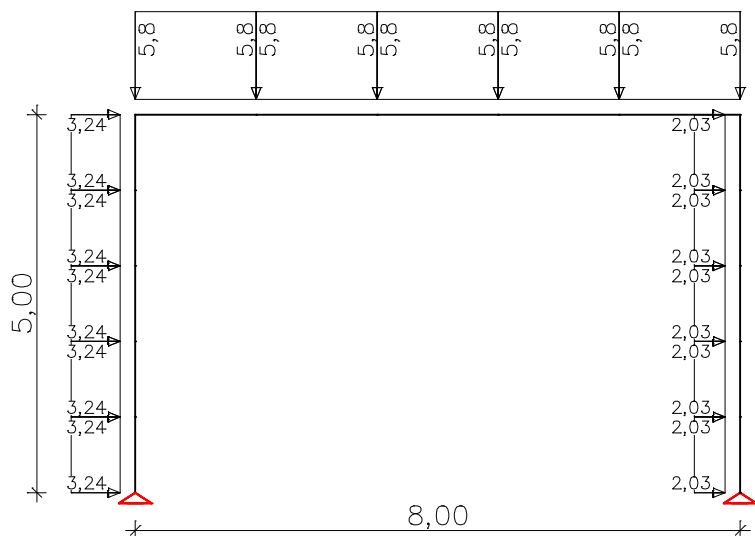


Maximale Durchbiegungen  $uz_{max}$  unter der 1. quasi-ständigen Situation [mm]



## Biegedrillknicknachweis Zweigelenrahmen

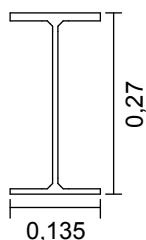
Die Eingangswerte entsprechen dem Beispiel 2b Seite 79 aus dem Aufsatz von W. Martin (1996).



### Protokollausdruck:

#### Biegedrillknicknachweis nach EN 1993-1-1:2010-12

#### Querschnitt: IPE 270



$h = 270,0 \text{ mm}$   
 $b = 135,0 \text{ mm}$   
 $s = 6,6 \text{ mm}$   
 $t = 10,2 \text{ mm}$   
 $r = 15,0 \text{ mm}$

$A = 45,9 \text{ cm}^2$

$I_T = 16,0 \text{ cm}^4$

$i_y = 11,23 \text{ cm}$

$I_y = 5790,0 \text{ cm}^4$

$I_{\omega} = 70580 \text{ cm}^6$

$i_z = 3,02 \text{ cm}$

$I_z = 420,0 \text{ cm}^4$

$i_p = 11,63 \text{ cm}$

#### Material: S235-EN

$f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$

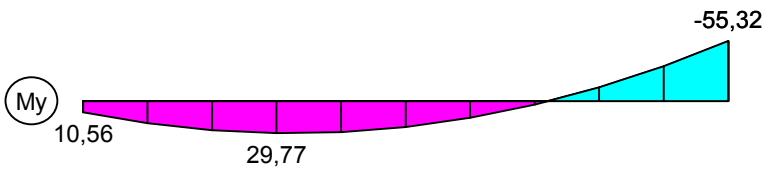
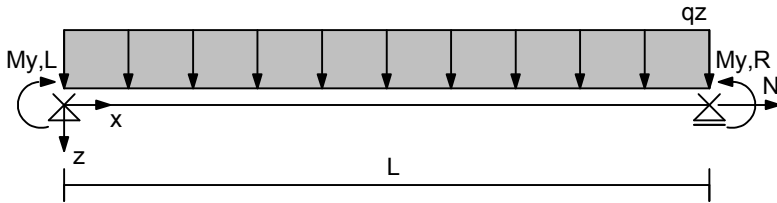
E-Modul = 210000 N/mm<sup>2</sup>

G-Modul = 81000 N/mm<sup>2</sup>

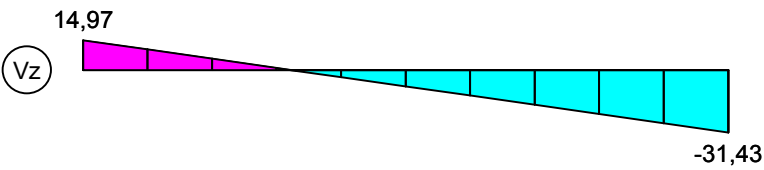
$\gamma_{M1} = 1,00$

**Einwirkungen in z-Richtung**

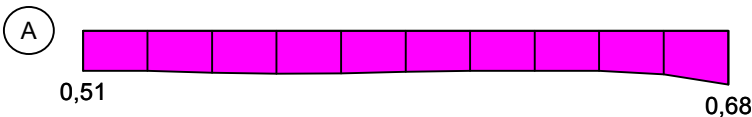
L = 8,00 m  $N_d = 0,00$  kN  $q_{z,d} = 5,80$  kN/m  
 $M_{y,d,links} = 10,56$  kNm  $M_{y,d,rechts} = -55,32$  kNm  
 Lastangriffspunkt Schubmittelpunkt  $\Rightarrow z_p = 0,00$  cm  
 Die Stabenden sind gabelgelagert.



Max  $M_{y,d} = 29,77$  kNm, Min  $M_{y,d} = -55,32$  kNm



Max  $V_{z,d} = 14,97$  kN, Min  $V_{z,d} = -31,43$  kN



Maximale Ausnutzung = 0,68

**Ideale Verzweigungslast  $N_{cr,y}$  für Knicken um die y-Achse**

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

E = 210000 N/mm<sup>2</sup>  $I_y = 5790,0$  cm<sup>4</sup>  $L_{cr,y} = 8,00$  m

$N_{cr,y} = 1875,07$  kN

**Ideale Verzweigungslast  $N_{cr,z}$  für Knicken um die z-Achse**

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

E = 210000 N/mm<sup>2</sup>  $I_z = 420,0$  cm<sup>4</sup>  $L_{cr,z} = 8,00$  m

$N_{cr,z} = 136,02$  kN

**Verzweigungslastfaktor  $\eta_{cr}$  für das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$**

$\eta_{cr} = 1,97$

---

**Maßgebender Nachweis an der Stelle x = 8,00 m**


---

**Bemessungswerte der Einwirkungen**

$$N_{Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = -31,43 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -55,32 \text{ kNm}$$

$$V_{y,Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

⇒ Querschnittsklasse 1

**Plastische Beanspruchbarkeiten nach Tabelle 6.7**

$$N_{Rk} = \pm 1078,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = \pm 113,74 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = \pm 22,78 \text{ kNm}$$

**Ideales Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$** 

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

$$M_{cr} = 1,97 \cdot (-55,32) = -108,73 \text{ kNm}$$

**Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2.3**

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \leq 1 \quad (6.57)$$

$$\Theta_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

mit  $\bar{\lambda}_{LT} = 1,02$

$$\beta = 0,75$$

$$M_{cr} = -108,73 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT0} = 0,40$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$W_{pl,y} = -4,8400e-4 \text{ m}^3$$

nach Tabellen 6.3 und 6.5

nach Tabelle 6.7

$$\chi_{LT} = 0,69$$

Modifikation nach Gleichung (6.58)

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1 \quad (6.58)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1$$

$$f = 0,96$$

$$k_c = 0,91$$

nach Tabelle 6.6

$$\chi_{LT,mod} = 0,71$$

**Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2**

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.54)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.55)$$

mit  $M_{Ed} = -55,32 \text{ kNm}$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,71$$

$$W_y = 4,8400e-4 \text{ m}^3$$

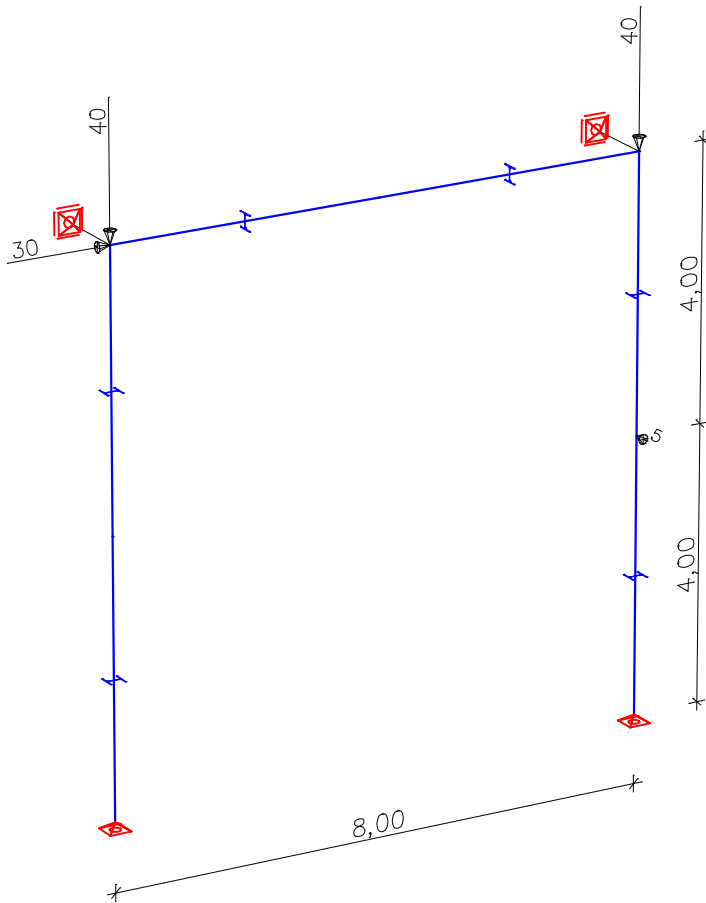
$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{Ed} / M_{b,Rd} = 0,68 \leq 1$$

**Nachweis erfüllt !**

## Biegedrillknicknachweis Rahmenstiel mit zweiachsiger Biegung und Normalkraft

Die Eingangswerte entsprechen dem Beispiel 7c (Nachweis mit zugehörigen Schnittgrößen) Seite 262 aus dem Buch von J. Meister (2002).

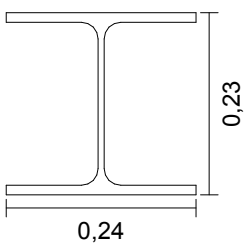


Es wird der rechte Rahmenstiel nachgewiesen.

### Protokollausdruck:

#### Biegedrillknicknachweis nach EN 1993-1-1:2010-12

#### Querschnitt: HEA 240



- $h = 230,0 \text{ mm}$
- $b = 240,0 \text{ mm}$
- $s = 7,5 \text{ mm}$
- $t = 12,0 \text{ mm}$
- $r = 21,0 \text{ mm}$

- $A = 76,8 \text{ cm}^2$
- $I_T = 41,7 \text{ cm}^4$
- $i_y = 10,05 \text{ cm}$

- $I_y = 7760,0 \text{ cm}^4$
- $I_{\omega} = 328500 \text{ cm}^6$
- $i_z = 6,01 \text{ cm}$

- $I_z = 2770,0 \text{ cm}^4$
- $i_p = 11,71 \text{ cm}$

**Material: S235-EN**

$f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$

$E\text{-Modul} = 210000 \text{ N/mm}^2$

$G\text{-Modul} = 81000 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_{M1} = 1,00$

**Einwirkungen in z-Richtung**

$L = 8,00 \text{ m}$

$N_d = -70,00 \text{ kN}$

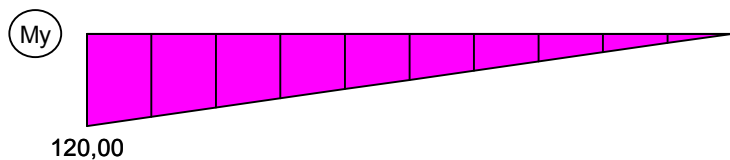
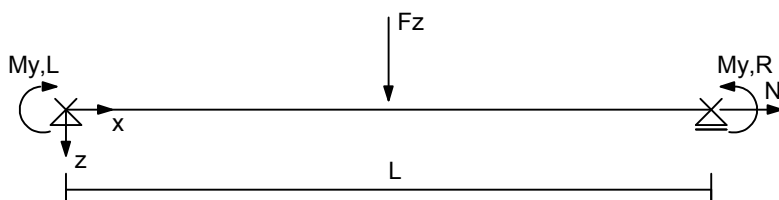
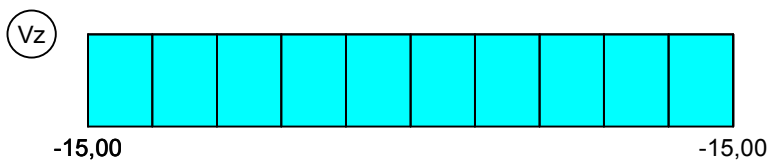
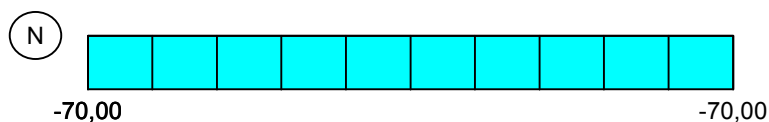
$F_{z,d} = 0,00 \text{ kN}$

$M_{y,d,\text{links}} = 120,00 \text{ kNm}$

$M_{y,d,\text{rechts}} = 0,00 \text{ kNm}$

Lastangriffspunkt Schubmittelpunkt  $\Rightarrow z_p = 0,00 \text{ cm}$ 

Die Stabenden sind gabelgelagert.

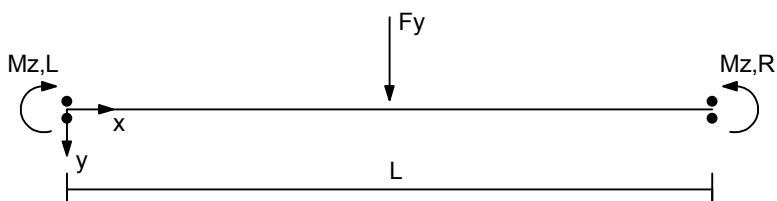
Max  $M_{y,d} = 120,00 \text{ kNm}$ Max  $V_{z,d} = -15,00 \text{ kN}$ Min  $N_{,d} = -70,00 \text{ kN}$ **Einwirkungen in y-Richtung**

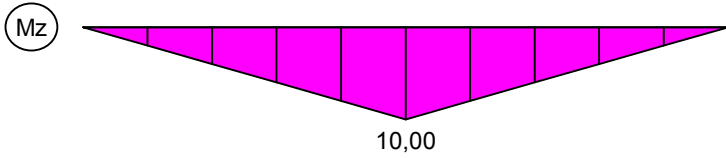
$L = 8,00 \text{ m}$

$F_{y,d} = 5,00 \text{ kN}$

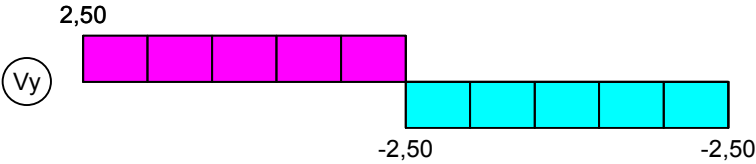
$M_{z,d,\text{links}} = 0,00 \text{ kNm};$

$M_{z,d,\text{rechts}} = 0,00 \text{ kNm}$

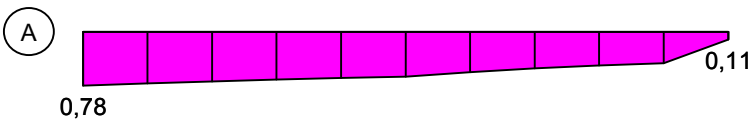




Max  $M_{z,d} = 10,00$  kNm



Max  $V_{y,d} = 2,50$  kN, Min  $V_{y,d} = -2,50$  kN



Maximale Ausnutzung = 0,78

**Ideale Verzweigungslast  $N_{cr,y}$  für Knicken um die y-Achse**

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$E = 210000$  N/mm<sup>2</sup>                       $I_y = 7760,0$  cm<sup>4</sup>                       $L_{cr,y} = 8,00$  m

$N_{cr,y} = 2513,05$  kN

**Ideale Verzweigungslast  $N_{cr,z}$  für Knicken um die z-Achse**

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2}$$

$E = 210000$  N/mm<sup>2</sup>                       $I_z = 2770,0$  cm<sup>4</sup>                       $L_{cr,z} = 8,00$  m

$N_{cr,z} = 897,05$  kN

**Verzweigungslastfaktor  $\eta_{cr}$  für das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$**

$\eta_{cr} = 3,03$

**Maßgebender Nachweis an der Stelle  $x = 0,00$  m**

**Bemessungswerte der Einwirkungen**

$N_{Ed} = -70,00$  kN  
 $V_{z,Ed} = -15,00$  kN                       $V_{y,Ed} = 2,50$  kN  
 $M_{y,Ed} = 120,00$  kNm                       $M_{z,Ed} = 0,00$  kNm

⇒ Querschnittsklasse 1

**Plastische Beanspruchbarkeiten nach Tabelle 6.7**

$N_{Rk} = \pm 1804,80$  kN  
 $M_{y,Rk} = \pm 174,99$  kNm                       $M_{z,Rk} = \pm 82,65$  kNm

**Abminderungsbeiwerte für Biegeknicken nach Kapitel 6.3.1**

$$\chi = \frac{1}{\Theta + \sqrt{\Theta^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (6.49)$$

$$\Theta = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

mit  $\bar{\lambda}_y = 0,85$                        $\bar{\lambda}_z = 1,42$   
 $\alpha_y = 0,34$                                $\alpha_z = 0,49$                       nach Tabellen 6.1 und 6.2  
 $N_{cr,y} = 2513,05 \text{ kN}$                $N_{cr,z} = 897,05 \text{ kN}$

$$\chi_y = 0,69$$

$$\chi_z = 0,34$$

**Nachweis gegen Biegeknicken nach Kapitel 6.3.1**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.46)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.47)$$

mit  $N_{Ed} = -70,00 \text{ kN}$                        $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$   
 $A = 76,80 \text{ cm}^2$                                $\gamma_{M1} = 1,00$   
 $\chi_y = 0,69$                                        $\chi_z = 0,34$

$$N_{Ed} / N_{b,y,Rd} = 0,06 \leq 1$$

$$N_{Ed} / N_{b,z,Rd} = 0,11 \leq 1$$

**Nachweis erfüllt !****Ideales Biegedrillknickmoment  $M_{cr}$** 

$$M_{cr} = \eta_{cr} \cdot M_{y,d}$$

$$M_{cr} = 3,03 \cdot 120,00 = 363,60 \text{ kNm}$$

**Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2.3**

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \leq 1 \quad (6.57)$$

$$\Theta_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

mit  $\bar{\lambda}_{LT} = 0,69$                                $\bar{\lambda}_{LT0} = 0,40$   
 $\beta = 0,75$                                        $\alpha_{LT} = 0,34$                       nach Tabellen 6.3 und 6.5  
 $M_{cr} = 363,60 \text{ kNm}$                        $W_{pl,y} = 7,4462e-4 \text{ m}^3$               nach Tabelle 6.7

$$\chi_{LT} = 0,87$$

Modifikation nach Gleichung (6.58)

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1 \quad (6.58)$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1$$

$f = 0,88$

$k_c = 0,75$

nach Tabelle 6.6

$\chi_{LT,mod} = 0,99$

**Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.2**

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (6.54)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.55)$$

mit  $M_{Ed} = 120,00 \text{ kNm}$        $W_y = 7,4462e-4 \text{ m}^3$   
 $\gamma_{M1} = 1,00$        $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$   
 $\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,99$

$M_{Ed} / M_{b,Rd} = 0,69 \leq 1$

**Nachweis erfüllt !****Interaktionsfaktoren nach Anhang B**

Äquivalente Momentenbeiwerte nach Tabelle B.3

$\psi_y = 0,00$

$\psi_z = 0,00$

$\alpha_{h,z} = 0,00$

$C_{my} = 0,60$

$C_{mz} = 0,90$

$C_{mLT} = 0,60$

Interaktionsfaktoren nach Tabelle B.1 für verdrehsteife Bauteile

Für I-Profile unter Druck und einachsiger Biegung  $M_{y,Ed}$  darf  $k_{zy} = 0$  angenommen werden

$k_{yy} = 0,62$

$k_{yz} = 0,63$

$k_{zy} = 0,00$

$k_{zz} = 1,04$

**Nachweis gegen Biegedrillknicken nach Kapitel 6.3.3**

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.62)$$

mit  $N_{Ed} = -70,00 \text{ kN}$        $M_{y,Ed} = 120,00 \text{ kNm}$        $M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$   
 $N_{Rk} = -1804,80 \text{ kN}$        $\Delta M_{y,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$        $\Delta M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$   
 $\chi_y = 0,69$        $M_{y,Rk} = 174,99 \text{ kNm}$        $M_{z,Rk} = 82,65 \text{ kNm}$   
 $\chi_z = 0,34$        $k_{yy} = 0,62$        $k_{yz} = 0,63$   
 $\gamma_{M1} = 1,00$        $k_{zy} = 0,00$        $k_{zz} = 1,04$   
 $\chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 0,99$

$0,06 + 0,43 + 0,00 = 0,49 \leq 1 \quad (6.61)$

$0,11 + 0,00 + 0,00 = 0,11 \leq 1 \quad (6.62)$

**Nachweis erfüllt !**



## Literaturhinweise

DIN EN 1990/NA:2010/A1:2012-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.

DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2015.

EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1991-1-1:2002

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.  
Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2002.

EN 1993-1-1:2005/A1:2014

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2014.

EN 1993-1-3:2006/AC:2009

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2009.

EN 1993-1-5:2006/AC:2009

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2009.

Gardner, L.; Nethercot, D.

Designers' Guide to EN 1993-1-1 –  
Eurocode 3: Design of Steel Structures – General Rules and Rules for Buildings.  
Thomas Telford Publishing, London 2005.

Johannsson, J.; Marquoi, R.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Beg, D.

Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-5 "Plated Structural Elements".  
JRC – ECSS Joint Report.  
First Edition, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 2007.

Martin, W.

ζ - Werte für den Biegedrillknicknachweis von I-Profilen.  
Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 1, S. 69-83.  
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Leipzig 1996.

Meister, J.

Nachweispraxis Biegeknicken und Biegedrillknicknachweis.  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2002.

ÖNORM B 1990-1:2004-05

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 Anhang A1:2003.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2004.

ÖNORM B 1993-1-1:2007-02

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln.  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-1-1.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2007.

Petersen, C.

Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.  
Vieweg Verlag, Braunschweig 1980.

Roik, K.

Vorlesungen über Stahlbau.  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1978.

Simoes da Silva, Luis; Simoes, Rui; Gervasio, Helena

Design of Steel Structures.  
Herausgeber: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.  
1. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2010.

SS EN 1990:2011-04

Anwendung der SS EN 1990.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.

SS EN 1993-1-1:2011-04

Anwendung der SS EN 1993-1-1.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.

# EN 1995-1-1 Holznachweise

## Grundlagen

Die Holznachweise nach EN 1995-1-1 (Eurocode 5) sind anwendbar für Hoch- und Ingenieurbauwerke zur Bemessung unter Normaltemperatur und im Brandfall mit Berücksichtigung der folgenden Normen:

- EN 1995-1-1:2014 und 1995-1-2:2010 (Basisdokument)
- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 und 1995-1-2/NA:2010-12 (Deutschland)
- ÖNORM EN 1995-1-1/NA:2015-06 und 1995-1-2/NA:2011-09 (Österreich)
- SS EN 1995-1-1/NA:2011-04 und 1995-1-2/NA:2011-04 (Schweden)

Die Auswahl der gewünschten Vorschrift erfolgt im Dialog *Einstellungen* des Berechnungsmenüs. Bei der Materialauswahl stehen folgende Alternativen zur Verfügung:

- C14 bis C50 für Nadelholz nach EN 338:2009, Tabelle 1
- D18 bis D70 für Laubholz nach EN 338:2009, Tabelle 1
- GL20h bis GL32h für homogenes Brettschichtholz nach EN 14080:2013, Tabelle 5
- GL20c bis GL32c für kombiniertes Brettschichtholz nach EN 14080:2013, Tabelle 4
- In Deutschland gelten für Brettschichtholz die Anwendungsregeln der DIN 20000-3:2015

Die Nachweise erfolgen im Nachlauf zur statischen Berechnung. Dazu sind die berechneten Lastfälle den Einwirkungen nach EN 1991:2002 (Eurocode 1), Teil 1, zuzuordnen. In den gewünschten Nachweissituationen ermittelt das Programm unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte nach EN 1990:2010 (Eurocode 0) automatisch die maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen, und zwar entweder für das Gesamtsystem oder eine Gruppe ausgewählter Elemente. Für jeden Schnittkraftsatz wird automatisch der Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  aus der Nutzungsklasse des Querschnitts und der maßgebenden Lasteinwirkungsdauer ermittelt.

Als Querschnitte können Rechteck- oder Polygonquerschnitte benutzt werden. Stäbe mit der Querschnittsart *Stab* werden nicht nachgewiesen, da für sie die Querschnittsgeometrie nicht bekannt ist.

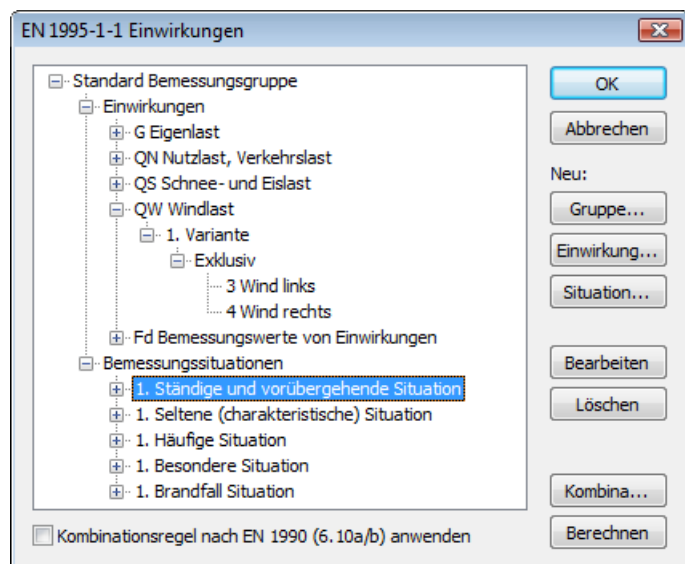
Bei Flächenquerschnitten werden - ohne Nachweis - die extremalen Schnittgrößen für die definierten Einwirkungskombinationen ermittelt und zur graphischen Darstellung in der Datenbasis gespeichert.

In den nachfolgenden Ausführungen werden vorrangig die Vorschriften der EN 1995-1-1 und 1995-1-2 zitiert. Auf die jeweiligen nationalen Festlegungen wird nur dann verwiesen, wenn sie abweichende oder ergänzende Regeln enthalten. Die betreffenden Passagen werden durch senkrechten Strich am Text markiert.

## Eingaben

### Einwirkungen und Bemessungssituationen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen werden aus den Schnittgrößen von Einzellastfällen und Lastfallkombinationen berechnet. Dazu müssen die vorhandenen Lastfälle und Lastfallkombinationen Einwirkungen zugeordnet werden. Diese bilden dann die gewünschten Bemessungssituationen. Der nachfolgende Dialog wird aus der Datenbasis oder den Einstellungen im Berechnungsmenü gestartet.



### **Einwirkung...**

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Einwirkungen:

- Ständige Einwirkungen (G, GE, GH)
- Veränderliche Einwirkungen (QN, QS, QW, QT, QH, QD)
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A)
- Einwirkungen infolge Erdbeben (AE)
- Bemessungswerte von Einwirkungen (Fd)

In diesen Einwirkungen sind die Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Material bereits enthalten, wie z.B. beim Stabilitätsnachweis am Gesamttragwerk nach EN 1995-1-1, Kapitel 2.2.2(1)P. Sie werden exklusiv kombiniert.

### **Gruppe...**

Startet den Dialog zur Eingabe einer neuen Bemessungsgruppe. Optional können für bestimmte Bauteile (Querschnitte) eigene Einwirkungen und Bemessungssituationen definiert werden.

### **Situation...**

Startet den Dialog zur Eingabe neuer Bemessungssituationen.

### **Bearbeiten**

Öffnet den Bearbeitungsdialog der markierten Einwirkung oder Situation.

### **Löschen**

Entfernt die markierte Einwirkung oder Situation.

### **Kombinationen...**

Startet den Dialog mit den ersten 999 zu kombinierenden Lastfall-Varianten der markierten Bemessungssituation mit der Möglichkeit, für ausgewählte Varianten Lastgruppen zu erzeugen. Diese lassen sich z.B. für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung nutzen.

### **Berechnen**

Berechnet die definierten Bemessungssituationen. Die extremalen Ergebnisse (Schnittgrößen, Auflagerreaktionen) sind anschließend für alle Situationen in der Datenbasis abrufbar. Dies ermöglicht eine Beurteilung ohne Aufruf des Nachweismoduls. Alle Ergebnisse werden bei jedem Start des Nachweismoduls mit den dann gültigen Einwirkungen automatisch Neuberechnet und für die nachzuweisenden Elemente in der Datenbasis gespeichert.

### **Kombinationsregel nach EN 1990 (6.10a/b) anwenden**

Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen wird optional nach Gl. (6.10a/b) kombiniert, anderenfalls nach Gl. (6.10).

## Definition einer Einwirkung

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft das Dialogfeld zur Eingabe einer veränderlichen Einwirkung. Die Dialogfelder für die weiteren Einwirkungsarten sehen entsprechend aus.

### Bezeichnung

Frei wählbare Bezeichnung für die Einwirkung.

### Gamma.sup, Gamma.inf

Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{sup}$  und  $\gamma_{inf}$ .

SS EN 1990:

Im Programm werden die Teilsicherheitsbeiwerte so vorgeschlagen, wie sie sich nach § 2 für Sicherheitsklasse 3 aus  $\gamma_d \cdot \gamma_{sup}$  mit dem Abminderungsfaktor  $\gamma_d = 1,0$  nach § 6 ergeben. Niedrigere Sicherheitsklassen lassen sich bei Bedarf durch Eingabe geringerer Werte berücksichtigen.

### Kombinationsbeiwerte psi für:

Eingabefelder zur Auswahl der Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen. Die Schaltfläche ermöglicht die Einsicht und Änderung der gewählten Kombinationsbeiwerte  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  und  $\psi_2$ .

### Lastfälle

Liste der möglichen Lastfälle bzw. Lastfallkombinationen. Die Auswahl geschieht durch Markieren und Betätigung der entsprechenden Schaltfläche oder Drag & Drop.

### Mehrfachauswahl

Lastfälle und Kombinationen können den Einwirkungen mehrfach hinzugefügt werden.

### Exklusive Varianten

Veränderliche Einwirkungen können aus mehreren exklusiven Varianten bestehen, die sich gegenseitig ausschließen. Die Varianten selber enthalten inklusive und exklusive Anteile. Mit den Schaltflächen oder können Einwirkungsvarianten hinzugefügt oder gelöscht werden.

### Inklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die gleichzeitig wirken können.

### Exklusive Lastfälle

Gewählte Lastfälle und Kombinationen, die sich gegenseitig ausschließen.

## Lasteinwirkungsdauer

Die Klasse der Lasteinwirkungsdauer nach EN 1995-1-1, Kapitel 2.3.1.2, dient zur Festlegung des Modifikationsbeiwerts  $k_{\text{mod}}$  für die Materialfestigkeiten. Im Dialog werden die Klassen nach Tabelle 2.2 mit den national maßgebenden Werten vorgeschlagen.

## Brandeinwirkungen

Die Definition von Brandeinwirkungen für das Nachweisverfahren mit reduziertem Querschnitt nach EN 1995-1-2, Kapitel 4.2.2, erfolgt im Querschnittsdialog. Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit wird in den Berechnungseinstellungen aktiviert und erfordert zusätzlich die Definition einer Bemessungssituation für den Brandfall.

The screenshot shows a software dialog box titled "Eigenschaften für Stab 31 - Querschnitt - EN 1995-1-2". On the left is a tree view with categories like "Querschnitt", "Form", "Material", "Bettung", "EN 1995-1-2", "Thermische Berechnung", "Allgemein", and "Ersatzstablänge". The main area contains the following fields and controls:

- Nummer:** 5 (dropdown)
- Querschnittsart:** Rechteck (dropdown)
- Materialart:** C20 (dropdown)
- Buttons: Neu, Kopie, Löschen
- Bezeichn.:** (empty text field)
- Warning icon: Es sind weitere Stäbe betroffen.
- Vorgaben für den Nachweis mit reduziertem Querschnitt nach Kap. 4.2.2**
  - Rechteckquerschnitt, beflamte Ränder:**
    - Links
    - Oben
    - Rechts
    - Unten
  - Rundquerschnitt, Beflammung:**
    - Allseitig
- Zeitdauer t der Brandbeanspruchung [min]:** 30 (dropdown)
- Abbrandrate  $\beta_n$  [mm/min]:** 0,8 (text field)

At the bottom are buttons for OK, Abbrechen, and Hilfe.

### Beflammte Ränder

Festlegung der Ränder mit Brandeinwirkung. Rundquerschnitte werden allseitig beflammt.

### Zeitdauer $t$

Zeitdauer  $t$  der Brandeinwirkung zur Berechnung der ideellen Abbrandtiefe  $d_{\text{char},n}$  nach Gl. (3.2). Gemäß Kapitel 3.4.2 wird von einer ungeschützten Oberfläche während der gesamten Branddauer ausgegangen.

$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t \quad (3.2)$$

### Abbrandrate $\beta_n$

Bemessungswert der ideellen Abbrandrate nach Kapitel 3.4.2(2) zur Berechnung der Abbrandtiefe nach Gl. (3.2). Der Wert nach Tabelle 3.1 ist voreingestellt.

### Hinweis

Brandeinwirkungen für einen Nachweis nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren gemäß EN 1995-1-2, Kapitel 4.4, werden auf der Dialogseite „*Thermische Berechnung*“ eingegeben. Eine Beschreibung hierzu ist im Handbuchabschnitt „*Tragwerksanalyse für den Brandfall*“ zu finden.

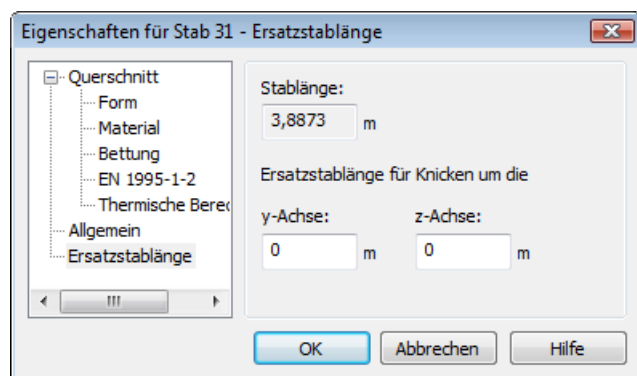
## Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Baustoffe sind nach EN 1995-1-1, Tabelle 2.3, mit den jeweils national gültigen Werten vorgelegt. In den Bemessungssituationen infolge Erdbeben gelten gemäß EN 1998-1:2004, Kapitel 5.2.4(2), die Beiwerte der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation. In außergewöhnlichen und besonderen Bemessungssituationen sowie im Brandfall werden die Beiwerte zu 1 angenommen.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen werden innerhalb der Definition der Einwirkungen entsprechend EN 1990, Tabelle A.1.2(B), festgelegt.

## Ersatzstablänge

Für den Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren gemäß EN 1995-1-1, Kapitel 6.3.2, sind im Eigenschaftsdialog der betreffenden Stäbe die Ersatzstablängen zu definieren. Die Aktivierung des Nachweises erfolgt in den Berechnungseinstellungen.



### y-Achse, z-Achse

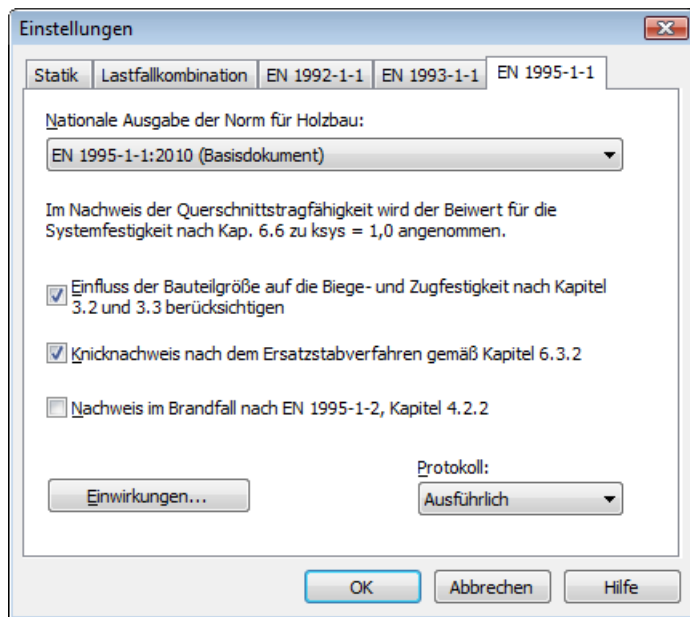
Die Vorgabe einer unter Berücksichtigung von Lagerung und Belastung zutreffenden Ersatzstablänge liegt im Ermessen und in der Verantwortung des Anwenders. Bei Eingabe von 0 wird für die betreffende Richtung kein Nachweis geführt.

### Hinweis

Wenn ein Bauteil mit konstantem Querschnitt in mehrere Stäbe geteilt ist, sollte allen Teilen die für das ganze Bauteil maßgebende Knicklänge zugeordnet werden. Eine rechnerische Ermittlung von Knicklängen und Knickeigenformen ist im FEM-Programm für ausgewählte Lastzusammenstellungen möglich (s. Beschreibung zur *Lastgruppe*).

## Berechnungseinstellungen

Die Dialogseite *EN 1995-1-1* ist über die Funktion *Einstellungen* im Berechnungsmenü erreichbar.



### Nationale Ausgabe der Norm

Die gewählte Ausgabe kommt bei allen nachfolgenden Eingaben und Berechnungen zur Anwendung.

### Einfluss der Bauteilgröße berücksichtigen

Bei Vollholz und Brettschichtholz mit Rechteckquerschnitt dürfen nach den Vorschriften der EN 1995-1-1, Kapitel 3.2 und 3.3, die Biege- und Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von den Querschnittsabmessungen mit dem Faktor  $k_h$  erhöht werden.

### Knicknachweis

Der Nachweis erfolgt gemäß EN 1995-1-1, Kapitel 6.3.2, nach dem Ersatzstabverfahren. Die Ersatzstablänge wird für die nachzuweisenden Stäbe im Eigenschaftsdialog definiert.

### Nachweis im Brandfall

Bei Rechteck- und Rundquerschnitten wird für die eingegebene Brandfallsituation der Nachweis mit reduziertem Querschnitt nach EN 1995-1-2, Kapitel 4.2.2, geführt. Die Beschreibung der Brandeinwirkung wird im Querschnittsdialog eingegeben.

### Einwirkungen...

Startet den Dialog zur Beschreibung der Einwirkungen.

### Protokoll

- *Nicht erstellen*: Vom Bemessungsprogramm wird kein Protokoll erzeugt.
- *Standard*: Bei der Berechnung wird ein Protokoll mit einer tabellarischen Ausgabe der ermittelten Ausnutzungen erstellt.
- *Ausführlich*: Dieses Protokoll unterscheidet sich vom Standard-Protokoll durch zusätzliche Ausgabe der untersuchten Schnittgrößenkombinationen.
- *Standard>zulässig*: Standard-Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.
- *Ausführlich>zulässig*: Ausführliches Protokoll der Nachweisstellen, an denen zulässige Grenzwerte überschritten werden.



# Grenzzustände der Tragfähigkeit

## Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.4.3, berücksichtigt:

- Für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen darf entweder nach Gleichung (6.10) oder mit der ungünstigeren der beiden Gleichungen (6.10a) und (6.10b) kombiniert werden.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10)$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Der Beiwert  $\xi$  ergibt sich nach Tabelle A.1.2(B) zu  $\xi = 0,85$ .

DIN EN 1990, ÖNORM B 1990:

Die Kombination erfolgt nach Gleichung (6.10).

SS EN 1990:

Die Gleichungen (6.10a) und (6.10b) sind anzuwenden. Der Beiwert  $\xi$  wird zu  $\xi = 0,89$  gesetzt.

- Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Für die Kombination kommt im Programm  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  zur Anwendung.

ÖNORM B 1990-1:

$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  ist maßgebend.

- Kombination für Bemessungssituationen infolge Erdbeben

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

- Kombination für Bemessungssituationen im Brandfall nach EN 1991-1-2 (Eurocode 1), Kap. 4.2.1.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Im Programm wird gemäß EN 1991-1-2, Kap. 4.3.1(2), der Wert  $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  verwendet.

DIN EN 1991-1-2:

Für die Einwirkung Wind ist  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  zu verwenden, anderenfalls  $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ .

SS EN 1991-1-2:

Der Wert  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$  ist maßgebend.

Zusätzlich steht für die Ergebnisse eines Stabilitätsnachweises nach Theorie 2. Ordnung eine

- Besondere Kombination

$$F_{d,1}; \dots; F_{d,n}$$

zur Verfügung, in der die Bemessungswerte der Einwirkungen ( $F_{d,i}$ ) exklusiv überlagert werden.

Für jede Kombination können verschiedene Bemessungssituationen in den Bau- und Endzuständen definiert werden. Jeder Nachweis wird für alle Situationen einer Kombination geführt.

## Bemessungswerte nach der Theorie 2. Ordnung

Die Berechnung nach der Theorie 2. Ordnung gemäß Kapitel 2.2.2(1)P erfolgt im Rahmen der Schnittkraftermittlung mit den Querschnittswerten unter Normaltemperatur. Dazu sind mit Hilfe von *Lastgruppen* geeignete Lastfälle aus maßgeblichen Beanspruchungen zusammenzustellen (s. auch Funktion *Kombinationen* im Einwirkungsdialog).

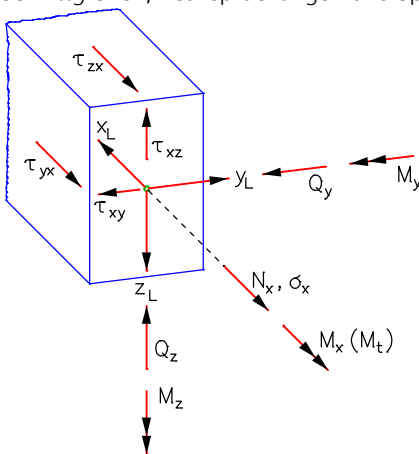
Da die Teilsicherheitsbeiwerte bereits bei der Schnittkraftermittlung zu berücksichtigen sind, müssen die Einwirkungen dort mit ihrem jeweiligen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G$  bzw.  $\gamma_Q$  sowie mit  $\gamma_M$  gemäß Tabelle 2.3 - ohne Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer - multipliziert werden.

Im Nachweis werden die nach Theorie 2. Ordnung berechneten Lastfälle einer Einwirkung  $F_d$  zugeordnet und in der *Besonderen Kombination* als exklusive Auswahl überlagert. Die Ergebnisse werden ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten gegen die charakteristischen Größen der Beanspruchbarkeiten geprüft.

## Spannungsermittlung

### Koordinatensysteme

Die folgende Abbildung zeigt am Beispiel eines Stabes mit Rechteckquerschnitt die Definition der Koordinatensysteme für Schnittgrößen, Beanspruchungen und Spannungen. Der Querschnittsrand ist als geschlossenes Polygon definiert.



Die Längskraft  $N_x$  verläuft durch den Schwerpunkt, die Querkräfte  $Q_y$  und  $Q_z$  durch den Schubmittelpunkt des Querschnitts, der hier mit dem Schwerpunkt zusammenfällt. Die Vektoren der Momente  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  und Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  verlaufen parallel zu den Koordinatenachsen.

### Längsspannungen

Die erforderlichen Querschnittswerte zur Ermittlung der Längsspannungen aus Längskraft und Biegung werden elementar mit der Umfahrmethode aus den Koordinaten des Polygonzugs ermittelt.

Im Einzelnen sind dies:

- $y_s, z_s$       Schwerpunktkoordinaten.
- $A$               Fläche des Querschnitts.
- $I_y, I_z$         Trägheitsmomente bezüglich der Koordinatenachsen.
- $I_{yz}$           Deviationsmoment.
- $I_1, I_2$         Trägheitsmomente bezüglich der Hauptachsen.
- $\varphi$               Verdrehungswinkel der Hauptachsen.
- $W_y, W_z$       Widerstandsmomente zur Berechnung der extremalen Längsspannungen aus  $M_y$ ,  $M_z$ .

Bei der Untersuchung eines Querschnitts werden die Spannungen an den automatisch festgelegten Berechnungspunkten ermittelt. Die Längsspannung  $\sigma$  für einen Punkt  $(y, z)$  des Querschnitts ergibt sich durch

$$\sigma(y, z) = N_x \frac{1}{A} + M_y \frac{\Delta z I_z - \Delta y I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} + M_z \frac{\Delta y I_y - \Delta z I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}$$

mit  $\Delta y = y - y_s$  und  $\Delta z = z - z_s$ .

## Schubspannungen

### Querkraft

Für die Beanspruchung infolge Querkraft wird die Differentialgleichung der sogenannten Schubverwölbung  $\omega_\tau$

$$\frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_\tau}{\partial z^2} = -\frac{Q_z z}{G I_y} \quad \text{bzw.} \quad -\frac{Q_y y}{G I_z}$$

mit Hilfe der Rand-Element-Methode numerisch gelöst. Daraus werden folgende Schubkenngrößen bestimmt:

$\tau_{Q_y,1}$  Schubspannung für die Querkraft  $Q_y = 1$ .

$\tau_{Q_z,1}$  Schubspannung für die Querkraft  $Q_z = 1$ .

$W_{qy}, W_{qz}$  Flächenwerte zur Berechnung der extremalen Schubspannungen aus  $Q_y$  und  $Q_z$  mit  $\tau_{Q_y} = Q_y / W_{qy}$  und  $\tau_{Q_z} = Q_z / W_{qz}$ .

Sofern im Querschnittsdialog gewählt, werden die Schubspannungen über die Querschnittsbreite gemittelt.

### Torsion

Für die Beanspruchung infolge St. Venant'scher Torsion ist die Differentialgleichung der Einheitsverwölbung  $\omega$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} = 0$$

maßgebend, deren Lösung die folgenden Kenngrößen liefert:

$I_t$  Torsionsträgheitsmoment.

$\tau_{M_x,1}$  Schubspannung für das Torsionsmoment  $M_x = 1$ .

$W_t$  Widerstandsmoment zur Berechnung der extremalen Schubspannung aus  $M_x$ .

## Baustoffeigenschaften

### Charakteristische Werte

Für Querschnitte aus Bauholz werden die charakteristischen Materialeigenschaften für Vollholz gemäß EN 338:2009, Tabelle 1, und für Brettschichtholz gemäß EN 14080:2013, Tabellen 4 und 5, angenommen.

DIN EN 1995-1-1:

Gemäß Kapitel 3.3 (NA.10) wird bei Brettschichtholz für alle Festigkeitsklassen eine charakteristische Schubfestigkeit von  $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

ÖNORM B 1995-1-1:

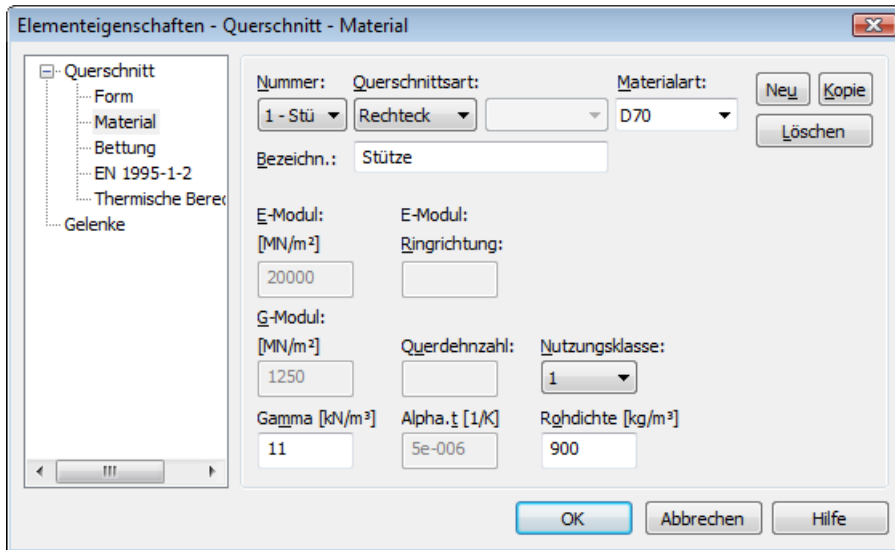
Gemäß Abschnitt 6.1.7(2) wird für Vollholz aus Nadelholz eine Schubfestigkeit von  $f_{v,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2$  und für Brettschichtholz von  $f_{v,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$  angenommen.

### Feuchtegehalt und Lasteinwirkungsdauer

Der Feuchtegehalt und die Lasteinwirkungsdauer beeinflussen nach Kapitel 2.3.1.1(2)P die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes und sind deshalb bei der Bemessung für den mechanischen Widerstand über einen Modifikationsbeiwert zu berücksichtigen. Dies erfolgt im Programm automatisch mit den vom Anwender vorgegebenen Eigenschaften. Beim Nachweis im Brandfall nach der Methode mit reduziertem Querschnitt wird gemäß EN 1995-1-2, 4.2.2 (5), der Modifikationsbeiwert zu 1 angenommen.

### Nutzungsklasse

Zur Festlegung des Feuchtegehalts sollen Tragwerke den in Kapitel 2.3.1.3 beschriebenen drei Nutzungsklassen zugeordnet werden. Die Zuordnung wird über die Materialeigenschaften im Querschnittsdialog vorgenommen. Damit lassen sich für einzelne Teile des Tragwerks unterschiedliche Nutzungsklassen festlegen.



**Lasteinwirkungsdauer**

Für die Ermittlung von Festigkeitseigenschaften sind die Einwirkungen nach Kapitel 2.3.1.2 einer der Klassen nach Tabelle 2.1 zuzuweisen. Die Zuordnung erfolgt innerhalb des Einwirkungsdialogs, wobei die Klassifizierung nach Tabelle 2.2 vorgeschlagen wird.

**Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$**

Der Modifikationsbeiwert berücksichtigt den Einfluss des Feuchtegehalts und der Lasteinwirkungsdauer auf die Materialfestigkeiten. Zahlenwerte für den Beiwert  $k_{mod}$  werden in Tabelle 3.1 der Norm angegeben. Im Nachweis der Querschnittstragfähigkeit dient er zur Festlegung der Beanspruchbarkeit nach Gl. (2.17):

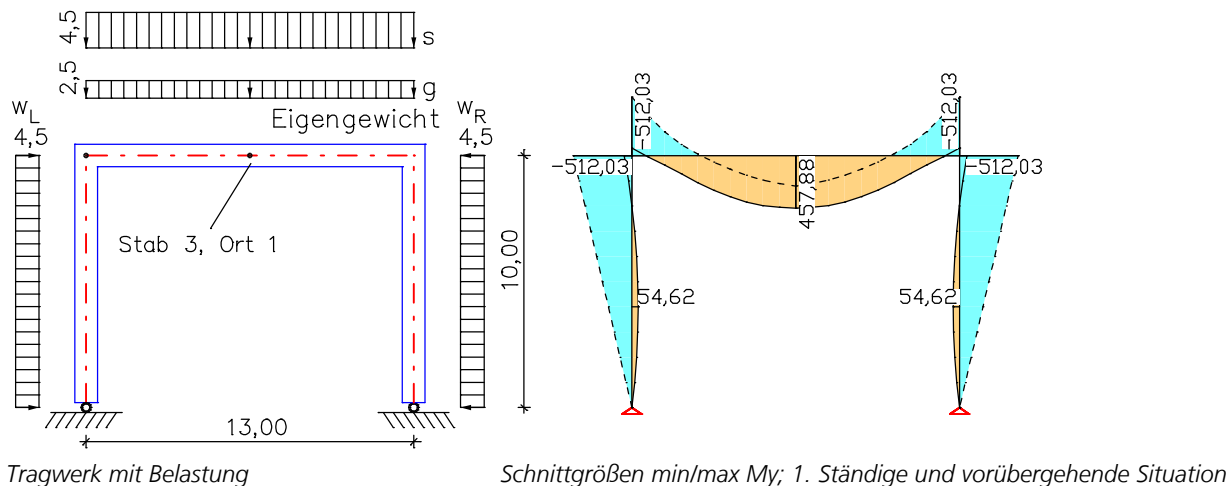
$$R_d = k_{mod} \cdot R_k / \gamma_M \tag{2.17}$$

Dabei ist

- $R_d$  der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit (Tragfähigkeit);
- $R_k$  der charakteristische Wert der Beanspruchbarkeit;
- $\gamma_M$  der Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaft.

Besteht eine Lastkombination aus Einwirkungen, die zu verschiedenen Klassen der Lasteinwirkungsdauer gehören, dann ist nach Kapitel 3.1.3(2) der Wert von  $k_{mod}$  zu verwenden, der zu der Einwirkung mit der kürzesten Dauer gehört. Der Einfluss des Modifikationsbeiwertes auf den Bemessungswert der Beanspruchbarkeit kann bewirken, dass eine Einwirkungskombination maßgebend ist, die nicht den maximalen Bemessungswert der zugehörigen Beanspruchung liefert. Im Nachweis werden deshalb immer alle möglichen Kombinationen von Lastfällen untersucht.

Jeder zu untersuchende Schnittkraftsatz liefert über die beteiligten Einwirkungen die maßgebende Lasteinwirkungsdauer, die zusammen mit der Nutzungsklasse den Beiwert  $k_{mod}$  für das Material festlegt. Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht den Sachverhalt, wobei die relevanten Größen im Protokoll durch Unterstreichen hervorgehoben wurden.



Einw.	Lastfall	Bezeichnung	Lastdauer
G	1	Eigenlast, ständige Lasten	Ständig
QS	2	Schnee	Mittel
QW	3	Wind von links	Kurz
	4	Wind von rechts	Kurz

**Ort 1**

Stab 3:  $x = 0,00$  m (Stablänge 6,50 m)  
 Querschnitt 1: Rechteck, **GL36H, Klasse 1**,  $h/b=900/300$  mm,  $A=270000$  mm<sup>2</sup>  
 $k_m=0,70$ ,  $k_{hy}/k_{ht}=1,00/1,07$ ,  $k_{cr}=0,58$

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QS+QW**

Maßgebende Schnittgrößen aus 16 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx [kN]	Qz [kN]	My [kNm]	Lastdauer	k <sub>mod</sub>
1	-29,77	-0,00	378,10	<b>Ständig</b>	<b>0,60</b>
5	-51,20	-25,96	403,77	<b>Kurz</b>	<b>0,90</b>

Lastfallkombinationen der maßgebenden Schnittkraftsätze

Satz	Kombination
1	$1,35 \cdot \mathbf{I1}$
5	$1,35 \cdot \mathbf{I1} + 0,75 \cdot \mathbf{L2} + 1,50 \cdot \mathbf{L3}$

Im Nachweis liefern die beiden protokollierten Schnittkraftsätze die jeweils höchste Ausnutzung für Biegung (Satz 1) sowie Querkraft (Satz 5). Der Schnittkraftsatz mit dem größten Biegemoment am Nachweisort ( $M_y = 457,88$  kNm) ist dagegen aufgrund des Einflusses von  $k_{mod}$  auf die Beanspruchbarkeit nicht maßgebend.

**Einfluss der Bauteilgröße**

Der Einfluss der Bauteilgröße auf die Festigkeit darf bei Vollholz und Brettschichtholz nach Kapitel 3.2 und 3.3 berücksichtigt werden. Im Programm erfolgt dies automatisch, wenn der Anwender diese Option in den Berechnungseinstellungen gewählt hat.

Wenn die maßgebende Querschnittsabmessung  $h$  [mm] den materialtypischen Referenzwert unterschreitet, darf die charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  ( $h =$  Querschnittshöhe) bzw. die Zugfestigkeit  $f_{t,k}$  ( $h =$  Querschnittsbreite) mit einem Beiwert  $k_h$  erhöht werden. Das Programm nimmt als Höhe die größere, als Breite die kleinere Querschnittsabmessung an.

**Vollholz**

Für Vollholz mit Rechteckquerschnitt und einer charakteristischen Rohdichte  $\rho_k \leq 700$  kg/m<sup>3</sup> beträgt nach Kapitel 3.2 der Referenzwert 150 mm und der Beiwert

$$k_h = \min((150/h)^{0,2}; 1,3) \quad (3.1)$$

DIN EN 1995-1-1:

Für die Zugfestigkeit ist mit "Querschnittsbreite" gemäß NCI zu Kapitel 3.2(3) die größte Querschnittsabmessung gemeint.

**Brettschichtholz**

Für Brettschichtholz mit Rechteckquerschnitt beträgt nach Kapitel 3.3 der Referenzwert 600 mm und der Beiwert

$$k_h = \min((600/h)^{0,1}; 1,1) \quad (3.2)$$

DIN EN 1995-1-1:

Für die Zugfestigkeit ist mit "Querschnittsbreite" gemäß NCI zu Kapitel 3.3(3) die größte Querschnittsabmessung gemeint. Eine Erhöhung der Biegefestigkeit nach Gl. (3.2) erfolgt gemäß Absatz (NA.9) nur bei Flachkantbiegebeanspruchung ( $M_y$ ). Die Möglichkeit, nach Absatz (NA.6) den Festigkeitswert bei Hochkant-Biegebeanspruchung ( $M_z$ ) zu erhöhen, wird im Programm nicht genutzt.

**Bemessungsverfahren für den Brandfall**

Die Bemessung für den Brandfall erfolgt nach der in EN 1995-1-2, Kapitel 4.2.2, beschriebenen Methode mit reduziertem Querschnitt. Über die entsprechende Eigenschaftsseite im Querschnittsdialog lassen sich die Brandeinwirkungen für die betroffenen Rechteck- und Rundquerschnitte definieren. Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit wird in den Berechnungseinstellungen aktiviert und erfordert zusätzlich die Definition einer Bemessungssituation für den Brandfall.

Der Restquerschnitt wird durch Reduzierung des Ausgangsquerschnitts um die Abbrandtiefe  $d_{ef}$  nach Gl. (4.1) ermittelt und auf die Bedingung für aussteifende Bauteile nach Kapitel 4.3.5(2) geprüft.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (4.1)$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (3.2)$$

Dabei ist

$$d_0 = 7 \text{ mm};$$

$k_0$  der Beiwert nach Tabelle 4.1;

$d_{char,n}$  der Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe nach Gl. (3.2).

$\beta_n$  die idelle Abbrandrate nach Kapitel 3.4.2(2).

Die nachfolgend beschriebenen Querschnittsnachweise erfolgen im Brandfall mit den in EN 1995-1-2, Gl. (2.1), definierten Festigkeiten.

### Hinweis

Alternativ zur hier beschriebenen Methode mit reduziertem Querschnitt kann der Nachweis nach dem allgemeinen Berechnungsverfahren gemäß EN 1995-1-2, Kapitel 4.4, geführt werden. Eine Beschreibung hierzu ist im Handbuchabschnitt „*Tragwerksanalyse für den Brandfall*“ zu finden.

## Querschnittsnachweise

Nach EN 1995-1-1, Kapitel 6.1.1, wird der Verlauf der Holzfasern parallel zur Stabachse angenommen. Der Nachweis von Zug- und Druckspannungen wird auf diese Faserrichtung beschränkt. Der Beiwert für die Systemfestigkeit nach Kapitel 6.6 wird zu  $k_{sys} = 1$  angenommen.

## Bemessungswerte der Festigkeiten

### Normaltemperatur

Bei Normaltemperatur ergeben sich die Festigkeiten sinngemäß aus EN 1995-1-1, Gl. (2.14):

$$f_d = k_{mod} \cdot f_k / \gamma_M \quad (2.14)$$

Dabei ist

$f_d$  der Bemessungswert der Festigkeit bei Normaltemperatur;

$k_{mod}$  der Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt nach Kap. 3.1.3;

$f_k$  die charakteristische Festigkeit nach EN 338 bzw. EN 14080;

$\gamma_M$  der Teilsicherheitsbeiwert für Holz nach Tabelle 2.3.

### Brandfall

Für den Brandfall sind die Festigkeiten in EN 1995-1-2, Gl. (2.1), definiert:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{20} / \gamma_{M,fi} \quad (2.1)$$

Dabei ist

$f_{d,fi}$  der Bemessungswert der Festigkeit im Brandfall;

$k_{mod,fi}$  der Modifikationsbeiwert im Brandfall, der für den Nachweis mit reduziertem Querschnitt nach 4.2.2(5) zu  $k_{mod,fi} = 1$  angenommen wird;

$f_{20}$  die 20%-Fraktile der Festigkeitseigenschaft bei Normaltemperatur mit

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k \text{ nach Gl. (2.4);}$$

$k_{fi}$  der Faktor nach Tabelle 2.1;

$f_k$  die charakteristische Festigkeit nach EN 338 bzw. EN 14080;

$\gamma_{M,fi}$  der Teilsicherheitsbeiwert für Holz im Brandfall, der zu  $\gamma_{M,fi} = 1$  angenommen wird.

## Zug in Faserrichtung

Nach Kapitel 6.1.2 muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (6.1)$$

Dabei ist

$\sigma_{t,0,d}$  der Bemessungswert der Zugspannung in Faserrichtung;

$f_{t,0,d}$  der Bemessungswert der Zugfestigkeit in Faserrichtung.

## Druck in Faserrichtung

Nach Kapitel 6.1.4 muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dabei ist

$\sigma_{c,0,d}$  der Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung;

$f_{c,0,d}$  der Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung.

## Biegung

Nach Kapitel 6.1.6 müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$\sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + k_m \cdot \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.11)$$

$$k_m \cdot \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.12)$$

Dabei sind

$\sigma_{m,y,d}$  und  $\sigma_{m,z,d}$  Bemessungswerte der Biegespannungen um die Hauptachsen;

$f_{m,y,d}$  und  $f_{m,z,d}$  zugehörige Bemessungswerte der Biegefestigkeiten.

Der Beiwert  $k_m$  soll die Inhomogenitäten des Baustoffs im Querschnitt berücksichtigen und wird gemäß 6.1.6(2) wie folgt angenommen:

$k_m = 0,7$  bei Rechteckquerschnitten aus Vollholz, Brettschichtholz und Furnierschichtholz;

$k_m = 1,0$  bei anderen Querschnitten und Holzwerkstoffen.

## Biegung und Zug

Nach Kapitel 6.2.3 müssen für die Spannungscombination aus Biegung und Zug die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$\sigma_{t,0,d} / f_{t,0,d} + \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + k_m \cdot \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.17)$$

$$\sigma_{t,0,d} / f_{t,0,d} + k_m \cdot \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.18)$$

Der Beiwert  $k_m$  ist wie für Biegung anzunehmen.

## Biegung und Druck

Nach Kapitel 6.2.4 müssen für die Spannungscombination aus Biegung und Druck die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$(\sigma_{c,0,d} / f_{c,0,d})^2 + \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + k_m \cdot \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.19)$$

$$(\sigma_{c,0,d} / f_{c,0,d})^2 + k_m \cdot \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} + \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d} \leq 1 \quad (6.20)$$

Der Beiwert  $k_m$  ist wie für Biegung anzunehmen.

## Schub

Nach Kapitel 6.1.7 muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6.13)$$

Der Nachweis wird für  $\tau_d = \max(\tau_{y,d}; \tau_{z,d})$  geführt.

Dabei ist

$\tau_{y,d}, \tau_{z,d}$  der Bemessungswert der Schubspannung aus Querkraft in y- bzw. z-Richtung des Querschnitts;  
 $f_{v,d}$  der Bemessungswert der Schubfestigkeit.

DIN EN 1995-1-1 und ÖNORM B 1995-1-1:

Bei Doppelbiegung in Rechteckquerschnitten muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$(\tau_{y,d} / f_{v,d})^2 + (\tau_{z,d} / f_{v,d})^2 \leq 1 \quad \begin{array}{l} \text{(NA.55)} \\ \text{(NA.6.15-E1)} \end{array}$$

Bei biegebeanspruchten Bauteilen sollte nach 6.1.7(2) der Einfluss von Rissen durch Anwendung der wirksamen Breite  $b_{ef}$  des Bauteils berücksichtigt werden:

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b \quad (6.13a)$$

Der Abminderungsbeiwert  $k_{cr}$  ist folgendermaßen anzunehmen:

$k_{cr} = 0,67$  für Vollholz und Brettschichtholz  
 $k_{cr} = 1,0$  für andere Holzwerkstoffe

DIN EN 1995-1-1:

Es gelten folgende Beiwerte:

$k_{cr} = 0,67$  für Vollholz aus Laubholz  
 $k_{cr} = 2,0 / f_{v,k}$  für Vollholz und Balkenschichtholz aus Nadelholz  
 $k_{cr} = 2,5 / f_{v,k}$  für Brettschichtholz mit  $f_{v,k}$  in N/mm<sup>2</sup>

ÖNORM B 1995-1-1:

Es gelten folgende Beiwerte:

$k_{cr} = 0,67$  für Vollholz und Brettschichtholz aus Laubholz  
 $k_{cr} = 1,00$  für andere Holzwerkstoffe aus Laubholz  
 $k_{cr} = 1,00$  für Vollholz, Brettschichtholz und andere Holzwerkstoffe aus Nadelholz. Dieser Wert gilt für Vollholz bei Annahme einer charakteristischen Schubfestigkeit  $f_{v,k} = 2,3$  N/mm<sup>2</sup> und für Brettschichtholz bei Annahme von  $f_{v,k} = 2,5$  N/mm<sup>2</sup>

## Torsion

Die Torsionsspannungen müssen nach Kapitel 6.1.8 die folgende Bedingung erfüllen:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \cdot f_{v,d} \quad (6.14)$$

mit

$$k_{shape} = \begin{array}{l} 1,2 \quad \text{für einen runden Querschnitt} \\ \min(1+0,05 \cdot h/b; 1,3) \quad \text{für einen rechteckigen Querschnitt} \end{array} \quad (6.15)$$

Dabei ist

$\tau_{tor,d}$  der Bemessungswert der Torsionsspannung;  
 $f_{v,d}$  der Bemessungswert der Schubfestigkeit;  
 $k_{shape}$  der Beiwert in Abhängigkeit von der Querschnittsform;  
 $h$  die größere Querschnittsabmessung;  
 $b$  die kleinere Querschnittsabmessung.



## Schub und Torsion

DIN EN 1995-1-1 und ÖNORM B 1995-1-1:

Bei Kombination von Schub aus Querkraft und Torsion muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\tau_{\text{tor,d}} / (k_{\text{shape}} \cdot f_{v,d}) + (\tau_{y,d} / f_{v,d})^2 + (\tau_{z,d} / f_{v,d})^2 \leq 1 \quad (\text{NA.56})$$

(NA.6.15-E1)

Der Beiwert  $k_{\text{shape}}$  ist wie für Torsion anzunehmen.

## Knicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren

Bei Anwendung des Ersatzstabverfahrens ist die Stabilität von durch Druck und Biegung beanspruchten Bauteilen gemäß EN 1995-1-1, Kapitel 6.3.2, nachzuweisen. Danach sollte der bezogene Schlankheitsgrad wie folgt angenommen werden:

$$\lambda_{\text{rel,y}} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)$$

und

$$\lambda_{\text{rel,z}} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.22)$$

Dabei ist

$\lambda_y, \lambda_{\text{rel,y}}$  der Schlankheitsgrad für Knicken um die y-Achse;

$\lambda_z, \lambda_{\text{rel,z}}$  der Schlankheitsgrad für Knicken um die z-Achse;

$$\lambda = l_{\text{ef}} / i$$

$l_{\text{ef}}$  die Ersatzstablänge;

$i$  der Trägheitsradius.

Im Fall  $\lambda_{\text{rel,y}} \leq 0,3$  bzw.  $\lambda_{\text{rel,z}} \leq 0,3$  werden gemäß 6.3.2(2) die Spannungen für Druck und Biegung nach Gl. (6.19) bzw. (6.20) nachgewiesen. Anderenfalls kommen die folgenden Gleichungen zur Anwendung:

$$(\sigma_{c,0,d} / (k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}) + \sigma_{m,y,d} / (k_m \cdot f_{m,y,d}) + k_m \cdot \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d}) \leq 1 \quad (6.23)$$

$$(\sigma_{c,0,d} / (k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}) + k_m \cdot \sigma_{m,y,d} / (k_m \cdot f_{m,y,d}) + \sigma_{m,z,d} / f_{m,z,d}) \leq 1 \quad (6.24)$$

Dabei ist

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel,y}}^2}} \quad (6.25)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel,z}}^2}} \quad (6.26)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel,y}} - 0,3) + \lambda_{\text{rel,y}}^2) \quad (6.27)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel,z}} - 0,3) + \lambda_{\text{rel,z}}^2) \quad (6.28)$$

$\beta_c$  ein Beiwert für Imperfektionen nach Abschnitt 10;

$\beta_c = 0,2$  für Vollholz; (6.29)

0,1 für Brettschichtholz und Furnierholz;

$k_m$  der Beiwert nach 6.1.6(2).

Der Nachweis wird nach Aktivierung in den Berechnungseinstellungen für alle Stäbe mit definierter Ersatzstablänge geführt.

## Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

### Nachweiskombinationen

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die folgenden Kombinationen nach EN 1990 (Eurocode 0), Kapitel 6.5.3, berücksichtigt:

- Kombination für charakteristische Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

- Kombination für häufige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

- Kombination für quasi-ständige Situationen

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

### Begrenzung der Verformungen

Nach EN 1995-1-1, Kapitel 7.2, sollen die Verformungen von Biegestäben die in Tabelle 7.2 angegebenen Werte nicht übersteigen.

ÖNORM B 1995-1-1:

In der charakteristischen Bemessungssituation ist die Durchbiegung gemäß Kapitel 5.7.2.1, Gl. (4) und (5), zu begrenzen. In der quasi-ständigen Situation ist Kapitel 5.7.2.2, Gl. (7), maßgebend.

SS EN 1995-1-1:

Nach § 8 werden die Grenzwerte für die Durchbiegung von Fall zu Fall unter Berücksichtigung der jeweiligen Umstände festgelegt.

Die Einhaltung der vorgenannten Restriktionen kann in der graphischen oder numerischen Verformungsdarstellung geprüft werden. Dazu lassen sich im Abschnitt *Knotendeformationen* des Ergebnisbaums die Verformungen für alle maßgebenden Nachweissituationen abrufen.

## Ergebnisse

Für alle Nachweissituationen werden die Extremwerte der Schnittgrößen, Auflagerreaktionen, Deformationen, Bodenpressungen und Spannungen gespeichert. Das ausführliche Protokoll gibt zusätzlich für jeden Berechnungsort die maßgebenden Kombinationsschnittgrößen aller Bemessungssituationen aus.

### Spannungen

- $\sigma_x, \sigma_y$  Extremale Normalspannungen aus Biegung und Normalkraft.
- $\sigma_{xy}$  Extremale Schubspannungen aus Drillmoment und Schubkraft.
- $\tau_{xy}, \tau_{xz}$  Extremale Schubspannungen aus Querkraft und Torsion.
- $\sigma_v$  Maximale Vergleichsspannung.
- $\sigma_1, \sigma_2$  Extremale Hauptspannungen.

Alle Spannungen werden in [MN/m<sup>2</sup>] ausgegeben.

### Ausnutzungen

Die Ausnutzung ist definiert als das Verhältnis zwischen der Beanspruchung  $E_d$  und der Beanspruchbarkeit  $R_d$  eines Querschnitts. Im Abschnitt *Spannungen/Holzbaunachweise* des Ergebnisbaums stehen folgende Größen zur Verfügung:

- Ausnutzung der Stäbe für jede einzelne Nachweissituation.
- Maximale Ausnutzung der Stäbe aus allen Nachweissituationen.
- Maximale Ausnutzung der Querschnitte aus allen Nachweissituationen.

## Beispiele

### Holznachweise an einer Gelenkpfette

Das Beispiel wurde in Anlehnung an das Buch

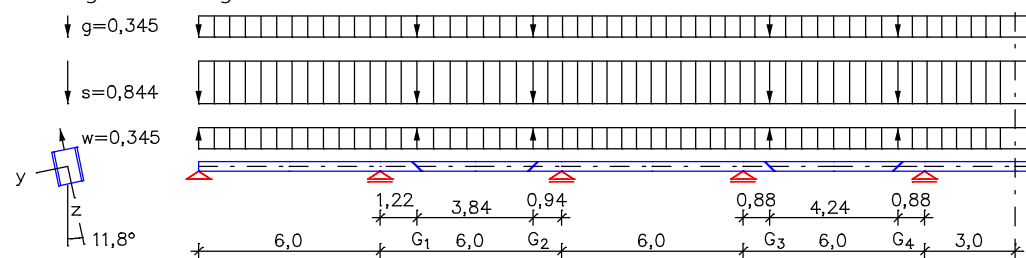
Gerhard Werner; Karlheinz Zimmer.

**Holzbau 2** - Dach- und Hallentragwerke nach DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5.

4., neu bearbeitete Auflage. Springer-Verlag, Berlin 2010.

gewählt.

An der unten dargestellten Sparrenpfette werden eine Stabwerksanalyse sowie Holznachweise durchgeführt. Die Achsen des als Gelenkpfette ausgebildete Systems verlaufen parallel zur Traufe bzw. Dachfläche. Daher sind die Querschnitte um  $11,8^\circ$  verdreht. Die Innenfelder haben bis zum Gelenk  $G_1$  den Querschnitt 1 (Rechteck 100/160). Das Endfeld hat bis zum Gelenk  $G_1$  den Querschnitt 2 (Rechteck 120/160). Beide Querschnitte sind aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 und der Nutzungsklasse 2 zugeordnet.



Statisches System, Abmessungen [m] und Lasten [kN/m]

#### Summe der aufgebrachtten Lasten und Auflagerreaktionen

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	Eigenlast und Eindeckung	0,000	0,000	9,315
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	9,315
2	Scheelast (kurzzeitig)	0,000	0,000	22,788
	Auflagerreaktionen	0,000	0,000	22,788
3	Windlast (kurzzeitig)	0,000	1,905	-9,118
	Auflagerreaktionen	0,000	1,905	-9,118

Zur Durchführung der Nachweise sind die Einwirkungen zuzuordnen, wie sie im nachfolgenden Protokoll abgedruckt sind. Das Nachweisprogramm führt die erforderlichen Schnittgrößenkombinationen durch und weist die Querschnittstragfähigkeit nach.

#### Nachweise nach EN 1995-1-1:2014

Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erfolgt nach EN 1995-1-1, Kap. 6.1. Der Beiwert für die Systemfestigkeit nach Kap. 6.6 wird zu  $k_{sys} = 1$  angenommen. Der Einfluss der Bauteilgröße wird gemäß Kapitel 3.2 und 3.3 berücksichtigt.

Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach EN 1990:2010 kombiniert. Alle Variationen des Zusammenwirkens veränderl. Einwirkungen werden untersucht.

**Der Nachweis erfolgt für alle möglichen Kombinationen der Einwirkungen.**

#### Spannungsermittlung

Die Längs- und Schubspannungen werden für polygonal berandete, homogene Querschnitte infolge Längskraft, Biegemomenten, Querkraften und Torsion berechnet. Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode. Die Berechnungspunkte für alle Spannungen sind Randpunkte des Querschnitts.

#### Teilsicherheitsbeiwerte für Bauholz

	gamma.M
Ständige und vorüberg. Komb.	1,30 (Vollholz)
Außergew. Kombination	1,25 (Brettschichtholz)
	1,00

#### Charakteristische Materialkennwerte

Festigkeiten und Rohdichten nach EN 338:2009 und EN 14080:2013 [MN/m<sup>2</sup>, kg/m<sup>3</sup>].

Material	f <sub>mk</sub>	f <sub>t0k</sub>	f <sub>c0k</sub>	f <sub>vk</sub>	rho <sub>k</sub>
C24	24,0	14,0	21,0	4,0	350,0

**Querschnittswerte**

Kl.	Nutzungs-kategorie	Material	Kl.	A	d, h	I <sub>y</sub>	I <sub>x</sub>
A	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]						
d, h, b	Durchmesser, Höhe, Breite [mm]						
I <sub>y</sub> , I <sub>x</sub>	Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ]						
Querschnitt	Material	Kl.	A	b	I <sub>y</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>yz</sub>
1 Innenfeld	C24	2	16000	160	3,4133e-05	3,2598e-05	
				100	1,3333e-05	0,0000e+00	
2 Endfeld	C24	2	19200	160	4,0960e-05	4,9752e-05	
				120	2,3040e-05	0,0000e+00	

**EN 1995-1-1 Einwirkungen**

**Standard Bemessungsgruppe**

**G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lasteinwirkungsdauer: Ständig

Lastfälle

1 Eigenlast und Eindeckung

**QS - Schnee- und Eislast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Lasteinwirkungsdauer: Kurz

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Schneelasten - Orte in CEN-Mitgliedsstaaten niedriger als 1000 m ü. NN  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,5 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

2 Scheelast (kurzzeitig)

**QW - Windlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Lasteinwirkungsdauer: Kurz

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Windlasten  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

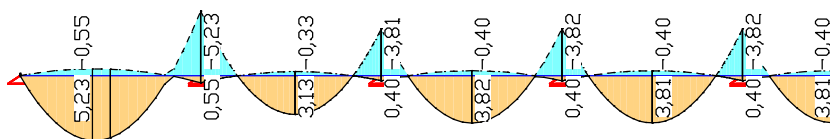
Lastfälle 1. Variante, exklusiv

3 Windlast (kurzzeitig)

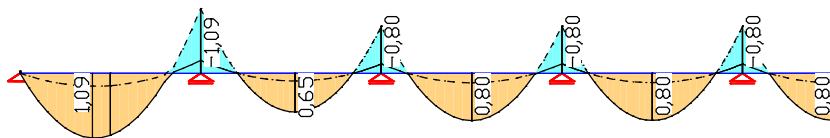
**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

- G - Eigenlast
- QS - Schnee- und Eislast
- QW - Windlast



Biegemoment min/max  $M_y$  [kNm]

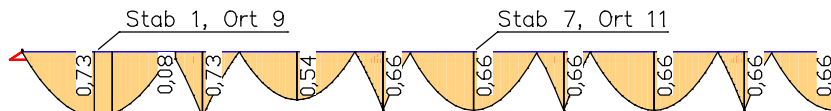


Biegemoment min/max  $M_z$  [kNm]

**Max. Querschnittsausnutzung**

- Ausnutzung Verhältnis der Bemessungswerte der Spannungen und der Festigkeiten.
- Zug Zug in Faserrichtung nach Gl. (6.1).
- Druck Druck in Faserrichtung nach Gl. (6.2).
- Biegung Biegung nach Gl. (6.11) und (6.12).
- Biegung, Zug Biegung und Zug nach Gl. (6.17) und (6.18).
- Bieg., Druck Biegung und Druck nach Gl. (6.19) und (6.20).
- Schub Schub nach Gl. (6.13).
- Torsion Torsion nach Gl. (6.14).
- x Abstand vom Stabanfang [m].
- SK Ständige und vorüberg. Komb.

Querschnitt	Material	Ergebnis	Stab	Ort	x[m]	Komb.	Ausnutzung
1 Innenfeld	C24	Zug			-.	-.	-.
		Druck			-.	-.	-.
		Biegung	7	11	3,00	SK.1	0,66
		Biegung, Zug			-.	-.	-.
		Biegung, Druck			-.	-.	-.
		Schub	8	11	3,00	SK.1	0,26
		Torsion			-.	-.	-.
2 Endfeld	C24	Zug			-.	-.	-.
		Druck			-.	-.	-.
		Biegung	1	9	2,40	SK.1	0,73
		Biegung, Zug			-.	-.	-.
		Biegung, Druck			-.	-.	-.
		Schub	2	11	3,00	SK.1	0,25
		Torsion			-.	-.	-.



Ausnutzungen beim Nachweis „Biegung“

Nachfolgend wird zusätzlich ein Auszug aus dem ausführlichen Protokoll für Stab 1, Ort 9 abgedruckt.

**Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe**

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Ausnutzung	Verhältnis der Bemessungswerte der Spannungen und der Festigkeiten.
kmod	Modifikationsbeiwert für Lastdauer und Feuchtegehalt, Gl. (2.17).
km	Beiwert zur Reduktion der Biegespannung nach Kap. 6.1.6(2).
khy, khz	Beiwerte zur Erhöhung der Biegefestigkeiten nach Gl. (3.1), (3.2).
kht	Beiwert zur Erhöhung der Zugfestigkeit nach Gl. (3.1), (3.2).
kcr	Beiwert zur Reduktion der Schubfestigkeit nach Gl. (6.13a).
kshape	Beiwert zur Erhöhung der Schubfestigkeit nach Gl. (6.14).
ft0d	Zugfestigkeit in Faserrichtung = $kmod \cdot ft0k / \gamma.M$ [MN/m <sup>2</sup> ].
fc0d	Druckfestigkeit in Faserrichtung = $kmod \cdot fc0k / \gamma.M$ [MN/m <sup>2</sup> ].
fmd	Biegefestigkeit = $kmod \cdot fmk / \gamma.M$ [MN/m <sup>2</sup> ].
fvd	Festigkeit für Querkraft & Torsion = $kmod \cdot fvk / \gamma.M$ [MN/m <sup>2</sup> ].
x	Abstand vom Stabanfang [m].
y, z	Ort im Querschnittspolygon [m].

**Stab 1**

**Ort 9**

Stab 1: x = 2,40 m (Stablänge 3,00 m)  
 Querschnitt 2: Endfeld, C24; Klasse 2; h/b=160/120 mm; A=19200 mm<sup>2</sup>  
 km=0,70; khy/khz/kht=1,00/1,00/1,05; kcr=0,67; kshape=1,20

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QS+QW**

Maßgebende Schnittgrößen aus 10 Schnittkraftsätzen								
Satz	Nx[kN]	Qy[kN]	Qz[kN]	Mx[kNm]	My[kNm]	Mz[kNm]	Lastdauer	kmod
3	:	0,00	0,03	0,15	-0,00	5,23	1,09 Kurz	0,90

Lastfallkombination des maßgebenden Schnittkraftsatzes

Satz	Kombination
3	: 1,35*L1+1,50*L2

**Nachweis für Biegung**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.11) und (6.12)	:	0,73
zug. Sigma.myd / (khy·fmd)	:	-10,217 / 16,615 : 0,61
Sigma.mzd / (khz·fmd)	:	-2,846 / 16,615 : 0,17
Qu.pkt. y / z [m]	:	0,000 / 0,000
Situation / Satz	:	SK.1 / 3

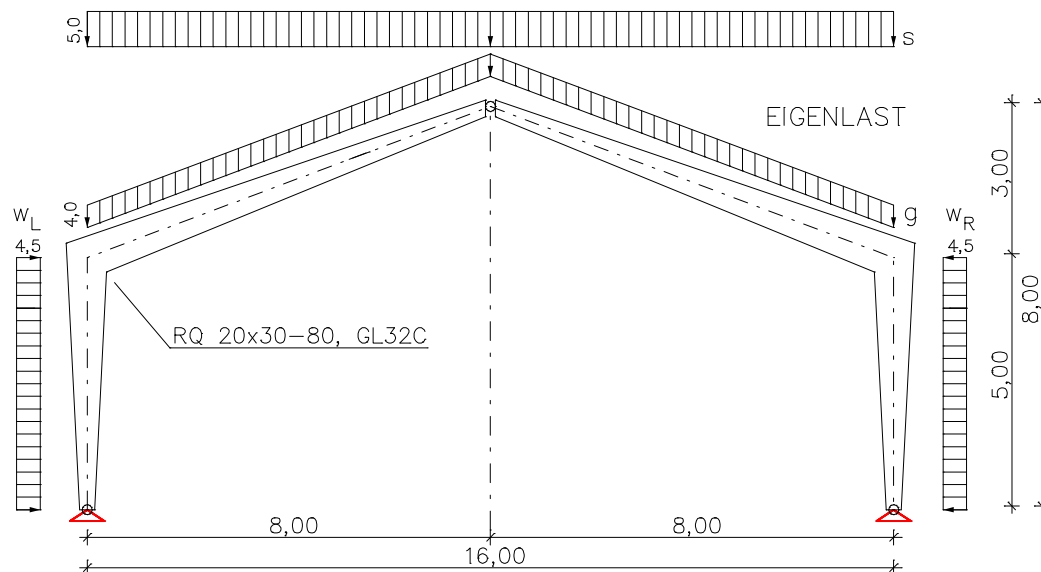
**Nachweis für Schub**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.13)	:	0,01
zug. Tau.yd / (kcr·fvd)	:	0,000 / 1,855 : 0,00
Tau.zd / (kcr·fvd)	:	0,011 / 1,855 : 0,01
Qu.pkt. y / z [m]	:	0,120 / 0,080
Situation / Satz	:	SK.1 / 3

## Dreigelenkrahmen unter Normaltemperatur und im Brandfall

Dieses Beispiel zeigt die Eingabe eines ebenen Dreigelenkrahmens aus Holz mit gevoutetem Querschnittsverlauf sowie entsprechenden Belastungen und die Durchführung folgender Berechnungen:

- Stabwerksberechnung nach Theorie 2. Ordnung
- Nachweise nach EN 1995-1-1 und EN 1995-1-2



Statisches System, Abmessungen [m] und Lasten [kN/m]

### Querschnitte

An den Gelenken RQ 20x30, GL32C, Nutzungsklasse 2

In den Rahmenecken RQ 20x80, GL32C, Nutzungsklasse 2

Vorgaben für den Nachweis im Brandfall

Beflammung dreiseitig (links / rechts / unten)

Branddauer 30 min

Abbrandrate 0,7 mm/min

### Belastungen

Lastfall 1: Ständige Lasten, Eigenlast und Ausbaulast 4,0 kN/m (siehe Abb.)

Lastfall 2: Schnee, projektive Linienlast 5,0 kN/m (Lasteinwirkungsdauer: mittel) (siehe Abb.)

Lastfall 3, 4: Wind, Linienlast auf die Stiele 4,5 kN/m (Lasteinwirkungsdauer: kurz) (siehe Abb.)

Lastfall 11: Stabilitätsnachweis unter Normaltemperatur (siehe unten)

### Stabilitätsnachweis unter Normaltemperatur

Dieser Lastfall ist nach Theorie 2. Ordnung zu berechnen. Im Nachweis nach EN 1995-1-1 werden die Ergebnisse ohne weitere Teilsicherheitsbeiwerte gegen die charakteristischen Materialkennwerte geprüft.

Der Lastfall 11 ist durch die Lastart *Lastgruppe* mit folgenden Angaben beschrieben:

#### Berechnungstheorie

Geometrische Theorie 2. Ordnung.

#### Gewählte Lastfälle

Lastfall 1 mit Faktor 1,35 ( $\gamma_G$ ).

Lastfall 2 mit Faktor 1,50 ( $\gamma_Q$ ).

#### Zusätzlicher globaler Lastfaktor

Da die Sicherheitsbeiwerte bereits bei der Schnittkräftermittlung zu berücksichtigen sind, müssen die Einwirkungen mit den Beiwerten  $\gamma_G$  bzw.  $\gamma_Q$  und zusätzlich mit  $\gamma_M = 1,25$  multipliziert werden.

#### Vorverformung

Sie wird in diesem Beispiel nicht berücksichtigt.

### Nachweisvorgaben

Zur Durchführung der Nachweise sind die Einwirkungen den Situationen

- Ständige und vorübergehende Situation unter Normaltemperatur
- Besondere Situation für den Stabilitätsnachweis unter Normaltemperatur
- Brandfallsituation

zuzuordnen, wie sie im nachfolgenden Protokoll abgedruckt sind. Das Nachweisprogramm führt die erforderlichen Schnittgrößenkombinationen durch und weist die Querschnittstragfähigkeit nach.

#### Nachweise nach EN 1995-1-1:2014 und EN 1995-1-2:2010

Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erfolgt nach EN 1995-1-1, Kap. 6.1. Der Systembeiwert nach Kapitel 6.6 wird zu  $k_{sys} = 1.0$  angenommen. Der Einfluss der Bauteilgröße wird gemäß Kapitel 3.2 und 3.3 berücksichtigt.

Im Brandfall wird gemäß EN 1995-1-2, Kap. 3.4.2, von ungeschützten Oberflächen während der gesamten Branddauer ausgegangen. Der Nachweis erfolgt nach der Methode mit reduziertem Querschnitt nach Kapitel 4.2.2 der Norm.

Die Einwirkungen werden nach EN 1990, Gl. (6.10), mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach EN 1990:2010 und 1991-1-2:2010 kombiniert. Alle Variationen des Zusammenwirkens veränderl. Einwirkungen werden untersucht.

**Der Nachweis erfolgt für alle möglichen Kombinationen der Einwirkungen.**

#### Spannungsermittlung

Die Längs- und Schubspannungen werden für polygonal berandete, homogene Querschnitte infolge Längskraft, Biegemoment und Querkraft berechnet. Die Ermittlung der Schubkenngrößen erfolgt nach der Boundary-Element-Methode. Die Berechnungspunkte für alle Spannungen sind Randpunkte des Querschnitts.

#### Teilsicherheitsbeiwerte für Bauholz

	gamma.M
Ständige und vorüberg. Komb.	1,30 (Vollholz) 1,25 (Brettschichtholz)
Außergew. Kombination	1,00
Besondere Kombination	1,00
Brandfallkombination	1,00

#### Charakteristische Materialkennwerte

Festigkeiten und Rohdichten nach EN 338:2009 und EN 14080:2013 [MN/m<sup>2</sup>, kg/m<sup>3</sup>].

Material	f <sub>mk</sub>	f <sub>t0k</sub>	f <sub>c0k</sub>	f <sub>vk</sub>	ρ <sub>h0k</sub>
GL32C	32,0	19,5	24,5	3,5	430,0

#### Querschnittswerte unter Normaltemperatur

Kl. Nutzungsklasse  
A Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]  
d,h,b Durchmesser, Höhe, Breite [mm]  
I<sub>y</sub>..I<sub>yz</sub> Trägheitsmomente [m<sup>4</sup>]

Querschnitt	Material	Kl.	A	d,h	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>yz</sub>
3 Rechteck	GL32C	1	62500	313	5,0863e-04	0,0000e+00	
				200	2,0833e-04		
4 Rechteck	GL32C	1	67500	338	6,4072e-04	0,0000e+00	
				200	2,2500e-04		
5 Rechteck	GL32C	1	72500	363	7,9391e-04	0,0000e+00	
				200	2,4167e-04		
6 Rechteck	GL32C	1	77500	388	9,6976e-04	0,0000e+00	
				200	2,5833e-04		
7 Rechteck	GL32C	1	82500	413	1,1698e-03	0,0000e+00	
				200	2,7500e-04		
8 Rechteck	GL32C	1	87500	438	1,3957e-03	0,0000e+00	
				200	2,9167e-04		
9 Rechteck	GL32C	1	92500	463	1,6489e-03	0,0000e+00	
				200	3,0833e-04		
10 Rechteck	GL32C	1	97500	488	1,9310e-03	0,0000e+00	
				200	3,2500e-04		
11 Rechteck	GL32C	1	102500	513	2,2435e-03	0,0000e+00	
				200	3,4167e-04		
12 Rechteck	GL32C	1	107500	538	2,5881e-03	0,0000e+00	
				200	3,5833e-04		
13 Rechteck	GL32C	1	112500	563	2,9663e-03	0,0000e+00	
				200	3,7500e-04		
14 Rechteck	GL32C	1	117500	588	3,3797e-03	0,0000e+00	
				200	3,9167e-04		
15 Rechteck	GL32C	1	122500	613	3,8297e-03	0,0000e+00	
				200	4,0833e-04		
16 Rechteck	GL32C	1	127500	638	4,3181e-03	0,0000e+00	
				200	4,2500e-04		
17 Rechteck	GL32C	1	132500	663	4,8463e-03	0,0000e+00	
				200	4,4167e-04		
18 Rechteck	GL32C	1	137500	688	5,4159e-03	0,0000e+00	
				200	4,5833e-04		
19 Rechteck	GL32C	1	142500	713	6,0284e-03	0,0000e+00	
				200	4,7500e-04		
20 Rechteck	GL32C	1	147500	738	6,6855e-03	0,0000e+00	
				200	4,9167e-04		
21 Rechteck	GL32C	1	152500	763	7,3887e-03	0,0000e+00	
				200	5,0833e-04		
22 Rechteck	GL32C	1	157500	788	8,1396e-03	0,0000e+00	
				200	5,2500e-04		

**Querschnittswerte im Brandfall**

Kl. Nutzungsklasse  
 Ar Fläche des Restquerschnitts nach EN 1995-1-2, Kapitel 3.4 [mm²]  
 dr,hr,br Durchmesser, Höhe, Breite des Restquerschnitts [mm]  
 Iy..Iyz Trägheitsmomente des Restquerschnitts [m4]  
 t Dauer der Brandeinwirkung nach EN 1995-1-2, Gl. (3.2) [min]  
 ßn Ideelle Abbrandrate nach EN 1995-1-2, Tabelle 3.1 [mm/min]  
 Rand Beflammter Rand: (L)inks, (R)echts, (O)ben, (U)nten, (A)llseitig

Querschnitt	Material	Kl.	Ar	dr,hr br	Iy Iz	Iyz	ßn	t	Rand
3 Rechteck	GL32C	1	40968	285	2,7633e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	7,0793e-05		0,70		
4 Rechteck	GL32C	1	44568	310	3,5576e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	7,7014e-05		0,70		
5 Rechteck	GL32C	1	48168	334	4,4913e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	8,3234e-05		0,70		
6 Rechteck	GL32C	1	51768	360	5,5754e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	8,9455e-05		0,70		
7 Rechteck	GL32C	1	55368	384	6,8213e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	9,5676e-05		0,70		
8 Rechteck	GL32C	1	58968	410	8,2403e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,0190e-04		0,70		
9 Rechteck	GL32C	1	62568	435	9,8435e-04	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,0812e-04		0,70		
10 Rechteck	GL32C	1	66168	459	1,1642e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,1434e-04		0,70		
11 Rechteck	GL32C	1	69768	484	1,3648e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,2056e-04		0,70		
12 Rechteck	GL32C	1	73368	509	1,5871e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,2678e-04		0,70		
13 Rechteck	GL32C	1	76968	535	1,8324e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,3300e-04		0,70		
14 Rechteck	GL32C	1	80568	560	2,1018e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,3922e-04		0,70		
15 Rechteck	GL32C	1	84168	585	2,3963e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,4544e-04		0,70		
16 Rechteck	GL32C	1	87768	609	2,7171e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,5166e-04		0,70		
17 Rechteck	GL32C	1	91368	635	3,0653e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,5788e-04		0,70		
18 Rechteck	GL32C	1	94968	660	3,4421e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,6410e-04		0,70		
19 Rechteck	GL32C	1	98568	685	3,8486e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,7033e-04		0,70		
20 Rechteck	GL32C	1	102168	710	4,2859e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,7655e-04		0,70		
21 Rechteck	GL32C	1	105768	734	4,7551e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,8277e-04		0,70		
22 Rechteck	GL32C	1	109368	760	5,2573e-03	0,0000e+00	30		LRU
				144	1,8899e-04		0,70		

Alle Restquerschnitte erfüllen die Bedingung 4.3.5(2) in EN 1995-1-2.

**EN 1995-1-1 Einwirkungen**

**Standard Bemessungsgruppe**

**G - Eigenlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,35 / 1

Lasteinwirkungsdauer: Ständig

Lastfälle

-----

1 G

**QS - Schnee- und Eislast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Lasteinwirkungsdauer: Mittel

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten

Schneelasten - Orte in CEN-Mitgliedsstaaten niedriger als 1000 m ü. NN

Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,5 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

-----

2 Schnee

**QW - Windlast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Lasteinwirkungsdauer: Kurz

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten

Windlasten

Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,6 / 0,2 / 0

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

-----

3 Wind links  
 4 Wind rechts



**Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen**

Lasteinwirkungsdauer: Mittel

Lastfälle

-----  
11 SV Th.2

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

G - Eigenlast  
QS - Schnee- und Eislast  
QW - Windlast

**1. Besondere Situation**

Endzustand

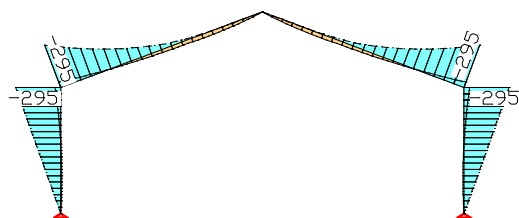
Fd - Bemessungswerte von Einwirkungen

**1. Brandfall Situation**

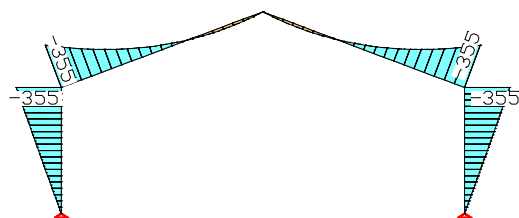
Endzustand

G - Eigenlast  
QS - Schnee- und Eislast  
QW - Windlast

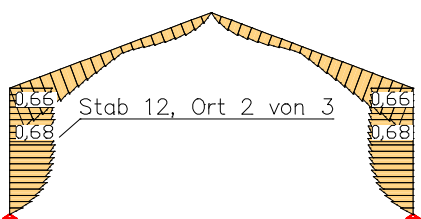
**Ergebnisse**



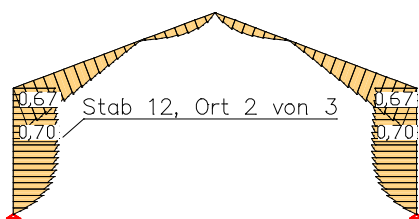
Schnittgrößen min/max M (Ständige K.) [kNm]



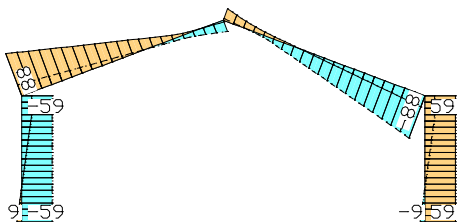
Schnittgrößen min/max M (Besondere K.) [kNm]



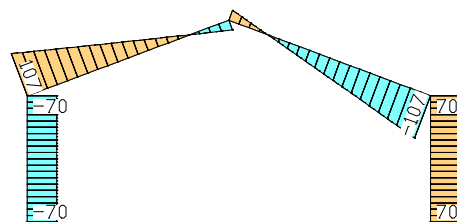
Maximale Ausnutzung infolge Biegung (Ständige K.)



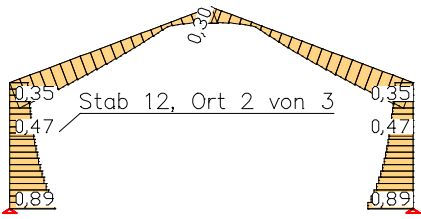
Maximale Ausnutzung infolge Biegung (Besondere K.)



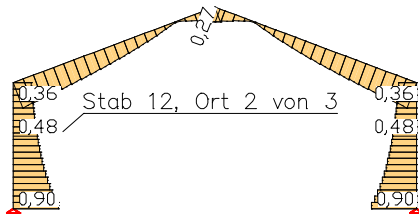
Schnittgrößen min/max Q (Ständige K.) [kN]



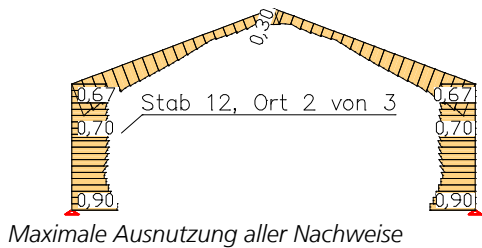
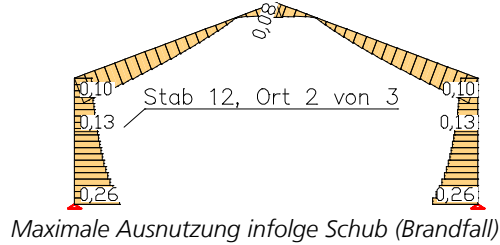
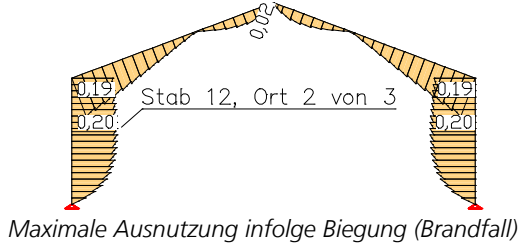
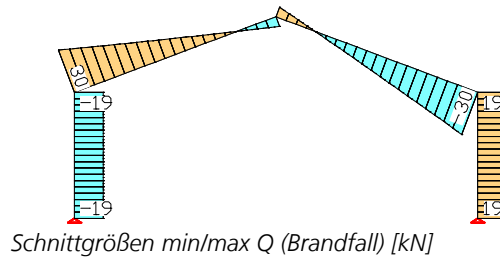
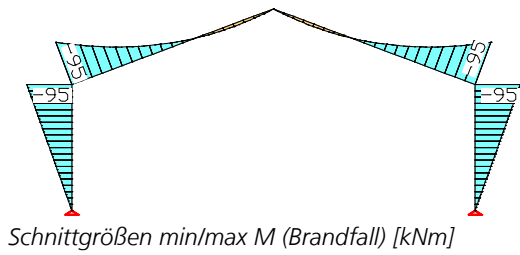
Schnittgrößen min/max Q (Besondere K.) [kN]



Maximale Ausnutzung infolge Schub (Ständige K.)



Maximale Ausnutzung infolge Schub (Besondere K.)



Nachfolgend wird zusätzlich ein Auszug aus dem ausführlichen Protokoll für Stab 12, Ort 2 abgedruckt.

**Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe unter Normaltemperatur**

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Ausnutzung Verhältnis der Bemessungswerte der Spannungen und der Festigkeiten.  
 kmod Modifikationsbeiwert für Lastdauer und Feuchtegehalt, Gl. (2.17).  
 km Beiwert zur Reduktion der Biegespannung nach Kap. 6.1.6(2).  
 khy Beiwert zur Erhöhung der Biegefestigkeit nach Gl. (3.1), (3.2).  
 kht Beiwert zur Erhöhung der Zugfestigkeit nach Gl. (3.1), (3.2).  
 kcr Beiwert zur Reduktion der Schubfestigkeit nach Gl. (6.13a).  
 ft0d Zugfestigkeit in Faserrichtung =  $kmod \cdot ft0k / \gamma.M$  [MN/m<sup>2</sup>].  
 fc0d Druckfestigkeit in Faserrichtung =  $kmod \cdot fc0k / \gamma.M$  [MN/m<sup>2</sup>].  
 fmd Biegefestigkeit =  $kmod \cdot fmk / \gamma.M$  [MN/m<sup>2</sup>].  
 fvd Schubfestigkeit für Querkraft =  $kmod \cdot fvk / \gamma.M$  [MN/m<sup>2</sup>].  
 x Abstand vom Stabanfang [m].  
 y, z Ort im Querschnittspolygon [m].

**Ort 2**

Stab 12: x = 0,13 m (Stablänge 0,25 m)  
 Querschnitt 14: Rechteck, GL32C; Klasse 1; h/b=588/200 mm; A=117500 mm<sup>2</sup>  
 km=0,70; kcr=0,67

**1. Ständige und vorüberg. Komb. (SK.1): G+QS+QW**

Maßgebende Schnittgrößen aus 16 Schnittkraftsätzen

Satz	Nx[kN]	Qz[kN]	My[kNm]	Lastdauer	kmod
3	-114,47	-55,76	-160,31	Mittel	0,80

Lastfallkombination des maßgebenden Schnittkraftsatzes

Satz	Kombination
3	1,35*L1+1,50*L2

**1. Besondere Kombination (BK.1): Fd**

Maßgebende Schnittgrößen aus 1 Schnittkraftsatz

Satz	Nx[kN]	Qz[kN]	My[kNm]	Lastdauer	kmod
1	-143,09	-70,14	-206,35	Mittel	0,80

Lastfallkombination des maßgebenden Schnittkraftsatzes

Satz	Kombination
1	L11

**Nachweis für Druck in Faserrichtung**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.2)					0,06
zug. $\sigma.c0d / fc0d$		-0,974 / 15,680			0,06
Situation / Satz		SK.1 /		3	

**Nachweis für Biegung**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.11) und (6.12) : 0,70  
 zug.  $\sigma_{\text{myd}} / f_{\text{md}}$  : 17,935 / 25,600 : 0,70  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,000 / 0,000  
 Situation / Satz : BK.1 / 1

**Nachweis für Biegung und Druck**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.19) und (6.20) : 0,70  
 zug.  $\sigma_{\text{c0d}} / f_{\text{c0d}}$  : -1,218 / 19,600 : 0,06  
 $\sigma_{\text{myd}} / f_{\text{md}}$  : 17,935 / 25,600 : 0,70  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,000 / 0,000  
 Situation / Satz : BK.1 / 1

**Nachweis für Schub**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.13) : 0,48  
 zug.  $\tau_{\text{yd}} / (k_{\text{cr}} \cdot f_{\text{vd}})$  : 0,000 / 1,876 : 0,00  
 $\tau_{\text{zd}} / (k_{\text{cr}} \cdot f_{\text{vd}})$  : -0,895 / 1,876 : 0,48  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,200 / 0,294  
 Situation / Satz : BK.1 / 1

**Nachweis der Querschnittstragfähigkeit für Stäbe im Brandfall**

Die Ergebnisse stellen die Extrema aller Kombinationen dar.

Ausnutzung Verhältnis der Bemessungswerte der Spannungen und der Festigkeiten.  
 $k_{\text{mod,fi}}$  Modifikationsbeiwert im Brandfall nach EN 1995-1-2, Gl. (2.1).  
 $k_{\text{fi}}$  Beiwert nach EN 1995-1-2, Tabelle 2.1.  
 $k_{\text{m}}$  Beiwert zur Reduktion der Biegespannung nach Kap. 6.1.6(2).  
 $k_{\text{hy}}$  Beiwert zur Erhöhung der Biegefestigkeit nach Gl. (3.1), (3.2).  
 $k_{\text{ht}}$  Beiwert zur Erhöhung der Zugfestigkeit nach Gl. (3.1), (3.2).  
 $k_{\text{cr}}$  Beiwert zur Reduktion der Schubfestigkeit nach Gl. (6.13a).  
 $f_{\text{t0d,fi}}$  Zugfestigkeit in Faserrichtung =  $k_{\text{mod,fi}} \cdot k_{\text{fi}} \cdot f_{\text{t0k}} / \gamma_{\text{M,fi}}$ .  
 $f_{\text{c0d,fi}}$  Druckfestigkeit in Faserrichtung =  $k_{\text{mod,fi}} \cdot k_{\text{fi}} \cdot f_{\text{c0k}} / \gamma_{\text{M,fi}}$ .  
 $f_{\text{md,fi}}$  Biegefestigkeit =  $k_{\text{mod,fi}} \cdot k_{\text{fi}} \cdot f_{\text{mk}} / \gamma_{\text{M,fi}}$ .  
 $f_{\text{vd,fi}}$  Schubfestigkeit für Querkraft =  $k_{\text{mod,fi}} \cdot k_{\text{fi}} \cdot f_{\text{vk}} / \gamma_{\text{M,fi}}$ .  
 $x$  Abstand vom Stabanfang [m].  
 $y, z$  Ort im Querschnittspolygon [m].

**Ort 2**

Stab 12:  $x = 0,13$  m (Stablänge 0,25 m)  
 Querschnitt 14: Rechteck, GL32C; Klasse 1;  $h_r/b_r = 560/144$  mm;  $A_r = 80568$  mm<sup>2</sup>  
 $k_{\text{mod,fi}} = 1,00$ ;  $k_{\text{fi}} = 1,15$ ;  $k_{\text{m}} = 0,70$ ;  $k_{\text{hy}}/k_{\text{ht}} = 1,01/1,10$ ;  $k_{\text{cr}} = 0,67$

**1. Brandfallkombination (FK.1): G+QS+QW**

Maßgebende Schnittgrößen aus 1 Schnittkraftsatz  
 Satz  $N_x$  [kN]  $Q_z$  [kN]  $M_y$  [kNm]  
 1 : -40,35 -19,08 -54,86

Lastfallkombination des maßgebenden Schnittkraftsatzes  
 Satz Kombination  
 1 : L1

**Nachweis für Druck in Faserrichtung**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.2) : 0,02  
 zug.  $\sigma_{\text{c0d}} / f_{\text{c0d,fi}}$  : -0,501 / 28,175 : 0,02  
 Situation / Satz : FK.1 / 1

**Nachweis für Biegung**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.11) und (6.12) : 0,20  
 zug.  $\sigma_{\text{myd}} / (k_{\text{hy}} \cdot f_{\text{md,fi}})$  : 7,302 / 37,058 : 0,20  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,000 / 0,000  
 Situation / Satz : FK.1 / 1

**Nachweis für Biegung und Druck**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.19) und (6.20) : 0,20  
 zug.  $\sigma_{\text{c0d}} / f_{\text{c0d,fi}}$  : -0,501 / 28,175 : 0,02  
 $\sigma_{\text{myd}} / (k_{\text{hy}} \cdot f_{\text{md,fi}})$  : 7,302 / 37,058 : 0,20  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,000 / 0,000  
 Situation / Satz : FK.1 / 1

**Nachweis für Schub**

Max. Ausnutzung nach Gleichung (6.13) : 0,13  
 zug.  $\tau_{\text{yd}} / (k_{\text{cr}} \cdot f_{\text{vd,fi}})$  : 0,000 / 2,697 : 0,00  
 $\tau_{\text{zd}} / (k_{\text{cr}} \cdot f_{\text{vd,fi}})$  : -0,355 / 2,697 : 0,13  
 Qu.pkt.  $y / z$  [m] : 0,144 / 0,280  
 Situation / Satz : FK.1 / 1

## Literaturhinweise

DIN 20000-3:2015-02

Anwendung von Bauprodukten im Bauwesen –  
Teil 3: Brettschichtholz und Balkenschichtholz nach DIN EN 14080  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2015.

DIN EN 1990/NA:2010/A1:2012-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2012.

DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2013.

DIN EN 1995-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 338:2009

Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 14080:2013

Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2013.

EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010

Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1991-1-1:2002

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke.  
Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2002.

EN 1991-1-2:2010

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1995-1-1:2014

Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2014.

- EN 1995-1-2:2010  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 14080:2013  
Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2013.
- Harrington, J.; Jacob, M.; Short, C.  
Handbook on structural timber design to Eurocode 5.  
Herausgeber: National Council for Forest Research and Development (COFORD).  
COFORD, Dublin 2006.
- ÖNORM B 1990-1:2004-05  
Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung –  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 Anhang A1:2003.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2004.
- ÖNORM B 1991-1-2:2003-12  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-2.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2003.
- ÖNORM B 1995-1-1:2015-06  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1995-1-1.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2015.
- ÖNORM B 1995-1-2:2011-09  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-1: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall.  
Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1995-1-2.  
Herausgeber: ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien.  
Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2011.
- Porteous, J.; Abdy, K.  
Structural Timber Design on Eurocode 5.  
Blackwell Publishing Ltd, Oxford 2007.
- SS EN 1990:2011-04  
Anwendung der SS EN 1990.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.
- SS EN 1991-1-2:2011-04  
Anwendung der SS EN 1991-1-2.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.
- SS EN 1995-1-1:2011-04  
Anwendung der SS EN 1995-1-1.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.
- SS EN 1995-1-2:2011-04  
Anwendung der SS EN 1995-1-2.  
Herausgeber: Zentralamt für Wohnungswesen, Bauwesen und Raumordnung (Boverket).  
Boverket, Karlskrona 2011.
- Werner, G.; Zimmer, K.  
Holzbau 2 - Dach- und Hallentragwerke nach DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5.  
4., neu bearbeitete Auflage.  
Springer Verlag, Berlin 2010.

# Dynamik

Mit diesem Ergänzungsmodul können bestehende FEM-Projekte unmittelbar einer dynamischen Analyse mit folgenden Leistungsmerkmalen unterzogen werden.

- Dynamische Berechnung von räumlichen und ebenen Stab-, Seil- und Flächentragwerken sowie von Volumenmodellen beliebiger Geometrie und Belastung.
- Ermittlung von Eigenwerten und Eigenvektoren durch Unterraumiteration. Der Benutzer kann Einfluss nehmen auf die Größe des iterierten Vektorraumes und die Iterationsgenauigkeit.
- Erfassung punktförmiger und verteilter Massenbelegungen. Gleichzeitige Systembeanspruchung durch Erreger unterschiedlicher Frequenz.
- Lösung der Bewegungsgleichungen in modalen Koordinaten mit anschließender Modenüberlagerung für periodische oder instationäre Last-Zeit-Verläufe. Der Integrationsbereich und die Größe der Zeitschritte können durch den Benutzer vorgegeben werden. Für jeden Zeitschritt stehen sämtliche Verformungs- und Beanspruchungsgrößen zur Verfügung. Diese können an Nachlaufprogramme zur Lastfallkombination, Bemessung oder Spannungsermittlung weitergegeben werden.
- Direkte Integration der Bewegungsgleichungen für beliebige Last-Zeit-Verläufe. Rayleigh'sche Systemdämpfung und Einzeldämpfer können hierbei durch Aufbereitung einer vollständigen Dämpfungsmatrix erfasst werden.
- Ermittlung der Systemantwort ( $U_{re}$ ,  $U_{im}$ ,  $abs(U)$ ,  $abs(Du)$ ,  $abs(DDU)$ ,  $Phase$ ) auf periodische Erregung für einen gewählten Beanspruchungs-Frequenzbereich oder für ein Erregungsspektrum. Es können sowohl Bodenbeschleunigung als auch direkte Tragwerksbelastungen berücksichtigt werden.
- Auswertung von Antwortspektren nach DIN 4149:1981, DIN 4149:2005, EN 1998-1 (Eurocode 8), ÖNORM B 4015 oder SIA 261 und Überlagerung der Schnittgrößen und Verschiebungen nach statistischen Gesetzen. Verwendung benutzerdefinierter Antwortspektren.

Die Vorgaben zur Dynamik sowie die Protokollinhalte werden über die Einstellungen im Berechnungsmenü gesteuert. Die Eingabe von Punktmassen wird üblicherweise in der Graphikansicht vorgenommen. Weitere Eingaben zur Dynamik erfolgen in der Datenbasis.

## Grundlagen

### Bewegungsgleichungen

Die allgemeinen Bewegungsgleichungen eines Finite-Elementsystems lauten in Matrixschreibweise:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = p(t) \quad (1)$$

Trägheitskräfte      Dampfkraft      elastische Kräfte      Erregungskraft  
mit

$M$                       Massenmatrix

$C$                       Dämpfungsmatrix

$K$                       Steifigkeitsmatrix

$u(t)$                   Verformungsvektor

$\dot{u}(t) = \frac{\partial u}{\partial t}$               Geschwindigkeitsvektor

$\ddot{u}(t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$               Beschleunigungsvektor

$p(t)$                   Belastungsvektor

#### Belastungsvektor

Dieser Vektor setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$p(t) = (p - M \ddot{u}_k) f(t)$$

mit

$p$                       Lastvektor

$\ddot{u}_k$                     Vektor der Knotenbeschleunigung.

$f(t)$                   Zeitfunktion der Belastung.

Sämtliche Kraft- und Verschiebungsgrößen sind Funktionen der Zeit  $t$ . Gleichung (1) beschreibt ein System gekoppelter linearer Differentialgleichungen, welche im allgemeinen Fall in ihrer Gesamtheit gelöst werden müssen. Bei Vernachlässigung der Trägheits- und Dämpfungskräfte und unter Voraussetzung einer von der Zeit unabhängigen Belastung ergibt sich hieraus der Anwendungsfall der Statik.

## Integration der Bewegungsgleichungen

Zur Integration der Bewegungsgleichungen wird das allgemeine Integrationsschema nach Newmark und Wilson verwendet. Dieses ist, unabhängig von der Wahl der Größe des Zeitschrittes, stabil.

Hierbei wird von den folgenden Annahmen ausgegangen:

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + \frac{1}{2}[\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \Delta t)] \Delta t \tag{2}$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t)\Delta t + \frac{1}{4}[\dot{u}(t) + \dot{u}(t + \Delta t)] \Delta t^2 \tag{3}$$

Zur Berechnung der Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  wird zusätzlich die Bewegungsgleichung (1) herangezogen. Die Zeitschrittlösung wird hiermit nach dem folgenden Schema durchgeführt:

Berechnungsvorgaben:

1. Ermittlung von Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrix.
2. Vorgabe von  $u(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $\ddot{u}(t)$ .
3. Wahl des Zeitschrittes  $\Delta t$ .

Berechnung der Integrationskonstanten:

4. Berechnung der effektiven Steifigkeitsmatrix und Triangulation.

Zeitschrittintegration:

5. Berechnung der effektiven Lasten zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$ .
6. Bestimmung der Verschiebungen zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  durch Rückwärtsauflösung.
7. Ermittlung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  aus den Gleichungen (2) und (3).

## Ungedämpftes Eigenschwingungsproblem

Vernachlässigt man in Gleichung (1) die Dämpfungs- und Erregungskräfte, so gelangt man zu der Form:

$$M \ddot{u}(t) + K u(t) = 0 \tag{4}$$

Mit dem Lösungsansatz  $u(t) = x e^{i\omega t}$  erhält man das Eigenwertproblem

$$(-\omega^2 M + K) x = 0 \tag{5}$$

mit  $\omega$  als Eigenkreisfrequenz

und in anderer Schreibweise:

$$K \Phi = \lambda M \Phi \tag{6}$$

Hierin bedeuten:

$\lambda$  Matrix der Eigenwerte

$$\lambda = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_i^2 \end{bmatrix}$$

$\Phi$  Matrix der Eigenvektoren

Das vorliegende Eigenwertproblem wird mit der Methode der Unterraumiteration gelöst. Hierbei wird im Unterraum der gesuchten Eigenvektoren simultan iteriert. Die Eigenvektoren haben die folgenden Transformationseigenschaften bezüglich der Massen- und Steifigkeitsmatrix:

$$\Phi^T K \Phi = \lambda \quad (7)$$

$$\Phi^T M \Phi = I \quad (8)$$

Das Lösen des Eigenwertproblems bedingt eine Steifigkeitsmatrix nach der linearen Elastizitätstheorie. Nichtlineare Effekte (z.B. Druck-, Zugstäbe, nichtlineare Federn, Zuglagerausfall, Seile) werden somit nicht erfasst.

Die Eigenwertanalyse ermittelt bei Seiltragwerken auf der Basis eines vorgegebenen Seilkraftzustandes die Eigenwerte und Eigenvektoren.

Eine Singularität der Jacobi-Matrix kann bei dynamischen Analysen auftreten und führt zum Abbruch der Berechnung.

```
Projektion der Steifigkeitsmatrix berechnen
Projektion der Massenmatrix berechnen
Unterraum lösen
```

```
** Fehlermeldungen **
```

```
FEM-F9915: Fehler in Jacobi-Iteration, Unterraum ist singulär
```

```
Programmabbruch, 0 Warnung(en), 1 Fehler.
```

Als Ursachen kommen in der Regel folgende Fehleingaben in Frage:

- Die Elementsteifigkeiten wurden unrealistisch hoch angegeben.
- Bei Stäben mit Polygonquerschnitt wurde kein realistisches Torsionsträgheitsmoment angegeben, sondern die Vorbelegung  $I_x = 10^{-6} \text{ m}^4$  benutzt.

Generell ist bei dynamischen Untersuchungen zu beachten, dass für die Eigenfrequenzen des Tragwerks nur dann brauchbare Werte ermittelt werden können, wenn wirklichkeitsnahe Steifigkeiten angesetzt wurden.

## Modale Analyse

Unter Ausnutzung der Gleichungen (7) und (8) kann eine Transformation der Bewegungsgleichungen in den Raum der Eigenvektoren durchgeführt werden.

Mit dem Ansatz

$$u(t) = \Phi x(t) \quad (9)$$

und Linksmultiplikation der Bewegungsgleichung (1) mit  $\Phi$  ergibt sich:

$$\ddot{x}(t) + \Phi^T C \Phi \dot{x}(t) + x(t) = \Phi^T p(t) \quad (10)$$

Man erreicht hiermit, dass sich das Gleichungssystem (10) in modalen Koordinaten bis auf das Dämpfungsglied entkoppelt. Macht man für die Dämpfungsmatrix den folgenden Ansatz

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (11)$$

so erhält man unter Beachtung der Gleichungen (7) und (8) die Bewegungsgleichung in entkoppelter Form zu:

$$\ddot{x}_i(t) + 2\omega_i \xi_i \dot{x}_i(t) + \omega_i^2 x_i(t) = r_i(t) \quad (12)$$

mit

$\omega$	Eigenkreisfrequenz
$\xi_i = D$ bzw. $(\alpha + \beta \omega_i^2) / 2\omega_i$	modales Dämpfungsmaß
$D$	Lehr'sches Dämpfungsmaß

$r_i(t) = \varphi_i^T p(t)$	modaler Lastvektor
-----------------------------	--------------------

$\varphi_i$	$i$ -ter Eigenvektor
-------------	----------------------

$i$	Index der Eigenwerte, Eigenvektoren
-----	-------------------------------------

Die Integration der Gleichungen (12) kann entweder analytisch oder mit einem numerischen Integrationsschema durchgeführt werden.

Der Ansatz (11) ist bei Tragwerken mit reiner Eigendämpfung in der Regel gerechtfertigt. Einzeldämpfer können hiermit jedoch nicht wirklichkeitsnah erfasst werden.

Ein wesentlicher Vorteil der modalen Analyse besteht darin, dass in aller Regel nicht der vollständige Eigenvektorraum berücksichtigt werden muss, sondern aufgrund der bei Bauwerken immer vorhandenen Eigendämpfung nur die ersten  $n$  Eigenformen ( $n \ll n_u$ ) von merklichem Einfluss auf die Tragwerksantwort sind. Dadurch wird der Berechnungsaufwand gegenüber einer direkten Integration der Bewegungsgleichungen erheblich reduziert.



## Direkte Integration der Bewegungsgleichungen

Die direkte Integration der Bewegungsgleichungen ermittelt für jeden Zeitschritt die vollständige dynamische Systemantwort. Die Lösungsgenauigkeit ist dabei unmittelbar von der Größe des gewählten Zeitschrittes abhängig. Dieser sollte in Hinblick auf den Frequenzgehalt  $\omega_p$  der Belastung zu

$$\Delta t \leq T_p / 10 \quad (13)$$

mit  $T_p$  Schwingzeit der Erregerfrequenz [s] gewählt werden. Höhere Frequenzen werden durch die Integration herausgefiltert.

Zur Integration werden die Gleichungen (1) bis (3) zum Zeitpunkt  $t+\Delta t$  unter Berücksichtigung geeigneter Anfangsbedingungen herangezogen. Jeder Integrationsschritt erfordert zur Ermittlung der jeweiligen Verschiebungsantwort u.a. die Berechnung eines effektiven Lastvektors unter Einschluss der Trägheits- und Dämpfungskräfte mit anschließender Auflösung des Gesamtgleichungssystems.

Da die direkte Integration sehr rechenzeit- und speicherplatzintensiv ist, empfiehlt sich deren Anwendung nur bei Sonderproblemen der Dynamik z.B. bei der Untersuchung von Tragwerken mit viskosen Einzeldämpfern.

Dynamische Untersuchungen von Seilstrukturen sind mit Hilfe der direkten Zeitschrittintegration ebenfalls möglich. Hierbei wird in jedem Zeitschritt eine nichtlineare Gleichgewichtsiteration durchgeführt, welche auch die Seilträgheits- und Dämpfungskräfte berücksichtigt.

## Stationärer Response

Bei einer periodischen Erregerkraft zeigt sich, dass die Systemantwort nach einer gewissen Einschwingphase alleine durch den partikulären Lösungsanteil der Differentialgleichungen gegeben ist. Der homogene Lösungsanteil konvergiert aufgrund der Systemdämpfung gegen Null. Da im eingeschwungenen Zustand der zeitliche Verlauf der Systemantwort dem Erregungskraftverlauf folgt, erscheint die Zeitintegration für eine einzelne Erregerfrequenz wenig sinnvoll. Interessanter ist hier die Ermittlung der jeweiligen Maximalamplituden in Abhängigkeit von den zugehörigen Erregerfrequenzen.

Der Ansatz einer cosinusförmigen Erregerkraft liefert:

$$p(t) = p^* \cos(\omega_p t + \varphi) = p_{re}^* \cos(\omega_p t) - p_{im}^* \sin(\omega_p t) \quad (14)$$

mit

$p^*$  Kraftamplitudenvektor (Lastvektor)

$\omega_p$  Kreisfrequenz der Erregung

$\varphi$  Phasenverschiebung der Erregung

Ein entsprechender partikulärer Lösungsansatz ergibt:

$$u(t) = u^* \cos(\omega_p t + \psi) = u_{re}^* \cos(\omega_p t) - u_{im}^* \sin(\omega_p t) \quad (15)$$

mit

$u^*$  Verformungsamplitudenvektor  
(Maximalverschiebung im eingeschwungenen Zustand)

$\omega_p$  Kreisfrequenz der Erregung

$\psi$  Phasenverschiebung der Antwort

Hieraus ergibt sich nach Einsetzen in die Bewegungsgleichungen das Gleichungssystem für den Real- und Imaginärteil der Systemantwort in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz.

$$\begin{aligned} (-\omega_p^2 M + K) u_{re}^* - \omega_p C u_{im}^* &= p_{re}^* \\ \omega_p C u_{re}^* + (-\omega_p^2 M + K) u_{im}^* &= p_{im}^* \end{aligned} \quad (16)$$

In modalen Koordinaten wird wieder eine Entkopplung der Gleichungen erreicht.

## Systemerregung durch Bodenbeschleunigung

Eine Beanspruchung durch eine Bodenbeschleunigung lässt sich mittels Transformation des Bezugssystems durch eine Belastung der nicht gelagerten Tragwerksknoten ersetzen.

Die effektive Tragwerksbelastung wird durch folgenden Lastvektor beschrieben:

$$p(t)_{\text{eff}} = p_{\text{eff}} f(t) = -M (T_s \ddot{u}_b) f(t) = -M \ddot{u}_k f(t) \quad (17)$$

mit

$f(t)$  Zeitverlauf der Erregung

$\ddot{u}_b$  Vektor der Bodenbeschleunigung

$T_s$  Transformationsmatrix

$\ddot{u}_k$  Vektor der Knotenbeschleunigung

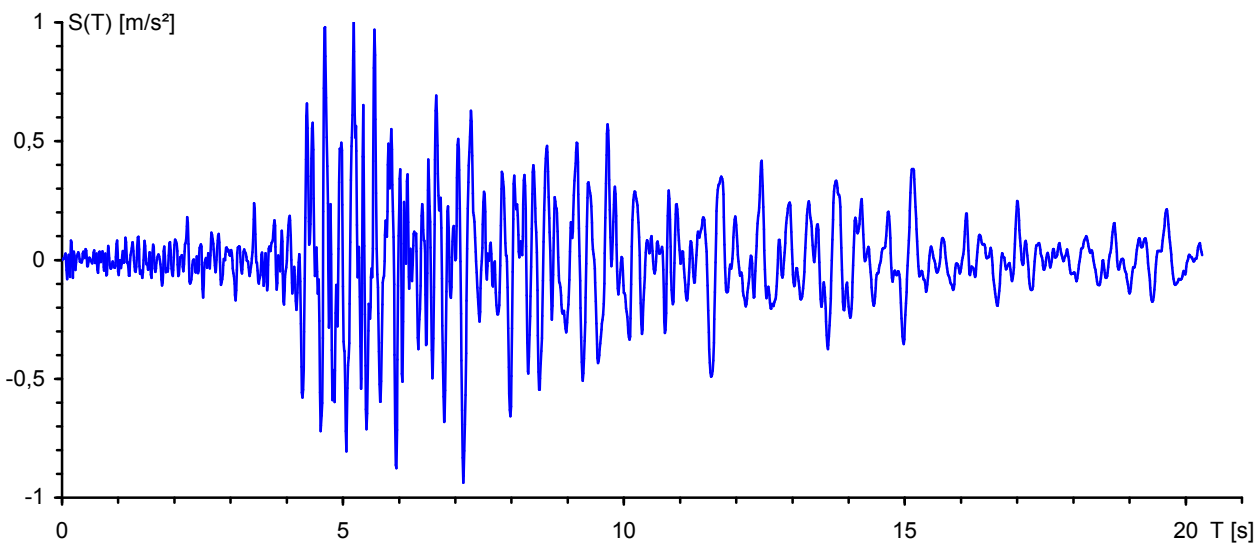
Diese Beziehung vernachlässigt die durch die Bodenbeschleunigung erzeugten Dämpfungskräfte sowie die Kopplung zwischen gelagerten und freien Elementen der Massenmatrix. Diese Einflüsse sind jedoch ohnehin gegenüber den Trägheitskräften von untergeordneter Bedeutung.

Die Transformationsmatrix  $T_s$  gibt den statischen Einfluss einer Stützenverschiebung auf die übrigen Systemknoten wieder.

Bei statisch bestimmt gelagerten Tragwerken oder starrer Bodenscheibe wird diese durch rein kinematische Beziehungen beschrieben. Die Verformungen und Geschwindigkeiten werden im mitgeführten Koordinatensystem berechnet. Die Beschleunigungen beziehen sich auf absolute Koordinaten.

## Antwortspektrumverfahren

Das Antwortspektrumverfahren wird zur Berechnung der Formänderungen und Schnittgrößen von erdbebenbeanspruchten Tragwerken eingesetzt. Hierbei wird nicht die direkte Fußpunkterregung des zu analysierenden Systems untersucht, sondern die Maximalantwort der signifikanten Eigenformen mit Hilfe eines Beschleunigungs-Antwortspektrums berechnet. Dieses kann entweder einer Bemessungsnorm entnommen werden oder im Sonderfall durch Integration der Bewegungsgleichung gewonnen werden.



Auf  $\ddot{u}_b = 1,0 \text{ m/s}^2$  normierte Bodenbeschleunigung aus Erdbeben

Die Bewegungsgleichung (12) in modalen Koordinaten lautet in abgewandelter Form:

$$\ddot{x}_i(t) + 2\omega_i \xi_i \dot{x}_i(t) + \omega_i^2 x_i(t) = \varphi_i^T M^{-1} t_s \ddot{u}_b(t) = \beta_i \ddot{u}_b(t) \quad (18)$$

Deren Lösung erhält man zu:

$$x_i(t) = \beta_i S_d^*(t) \quad (19)$$

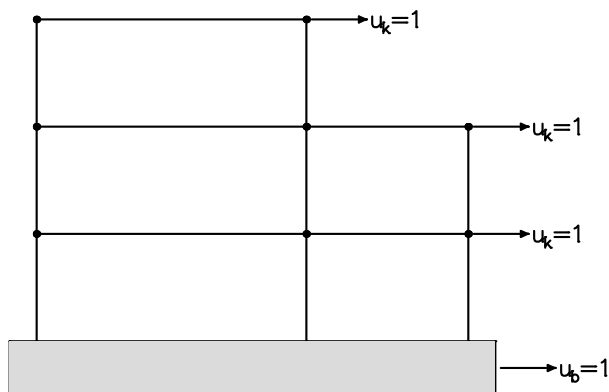
unter Verwendung des DUHAMEL-Integrals

$$S_d^*(t) = \frac{1}{\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}} \int_0^t \ddot{u}_b(\tau) e^{-\xi_i \omega_i (t - \tau)} \sin[\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} (t - \tau)] d\tau \quad (20)$$

hierin bedeuten

- $\beta_i$  Anteilsfaktor
- $\omega_i$  Eigenkreisfrequenz der  $i$ -ten Eigenform
- $\xi_i$  Lehr'sches Dämpfungsmaß der  $i$ -ten Eigenform
- $\ddot{u}_b(t)$  Bodenbeschleunigung durch Erdbeben

Der Vektor  $t_s$  gibt die anteiligen Knotenverschiebungen wieder, die sich bei Aufbringung einer Einheitsverformung der gelagerten Systemknoten ergeben. Innerhalb des Programms wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um kinematische Verschiebungen des Gesamtsystems handelt (siehe „Systemerregung durch Bodenbeschleunigung“).

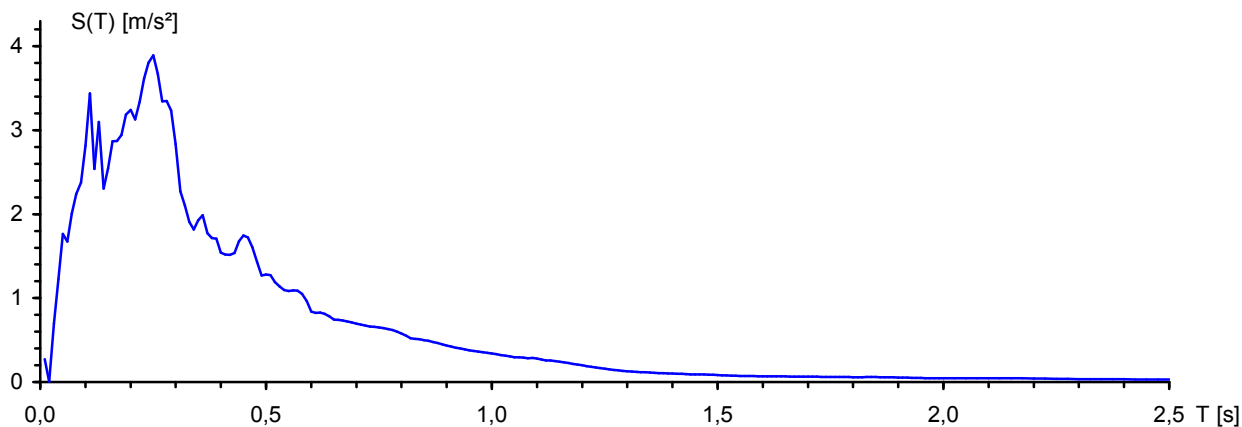


Die Ordinaten der Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Antwortspektren ergeben sich aus den Maximalordinaten von  $S_d^*(t)$  für unterschiedliche Schwingzeiten.

$$S_d = S_v(1/\omega_i) = S_a(1/\omega_i^2) = \max | S_d^*(t) | \tag{21}$$

Diese werden in der Regel noch normiert und geglättet (siehe auch Antwortspektren der unterschiedlichen Normen).

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein auf Basis der oben abgebildeten Bodenbeschleunigung berechnetes ungeglättetes, elastisches Beschleunigungs-Antwortspektrum. Hierbei wurde eine Dämpfung von 5% zugrundegelegt.



Aus dem Beschleunigungs-Antwortspektrum werden für die weitere Berechnung statische Ersatzlasten der jeweiligen Eigenform in folgender Weise ermittelt:

$$H_{E,i} = \beta_i S_{a,i} M \varphi_i \tag{22}$$

Hieraus ergeben sich für jede Eigenform Verformungen und Schnittgrößen, die vor der weiteren Verwendung ggf. noch statistisch überlagert werden dürfen.

Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung, ob genügend Modalbeiträge berücksichtigt worden sind, ist die sogenannte effektive modale Masse. Diese ergibt sich unter Beachtung von (8) zu:

$$M_{\text{eff}} = \sum_i \beta_i^2 M_i = \sum_i \beta_i^2 \tag{23}$$

Bei Erfassung aller Eigenformen entspricht diese der Gesamtmasse des untersuchten Tragwerks. In der Regel wird gefordert, dass die effektive modale Masse mindestens 90% der Gesamtmasse betragen soll (siehe EC 8 usw.) Diese Forderung wird bei üblichen Hochbauten schon durch die Berücksichtigung der ersten signifikanten Eigenformen erfüllt.

Bei Tragwerken mit vielen torsionsweichen Stäben und rotatorischer Massenbelegung oder quasi starren Teilsystemen kann die Erfüllung dieser Forderung jedoch problematisch werden, da dann eine sehr große Anzahl von Eigenformen zu berechnen ist. Deshalb sollte in diesem Fall über eine Abänderung des Rechenmodells oder der gewählten Massenbelegung nachgedacht werden.

Die in den Eigenmassen des Tragwerks nicht enthaltenen Ausbaumassen sowie die nach Norm zu berücksichtigenden Massenanteile infolge Verkehr sind durch geeignete *Massen aus Lastfällen* oder *Punktmassen* vom Benutzer festzulegen.

## Antwortspektrum nach DIN 4149:2005

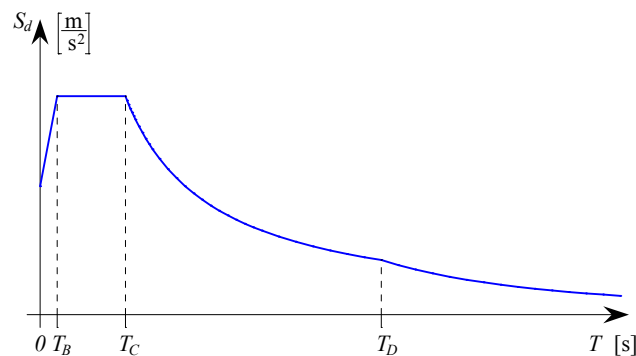
Die Ordinaten des Bemessungsspektrums  $S_d(T)$  werden durch folgende Ausdrücke bestimmt:

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \left( \frac{\beta_0}{q} - 1 \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \frac{T_C}{T}$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \frac{T_C T_D}{T^2}$$



Bemessungsspektrum  $S_d(T)$

Zur Bestimmung des Bemessungsspektrums sind die nachfolgenden Parameter erforderlich:

$T$	Schwingungsdauer ( $T = 1/f$ ).
$a_g$	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung gemäß DIN 4149, Tabelle 2, in Abhängigkeit von der Erdbebenzone. Dieser ist im Einstellungsdialog ( $a_x, a_y, a_z$ ) vom Benutzer anzugeben. Der Faktor von 0,7 für die vertikale Bodenbeschleunigung gemäß Abschnitt 5.4.1 (4) ist vom Benutzer zu berücksichtigen.
$\gamma_I$	Bedeutungsbeiwert gemäß Tabelle 3.
$\beta_0$	Verstärkungsbeiwert der Spektralbeschleunigung mit dem Referenzwert $\beta_0 = 2,5$ für 5 % viskoser Dämpfung.
$S, T_B, T_C, T_D$	Parameter gemäß Tabelle 4 bzw. 5.
$q$	Verhaltensbeiwert, der die Fähigkeit eines Tragwerks, der Erdbebeneinwirkung im nichtlinearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, berücksichtigt. Der Verhaltensbeiwert hängt vom plastischen Verformungs- und Energiedissipationsvermögen des Tragwerks ab und ist gemäß Abschnitt 8 bis 12 zu bestimmen. Für die vertikale Erdbebeneinwirkung wird nach Kapitel 8.3.3.2.2 mit einem $q$ von 1,0 gerechnet.

### Statistische Kombinationsmethoden

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS- oder CQC-Methode. Ist die nachfolgende Forderung erfüllt, wird bei der automatischen Wahl der Überlagerungsvorschrift entsprechend der Norm die SRSS-Methode gewählt, ansonsten die CQC-Methode.

$$T_i < 0,9 \cdot T_j \text{ mit } T_i \leq T_j$$

Ergänzende Hinweise sind im Abschnitt "Statistische Kombinationsmethoden" angegeben.

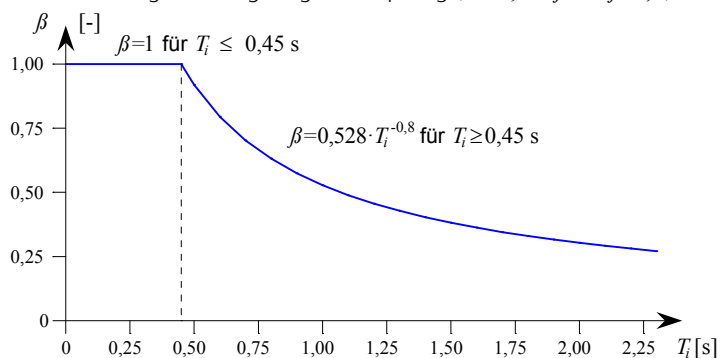
## Antwortspektrum nach DIN 4149:1981

Die für das Antwortspektrum nach DIN 4149:1981 benötigten Ordinatenwerte des Bemessungsspektrums  $S_{d,i}$  der  $i$ -ten Eigenform ergeben sich durch die nachfolgende Gleichung:

$$S_{d,i} = \beta a_0 \chi \alpha \quad (27)$$

mit

$\beta = \beta(T_i)$  Beiwert des normierten Antwortspektrums (DIN 4149:1981, Teil 1, Bild 2). Eine eventuelle Erhöhung des Beiwertes aufgrund zu geringer Dämpfung ( $D < 0,05$ :  $\beta^* = \beta \cdot 1,3$ ) kann gegebenenfalls erfasst werden.



$T_i$  Eigenschwingungsdauer der  $i$ -ten Eigenfrequenz.

$a_0$  Bodenbeschleunigung in Abhängigkeit von der Erdbebenzone (Abschnitt 7.2.1).

Diese ist im Einstellungsdialog ( $a_x, a_y, a_z$ ) vom Benutzer anzugeben. Der Faktor von 0,5 für die vertikale Bodenbeschleunigung ist vom Benutzer zu berücksichtigen (Abschnitt 7.3).

$\chi$  Faktor für den Baugrund (Abschnitt 7.2.2).

$\alpha$  Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Bauwerksklasse und der Erdbebenzone (Abschnitt 7.2.3).

### Statistische Kombinationsmethoden

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS- oder CQC-Methode. DIN 4149:1981 sieht die SRSS-Methode vor.

Ergänzende Hinweise sind im Abschnitt "Statistische Kombinationsmethoden" angegeben.

## Antwortspektrum nach EN 1998-1

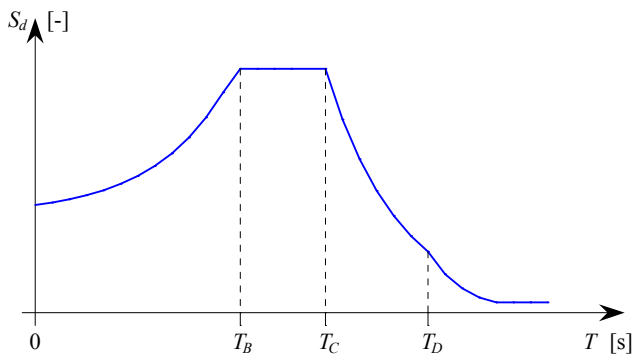
Die für das Bemessungsspektrum nach EN 1998-1 (EC8) benötigten Ordinatenwerte  $S_d$  ergeben sich durch die nachfolgenden Gleichungen:

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d(T) = a_g \cdot S \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T: \quad S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$



Bemessungsspektrum  $S_d$

Zur Bestimmung des Bemessungsspektrums sind die nachfolgenden Parameter erforderlich:

$\gamma_I$  Bedeutungsbeiwert gemäß Abschnitt 4.2.5.

$a_g$  Bemessungswert der Bodenbeschleunigung für Baugrundklasse A mit  $a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$ . Die zu verwendende Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung  $a_{gR}$  ist im Einstellungsdialog ( $a_x, a_y, a_z$ ) vom Benutzer anzugeben. Dabei ist der Faktor für die vertikale Bodenbeschleunigung gemäß Tabelle 3.4 vom Benutzer zu berücksichtigen. Für Spektren vom Typ 1 ist die vertikale Bodenbeschleunigung auf 90% und für Spektren vom Typ 2 auf 45% der horizontalen Bodenbeschleunigung zu begrenzen.

$S, T_B, T_C, T_D$  Parameterwerte gemäß Abschnitt 3.2.2.

$q$  Verhaltensbeiwert, der die Fähigkeit eines Tragwerks, der Erdbebeneinwirkung im nichtlinearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, berücksichtigt. Der Verhaltensbeiwert hängt vom plastischen Verformungs- und Energiedissipationsvermögen des Tragwerks ab und ist gemäß den Angaben der Norm EN 1998-1 in Rechnung zu stellen. Für die vertikale Erdbebeneinwirkung wird mit einem  $q$  von 1,0 gerechnet.

$\beta$  Beiwert für den unteren Grenzwert für das horizontale Bemessungsspektrum mit  $\beta = 0,2$ .

### Statistische Kombinationsmethode

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS- oder CQC-Methode. Ist die nachfolgende Forderung erfüllt, wird bei der automatischen Wahl der Überlagerungsvorschrift entsprechend der Norm die SRSS-Methode gewählt, ansonsten die CQC-Methode.

$$T_i < 0,9 \cdot T_j \text{ mit } T_i \leq T_j$$

Ergänzende Hinweise sind im Abschnitt "Statistische Kombinationsmethoden" angegeben.

## Antwortspektrum nach ÖNORM B 4015

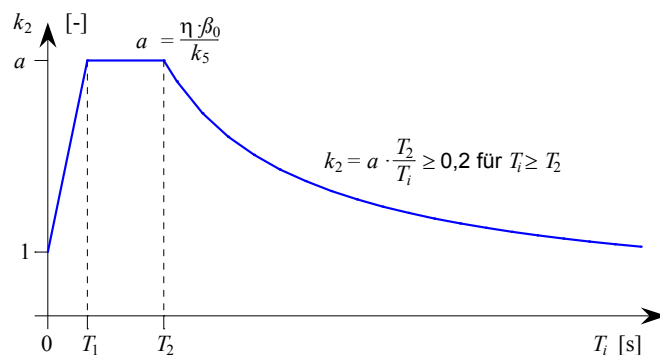
Die für das Antwortspektrum nach ÖNORM B 4015 benötigten seismischen Koeffizienten  $k_{E,i}$  der  $i$ -ten Eigenform ergeben sich durch die nachfolgende Gleichung:

$$k_{E,i} = \varepsilon \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{3,i} \cdot k_4$$

mit

- $\varepsilon$  Erdbebenkoeffizient in Abhängigkeit der Bodenbeschleunigung  $a_0$  und der Erdbeschleunigung  $g$  mit  $\varepsilon = a_0 / g$ . Der Faktor von 0,67 für die effektive vertikale Bodenbeschleunigung ist vom Benutzer zu berücksichtigen.
- $k_1$  Gründungskoeffizient (Tabelle 9).
- $k_2$  Bauwerks-Reaktionskoeffizient.
- $k_{3,i}$  Verteilungskoeffizient.
- $k_4$  Faktor zur Berücksichtigung der Bauwerksart (in der Regel 1, bei Brücken gemäß Absatz 10.2).

Zur Bestimmung des Bauwerks-Reaktionskoeffizienten  $k_2$  sind die nachfolgenden Parameter erforderlich:



- $T_i$  Eigenschwingungsdauer der  $i$ -ten Eigenfrequenz.
- $T_1, T_2$  Reaktionsparameter [s] (Tabelle 9).
- $\eta$  Faktor zur Bestimmung der Bauwerksdämpfung mit 
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + 100 \cdot \xi}}$$
- $\xi$  Lehr'sches Dämpfungsmaß.
- $\beta_0$  Reaktionsparameter in Abhängigkeit vom Untergrund (Tabelle 9).
- $k_5$  Bauwerksduktilität (Verhältnis der Grenzdeformation zur elastischen Deformation, Tabelle 12). Falls der Wert größer 1,5 ist, wird  $\eta$  nicht kleiner als 1 angenommen.

### Statistische Kombinationsmethoden

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS- oder CQC-Methode. Ist die nachfolgende Forderung erfüllt, wird bei der automatischen Wahl der Überlagerungsvorschrift entsprechend ÖNORM B 4015 die SRSS-Methode gewählt, ansonsten die CQC-Methode.

$$f_i / f_j < 1 / (1 + 10\xi) \text{ mit } f_i \leq f_j \text{ und } j = 1 \text{ bis } n$$

Ergänzende Hinweise sind im Abschnitt "Statistische Kombinationsmethoden" angegeben.

## Antwortspektrum nach SIA 261:2014

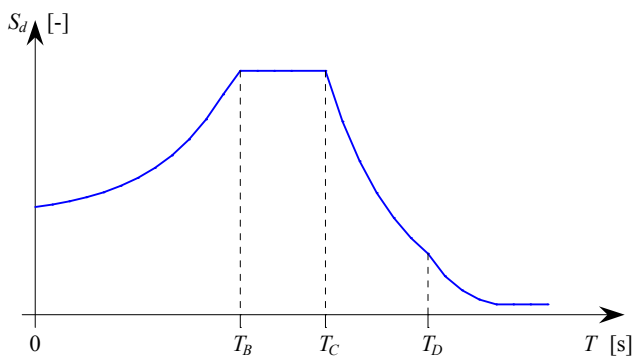
Die für das Antwortspektrum nach SIA 261 benötigten Ordinatenwerte  $S_d$  ergeben sich durch die nachfolgenden Gleichungen:

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_d = \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} S \left[ 0,67 + \left( \frac{2,5}{q} - 0,67 \right) \frac{T}{T_B} \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \quad S_d = 2,5 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} \frac{S}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: \quad S_d = 2,5 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} S \frac{T_C}{T q}$$

$$T_D \leq T: \quad S_d = 2,5 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} S \frac{T_C T_D}{T^2 q} \geq 0,1 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g}$$



Zur Bestimmung des Bemessungsspektrums sind die nachfolgenden Parameter erforderlich:

$\gamma_f$	Bedeutungsfaktor gemäß Tabelle 25.
$a_{gd}$	Bodenbeschleunigung gemäß Abschnitt 16.2.1.2 in Abhängigkeit von der Erdbebenzone. Der Faktor von 0,7 für die vertikale Erdbebeneinwirkung gemäß Abschnitt 16.2.4.2 ist vom Benutzer zu berücksichtigen.
$g$	Erdbeschleunigung.
$S, T_B, T_C, T_D$	Reaktionsparameter gemäß Tabelle 24.
$q$	Verhaltensbeiwert, der die Fähigkeit eines Tragwerks, der Erdbebeneinwirkung im nicht-linearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, berücksichtigt. Der Verhaltensbeiwert hängt vom plastischen Verformungs- und Energiedissipationsvermögen des Tragwerks ab und ist gemäß den Angaben der Normen SIA 262 bis 267 in Rechnung zu stellen. Für die vertikale Erdbebeneinwirkung wird mit einem $q$ von 1,5 gerechnet.

### Statistische Kombinationsmethode

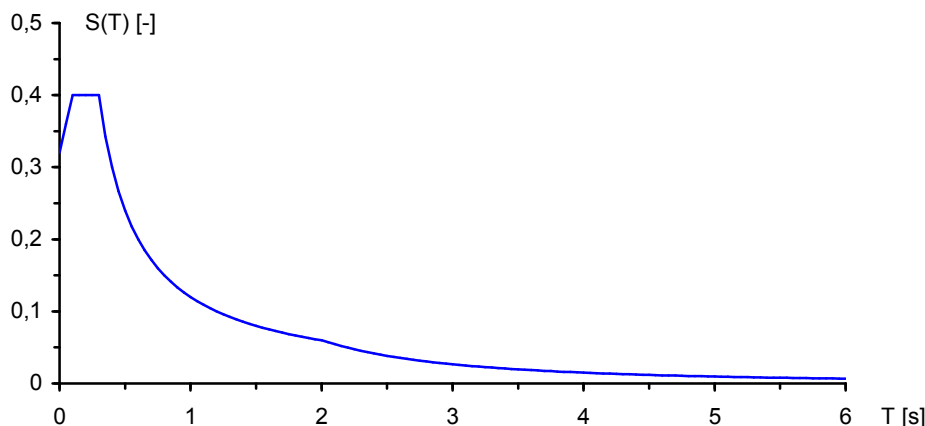
Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS-Methode.

Ergänzende Hinweise sind im Abschnitt "Statistische Kombinationsmethoden" angegeben.



### Alternatives Antwortspektrum

Der Verlauf des alternativen Antwortspektrums kann frei definiert werden. Die alternativen Beschleunigungs-Antwortspektren ( $S_{a,x}, S_{a,y}, S_{a,z}$ ) berechnen sich als Produkt aus den angegebenen Bodenbeschleunigungen ( $a_x, a_y, a_z$ ) und den benutzerdefinierten normierten Antwortspekten (*Standard* oder *Vertikal*).



Beispiel eines normierten alternativen Antwortspektrums

### Statistische Kombinationsmethoden

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach der SRSS- oder CQC-Methode.

### Statistische Kombinationsmethoden

Da das Antwortspektrum nur Maximalamplituden erfasst, erfolgt die Überlagerung der Verschiebungen und Schnittgrößen nach einem der beiden nachfolgenden statistischen Gesetze:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2} \tag{SRSS-Methode}$$

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E_i \cdot \rho_{ij} \cdot E_j} \tag{CQC-Methode}$$

mit

$E_i$  Verschiebungen und Schnittgrößen der  $i$ -ten Eigenformen.

$n$  Anzahl der Eigenformen.

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2 \cdot (1+r) \cdot r^{1,5}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 \cdot r(1+r)^2}$$

$r = f_i / f_j = T_j / T_i$  Frequenzverhältnis.

$\xi$  Lehr'sches Dämpfungsmaß.

Die CQC-Methode ist nur für  $\xi > 0$  zulässig.

Im Standard-Fall wird je nach Norm die Überlagerungsvorschrift automatisch gewählt. Ist z.B. nach DIN 4149 die nachfolgende Forderung für alle zu untersuchenden Eigenformen erfüllt, wird bei der automatischen Wahl der Überlagerungsvorschrift die SRSS-Methode gewählt, ansonsten die CQC-Methode.

$$T_i \leq 0,9 T_j \text{ mit } T_i \leq T_j$$

Liegt ein symmetrisches, räumliches Tragwerk vor, ergeben sich häufig zwei gleichartige Schwingzeiten ( $T_i = T_j$ ). Somit wird bei derartigen Systemen bei der automatischen Wahl der Überlagerungsvorschrift immer mit der CQC-Methode gearbeitet. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, die Kombinationsmethode manuell auszuwählen.

## Einwirkungen infolge Erdbeben

Im Rahmen der Tragfähigkeitsnachweise der unterschiedlichen Normen ist für die Erdbebensituation eine Einwirkung infolge Erdbeben ( $A_{Ed}$ ) zu berücksichtigen.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \cdot P \cdot A_{Ed} \cdot \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

In der Regel sind zwei zueinander orthogonale horizontale Erdbebenrichtungen zu untersuchen und in der Form

$$(E_{Edx} \oplus 0,3 \cdot E_{Edy}) \text{ oder } (0,3 \cdot E_{Edx} \oplus E_{Edy})$$

zu kombinieren. Dabei können die Schnittgrößen  $E_{Edx}$  bzw.  $E_{Edy}$  durch statistische Überlagerung ermittelt werden.

Die beiden nachfolgenden Kombinationen zeigen die Vorgehensweise.

### Lastfallkombination 1, Edx "+" 0,3 Edy

1. veränderliche exklusive Einwirkung	Faktor
Antwortspektrum überlagert (x)	-1,000
Antwortspektrum überlagert (x)	1,000
2. veränderliche exklusive Einwirkung	Faktor
Antwortspektrum überlagert (y)	-0,300
Antwortspektrum überlagert (y)	0,300

### Lastfallkombination 2, 0,3 Edx "+" Edy

1. veränderliche exklusive Einwirkung	Faktor
Antwortspektrum überlagert (x)	0,300
Antwortspektrum überlagert (x)	-0,300
2. veränderliche exklusive Einwirkung	Faktor
Antwortspektrum überlagert (y)	1,000
Antwortspektrum überlagert (y)	-1,000

Die zufälligen Torsionswirkungen nach DIN 4149:2005, Abschnitt 6.2.3.3, bzw. EN 1998-1, Abschnitt 4.3.2, sind in den vom Programm berechneten statischen Ersatzlasten nicht enthalten. Sie sind gegebenenfalls durch zusätzliche vom Benutzer definierte Lastfälle in den Kombinationen zu erfassen.

### Kennwert der Empfindlichkeit gegenüber Geschossverschiebungen

Bei der Untersuchung der Tragfähigkeit nach DIN 4149:2005, Abschnitt 7.2.2, bzw. EN 1998-1, Abschnitt 4.4.2.2, ist dieser Kennwert zu überprüfen (siehe Beispiel *Erdbeben*). Überschreitet er den Wert von 0,1, sind die Reaktionen aus Erdbebeneinwirkung ggf. zu vergrößern bzw. eine Berechnung nach Theorie 2. Ordnung durchzuführen. Der Wert von  $\theta$  darf 0,3 nicht überschreiten.

Eine automatische Berechnung des Wertes ist programmseitig nicht möglich.

## Dynamische Zugüberfahrt

Hiermit kann die dynamische Beanspruchung durch vordefinierte Regelzüge wie *ICE*, *Thalys* etc. oder selbstdefinierte Zuglasten für beliebige Stab- und Flächentragwerke untersucht werden.

### Fahrwege

Die Beschreibung der Fahrwege erfolgt mit der Lastart „*Dynamische Zuglast*“ durch die Eingabe beliebiger Polygone auf dem Tragwerk. Es können gleichzeitig mehrere Fahrwege berücksichtigt werden, so dass z.B. die gegenseitige Beeinflussung entgegenkommender Züge untersucht werden kann.

### Zugdefinition

Die Lastbilder der Typenzüge für Hochgeschwindigkeitsstrecken werden programmseitig vorgehalten. Zusätzlich können benutzerdefinierte Zuglasten eingegeben werden. Weitere Vorgabeparameter sind die Geschwindigkeit und die Startzeit für jeden Zug. Jeder Zug ist einem Fahrweg zugeordnet. Durch die Variation der Startzeiten kann der zeitliche Abstand verschiedener Züge festgelegt werden.

### Berechnung

Die dynamische Zugüberfahrt kann im Rahmen einer direkten oder modalen Zeitschrittintegration analysiert werden. Die Anzahl und Dauer der Zeitschritte können vom Anwender vorgegeben werden. Hierbei sind das Schwingverhalten und die gewünschte Fahrstrecke der Züge zu berücksichtigen.

### Ergebnisse

Als Berechnungsergebnisse stehen die Deformationen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die Schnittgrößen für jeden Zeitschritt zur Verfügung. Diese können einzeln oder in Zeitdiagrammen dargestellt werden. Zusätzlich können die Verformungen im Systemviewer dynamisch animiert werden. Für weitere Untersuchungen werden exklusive Kombinationen der Ergebnisdaten bereitgestellt.

## Eingaben

Die tabellarischen Eingaben erfolgen im Ordner *Dynamik* der Datenbasis.

## Berechnungseinstellungen

Hier werden der gewünschte Berechnungsmodus und die zugehörigen Steuergrößen eingestellt.

### Berechnungsmodus

- **Eigenwerte**
  - Eigenwerte
  - Wirkung der Massen
- **Stationärer Response**
  - Eigenwerte
  - Wirkung der Massen
  - Folgende Lastfälle berücksichtigen
  - Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen
- **Antwortspektrum**
  - Eigenwerte
  - Wirkung der Massen
  - Bodenbeschleunigung
  - Beiwerte nach DIN 4149:1981, DIN 4149:2005, EN 1998-1:2004, ÖNORM B 4015, SIA 261
  - Alternatives Antwortspektrum
  - Statische Ersatzlasten der Modalbeiträge speichern
- **Modale Zeitschrittintegration**
  - Eigenwerte
  - Wirkung der Massen
  - Zeitschrittintegration
  - Folgende Lastfälle berücksichtigen
  - Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen
- **Direkte Zeitschrittintegration**
  - Wirkung der Massen
  - Zeitschrittintegration
  - Folgende Lastfälle berücksichtigen
  - Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen

## Eigenwerte

*Anzahl:* Es können bis zu 999 Eigenwerte und -vektoren berechnet werden.

*Vektorraum:* Größe des während der Eigenwertiteration zu verwendenden Vektorraumes. Die Anzahl der Iterationsvektoren muss stets größer oder gleich der Anzahl der gewünschten Eigenwerte sein.

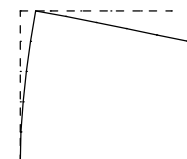
*Genauigkeit:* Größe des maximalen relativen Fehlers [%].

*Steifigkeit nach 2. Ordnung (LF):* Eigenwertberechnung mit einer Steifigkeitsmatrix, in welcher die geometrisch nichtlinearen Anteile nach Elastizitätstheorie 2. Ordnung berücksichtigt werden. Dafür werden die Schnittgrößen des hier gewählten statischen Lastfalls verwendet.

## Wirkung der Massen

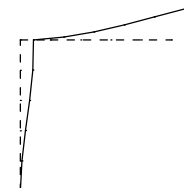
Auswahl der in der Massenmatrix berücksichtigten Massenanteile.

Alle Massen



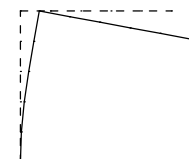
Eigenform 1: 6,43 Hz

Alle Massen



Eigenform 2: 17,48 Hz

Nur Massen x-Richtung



Eigenform 1: 8,56 Hz

**Achtung:** Durch Unterdrückung von Massenanteilen ergeben sich unter Umständen stark abweichende Eigenformen und Eigenfrequenzen!

## Bodenbeschleunigung

$a_x$ ,  $a_y$ : Vektor mit dem Regelwert der Horizontalbeschleunigung des Bodens in Abhängigkeit von der Erdbebenzone [ $m/s^2$ ].

$a_z$ : Regelwert der Vertikalbeschleunigung des Bodens [ $m/s^2$ ]. Dieser braucht in der Regel nicht berücksichtigt zu werden.

*Komponenten getrennt aufbringen:* Für jede Richtung werden eigene statische Ersatzlastfälle aufgebracht.

*Bezugssystemwinkel Alpha:* Verdrehung der Horizontalbeschleunigungen  $a_x$  und  $a_y$  um die globale z-Achse [°].

## Beiwerte nach DIN 4149:2005

*Untergrundverhältnisse:* Definiert die Untergrundparameter entsprechend DIN 4149:2005, Tabelle 4 bzw. 5.

*Untergrundparameter S, TB, TC, TD:* Beiwerte zur Bestimmung des Bemessungsspektrums.

*Lehr'sches Dämpfungsmaß:* Maß  $\xi$  zur Bestimmung des Dämpfungskorrekturbeiwertes  $\eta$ . Beim Bemessungsspektrum nach Abschnitt 5.4.3 wird von 5% viskoser Dämpfung ausgegangen.

*Bedeutungsbeiwert  $\gamma_I$ :* Faktor gemäss Tabelle 3.

*Verhaltensbeiwert (horizontal) q:* Beiwert zur Berücksichtigung der Energiedissipationsfähigkeit eines Tragwerks nach Abschnitt 8 bis 12. Für vertikale Erdbebeneinwirkungen wird  $q$  programmintern gleich 1,0 gesetzt.

*Kombinationsmethode:*

- *Standard:* Das Programm wählt automatisch eine der beiden nachfolgenden Kombinationsmethoden (Siehe *Grundlagern - Antwortspektrum nach DIN 4149:2005*).
- *SRSS-Methode:* Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).
- *CQC-Methode:* Vollständige quadratische Kombination (Complete quadratic combination).

## Beiwerte nach DIN 4149:1981

*Baugrundfaktor kappa*: Faktor zur Berücksichtigung des Baugrunds (DIN 4149:1981, Abschnitt 7.2.2).

*Faktor zur Berücksichtigung der Bauwerksklasse alpha*: Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Bauwerksklasse und der Erdbebenzone (Abschnitt 7.2.3).

*Beiwert  $\beta$  um 30 % erhöhen*: Der Beiwert  $\beta$  (Bild 2) wird um 30 % erhöht. Nach Abschnitt 8.1 ist dies für Bauwerke mit einem Dämpfungsmaß  $D < 0,05$  erforderlich.

*Kombinationsmethode*:

- *SRSS-Methode*: Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).
- *CQC-Methode*: Vollständige quadratische Kombination (Complete quadratic combination)

*Lehr'sches Dämpfungsmaß*: Dämpfungszahl des Bauwerkes zur Berechnung des Wechselwirkungsfaktors bei der Kombination der modalen Anteile nach der CQC-Methode.

## Beiwerte nach EN 1998-1

*Baugrundklasse*: Wahl der Parameterwerte entsprechend EN 1998-1, Tabelle 3.2 bzw. 3.3.

*Parameterwerte  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$* : Beiwerte zur Bestimmung des Bemessungsspektrums für die Horizontalkomponenten der Erdbebeneinwirkung. Das Bemessungsspektrum für die Vertikalkomponenten der Erdbebeneinwirkung wird gemäß Tabelle 3.4 mit den Parameterwerten  $S=1,0$ ,  $T_B=0,05$ ,  $T_C=0,15$  und  $T_D=1,00$  ermittelt.

*Lehr'sches Dämpfungsmaß*: Maß  $\xi$  zur Bestimmung des Faktors zur Berücksichtigung der Bauwerksdämpfung  $\eta$ . Beim Bemessungsspektrum nach Abschnitt 3.2.2.5 wird von 5% viskoser Dämpfung ausgegangen.

*Bedeutungsbeiwert  $\gamma_i$* : Faktor gemäß Abschnitt 4.2.5.

*Verhaltensbeiwert (horizontal)  $q$* : Die Fähigkeit eines Tragwerks, der Erdbebeneinwirkung im nichtlinearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, darf mit dem Verhaltensbeiwert  $q$  berücksichtigt werden. Er wird für die horizontale Erdbebeneinwirkung verwendet. Für vertikale Erdbebeneinwirkungen wird  $q$  programmintern gleich 1,0 gesetzt.

*Kombinationsmethode*:

- *Standard*: Das Programm wählt automatisch eine der beiden nachfolgenden Kombinationsmethoden. (Siehe Grundlagen - Antwortspektrum nach EN 1998-1).
- *SRSS-Methode*: Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).
- *CQC-Methode*: Vollständige quadratische Kombination (Complete quadratic combination).

## Beiwerte nach ÖNORM B 4015

*Art des Untergrundes*: Definiert den Gründungskoeffizient und die Reaktionsparameter entsprechend ÖNORM B 4015, Tabelle 9.

*Gründungskoeffizient  $k_1$* : Wert nach Tabelle 9.

*Reaktionsparameter  $T_1, T_2, \beta_0$* : Beiwerte zur Bestimmung des Bauwerks-Reaktionskoeffizienten  $k_2$ .

*Lehr'sches Dämpfungsmaß*: Maß  $\xi$  zur Bestimmung des Faktors zur Berücksichtigung der Bauwerksdämpfung  $\eta$  und des Wechselwirkungsfaktors bei der Kombination der modalen Anteile nach der CQC-Methode.

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + 100 \cdot \xi}}$$

*Bauwerksduktilität  $k_5$* : Verhältnis der Grenzdeformation zur elastischen Deformation.

*Faktor zur Berücksichtigung der Bauwerksart*: Der Faktor  $k_4$  ist im Regelfall mit 1 anzusetzen.

*Kombinationsmethode*:

- *Standard*: Das Programm wählt automatisch eine der beiden nachfolgenden Kombinationsmethoden (Siehe Grundlagen - Antwortspektrum nach ÖNORM B 4015).
- *SRSS-Methode*: Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).
- *CQC-Methode*: Vollständige quadratische Kombination (Complete quadratic combination).

## Beiwerte nach SIA 261:2014

*Baugrundklasse:* Definiert die Reaktionsparameter entsprechend SIA 261, Tabelle 24.

*Reaktionsparameter  $S$ ,  $TB$ ,  $TC$ ,  $TD$ :* Beiwerte zur Bestimmung des Bemessungsspektrums.

*Lehr'sches Dämpfungsmaß:* Maß  $\xi$  zur Bestimmung des Faktors zur Berücksichtigung der Bauwerksdämpfung  $\eta$ . Beim Bemessungsspektrum nach Abschnitt 16.2.4.1 wird von 5% viskoser Dämpfung ausgegangen.

*Bedeutungsfaktor  $\gamma_f$ :* Faktor gemäss Tabelle 25.

*Verhaltensbeiwert (horizontal)  $q$ :* Die Fähigkeit eines Tragwerks, der Erdbebeneinwirkung im nichtlinearen Bereich mit Überfestigkeit zu widerstehen, darf mit dem Verhaltensbeiwert  $q$  berücksichtigt werden. Für Stahlbeton kann der Wert der Tabelle 14, SIA 262, entnommen werden. Er wird für die horizontale Erdbebeneinwirkung verwendet. Für vertikale Erdbebeneinwirkungen wird  $q$  programmintern gleich 1,5 gesetzt.

*Kombinationsmethode:*

*SRSS-Methode:* Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).

## Alternatives Antwortspektrum

*Kombinationsmethode:*

- *SRSS-Methode:* Wurzel der Summe der Quadrate (Square root of the sum of the squares).
- *CQC-Methode:* Vollständige quadratische Kombination (Complete quadratic combination)

*Lehr'sches Dämpfungsmaß:* Dämpfungszahl des Bauwerkes zur Berechnung des Wechselwirkungsfaktors bei der Kombination der modalen Anteile nach der CQC-Methode.

*Standard:* Verlauf des Standard-Antwortspektrums.

*Vertikal:* Verlauf des vertikalen Antwortspektrums. Ist dieses nicht definiert, wird auch für die vertikale Richtung das Standard-Antwortspektrum verwendet.

## Statische Ersatzlasten der Modalbeiträge speichern

Die für eine Erdbebenuntersuchung mit Antwortspektren berechneten statischen Ersatzlasten der Modalbeiträge, ggf. getrennt für die Beschleunigungsrichtungen, werden gespeichert und können anschließend in einen Lastfall importiert werden.

## Zeitschrittintegration

*Anzahl Zeitschritte:* Anzahl der auszuführenden Zeitschritte bei der Integration der Bewegungsgleichungen.

*Dauer des Zeitschrittes:* Zeitdauer eines Zeitschrittes [s].

*Ergebnisse alle  $n$  Schritte:* Die Speicherung jedes  $n$ -ten Zeitschrittes führt zur Reduzierung der Datenmenge. Die Genauigkeit der Integration wird nicht beeinträchtigt, jedoch die Qualität der Ergebnisdarstellung.

*Statische Anfangsbedingung (LF):* Der Schnittgrößen- und Deformationszustand des ausgewählten Lastfalls wird als statische Anfangsbedingung (Zustand zum Zeitpunkt  $t=0$ ) bei der direkten Zeitschrittintegration angesetzt. Dies ist insbesondere bei nichtlinearen Untersuchungen (z.B. Seiltragwerke) von Bedeutung, um vor Aufbringung einer zeitlich veränderlichen Belastung die ständigen Einwirkungen zu erfassen. In einem solchen Fall ist bekanntlich eine Superposition nicht zulässig. Die Belastungen (z.B. aus Eigenlast), welche die Anfangsbedingung erzeugen, sind zur Wahrung eines Gleichgewichtszustandes auch im zugehörigen dynamischen Lastfall (siehe unten) zu berücksichtigen. Diese können natürlich ebenfalls einen zeitlich veränderlichen Verlauf annehmen.

*Art des Last-Zeit-Verlaufes*

- *periodisch am Gesamtsystem:* Gleichartige cosinusförmige Erregung aller Freiheitsgrade.
- *instationär am Gesamtsystem:* Gleichartige instationäre Erregung aller Freiheitsgrade.
- *Knotenbezogen:* Unterschiedliche Last-Zeit-Verläufe für die verschiedenen Knoten bzw. Freiheitsgrade, welche in der Tabelle Knotenbezogene Last-Zeit-Verläufe definiert sind.
- *Lastbezogen:* Es werden die in den Lasten festgelegten Last-Zeit-Verläufe verwendet.
- *Zugüberfahrt:* Die geometrische Zuordnung der Zuglasten erfolgt über den zugehörigen Fahrweg. Der Fahrweg muss vollständig auf oder im Tragwerk verlaufen. Befinden sich Achslasten auf dem Fahrweg und können nicht einem Element zugeordnet werden, erfolgt eine Fehlermeldung. Die zeitabhängige Position der Achslasten ergibt sich in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Startzeit. Werden vom Anwender in einem Lastfall zusätzlich zu den Zuglasten noch andere Lastarten definiert, so werden diese als konstant über die Integrationszeit angesehen.

*Instationärer Last-Zeit-Verlauf:* Nummer der instationären Lastfunktion.

*Lastfrequenz:* Frequenz [Hz] der periodischen Erregung am Gesamtsystem.

*Phasenverschiebung:* Phasenverschiebung der periodischen Erregung am Gesamtsystem [rad].

## Folgende Lastfälle berücksichtigen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

## Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen

Aktivierung der definierten Knotenbeschleunigungen.

## Punktmassen

Mit dieser Funktion des Tragwerksmenüs werden Punktmassen für die dynamische Analyse eingegeben. Sie wirken zusätzlich zu den Massen aus gewählten Lastfällen und der verteilten Massenbelegung des Tragwerks, welche das Programm automatisch ermittelt. Die Punktmassen sind an Elementknoten gebunden und werden mit einem gefüllten Kreis dargestellt.

### Aus

Punktmassen aus der Graphikansicht entfernen.

### Eingeben

An ausgewählten Knoten werden die Punktmassen durch Eingabe ihrer Komponenten definiert.

## Komponenten einer Punktmasse

### Mux, Muy, Muz

Translatorische Massen in Richtung der globalen Achsen [t].

### Mphi.x, Mphi.y, Mphi.z

Rotatorische Massen um die globalen Achsen [t m<sup>2</sup>].



## Massen aus Lastfällen erzeugen

Darin können Lastfälle gewählt werden, woraus zusätzliche Knotenmassen erzeugt werden sollen. Hierzu werden Knotenlasten in globaler z-Richtung, die sich aus den Lastfällen ergeben, durch die Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) dividiert und als zusätzliche Punktmassen (translatorische Massen) in den Richtungen x, y und z-angesetzt. Die nachfolgend aufgeführten Lastarten, welche keine vertikale Last in diesem Sinne darstellen, werden vom Programm ignoriert.

- Brandfall
- Dynamischer Elementkollaps
- Dynamische Zuglast
- Einflussfläche, Einflusslinie
- Einfügen
- Einzelmoment auf Stäbe
- Freies Linienmoment auf Stäbe und Flächenelemente
- Knickeigenwerte
- Kriechen und Schwinden
- Lagersenkung
- Lastgruppe
- Linientorsionsmoment auf Stäbe
- Superposition
- Theorie
- Temperatur, Vordehnung
- Volleinspannkkräfte von Stäben
- Vorspannung

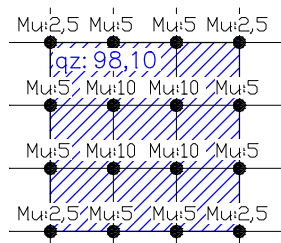
Des weiteren wird die Lastart *Eigenlast* nicht berücksichtigt, da die Eigenmasse des Systems bereits automatisch in der Massenmatrix enthalten ist.

### Lastfälle

Lastfälle markieren, um sie der aktuellen Einwirkung hinzuzufügen.

### Lastfaktor

Die einzelnen Lastfälle werden mit einem Faktor gewichtet.



Massenverteilung bei einem Elementtraster von 1 m und einer Last  $q_z$  von  $98,1 \text{ kN/m}^2$

Die Punktmassen aus Lastfällen, die sich bei der dynamischen Berechnung ergeben, können über die Datenbasis im Abschnitt „Ergebnisse, Aus Lasten erzeugte Massen“ eingesehen werden.

## Knotenbeschleunigungen

Die aus den eingegebenen Knotenbeschleunigungen resultierenden Trägheitskräfte werden zu den Belastungen addiert. Bei reiner Bodenerregung sollten deshalb keine äußeren Lasten definiert werden.

Knotenbeschleunigungen [ACCE]					
	Von Knoten	Bis Knoten	ax	ay	az
			[m/s²]		
1	1	10000	1,0000	0,0000	0,0000
2					

### Von Knoten, Bis Knoten

Knotengruppe die beschleunigt wird.

### ax, ay, az

Komponenten der Knotenbeschleunigung in globaler Richtung [m/s²].

## Modale Dämpfung

Mit dieser Tabelle werden die Dämpfungsparameter für die Eigendämpfung des Systems festgelegt. Im Programm wird für die modale Dämpfung  $\xi_i$  die nachfolgende Formel verwendet.

$$\xi_i = D + (\alpha + \beta \omega_i^2) / (2 \omega_i)$$

Im allgemeinen ist es nur sinnvoll, die modale Dämpfung entweder über das Lehr'sche Dämpfungsmaß oder die beiden Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  festzulegen. Singuläre Dämpferelemente sind nur über eine direkte Integration der Bewegungsgleichungen erfassbar.

Modale Dämpfung [DAEMPfung]			
Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	B [s]
1	2,000	0,00000	0,00000
2	2,000	0,00000	0,00000
3	2,000	0,00000	0,00000

### Eigenform

Nummer der Eigenform.

### D

Lehr'sches Dämpfungsmaß der Eigenform (in % der kritischen Dämpfung).

### alpha

Massenproportionale Dämpfung [1/s].

### B

Steifigkeitsproportionale Dämpfung [s].

## Lehr'sches Dämpfungsmaß

Dämpfungszahl des Bauwerkes. Der Wert  $\xi = 1$  entspricht der kritischen Dämpfung.

Dämpfungswerte  $\xi$  für den elastischen Bereich aus ÖNORM B 4015, Tabelle 11.

		$\xi$
Konstruktionsart	Stahlkonstruktionen	
	- geschraubt	0,005 bis 0,010
	- geschweißt	0,003 bis 0,005
	Stahlbetonkonstruktionen	0,005 bis 0,020
	Spannbetonkonstruktionen	0,005 bis 0,015
	Holzkonstruktionen	0,010 bis 0,030
	Mauerwerksbauten	0,010 bis 0,030
Zuschläge	Dämpfende Einbauten (z.B. Ausmauerungen)	0,005
	Gründungsdämpfungen	0,001 bis 0,003
Beispiele für Bauwerke (inkl. Gründung)	Turmartige Bauwerke	
	- aus Stahl	0,004 bis 0,008
	- aus Stahlbeton	0,006 bis 0,010
	Brücken	
	- aus Stahl	0,005 bis 0,015
	- aus Stahl- bzw. Spannbeton	0,006 bis 0,020
	Rahmenkonstruktionen	
	- aus Stahl	0,010 bis 0,020
	- aus Stahlbeton	0,015 bis 0,025

## Knotenbezogene Last-Zeit-Verläufe

Den Freiheitsgraden einer Knotengruppe können unterschiedliche Erregerkraftverläufe zugeordnet werden.

Knotenbezogene Last-Zeit-Verläufe [DYNLAST]						
	Von Knoten	Bis Knoten	Lastfrequenz [Hz]	Phasenverschiebung [rad]	Instationärer Last-Zeit-V.	Last-Komponente
1	2	11	3,0000	0,0000	0	*
2						

### Von Knoten, Bis Knoten

Knotengruppe.

### Lastfrequenz

Erregerfrequenz  $\omega_p$  für periodische Belastung [Hz].

### Phasenverschiebung

Phasenverschiebung für cosinusförmige Erregung [rad].

### Instationärer Last-Zeit-Verlauf

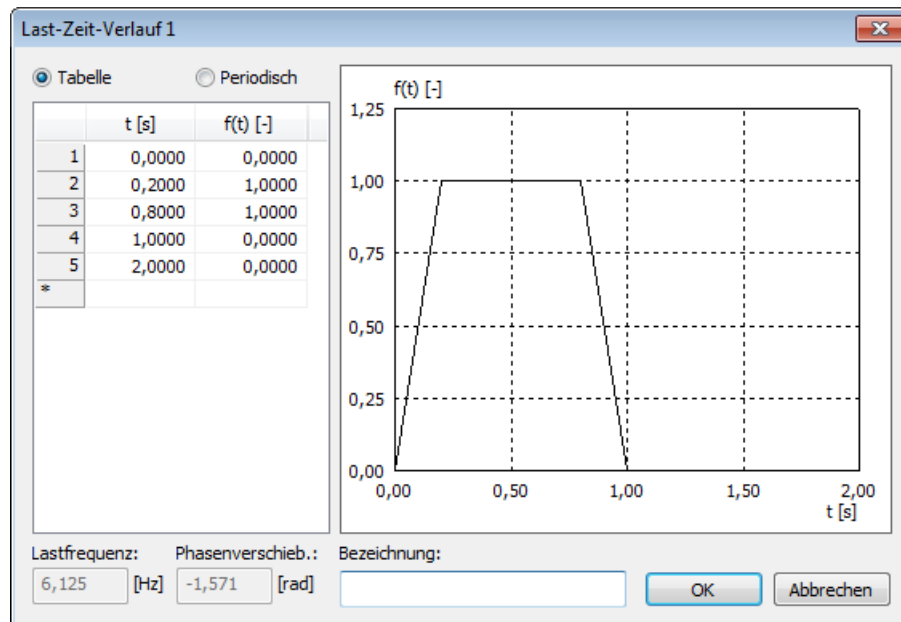
Nummer eines instationären Last-Zeit-Verlaufes. Die Lastfrequenz ist dabei zu Null zu setzen.

### Lastkomponente

Maßgebende Belastungskomponente  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  eines Knotens. Mit „\*“ werden alle Belastungskomponenten aufgebracht.

## Instationärer Last-Zeit-Verlauf

In diesem Dialog wird ein instationärer Last-Zeit-Verlauf definiert, der den zeitlichen Verlauf  $f(t)$  der Belastung beschreibt. Der Funktionswert gibt den Lastfaktor zum entsprechenden Zeitpunkt an. Der letzte Funktionswert gilt bis  $t = \infty$ .



## Rayleigh'sche Dämpfung

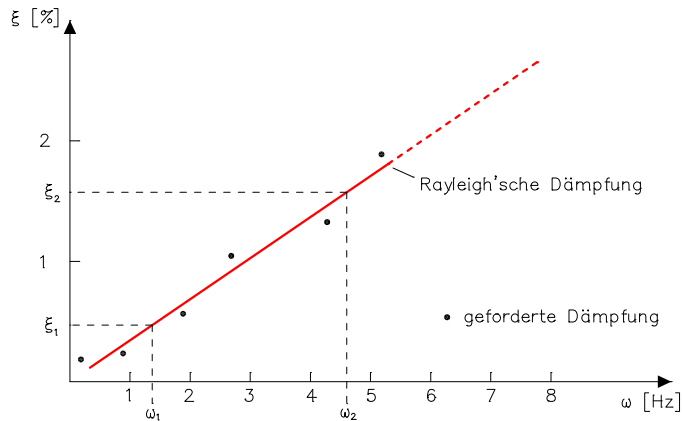
In dieser Tabelle werden Bestimmungsparameter ( $\omega_i, \xi_i$ ) für eine massen- und steifigkeitsproportionale Dämpfung für die direkte Integration der Bewegungsgleichungen eingegeben.

Rayleigh'sche Dämpfung [RAYLEIGH]		
	Eigenfrequenz [Hz]	zugeh. Dämpfungsmaß [%]
1. Wertepaar	1,000	2,000
2. Wertepaar	5,000	2,000

Im Programm wird der Dämpfungsansatz  $C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$  verwendet. Da die Faktoren  $\alpha$  und  $\beta$  im allgemeinen nicht bekannt sind, werden Sie programmintern über die nachfolgenden zwei Bestimmungsgleichungen ermittelt.

$$\alpha + \beta \cdot \omega_1^2 = 2 \omega_1 \cdot \xi_1, \quad \alpha + \beta \cdot \omega_2^2 = 2 \omega_2 \cdot \xi_2$$

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaßen. Die tatsächlich geforderte Dämpfung kann z.B. durch Messungen vorgegeben sein.



## Viskose Einzeldämpfer

Einzeldämpferelemente sind bestimmt durch Anfangs- und Endknoten sowie durch ihre Dämpfungskonstante. Die Verwendung von Einzeldämpfern ist nur im Rahmen einer direkten Integration der Bewegungsgleichungen möglich.

Viskose Einzeldämpfer [DAEMPFER]				
	Nr.	Anfangs-knoten	End-knoten	Dämpfungskonstante [kNs/m]
1	1	11	12	1,9000
2				

## Erregerfrequenzbereich Response

Die Erregerfrequenzen zur Berechnung eines stationären Responses werden einem Knotenfreiheitsgrad zugewiesen. Dies geschieht über die Eingabe eines Frequenzbereiches mit Angabe der zu berechnenden Frequenzschritte oder durch Auswahl eines Erregerspektrums über die dargestellte Tabelle.

Erregerfrequenzbereich Response [HERTZ]							
	Knoten	Freiheitsgrad	Erregungsart	Erregerfrequenzbereich von [Hz]	bis [Hz]	Anzahl Schritte	Spektrum
1	11	ux	Bereich	0,0000	10,0000	200	
2							

*Knoten*

Knoten für den der Response berechnet werden soll.

*Freiheitsgrad*

Knotenfreiheitsgrad  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ,  $\phi_{i,x}$ ,  $\phi_{i,y}$ ,  $\phi_{i,z}$ , für den ein stationärer Response berechnet werden soll.

*Erregungsart*

Auswahl von Erregerfrequenzbereich oder Spektrum.

*Erregerfrequenzbereich*

Anfangs- und Endfrequenz der Erregung [Hz].

*Anzahl Schritte*

Anzahl der Berechnungsschritte im Frequenzbereich.

*Spektrum*

Nummer des Erregerspektrums.

## Erregungsspektrum

Hiermit können einzelnen Erregerfrequenzen Lastfaktoren zugeordnet werden. Damit kann z.B. ein gemessenes Beanspruchungsspektrum (Wertepaare Frequenz-Beschleunigung) automatisch aufgebracht werden.

### Erregerfrequenz

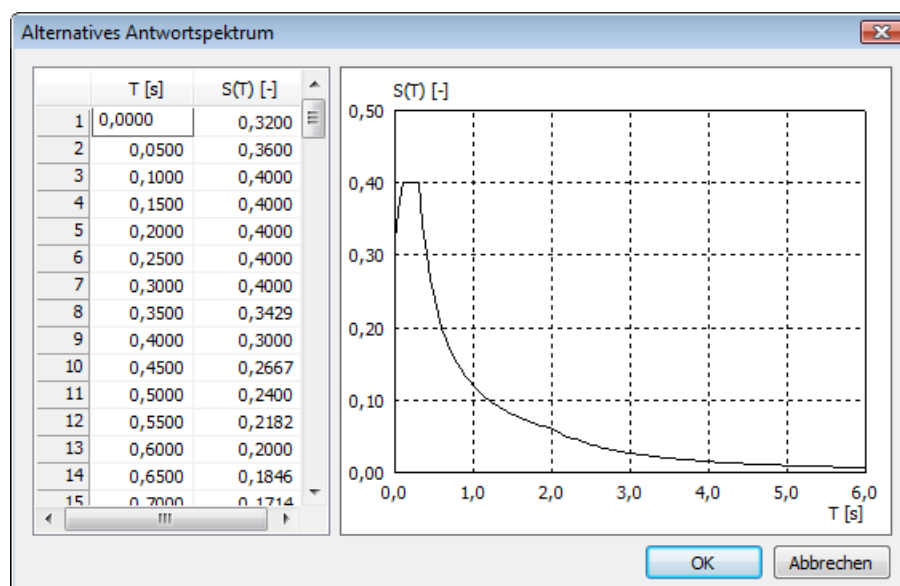
Erregerfrequenz für die ein stationärer Response berechnet werden soll [Hz].

### Lastfaktor

Faktor für die Belastung bei der entsprechenden Erregerfrequenz.

## Alternatives Antwortspektrum

In diesem Dialog wird ein benutzerdefiniertes normiertes Antwortspektrum definiert. Die Eingabe erfolgt über die Berechnungseinstellungen zur Dynamik wenn der entsprechende Berechnungsmodus gewählt ist.



### Schwingzeit T

Eigenschwingungsdauer [s].

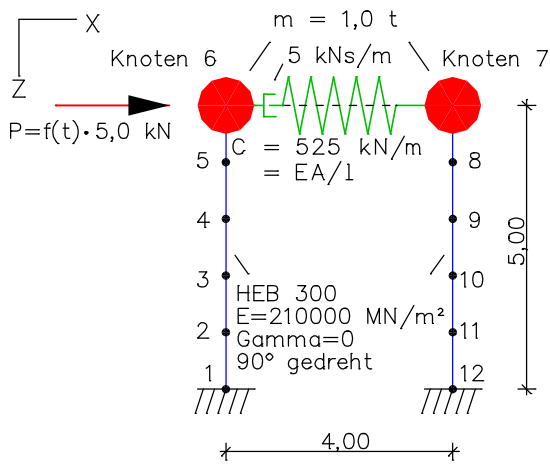
### Beiwert S(T)

Beiwert des benutzerdefinierten normierten Antwortspektrums.

## Beispiele

### Gekoppelter Zweimassenschwinger

Am Beispiel eines gekoppelten Zweimassenschwingers werden grundlegende Funktionen der dynamischen Tragwerksanalyse aufgezeigt. Die erforderlichen Eingaben werden jeweils wiedergegeben.



#### Folgende dynamische Analysen werden durchgeführt:

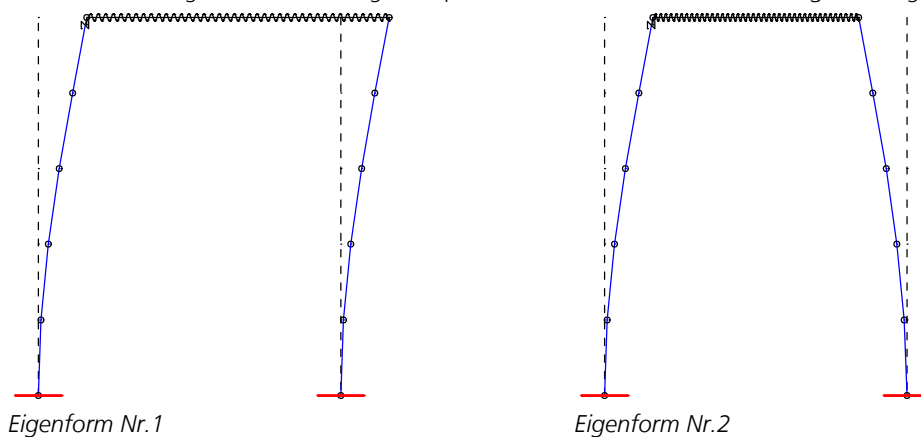
- Eigenwerte und Eigenformen.
- Stationärer Response in einem Erregerfrequenzbereich mit Systemdämpfung (Systemantwort im eingeschwungenen Zustand).
- Periodischer Last-Zeit-Verlauf „ $f(t) = \sin \omega t$ “ unter Berücksichtigung einer Systemdämpfung (modale Analyse).
- Periodischer Last-Zeit-Verlauf „ $f(t) = \sin \omega t$ “ unter Berücksichtigung eines viskosen Einzeldämpfers und Rayleigh'scher Dämpfung (direkte Analyse).
- Konstanter Last-Zeit-Verlauf „ $f(t) = 1$ “ mit Systemdämpfung (modale Analyse).
- Instationärer Last-Zeit-Verlauf „ $f(t) = \text{nichtperiodisch}$ “ unter Berücksichtigung einer Systemdämpfung (modale Analyse).
- Antwortspektrum nach DIN 4149:2005.
- Antwortspektrum nach EN 1998-1.

## Eigenwerte und Eigenformen

### Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Eigenwerte
Eigenwerte, Anzahl	2
Max. Vektorraum	2
Iterationsgenauigkeit	1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X

Die ermittelten Eigenformen und Eigenfrequenzen können mit der Funktion *Ergebnisse* graphisch dargestellt werden.



Das Berechnungsprotokoll liefert darüber hinaus:

**Eigenfrequenzen**

Nr.	Eigenwert [1/s <sup>2</sup> ]	rel. Tol. [-]	Omega [rad/s]	Eigenfrequenz [Hz]	Periode [s]
1	4,3142e+02	7,2896e-27	20,771	3,306	0,302502
2	1,4814e+03	1,1543e-28	38,489	6,126	0,163245

**Stationärer Response**

Der stationäre Response gibt die Systemantwort auf eine periodisch schwingende Belastung im eingeschwungenen Zustand über den definierten Frequenzbereich (hier von 0 bis 8 Hz) wieder. Das Dämpfungsmaß wird für beide Eigenfrequenzen auf 10% gesetzt. Man erkennt die Reaktionsspitzen im Bereich der Eigenfrequenzen.

**Berechnungsvorgaben Dynamik**

Berechnungsmodus	Stationärer Response
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	2 2 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Einwirkungen Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen Lastfälle	Nein 1 - Knoten 6; 5 kN

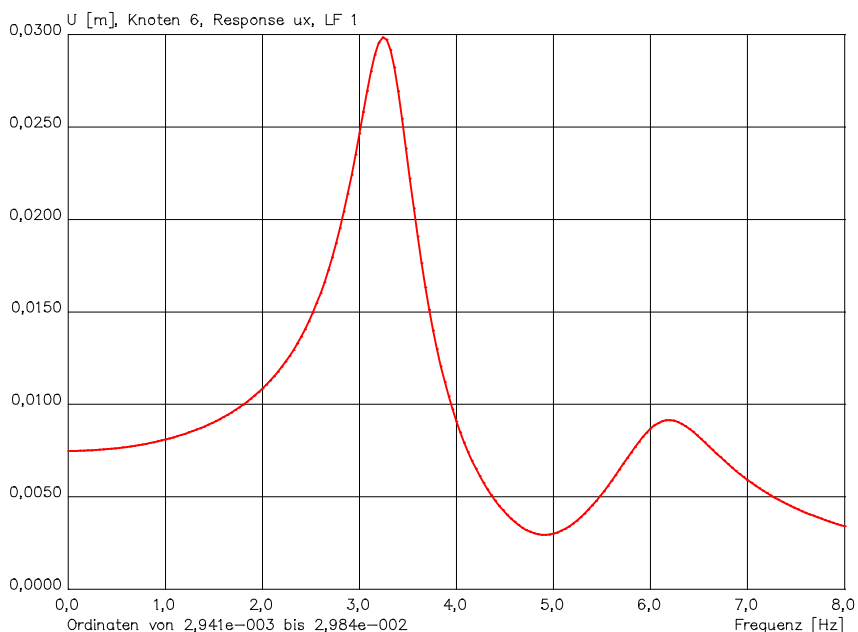
**Modale Dämpfung**

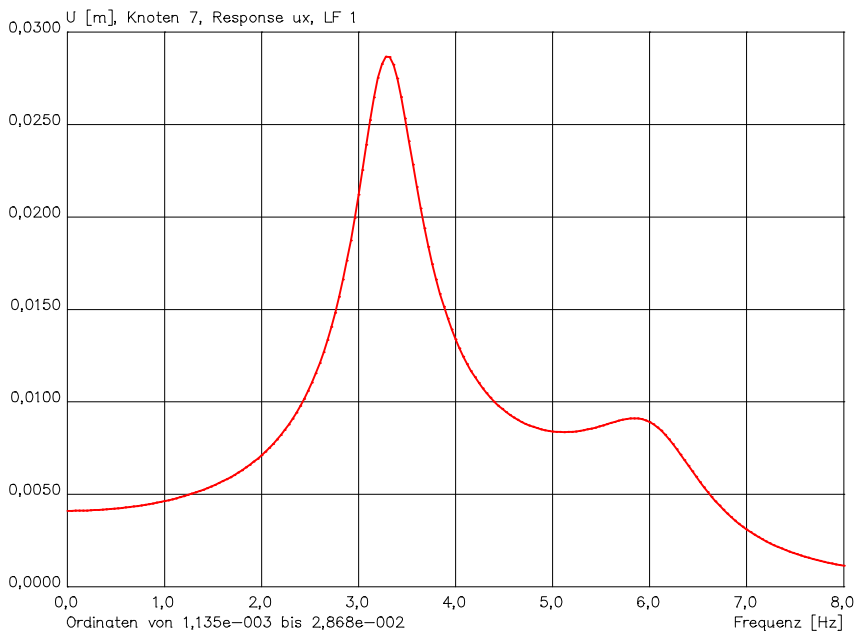
Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	β [s]
1	10,000	0,00000	0,00000
2	10,000	0,00000	0,00000

- D Lehr'sches Dämpfungsmaß
- alpha Massenproportionale Dämpfung
- β Steifigkeitsproportionale Dämpfung

**Erregerfrequenzbereich Response**

	Knoten	Freiheits- grad	Erregungs- art	Erregerfrequenzbereich von [Hz]	Erregerfrequenzbereich bis [Hz]	Anzahl Schritte	Spektrum
1	6	ux	Bereich	0,0000	8,0000	200	
2	7	ux	Bereich	0,0000	8,0000	200	





### Periodischer Last-Zeit-Verlauf (modale Analyse)

Zu berechnen ist das Systemverhalten auf Grund eines sinusförmigen Last-Zeit-Verlaufes unter Berücksichtigung einer Systemdämpfung von 10 %. Da das Programm von einem cosinusförmigen Last-Zeit-Verlauf ausgeht, muß eine Phasenverschiebung von  $-\pi/2$  definiert werden. Das System wird in seiner zweiten Eigenfrequenz erregt.

#### Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Modale Zeitschrittintegration
Eigenwerte, Anzahl	2
Max. Vektorraum	2
Iterationsgenauigkeit	1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Zeitschrittintegration Anzahl Zeitschritte	200
Größe des Zeitschritts	0,01 [s]
Ergebnisse alle n Schritte	1
Last-Zeit-Verlauf	Periodisch am Gesamtsystem
Lastfrequenz	6,126 [Hz]
Phasenverschiebung	-1,5708 [rad]
Einwirkungen Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen Lastfälle	Nein 1 - Knoten 6; 5 kN

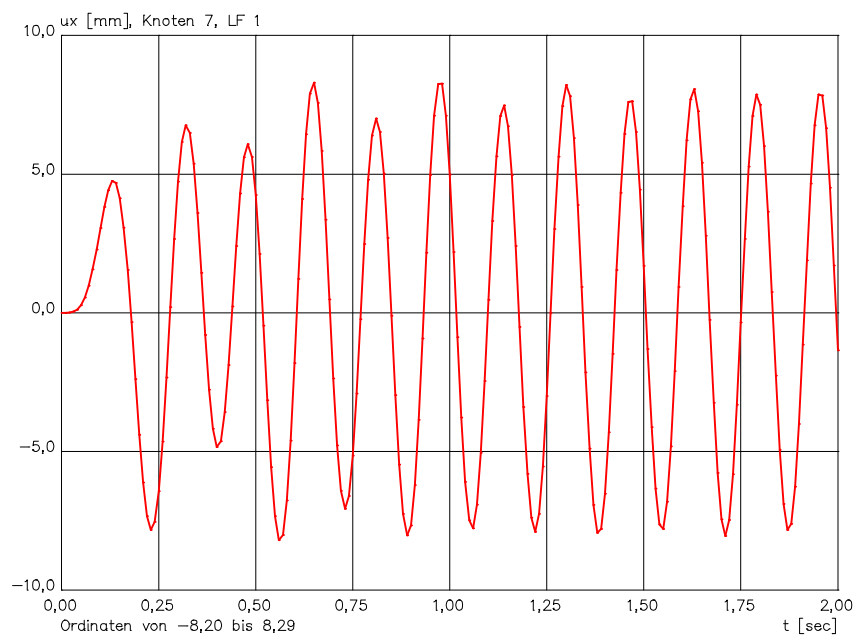
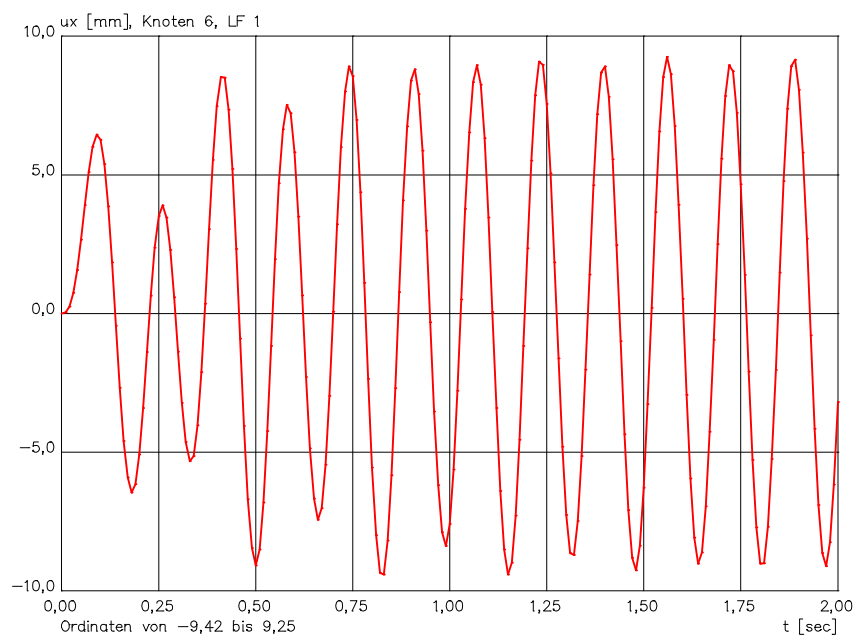
#### Modale Dämpfung

Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	β [s]
1	10,000	0,00000	0,00000
2	10,000	0,00000	0,00000

D Lehr'sches Dämpfungsmaß  
 alpha Massenproportionale Dämpfung  
 β Steifigkeitsproportionale Dämpfung

Nach Beendigung des Einschwingvorgangs bleibt die Schwingung stationär.





## Periodischer Last-Zeit-Verlauf (direkte Analyse)

Zu berechnen ist das Systemverhalten auf Grund eines sinusförmigen Last-Zeit-Verlaufes unter Berücksichtigung eines viskosen Einzeldämpfers und Rayleigh'scher Dämpfung. Da das Programm von einem cosinusförmigen Last-Zeit-Verlauf ausgeht, muss eine Phasenverschiebung von  $-\pi/2$  definiert werden. Das System wird in seiner zweiten Eigenfrequenz erregt.

### Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Direkte Zeitschrittintegration
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Zeitschrittintegration Anzahl Zeitschritte Größe des Zeitschritts Ergebnisse alle n Schritte Last-Zeit-Verlauf Lastfrequenz Phasenverschiebung	200 0,01 [s] 1 Periodisch am Gesamtsystem 6,126 [Hz] -1,5708 [rad]
Einwirkungen Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen Lastfälle	Nein 1 - Knoten 6; 5 kN

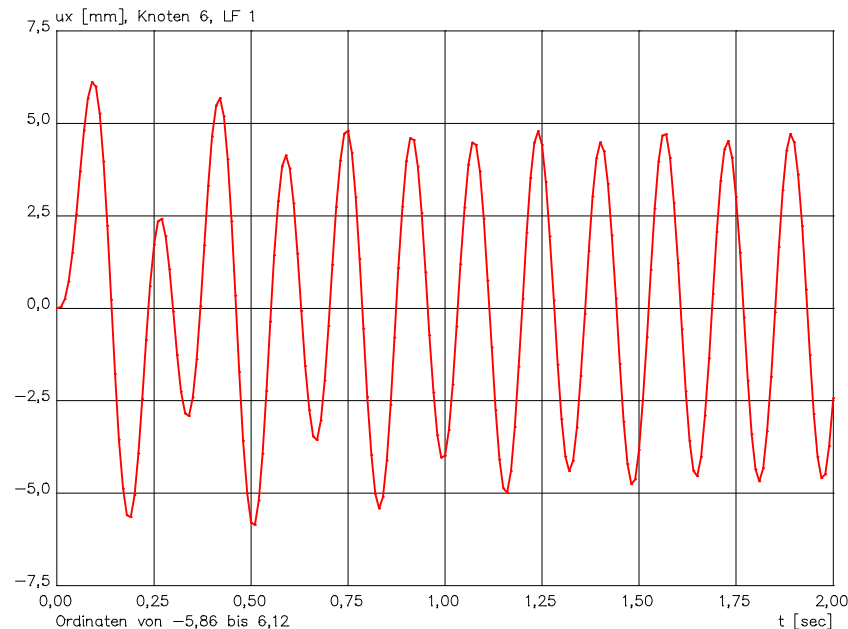
### Rayleigh'sche Dämpfung

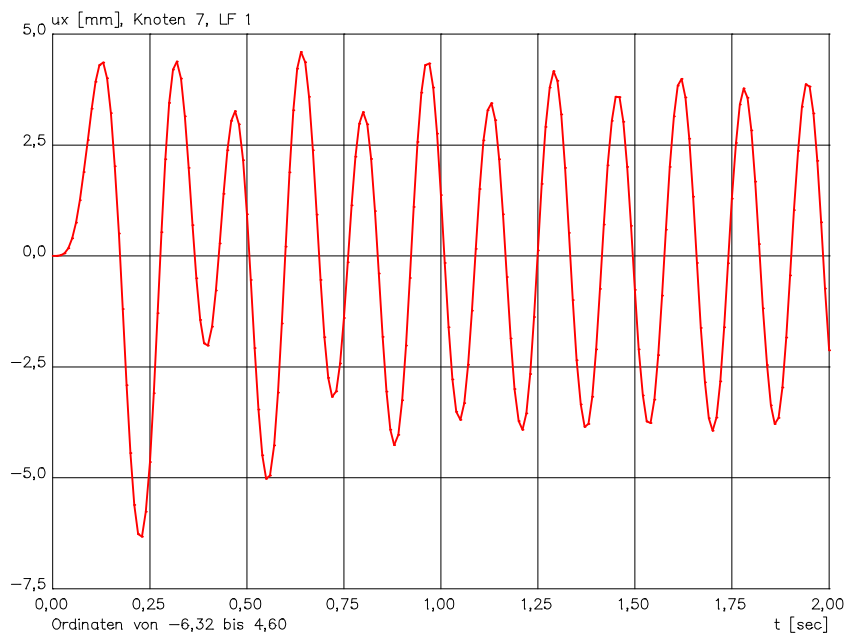
	Eigenfrequenz [Hz]	zugeh. Dämpfungsmaß [%]
1. Wertepaar	3,307	10,000
2. Wertepaar	6,126	10,000

### Viskose Einzeldämpfer

Nr.	Anfangs- knoten	End- knoten	Dämpfungskonstante [kNs/m]
1	1	6	5,0000

Nach Beendigung des Einschwingvorgangs bleibt die Schwingung stationär.





### Konstanter Last-Zeit-Verlauf

Zu berechnen ist das Systemverhalten auf Grund einer Last, welche zum Zeitpunkt  $t = 0$  aufgebracht wird und konstant weiter wirkt. Die Berechnung berücksichtigt eine Systemdämpfung von 10 %.

#### Berechnungsvorgaben Dynamik

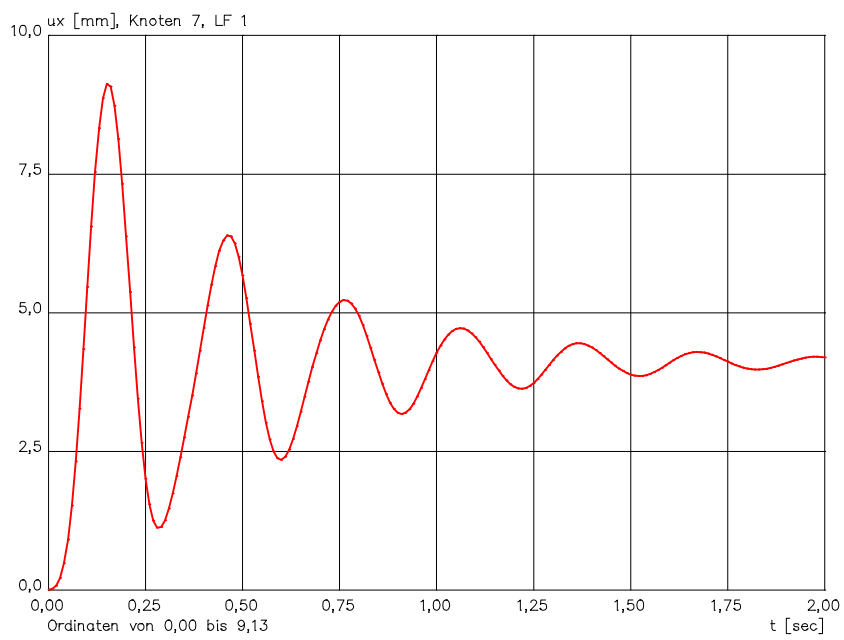
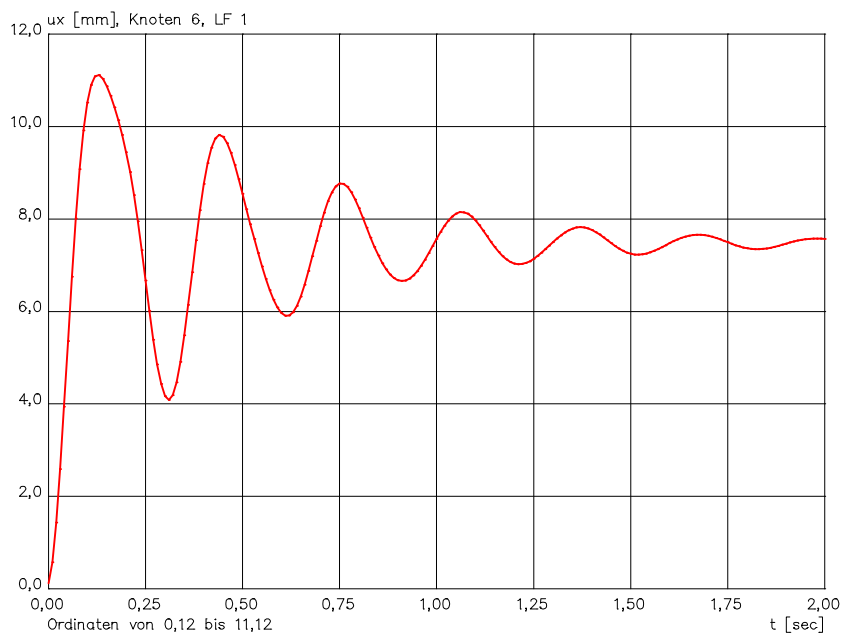
Berechnungsmodus	Modale Zeitschrittintegration
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	2 2 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Zeitschrittintegration Anzahl Zeitschritte Größe des Zeitschritts Ergebnisse alle n Schritte Last-Zeit-Verlauf Lastfrequenz Phasenverschiebung	200 0,01 [s] 1 Periodisch am Gesamtsystem 0 [Hz] 0 [rad]
Einwirkungen Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen Lastfälle	Nein 1 - Knoten 6; 5 kN

#### Modale Dämpfung

Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	beta [s]
1	10,000	0,00000	0,00000
2	10,000	0,00000	0,00000

D Lehr'sches Dämpfungsmaß  
alpha Massenproportionale Dämpfung  
beta Steifigkeitsproportionale Dämpfung

Als Endwert der gedämpften Schwingung stellt sich die statische Verschiebung  $u_x$  ein.



## Instationärer Last-Zeit-Verlauf

Zu berechnen ist das Systemverhalten auf Grund einer ungleichförmig schwingenden Belastung. Die Berechnung berücksichtigt eine Systemdämpfung von 10 %.

### Berechnungsvorgaben Dynamik

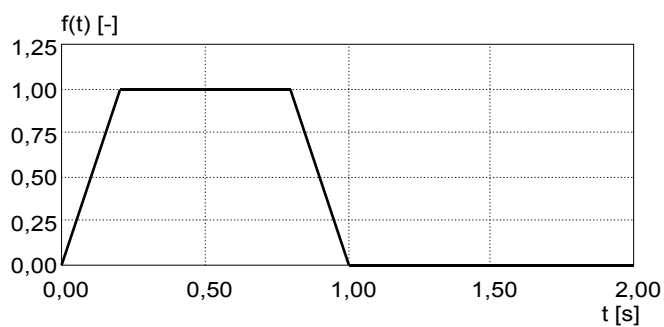
Berechnungsmodus	Modale Zeitschrittintegration
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	2 2 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Zeitschrittintegration Anzahl Zeitschritte Größe des Zeitschritts Ergebnisse alle n Schritte Last-Zeit-Verlauf	200 0,01 [s] 1 1, instationär am Gesamtsystem
Einwirkungen Berücksichtigung definierter Knotenbeschleunigungen Lastfälle	Nein 1 - Knoten 6; 5 kN

### Modale Dämpfung

Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	β [s]
1	10,000	0,00000	0,00000
2	10,000	0,00000	0,00000

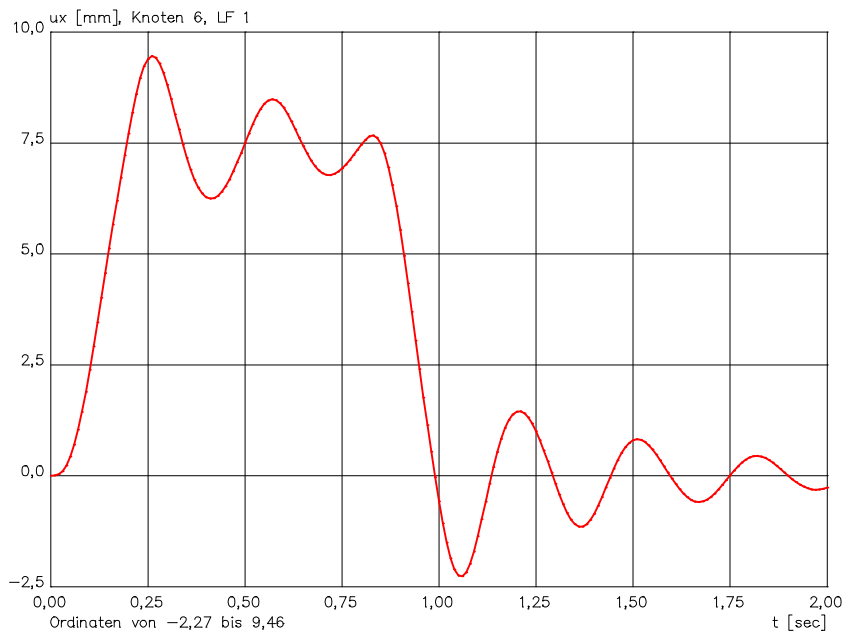
D Lehr'sches Dämpfungsmaß  
alpha Massenproportionale Dämpfung  
β Steifigkeitsproportionale Dämpfung

### Last-Zeit-Verlauf 1



Nr.	t [s]	f(t) [-]	Nr.	t [s]	f(t) [-]
1	0,000	0,0000	2	0,200	1,0000
3	0,800	1,0000	4	1,000	0,0000
5	2,000	0,0000			

Der Funktionswert gibt den Lastfaktor zum jeweiligen Zeitpunkt an.

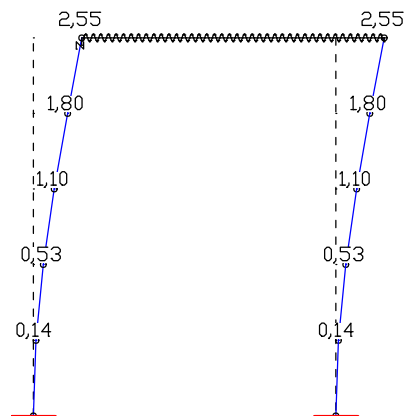


### Antwortspektrum nach DIN 4149:2005

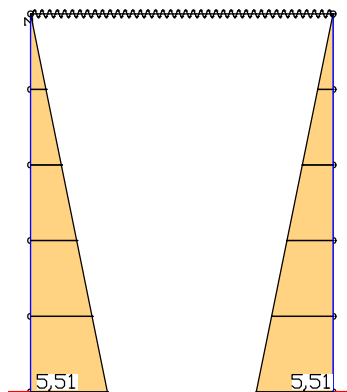
Zu berechnen sind die horizontalen statischen Ersatzlasten für die untersuchten Eigenformen entsprechend DIN 4149. Die Ergebnisse der Auswertung des Antwortspektrums der einzelnen Eigenformen werden statistisch überlagert.

#### Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Antwortspektrum DIN 4149:2005
Eigenwerte, Anzahl	2
Max. Vektorraum	2
Iterationsgenauigkeit	1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Bodenbeschleunigungen Komponenten getrennt aufbringen Bezugssystemwinkel alpha	ax = 1 ay = 0 az = 0 [m/s <sup>2</sup> ] Nein 0 [°]
Beiwerte nach DIN 4149:2005 Untergrundverhältnisse Lehr'sches Dämpfungsmaß Bedeutungsbeiwert gamma I Verhaltensbeiwert q Kombinationsmethode Stat. Ersatzlasten speichern	A-R 0,05 1 1,5 Standard Nein



Deformationen nach statistischer Überlagerung [mm]



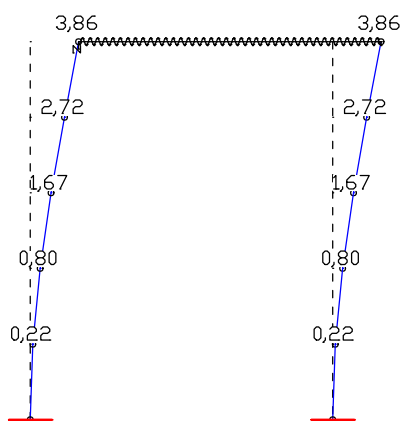
Momente nach statistischer Überlagerung [kNm]

## Antwortspektrum nach EN 1998-1

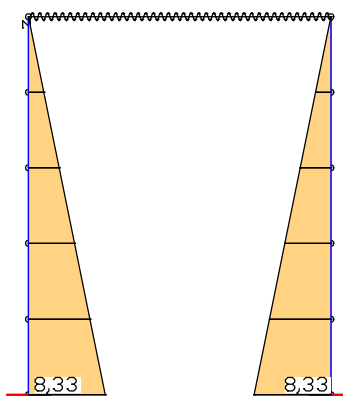
Zu berechnen sind die horizontalen statischen Ersatzlasten für die untersuchten Eigenformen entsprechend EN 1998-1. Die Ergebnisse der Auswertung des Antwortspektrums der einzelnen Eigenformen werden statistisch überlagert.

### Berechnungsvorgaben Dynamik

Berechnungsmodus	Antwortspektrum EN 1998-1:2004
Eigenwerte, Anzahl Max. Vektorraum Iterationsgenauigkeit	2 2 1 [%]
Wirkung der Massen In Richtung Um Achse	X
Bodenbeschleunigungen Komponenten getrennt aufbringen Bezugssystemwinkel alpha	$a_x = 1 \quad a_y = 0 \quad a_z = 0$ [m/s <sup>2</sup> ] Nein 0 [°]
Beiwerte nach EN 1998-1:2004 Baugrundklasse Antwortspektrum vom Typ Parameter für Antwortspektren Lehr'sches Dämpfungsmaß Bedeutungsbeiwert $\gamma$ Verhaltensbeiwert $q$ Kombinationsmethode Stat. Ersatzlasten speichern	A - Fels oder andere felsähnliche geologische ... 1 S = 1 TB = 0,15 TC = 0,4 TD = 2 0,05 1 1,5 Standard Nein



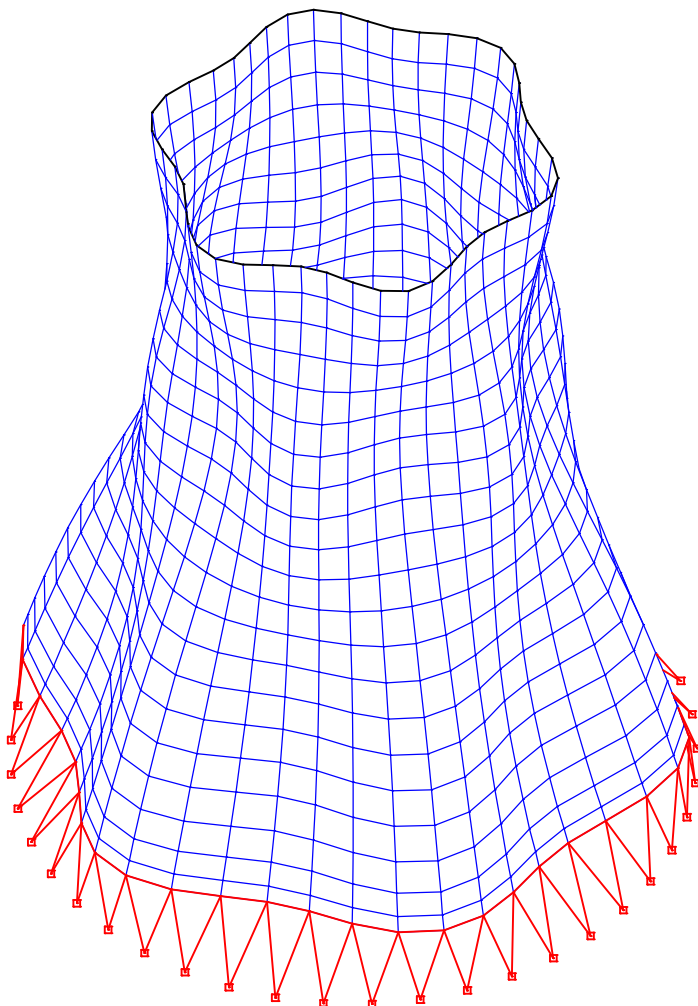
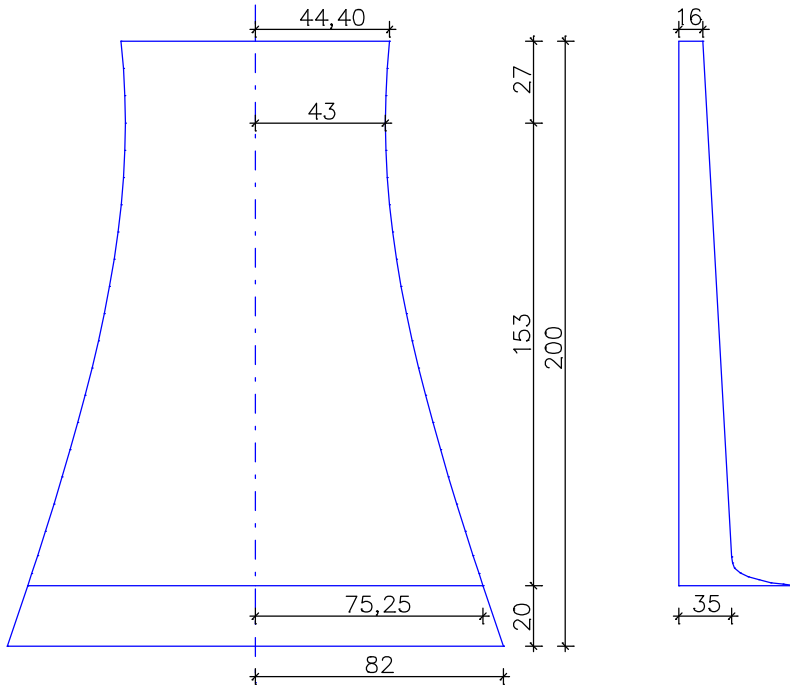
Deformationen nach  
statistischer Überlagerung [mm]



Momente nach  
statistischer Überlagerung [kNm]

## Naturzugkühlturm mit Eigenform

Der nachfolgend dargestellte Kühlturm mit stetig veränderlicher Wanddicke dient als Beispiel für die dynamische Analyse eines Modells aus Stab- und Schalenelementen. Zur Veranschaulichung ist eine charakteristische Eigenform wiedergegeben.

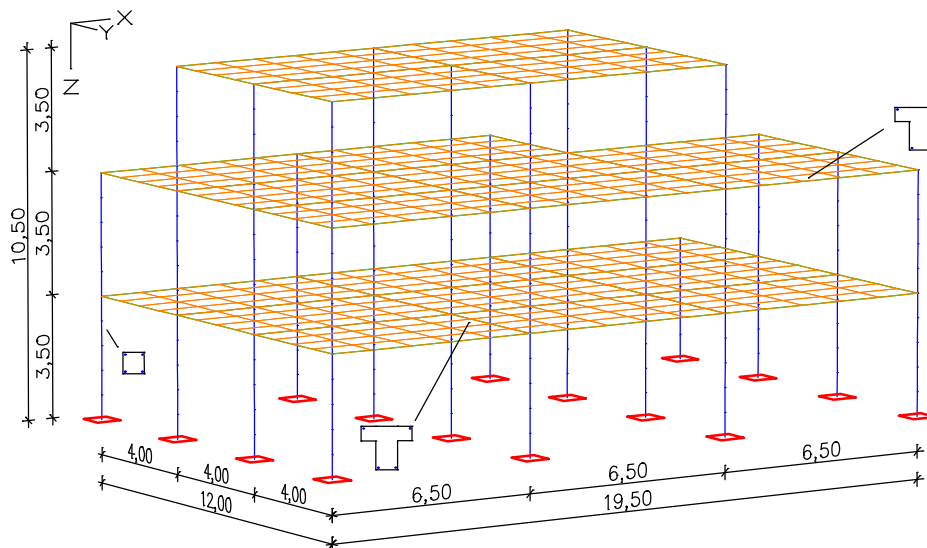


Eigenform Nr. 5, Eigenfrequenz = 0,55 Hz



## Erdbebennachweis nach DIN 4149:2005

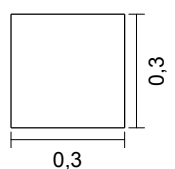
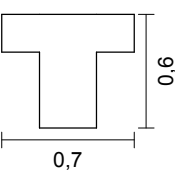
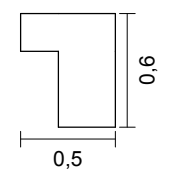
Das nachfolgende Beispiel zeigt die Anwendung des Antwortspektrenverfahrens anhand eines unregelmäßigen räumlichen Tragwerks.



### Material

Beton C20/25  
 Betonstahl 500 M / 500 S

### Querschnittswerte

1	Polygon 	Stützen Schwerpunkt [m] $y_s = 0,150$ $z_s = 0,150$ Fläche [m <sup>2</sup> ] $A = 9,0000e-02$ Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] $I_x = 5,0000e-04$ $I_y = 6,7500e-04$ $I_z = 6,7500e-04$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = 0,000$ Iyz in Stabsteifigkeit vernachlässigen.
2	Polygon 	Plattenbalken 60/30 Schwerpunkt [m] $y_s = 0,350$ $z_s = 0,238$ Fläche [m <sup>2</sup> ] $A = 2,6000e-01$ Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] $I_x = 3,0000e-03$ $I_y = 7,8821e-03$ $I_z = 6,6167e-03$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = -0,000$ Iyz in Stabsteifigkeit vernachlässigen.
3	Polygon 	Randbalken 60/30 Schwerpunkt [m] $y_s = 0,305$ $z_s = 0,264$ Fläche [m <sup>2</sup> ] $A = 2,2000e-01$ Trägheitsmomente [m <sup>4</sup> ] $I_x = 3,0000e-03$ $I_y = 6,8424e-03$ $I_z = 3,5288e-03$ Hauptachsenwinkel [Grad] $\Phi = -22,322$ Iyz in Stabsteifigkeit vernachlässigen.
4	Fläche	Platten Elementdicke [m] $d_z = 0,2000$ Orthotropie $d_{zy}/d_z = 1$ E-Modul Platte/Scheibe = 1

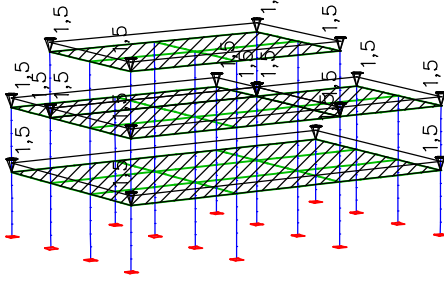
### Kennwerte für den Erdbebennachweis

Erdbebenzone	3	Verhaltensbeiwert	
Untergrundklasse	T	Horizontal:	Vertikal:
Baugrundklasse	B	$q = q_0 \cdot k_R \cdot k_w \geq 1,5$	Für vertikale Erdbebeneinwirkungen wird der Verhaltensbeiwert entsprechend 8.3.3.2.2
Bedeutungskategorie	III	$q = 3 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 2,4 \geq 1,5$	programmseitig zu $q = 1,0$ gesetzt.
Duktilitätsklasse	2		

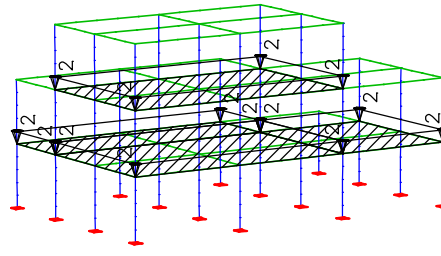
Für das dargestellte Rahmentragwerk aus Stahlbeton werden die nachfolgenden Berechnungen durchgeführt:

- Ermittlung der Eigenwerte und Eigenformen des Tragwerksmodells unter Berücksichtigung der Massen entsprechend Abschnitt 5.5 der Norm.
- Ermittlung der horizontalen statischen Ersatzlasten nach Abschnitt 6.2.3 der Norm.
- Kontrolle der effektiven modalen Massen des Tragwerksmodells.
- Statistische Kombination der modalen Schnittgrößen und Verschiebungen nach Abschnitt 6.2.3.2 der Norm.
- Berücksichtigung zufälliger Torsionswirkungen nach Abschnitt 6.2.3.3 der Norm.
- Kombination der Beanspruchung infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung nach Abschnitt 6.2.4 der Norm.
- Kombinationen der Erdbebeneinwirkung mit anderen Einwirkungen nach DIN 1055-100.
- Berechnung des Kennwertes der Empfindlichkeit gegenüber Geschossverschiebungen nach Abschnitt 7 der Norm.

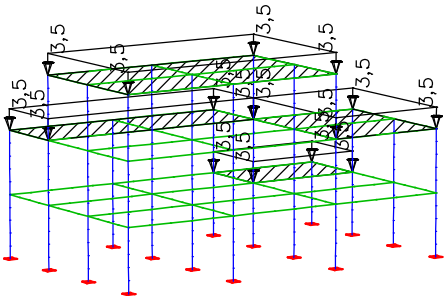
EIGENLAST



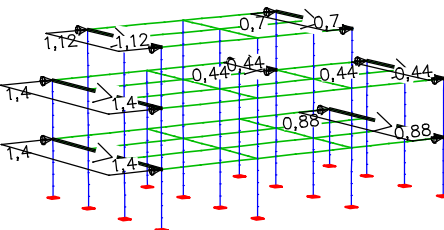
Lastfall 1: Eigenlast und Ausbau



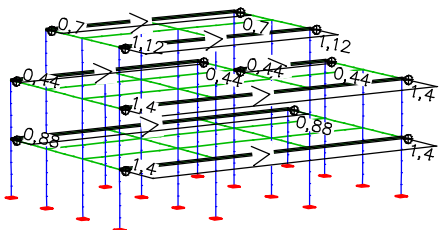
Lastfall 2: Verkehr auf Innenflächen



Lastfall 3: Verkehr auf Außenflächen



Lastfall 4: Wind in x-Richtung



Lastfall 5: Wind in y-Richtung

**Berechnungsvorgaben Dynamik**

Wirkung der Massen  
 in Richtung X Y Z  
 um Achse X Y Z

**Eigenwerte**

Anzahl der Eigenwerte: 5  
 Maximaler Vektorraum : 10  
 Iterationsgenauigkeit: 1,00 [%]  
 Antwortspektrum DIN 4149 (Ausgabe 04/2005)

**Grundwerte der Bodenbeschleunigungen**

ax: 0,800 [m/s<sup>2</sup>]  
 ay: 0,800 [m/s<sup>2</sup>]  
 az: 0,000 [m/s<sup>2</sup>]  
 Komponenten der Beschleunigungen werden getrennt aufgebracht  
 Bezugssystemwinkel alpha: 0,00 [°]

Untergrundverhältnisse : B-T  
 Reaktionsparameter S: 1,000 TB: 0,100 TC: 0,300 TD: 2,000  
 Lehr'sches Dämpfungsmaß : 0,050  
 Bedeutungsbeiwert Gamma1: 1,200  
 Verhaltensbeiwert q: 2,400

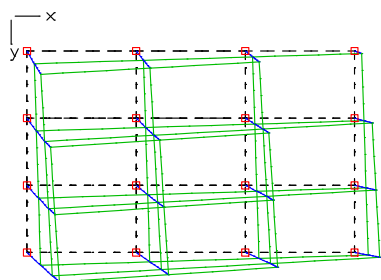
**Massen aus Lastfällen erzeugen**

Lastfall	Faktor
1	1,00
2	0,15
3	0,30

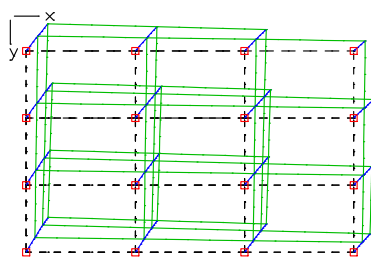
**Summe der aufgebrauchten Massen (global)**

	Mx [t]	My [t]	Mz [t]
Eigenmassen	495,034	495,034	495,034
Punktmassen	0,000	0,000	0,000
Massen aus LF	118,074	118,074	118,074
Summe	613,107	613,107	613,107

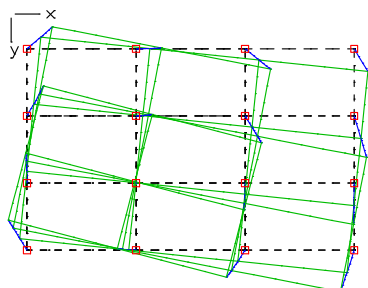
**Eigenfrequenzen und Eigenformen**



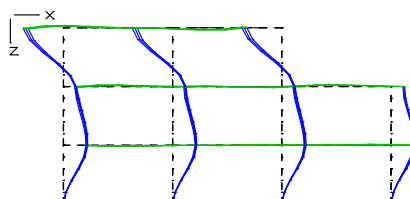
Eigenform 1:  $\omega = 1,31$  Hz



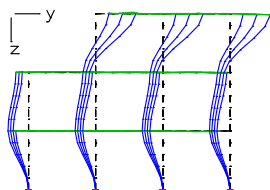
Eigenform 2:  $\omega = 1,34$  Hz



Eigenform 3:  $\omega = 1,85$  Hz



Eigenform 4:  $\omega = 3,23$  Hz



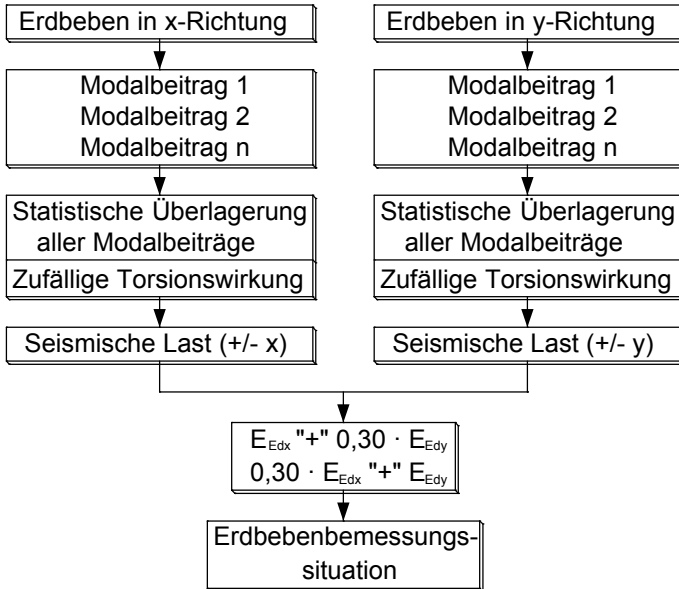
Eigenform 5:  $\omega = 3,31$  Hz

**Effektive modale Massen (global)**

Eigenform	Mx eff [t]	My eff [t]	Mz eff [t]
1	322,206	181,120	0,000
2	207,352	328,409	0,000
3	12,926	37,241	0,000
4	46,016	5,053	0,034
5	3,734	41,176	0,003
Summe:	592,233	592,999	0,037
Anteil der Gesamtmasse:	97 [%]	97 [%]	0 [%]

Die berücksichtigten effektiven modalen Massen betragen 97% der aufgebrauchten Massen. Somit ist nach Abschnitt 6.2.3.1 (5) der Norm die Anzahl der untersuchten Eigenformen ausreichend.

**Berechnungsschema**



Nach Abschnitt 5.4.1 (3) ist der Nachweis der horizontalen Erdbebeneinwirkung in zwei zueinander senkrechten Richtungen zu führen. Das oben abgebildete Berechnungsschema zeigt die Vorgehensweise. Die statistische Überlagerung der Modalbeiträge wird programmseitig durchgeführt. Die zufälligen Torsionswirkungen nach Abschnitt 6.2.3.3 der Norm können für dieses Tragwerk in der nachfolgenden Weise Berücksichtigung finden.

**Fundamentschub**

$$F_b = \frac{S_d(T)}{a_g} \cdot a_g \cdot m$$

$$= 0,5 \cdot 0,8 \cdot 613$$

$$= 245 \text{ kN für } T = 0,75 \text{ s}$$

mit

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j}$$

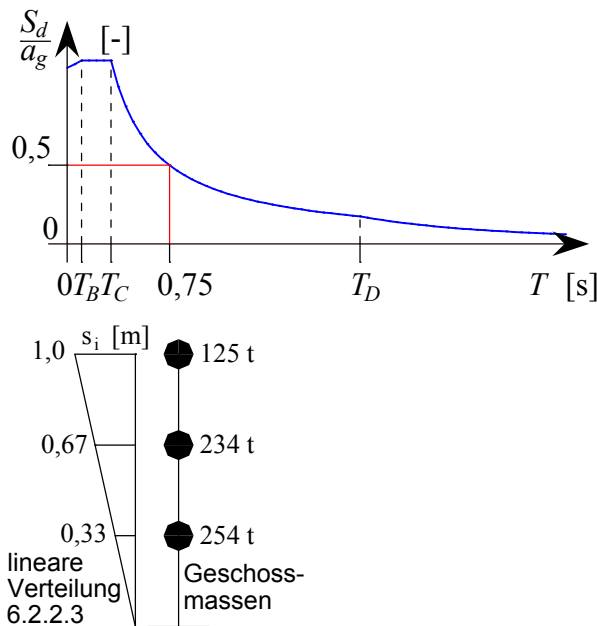
$$M_{1i} = e_{1i} \cdot F_i = h_i \cdot L_i^2 / 6$$

Lastordinate der Trapezlast des Geschosses  $i$

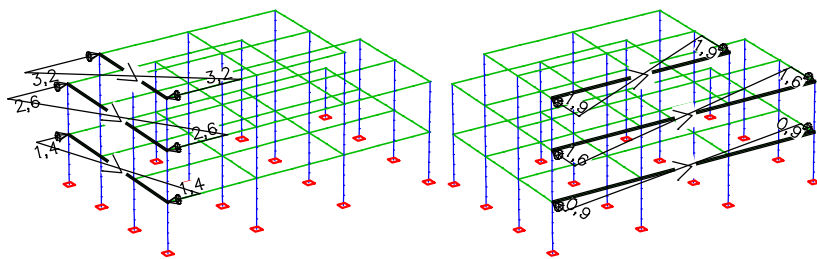
$$h_i = \pm 0,3 \cdot F_i / L_i$$

Exzentrizität von  $F_i$

$$e_{1i} = \pm 0,05 \cdot L_i$$



Decke über Geschoss	Höhe $z_j$ [m]	Masse $m_j$ [t]	$s_j \cdot m_j$ [tm]	H-Kraft $F_j$ [kN]	Breite $L_{x_j}$ [m]	Trapezlast $h_{x_j}$ [kN/m]	Breite $L_{y_j}$ [m]	Trapezlast $h_{y_j}$ [kN/m]
3	10,5	125	125	84	8	$\pm 3,2$	13	$\pm 1,9$
2	7,0	234	156	104	12	$\pm 2,6$	19,5	$\pm 1,6$
1	3,5	254	85	57	12	$\pm 1,4$	19,5	$\pm 0,9$
Summe		613	366	245				



## Kombination der Beanspruchung

Kombination der Beanspruchung infolge der Komponenten der Erdbebeneinwirkung nach Abschnitt 6.2.4 der Norm.

### Lastfallkombination 1, Edx "+" 0,3 Edy

1. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
Antwortspektrum überlagert (x)		1,000
Antwortspektrum überlagert (x)		-1,000
2. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
Antwortspektrum überlagert (y)		0,300
Antwortspektrum überlagert (y)		-0,300
3. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
51	Zufällige Torsion (x)	1,000
51	Zufällige Torsion (x)	-1,000
4. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
52	Zufällige Torsion (y)	0,300
52	Zufällige Torsion (y)	-0,300

### Lastfallkombination 2, 0,3 Edx "+" Edy

1. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
Antwortspektrum überlagert (x)		-0,300
Antwortspektrum überlagert (x)		0,300
2. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
Antwortspektrum überlagert (y)		-1,000
Antwortspektrum überlagert (y)		1,000
3. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
51	Zufällige Torsion (x)	0,300
51	Zufällige Torsion (x)	-0,300
4. veränderliche exklusive Einwirkung		Faktor
52	Zufällige Torsion (y)	1,000
52	Zufällige Torsion (y)	-1,000

Kombinationen der Erdbebeneinwirkung mit anderen Einwirkungen nach DIN 1055-100.

### DIN 1045-1 Einwirkungen

#### Standard Bemessungsgruppe

#### G - Eigenlast

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1,35 / 1$

#### Lastfälle

1 G, Eigenlast

#### QW - Windlast

$\Gamma_{sup} / \Gamma_{inf} = 1,5 / 0$

Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für: Hochbauten  
Windlasten

$\psi_{0} / \psi_{1} / \psi_{2} = 0,6 / 0,5 / 0$

#### Lastfälle 1. Variante, exklusiv

4 QW, Wind in x-Richtung  
5 QW, Wind in y-Richtung

**QN - Nutzlast, Verkehrslast**

Gamma.sup / gamma.inf = 1,5 / 0

Kombinationsbeiwerte psi für: Hochbauten  
 Nutzlasten - Kategorie A - Wohn- und Aufenthaltsräume  
 Psi.0 / Psi.1 / Psi.2 = 0,7 / 0,5 / 0,3

Lastfälle 1. Variante, inklusiv

- 2 QN, Innendecken
- 3 QN, Außendecken

**1. Ständige und vorübergehende Situation**

Endzustand

- G Eigenlast
- QN Nutzlast, Verkehrslast
- QW Windlast

**AE - Einwirkungen infolge Erdbeben**

Gamma.sup = 1

Lastfälle 1. Variante, exklusiv

- K1 Edx "+" 0,3 Edy
- K2 0,3 Edx "+" Edy

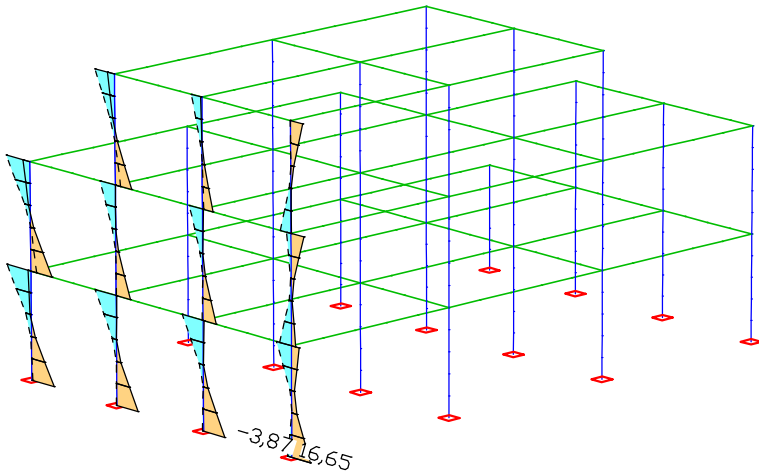
**1. Erdbebensituation**

Endzustand

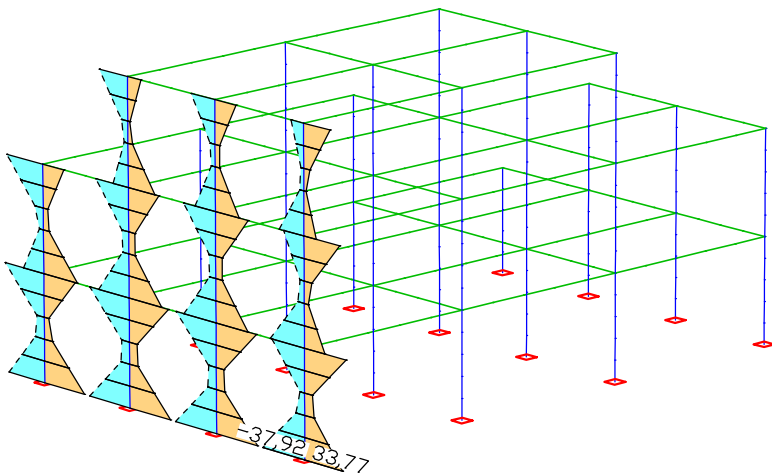
- G Eigenlast
- QN Nutzlast, Verkehrslast
- QW Windlast
- AE Einwirkungen infolge Erdbeben

**Ergebnisse**

Die nachfolgend abgebildeten Schnittgrößen *min/max*  $M_z$  zeigen für eine ausgesuchte Stabgruppe den unterschiedlichen Einfluss von Windkraft (ständige und vorübergehende Situation) und Erdbebeneinwirkung (Erdbebensituation). Man erkennt, dass hier die Einwirkungen aus Erdbeben maßgebend werden.



Ausgewählte Schnittgrößen *min,max*  $M_z$  aus ständiger und vorübergehender Situation [kNm]



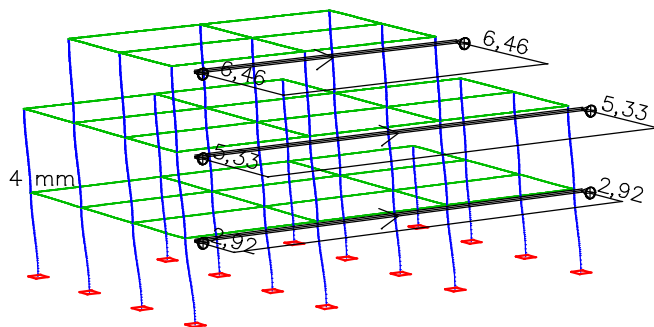
Ausgewählte Schnittgrößen *min,max*  $M_z$  aus Erdbebensituation [kNm]

**Kombinationsinfo - Stab 1 - Knoten 1 - Mz min, max  
D1045-1.E.1 : 1. Erdbebensituation, DIN 1045-1**

Lastfall	Faktor	Nx [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Qy [kN]	Qz [kN]	Mx [kNm]
1 : G, Eigenlast	1,00	-199,90	4,43	-2,00	1,65	-3,77	0,00
2 : QN, Innendecken	0,30	-6,17	0,25	-0,10	0,09	-0,22	-0,00
3 : QN, Außendecken	0,30	-5,17	0,05	-0,05	0,04	-0,03	0,00
51 : Zufällige Torsion (x)	-0,30	-0,48	-0,35	-0,57	0,31	0,19	0,01
52 : Zufällige Torsion (y)	-1,00	-2,58	-1,86	-3,10	1,71	1,01	0,06
Asp.x : Antwortspektrum überlagert (x)	-0,30	-5,49	-7,72	-2,06	-1,13	-4,19	-0,04
Asp.y : Antwortspektrum überlagert (y)	-1,00	-35,11	-5,99	-30,03	-16,55	-3,24	-0,20
Mz min		-254,91	-11,18	-37,92	-13,88	-10,26	-0,16
1 : G, Eigenlast	1,00	-199,90	4,43	-2,00	1,65	-3,77	0,00
51 : Zufällige Torsion (x)	0,30	0,48	0,35	0,57	-0,31	-0,19	-0,01
52 : Zufällige Torsion (y)	1,00	2,58	1,86	3,10	-1,71	-1,01	-0,06
Asp.x : Antwortspektrum überlagert (x)	0,30	5,49	7,72	2,06	1,13	4,19	0,04
Asp.y : Antwortspektrum überlagert (y)	1,00	35,11	5,99	30,03	16,55	3,24	0,20
Mz max		-156,24	20,35	33,77	17,31	2,46	0,16

**Kennwert der Empfindlichkeit gegenüber Geschossverschiebungen**

Die Berechnung erfolgt hier exemplarisch für die unterste Etage nach Abschnitt 7 der Norm.



Deformation infolge einer Geschossbelastung in y-Richtung  $V_{tot} = 245 \text{ kN}$

**Summe der aufgebrachtten Lasten und Auflagerreaktionen**

LF.	Bezeichnung	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	G, Eigenlast	0,000	0,000	5675,250
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	5675,250
2	QN, Innendecken	0,000	0,000	624,000
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	624,000
3	QN, Außendecken	0,000	0,000	819,000
	Auflagerreaktionen	0,000	-0,000	819,000

$$P_{tot} = \Sigma G_k + \Sigma \psi_2 \cdot Q_k = 5675 + 0,3 \cdot (624 + 819) = 6108 \text{ kN}$$

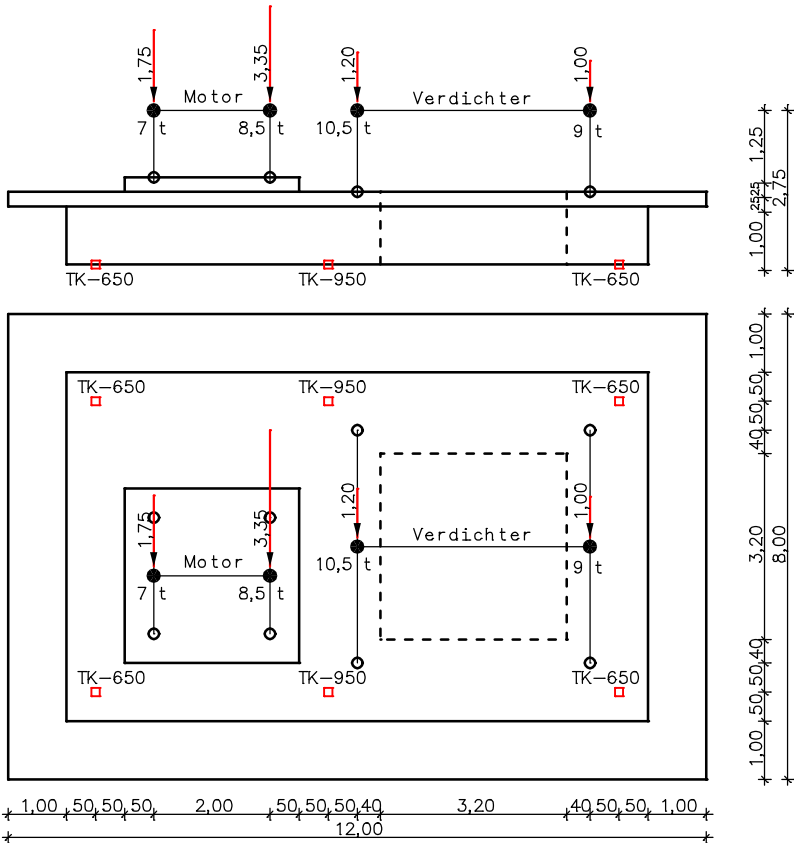
$$d_t = d_e \cdot q = 4 \cdot 2,4 = 9,6 \text{ mm} ; h = 3500 \text{ mm}$$

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_t}{V_{tot} \cdot h} = \frac{6108 \cdot 9,6}{245 \cdot 3500} = 0,07 \leq 0,1$$

=> Wirkungen nach Theorie 2.Ordnung müssen nicht berücksichtigt werden.

# Maschinenfundament mit mehreren Erregern

Dieses Beispiel behandelt die Modellierung und Berechnung eines Maschinenfundamentes, welches durch zwei unterschiedlich frequente Erreger, einen Motor (Betriebsdrehzahl: 25 Hz) und einen Verdichter (Betriebsdrehzahl: 50 Hz), dynamisch belastet wird. Das Fundament wird aus Beton C35/45 erstellt. Zur Berücksichtigung aller Exzentrizitäten wurde ein Volumenmodell gewählt. Das Stabwerk für den Motor und den Verdichter erfasst die Lage der Maschinenmassen (Lagerwellen) und die Lastangriffspunkte für die Unwuchten. Damit können die Verschiebungen und Beschleunigungen des Systems an diesen Stellen berechnet werden. Den Stäben ist keine Masse ( $g = 0$ ) zuzuordnen, da diese in den Punktmassen für die Maschinen enthalten sind. Um Zwängungen zu vermeiden sind in den Stäbe der Lagerwellen Normalkraftgelenke definiert. In der nachfolgenden Abbildung ist das System mit den Massen und Unwuchtkräften [kN] der Maschinen dargestellt.



### Punktmassen

Knoten	Masse [t]
135	7,0
136	8,5
137	10,5
138	9,0

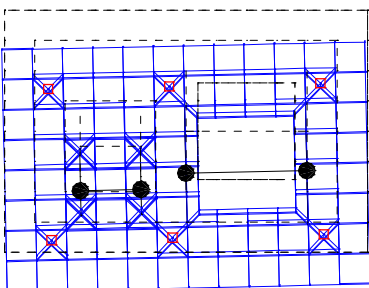
Für die Steifigkeiten der Stäbe werden folgende Werte verwendet:

- $A = 0,1 \text{ m}^2$
- $I_x = 10^{-6} \text{ m}^4$
- $I_y = I_z = 0,1 \text{ m}^4$
- E-Modul = 210000 MN/m<sup>2</sup>
- G-Modul = 81000 MN/m<sup>2</sup>

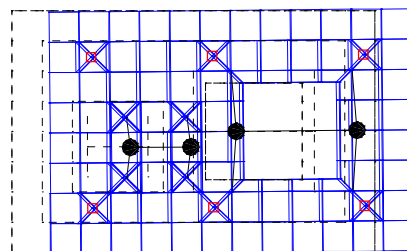
Die sechs Auflager sind mit zwei unterschiedlichen Federelementen ausgestattet (Federsteifigkeiten [MN/m]).

GERB	TK-650	TK-950
horizontal	11,9	15,9
vertikal	20,6	29,8

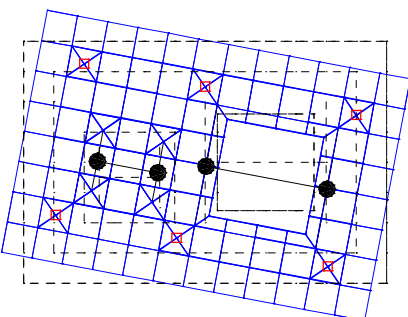
## Eigenformen



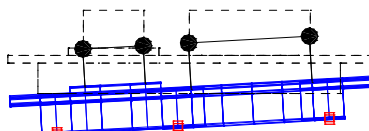
Eigenform 1:  $\omega = 2,81 \text{ Hz}$



Eigenform 2:  $\omega = 2,88 \text{ Hz}$

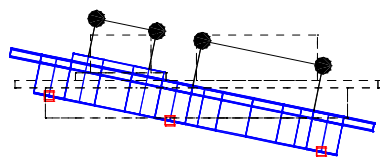


Eigenform 3:  $\omega = 3,59 \text{ Hz}$

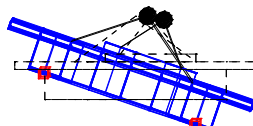


Eigenform 4:  $\omega = 4,00 \text{ Hz}$

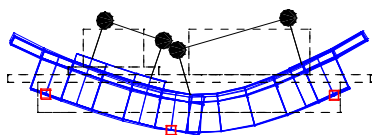




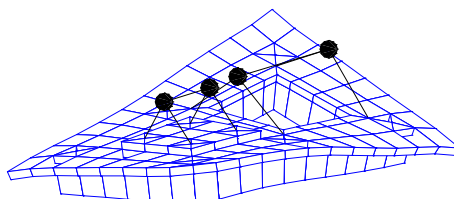
Eigenform 5:  $\omega = 4,54$  Hz



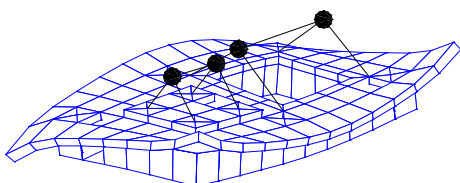
Eigenform 6:  $\omega = 5,29$  Hz



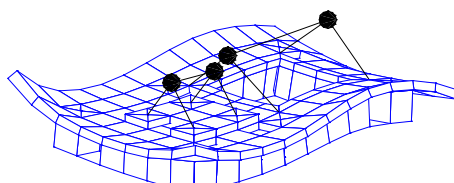
Eigenform 7:  $\omega = 27,56$  Hz



Eigenform 8:  $\omega = 34,81$  Hz



Eigenform 9:  $\omega = 66,66$  Hz



Eigenform 10:  $\omega = 70,82$  Hz

### Beurteilung der Eigenfrequenzen

Gemäß der zurückgezogenen DIN 4024, Teil 1, Abschnitt 5.3.2 konnte das Schwingungsverhalten des Maschinenfundamentes anhand der Eigenfrequenzen beurteilt werden. Wenn die folgenden Bedingungen 1 und 2 erfüllt waren, durfte auf weitere Untersuchungen des Schwingungsverhaltens verzichtet werden:

1. Eigenfrequenz 1. Ordnung

$$f_{1(z)} \leq 0,8 \cdot f_m$$

$$f_4 \leq 0,8 \cdot 25 \text{ Hz}$$

$$4,0 \leq 20 \text{ Hz}$$

2. Eigenfrequenzen höherer Ordnung

$$f_n \leq 0,9 \cdot f_m \text{ und } f_{n+1} \geq 1,1 \cdot f_m$$

$$f_6 \leq 0,9 \cdot 25 \text{ Hz} \quad f_7 \geq 1,1 \cdot 25 \text{ Hz}$$

$$5,3 \leq 22,5 \text{ Hz} \quad 27,6 \geq 27,5 \text{ Hz}$$

bzw.

$$f_8 \leq 0,9 \cdot 50 \text{ Hz} \quad f_9 \geq 1,1 \cdot 50 \text{ Hz}$$

$$34,8 \leq 45 \text{ Hz} \quad 66,7 \geq 55 \text{ Hz}$$

Bezeichnungen:

- $f_m$  Maschinenfrequenz (25 bzw. 50 Hz)
- $f_1$  Erste Eigenfrequenz mit ihrer Eigenform in Richtung des Erregers (Hier: z-Richtung)
- $f_n$  Höchste Eigenfrequenz unterhalb der Maschinenfrequenz
- $f_{n+1}$  Niedrigste Eigenfrequenz oberhalb der Maschinenfrequenz

### Untersuchung der erzwungenen Schwingungen

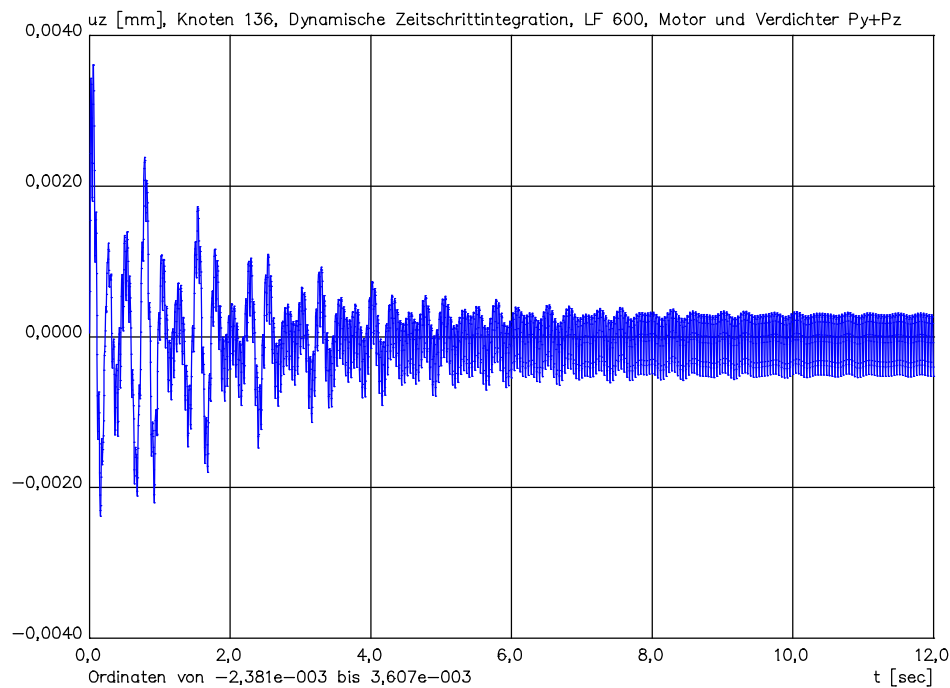
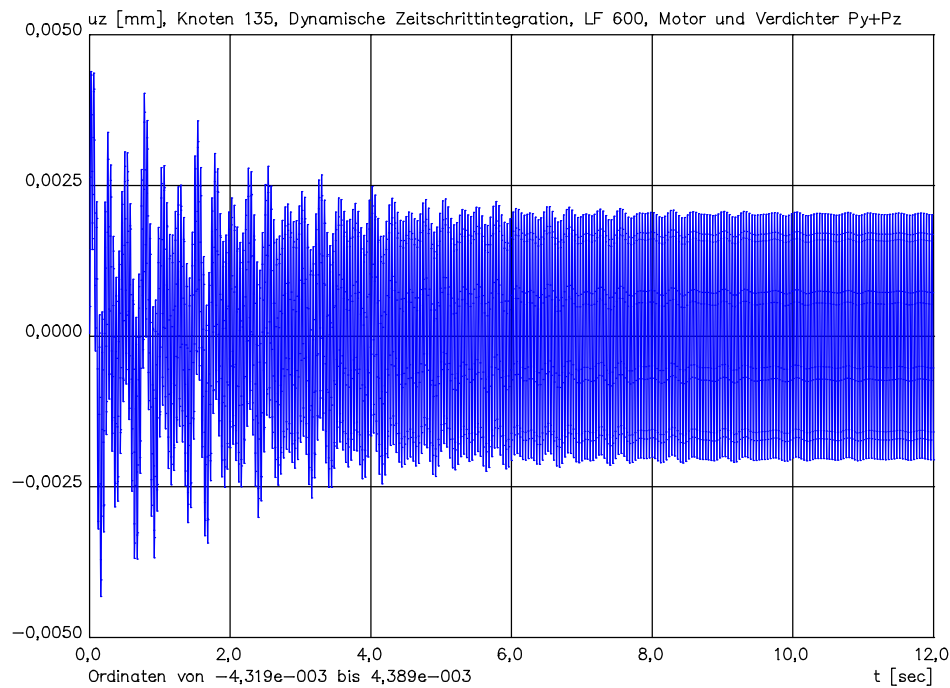
Ist eine positive Beurteilung des Schwingungsverhaltens nicht möglich, kann eine genauere Untersuchung über die Ermittlung der erzwungenen Verschiebungsgrößen notwendig sein.

Eine Berechnungen des stationären Responses bei einer Lehr'sches Dämpfung aller 10 Eigenfrequenzen von 2 % getrennt für die verschiedenen frequenten Erreger ergibt folgende Maximalamplituden der Verschiebungen  $u_z$  [ $\mu\text{m}$ ] der Lagerwellen welche in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt ist. Man liegt auf der sicheren Seite der Abschätzung, wenn man die Maximalwerte der Einzelverformungen der Knoten entsprechend der unteren Tabelle addiert. Im eingeschwungenen Zustand entspricht die Summe der Einzelverformungen der Knoten fast genau den Ergebnissen der Zeitschrittintegration,

welche im nachfolgenden Abschnitt dargestellt ist.

Lastfall	Knoten 135	Knoten 136	Knoten 137	Knoten 138
$P_z$ des Motor bei 25 Hz	2,007	0,488	0,398	0,916
$P_z$ des Verdichters bei 50 Hz	0,010	0,124	0,169	0,155
$P_y$ des Motor bei 25 Hz	0,014	0,129	0,007	0,031
$P_y$ des Verdichters bei 50 Hz	0,003	0,008	0,003	0,002
Summe der Amplituden [ $\mu\text{m}$ ]	2,034	0,749	0,577	1,104

Eine modale Zeitschrittintegration mit 6000 Zeitschritten mit je 0,002 [s] Dauer mit der gleichzeitigen Wirkung aller dynamischen Lastanteile ergibt folgende Verformungen der Lagerwelle des Motors über die Zeit.



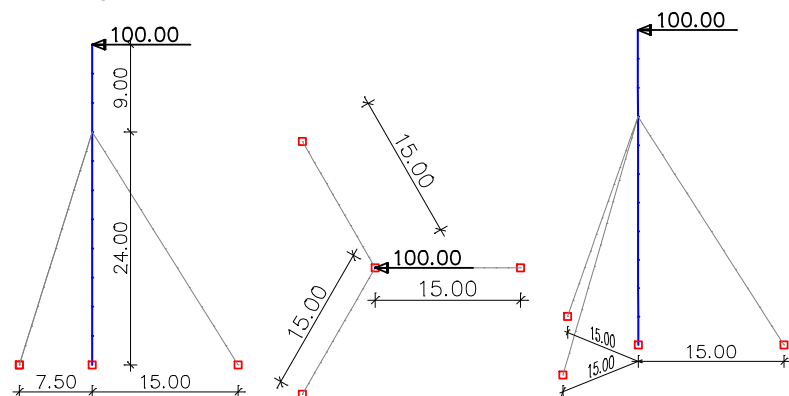
Die Maximalamplitude der Verschiebung  $u_z$  an den Knoten 135 bis 138 der Lagerwellen betragen nach 12 Sekunden (eingeschwungener Zustand):

Untersuchung	Knoten 135	Knoten 136	Knoten 137	Knoten 138
stationärer Response: $\Sigma u_z $	2,03 $\mu\text{m}$	0,75 $\mu\text{m}$	0,58 $\mu\text{m}$	1,10 $\mu\text{m}$
modale Analyse	2,05 $\mu\text{m}$	0,53 $\mu\text{m}$	0,58 $\mu\text{m}$	1,10 $\mu\text{m}$

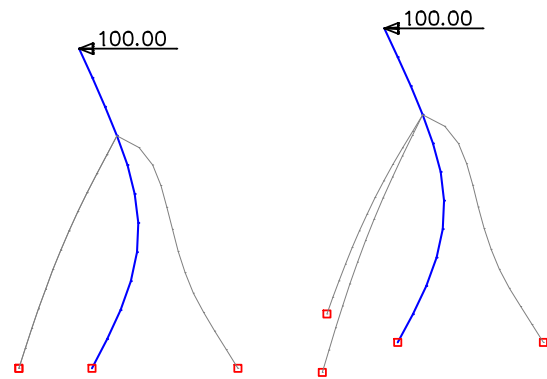
### Abgespannter Mast

Dieses Beispiel behandelt einen in drei Richtungen abgespannten Mast. Die Abspannungen sind durch jeweils 12 Seilelemente abgebildet. Die an der Mastspitze angreifende Einzellast schwingt periodisch. Die Berechnung des Tragwerks erfolgte mit einer direkten Zeitschrittintegration in 100 Zeitschritten über eine Dauer von 2 Sekunden.

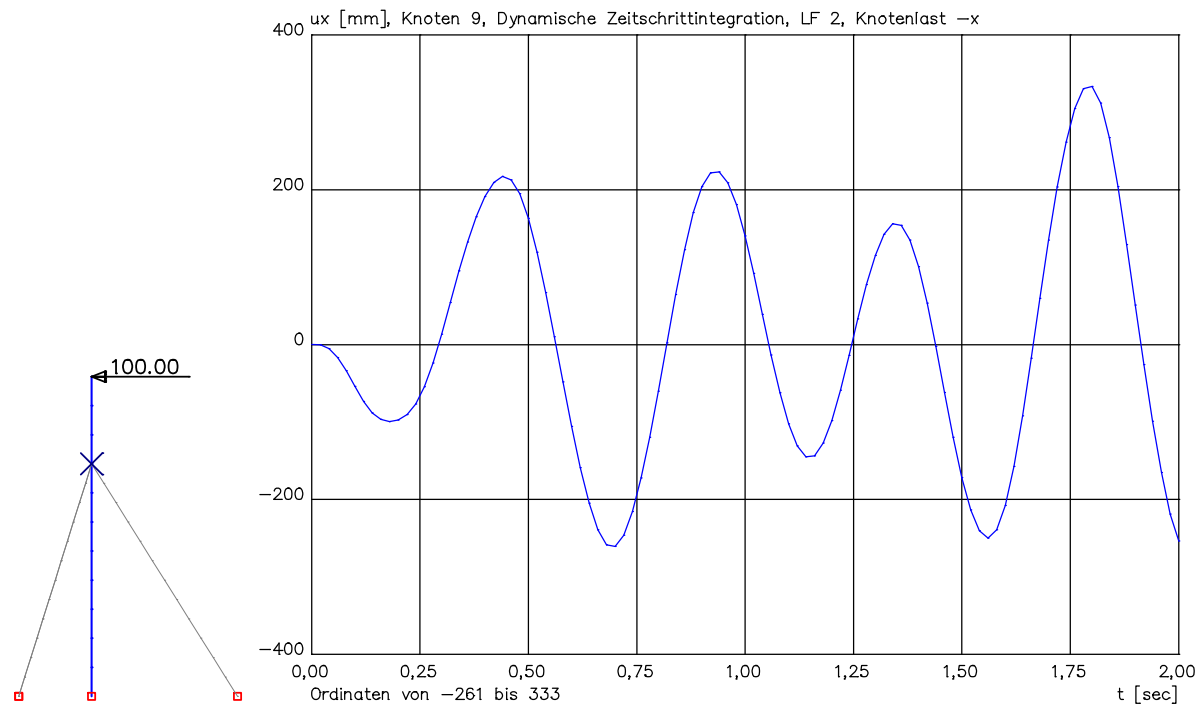
- Mast: Rohr,  $d = 66 \text{ cm}$ ,  $t = 1,42 \text{ cm}$ , S355
- Seile:  $A = 3,57 \text{ cm}^2$ ,  $E = 150000 \text{ MN/m}^2$ , Seilvorspannung = 200,0 kN
- Belastung: 100 kN periodisch mit 2,31 Hz an der Mastspitze



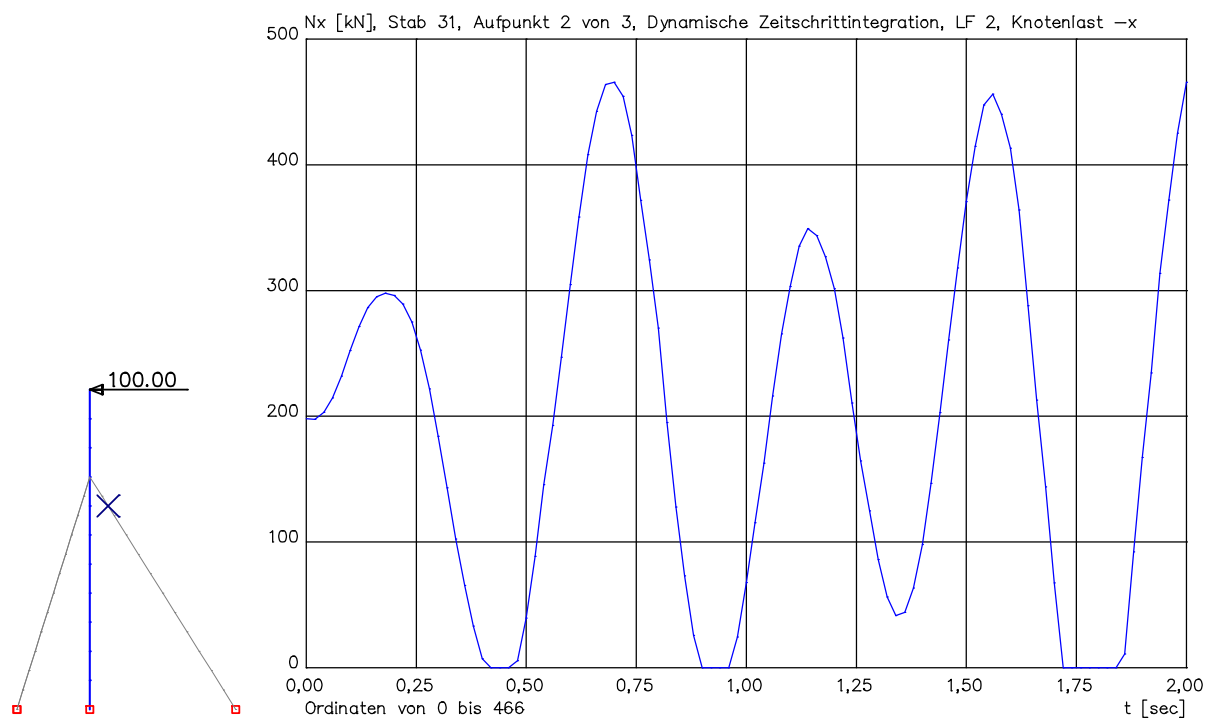
Systemabmessungen mit Belastung [kN]



XZ-Ansicht  
3D-Ansicht  
Verformungsfigur nach 1,84 Sekunden



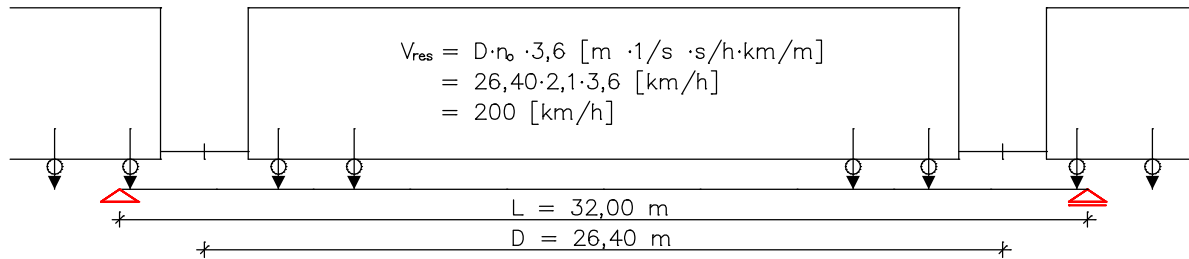
Verformung am markierten Knoten in x-Richtung



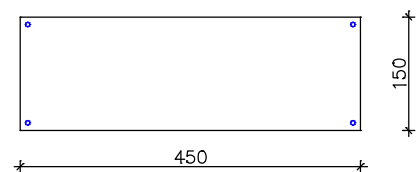
Schnittgrößen  $N_x$  am markierten Berechnungsort

## Dynamische Zugüberfahrt

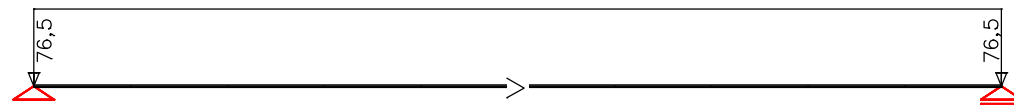
Mit dem Programm kann auf einfache Weise die dynamische Beanspruchung durch vordefinierte Regelzüge wie ICE, Thalys etc. oder selbst definierte Zuglasten untersucht werden. In diesem Beispiel soll ein ICE 1 über eine 32 m lange Einfeldbrücke aus Stäben fahren.



System mit ICE1, Abmessungen und der Resonanzgeschwindigkeit



**Querschnitt**  
 C 50/60 nach EN 1992-1-1  
 Torsionssteifigkeit  $I_x = 4,00188 \text{ m}^4$



Ausbauast (7,8 t/m)

Neben der Systemeingabe und den statischen Lastfällen sind folgende Schritte erforderlich:

- Definition des Fahrweges und Festlegung der Zugeigenschaften
- Massenbelegung und Dämpfung
- Dynamische Zeitschrittberechnung
- Ergebnisse darstellen und weiterverarbeiten

### Fahrweg und Zugdefinition

Die Beschreibung des Fahrweges erfolgt durch die Eingabe eines Linienzuges auf dem Tragwerk. Es ist lediglich erforderlich, dass der Fahrweg innerhalb der Querschnittsabmessungen der Elemente liegt. Exzentrizitäten bzgl. der Stabachsen werden automatisch berücksichtigt.

In einem Lastfall ist die Lastart *Dynamische Zuglast* zu wählen und der Fahrweg des Lastenzuges einzugeben. Dieser kann über Flächenelemente und Stäbe mit Polygonquerschnitt führen. Nach Beendigung der Eingabe des des Linienzuges erscheint der Dialog zur Zugdefinition:

**Dynamische Zuglast**

Bezeichnung: ICE 1, 200 km/h    Nr.: 1

Zug: ICE 1    v: [km/h] 200    Startzeit: [s] 0

Fahrweg    Zug

	Abstand [m]	Achslast [kN]
1	0	195
2	3	195
3	11,46	195
4	14,46	195
5	19,31	130
6	21,81	130
7	38,31	130

OK    Abbrechen

In diesem ist der gewünschten Zugtyp sowie die zu untersuchende Geschwindigkeit einzustellen. Sollen mehrere Züge bzw. Fahrwege gleichzeitig untersucht werden (z.B. für eine Zugbegegnung), so kann mit der Startzeit der zeitlichen Versatz gesteuert werden. Wenn ein benutzerdefinierter Zug gewählt wurde, können in der Rubrik *Zug* die Achsabstände und die Achslasten editiert werden. Es können auch aus der Zwischenablage Daten eingefügt werden.

Damit ist die Definition eines Fahrweges abgeschlossen.

Der Zug wird in der Berechnung als Gruppe von Einzellasten, die den Fahrweg entlang fahren, berücksichtigt. Die Achslasten wirken dabei immer in Richtung der globalen Z-Achse.

### Massenbelegung und Dämpfung

Für die dynamische Berechnung sind die berücksichtigten Massen wichtig. Im Standardfall werden nur die Eigenmassen des Tragwerks erfasst. Die zusätzlichen Massen des Ausbaus wie z.B. des Schotterbetts können durch *Massen aus Lastfällen* erfasst werden.

#### Summe der aufgebrachten Massen (global)

	Mx [t]	My [t]	Mz [t]
Eigenmassen	550,459	550,459	550,459
Punktmassen	0,000	0,000	0,000
Massen aus LF	249,541	249,541	249,541
Summe	800,000	800,000	800,000

Des Weiteren sollte eine sinnvolle Dämpfung des Systems berücksichtigt werden.

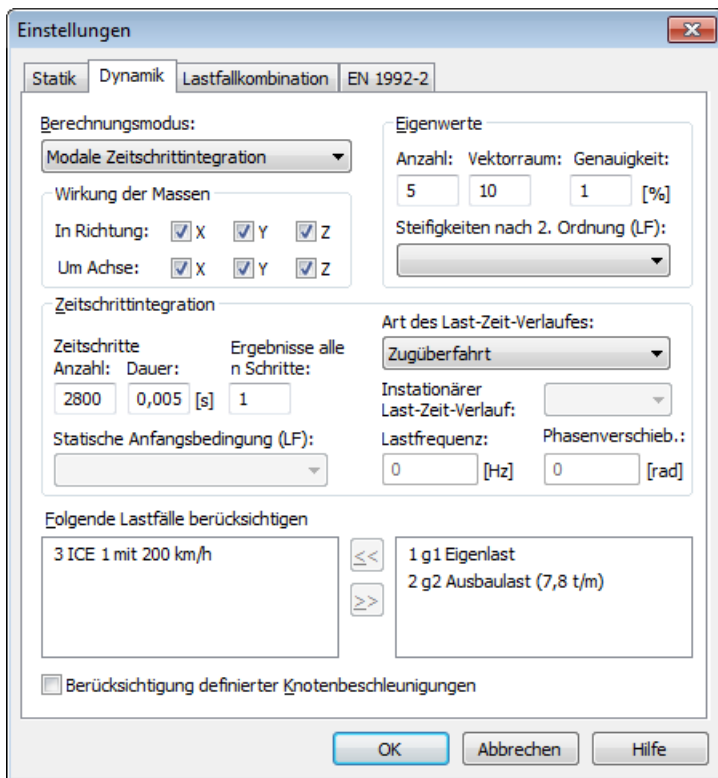
### Modale Dämpfung

Eigenform	D [%]	alpha [1/s]	β [s]
1	1,500	0,00000	0,00000
2	1,500	0,00000	0,00000
3	1,500	0,00000	0,00000
4	1,500	0,00000	0,00000
5	1,500	0,00000	0,00000

- D Lehr'sches Dämpfungsmaß
- alpha Massenproportionale Dämpfung
- β Steifigkeitsproportionale Dämpfung

### Dynamische Zeitschrittberechnung

Dynamische Zuglasten werden nur im Rahmen einer dynamischen Berechnung berücksichtigt. Die Eingaben hierfür erfolgen auf der Registerkarte *Dynamik* der Berechnungseinstellungen.



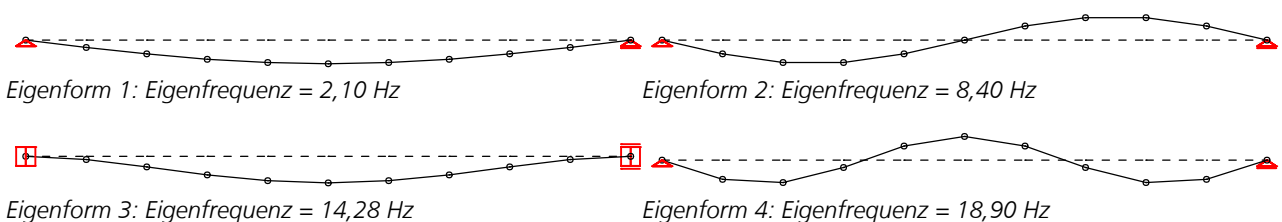
Die Zugüberfahrt kann mit der direkten oder der modalen Zeitschrittintegration analysiert werden.

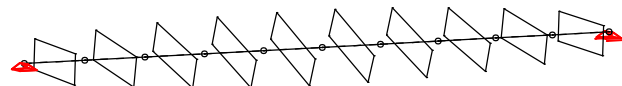
Die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenwerte ist systemabhängig. Die Dauer und die Anzahl der Zeitschritte sollte so gewählt werden, dass diese den gewünschten Berechnungszeitraum bzw. die Fahrstrecke des Zuges ergeben.

Die Dauer der zu wählenden Zeitschritte wird wesentlich durch das Schwingungsverhalten des Tragwerkes bestimmt. Diese sollten kürzer als 1/10 der Schwingzeit der maßgebenden Eigenfrequenz sein.

Im Rahmen der Berechnung werden dann die Eigenfrequenzen, die Eigenformen und alle Zeitschritte berechnet. Dabei werden für jeden Zeitschritt die Deformationen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie Schnittgrößen ermittelt und abgespeichert.

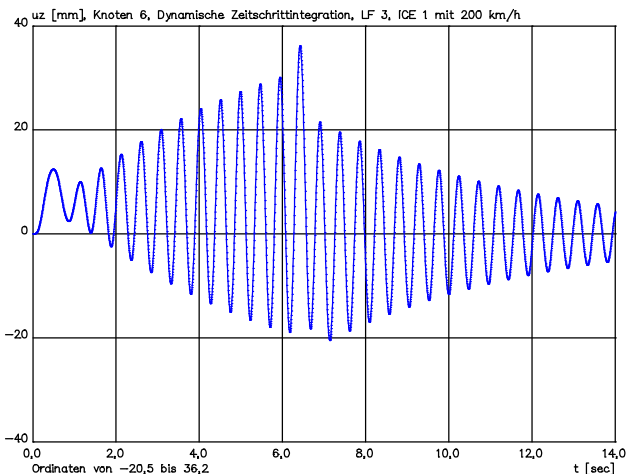
### Ergebnisse darstellen und weiterverarbeiten



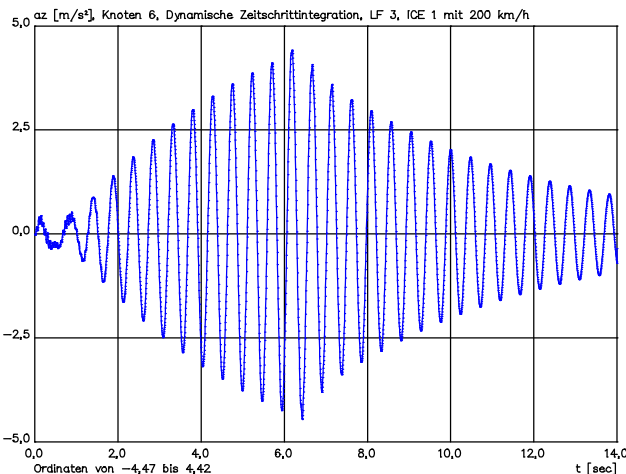


Eigenform 5: Eigenfrequenz = 21,69 Hz

Neben den Eigenformen mit ihren Eigenfrequenzen können die Ergebnisse der Zugüberfahrt für jeden Knoten über den Berechnungszeitraum aufgetragen werden. Der Darstellungsbereich wird dabei in 2 Fenster aufgeteilt. Im linken Fenster ist der Knoten auszuwählen, für den der Ergebnisverlauf aufgetragen werden soll.



Vertikalverschiebung in Feldmitte



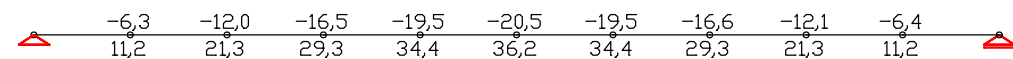
Vertikalbeschleunigung in Feldmitte

Einige dynamische Ergebnisse wie Deformationen und Schnittgrößen können zusätzlich für jeden gespeicherten Zeitschritt am System dargestellt werden.

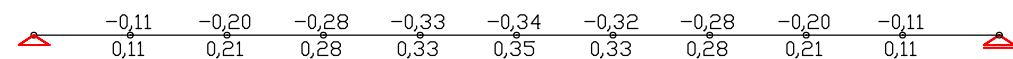
Mit der Lastfallkombination können die 'Hüllkurven' aller Zeitschritte für die Deformationen und die Schnittgrößen ermittelt werden und gegebenenfalls mit statischen Lastfällen überlagert werden.

**Lastfallkombination 1, ICE 1**

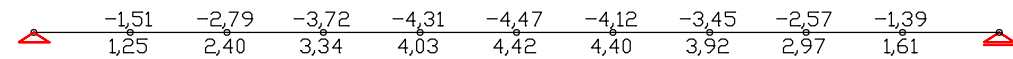
Exklusive Auswahl	Faktor
3 Zeitschrittberechnung	1,000



Deformationen  $u_z$  min, max aus Lastfallkombination 1 [mm]



Geschwindigkeiten  $v_z$  min, max aus Lastfallkombination 1 [m/s]



Beschleunigungen  $a_z$  min, max aus Lastfallkombination 1 [m/s²]

## Literaturhinweise

Bathe, K. J.

Finite Elemente Methoden.  
Springer Verlag, Berlin 1986.

DIN 4149:1981

Bauten in deutschen Erdbebengebieten -  
Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 1981.

DIN 4149:2005-04

Bauten in deutschen Erdbebengebieten -  
Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2005.

EN 1998-1:2010-12

Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben -  
Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

Hughes, T. J. R.

The finite element method.  
Prentice-Hall Int. Ed., New Jersey 1987.

Lecture Notes in Engineering

Finite Element Analysis for Engineering Design.  
Springer Verlag, Berlin 1988.

Link, M.

Finite Elemente in der Statik und Dynamik.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.

Meskouris, K.

Baudynamik.  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1999.

Müller, F. P.

Baudynamik, Betonkalender Teil II.  
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1978.

ÖNORM B 4015:2007-02

Belastungsannahmen im Bauwesen - Außergewöhnliche Einwirkungen -  
Erdbebeneinwirkungen - Grundlagen und Berechnungsverfahren.  
Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien 2007.

Schwarz, H. R.

Methode der finiten Elemente. Teubner Studienbücher.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.

SIA 261:2014 Bauwesen

Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizer Norm SN 505 261,  
Eingetragene Norm der schweizerischen Normen-Vereinigung SNV.  
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2014.

Zienkiewicz, O. C.

Methode der finiten Elemente, Studienausgabe.  
Hanser Verlag, München 1984.



# Nichtlineare Systemanalyse

## Grundlagen

### Anwendungsbereich

Die Berechnungsoption *Nichtlineare Systemanalyse* ermöglicht die Ermittlung der Schnitt- und Formänderungsgrößen von Stab- und Flächentragwerken aus Stahlbeton und Stahl sowie des Spannungszustandes von Volumenelementen mit bilinearem Materialgesetz unter Berücksichtigung physikalischer und geometrischer Nichtlinearitäten. Aufgrund des hohen numerischen Aufwandes ist dieses Programmmodul nur für Sonderprobleme sinnvoll anwendbar.

Im Einzelnen können folgende nichtlineare Effekte berücksichtigt werden:

- Gleichgewicht am verformten System nach Theorie 2. Ordnung, wenn diese im betreffenden Lastfall aktiviert ist.
- Stäbe und Flächen aus Stahlbeton nach DIN 1045, DIN 1045-1, ÖNORM B4700, SIA 262 und EN 1992-1-1.
- Stäbe und Flächen aus Stahl mit bilinearer Spannungs-Dehnungs-Linie unter Berücksichtigung der Huber-v. Mises-Fließbedingung sowie vollständiger Interaktion sämtlicher Schnittgrößen.
- Stäbe, Flächen und Volumen mit bilinearer Spannungs-Dehnungs-Linie bzw. Fließbedingung nach Raghava und getrennt definierbarer Druck- und Zugfestigkeit.
- Druckweiche Stäbe.
- Stab- und Flächenbettung mit bilinearem Bettungsverlauf senkrecht und längs zum Element.
- Volumenelemente mit bilinearem Bettungsverlauf im Elementkoordinatensystem.
- Bei Flächen- und Volumenelementen kann die Lastart *Vorspannung* verwendet werden, um Vorspannung ohne Verbund (nur Last) zu simulieren.
- Stäbe aus Stahl, Stahlbeton und Holz im Brandfall nach EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 und EN 1995-1-2 (s. Kapitel „Tragwerksanalyse für den Brandfall“).

### Berechnungsverfahren

Das verwendete Berechnungsmodell basiert auf der Finite-Elemente-Methode. Zur Durchführung der nichtlinearen Systemanalyse werden die Standardstabelemente intern durch Schubweiche, nichtlineare Stäbe mit einem höheren Verschiebungsansatz ersetzt. Für die Behandlung von Flächen- und Volumentragwerken werden nichtlineare Schicht- bzw. Volumenelemente verwendet. Im Vergleich zur linearen Berechnung ist, um den nichtlinearen oder gar unstetigen Eigenschaften des Tragwerks Rechnung zu tragen, in der Regel eine feinere Einteilung erforderlich.

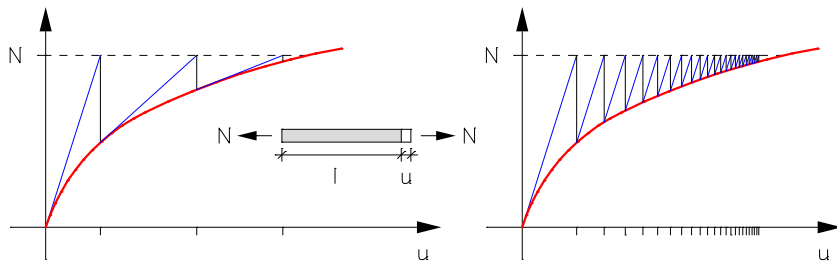
#### Voraussetzungen

- Die Stäbe sind planmäßig gerade.
- Die Flächenelemente sind planmäßig eben.
- Der Flächen- bzw. Stabquerschnitt ist elementweise konstant.
- Die Querschnittsabmessungen sind klein gegenüber den übrigen Systemabmessungen.
- Schubverformungen der Stäbe werden mit einer über den Querschnitt konstanten Schubverzerrung erfasst, d.h. der Querschnitt bleibt nach der Deformation eben, steht jedoch nicht mehr senkrecht auf der Stabachse.
- Die mathematische Krümmung wird linearisiert.
- Die Belastung wird langsam auf ihren Endwert gesteigert und erfährt durch die Systemverformung keine Richtungsänderung.

#### Gleichgewichtsiteration

Die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems erfolgt lastgesteuert nach der inkrementellen Newton-Raphson-Methode. Hierbei wird in jedem Iterationszyklus die tangentielle Steifigkeitsmatrix in Abhängigkeit vom aktuellen Schnittgrößen- und Deformationszustand aufbereitet. Alternativ kann die Iteration mit konstanter Steifigkeitsmatrix nach der modifizierten Newton-Raphson-Methode erfolgen. Bei beiden Methoden wird der aufnehmbare Lastfaktor ( $\leq 1.0$ ) durch Intervallschachtelung ermittelt. Das Programm geht davon aus, dass die in den Lastfällen definierten Einwirkungen bereits mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten gewichtet sind.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den unterschiedlichen Iterationsverlauf am Beispiel eines Stabes mit einem Freiheitsgrad.



Newton-Raphson-Methode

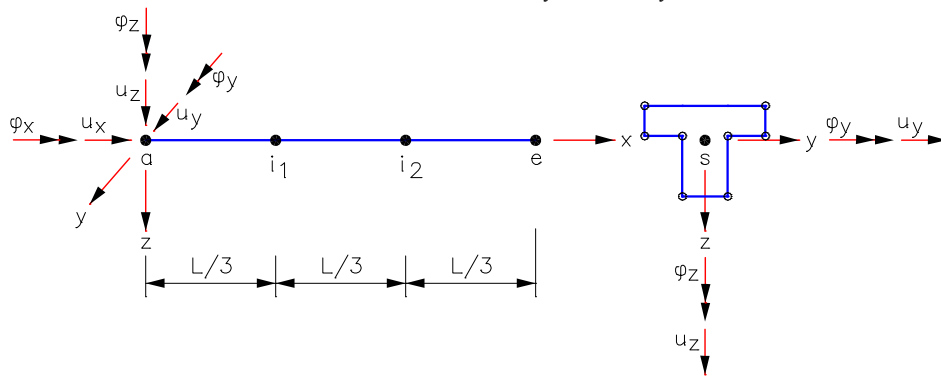
Modifizierte Newton-Raphson-Methode

Bei einem Nachweis am Gesamtsystem gemäß ÖNORM B4700 (Abschnitt 3.4.3.3) bzw. ÖNORM EN 1992-1-1:2007 (Nationale Erläuterung zu Abschnitt 5.8.6(3)) ist darauf zu achten, dass die maßgebende Einwirkungskombination nur 80% bzw. 77% der erreichbaren Systemtraglast betragen darf. Dies kann z.B. mit einem zusätzlichen Lastfaktor von 1,25 bzw. 1,3 erreicht werden.

Bei Stahlbetonbauteilen wird die vorhandene Bewehrung der Berechnung zugrunde gelegt. Auf Wunsch kann bei Stabwerken zur Erzielung des gewünschten Lastniveaus im Tragfähigkeitsnachweis eine automatische Bewehrungserhöhung durchgeführt werden.

## Finite Stabelemente

Es werden schubweiche Stabelemente mit 4 Knoten verwendet. Die beiden inneren Knoten sind für den Anwender verborgen. Jeder Knoten hat die Freiheitsgrade  $u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y$  und  $\varphi_z$ .



Stabelement mit Knotenfreiheitsgraden

Da bei schubweichen Elementen für die Verschiebungen und Verdrehungen unabhängige Verformungsansätze gemacht werden, sind bei dem vorliegenden Stabelement sämtliche Formänderungen durch Polynome 3. Grades approximiert.

Dies erlaubt eine gleichwertige Darstellung der Dehnungen und Krümmungen, was insbesondere bei der Erfassung der physikalischen Nichtlinearitäten von Vorteil ist. Sämtliche Schnittgrößen werden durch Polynome 2. Grades (quadratische Parabeln) beschrieben.

In Verbindung mit Schalenelementen kommen aus Kompatibilitätsgründen gleichwertige, schubstarre Stabelemente zur Anwendung.

Bei linearer Berechnung ergeben sich hiermit bei konstanter Elementbelastung in Längs- oder Querrichtung exakte Ergebnisse. Davon abweichende Beanspruchungen, wie Einzellasten im Element oder Trapezlasten im Element, können nur genähert erfasst werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt dann von der gewählten Tragwerksdiskretisierung ab.

### Kinematik

$$u_x(x, y, z) = u_x(x) - y \cdot \varphi_z(x) + z \cdot \varphi_y(x)$$

$$u_y(x, y, z) = u_y(x) - z \cdot \varphi_x(x)$$

$$u_z(x, y, z) = u_z(x) - y \cdot \varphi_x(x)$$

**Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehungen**

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$

$$g' = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = \gamma_{yz} = 0$$

**Virtuelle innere Arbeit**

$$\Psi(a) = \int_V \delta \epsilon \cdot \sigma \, dV + \int_V \delta \gamma \cdot \tau \, dV + \int_L \delta \vartheta \cdot M_x \, dx$$

*Normalkraft*
*Schub*
*Torsion*  
*Biegung*

*a* Knotenfreiheitsgrade

**Tangentiale Steifigkeitsmatrix**

$$\frac{d\Psi}{da} = K_T = \int_V \left( dB^T \cdot \sigma + B^T \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right) dV + K_{Schub} + K_{Torsion}$$

$$= K_0 + K_\sigma + K_{nl} + K_{Schub} + K_{Torsion}$$

mit  $d\epsilon = B \cdot da$  und  $B = B_0 + B_{nl}$

Gegebenenfalls kommen noch Terme aus der Bettung der Elemente hinzu.

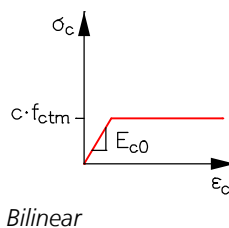
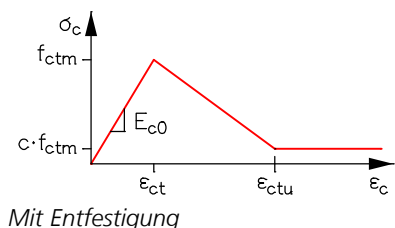
**Querschnittsanalyse**

Grundsätzlich können nur Polygonquerschnitte, Datenbankquerschnitte und Stahlbauprofile einer nichtlinearen Analyse unterworfen werden. Bei allen übrigen Querschnittsarten und bei den Materialarten *Beton* sowie *Bauholz* wird elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt. Zur Ermittlung der nichtlinearen Steifigkeiten und Schnittgrößen ist eine numerische Integration der Spannungen und deren Ableitungen über die Querschnittsfläche erforderlich. Je nach Material wird hierbei unterschiedlich vorgegangen.

**Stäbe aus Stahlbeton**

Mit den weiter unten dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linien lassen sich bei bekanntem Dehnungszustand durch Integration der Normalspannungen am Querschnitt die resultierenden Schnittgrößen  $N_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  ermitteln. Zur Bestimmung des Dehnungs- und Spannungszustandes am Querschnitt werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Querschnitte bleiben bei der Verformung zu jedem Zeitpunkt eben, auch wenn der Querschnitt infolge Überschreitens der Betonzugfestigkeit gerissen ist.
- Zwischen Beton und Bewehrung herrscht vollkommener Verbund.
- Die Zugfestigkeit des Betons wird standardmäßig vernachlässigt, kann jedoch auf Wunsch berücksichtigt werden.
- Im Zugbereich der Spannungs-Dehnungs-Linien kann einer der beiden folgenden Verläufe zugrunde gelegt werden.



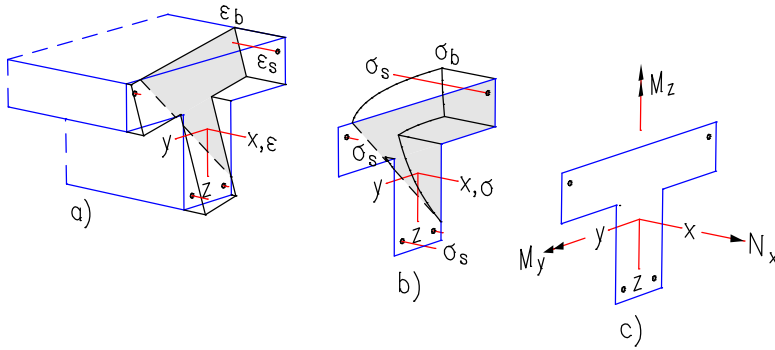
- $\epsilon_{ct}$  Dehnung bei Erreichen der Betonzugfestigkeit
- $\epsilon_{ctu}$  Dehnung nach Überschreiten der spezifischen Bruchenergie  $G_f$

$$G_f = G_{f0} \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \quad G_{f0} \approx 3,0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{MNm}}{\text{m}^2}$$

$$f_{cm0} = 10 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$f_{cm}$  mittlere Betondruckfestigkeit

- Die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen (tension stiffening) wird durch eine verbleibende Zugspannung  $\sigma = c \cdot f_{ctm}$  bzw.  $c \cdot \beta_{bz}$  erfasst. Die Konstante  $c$  ist vom Benutzer einstellbar (Standard: 0,1).

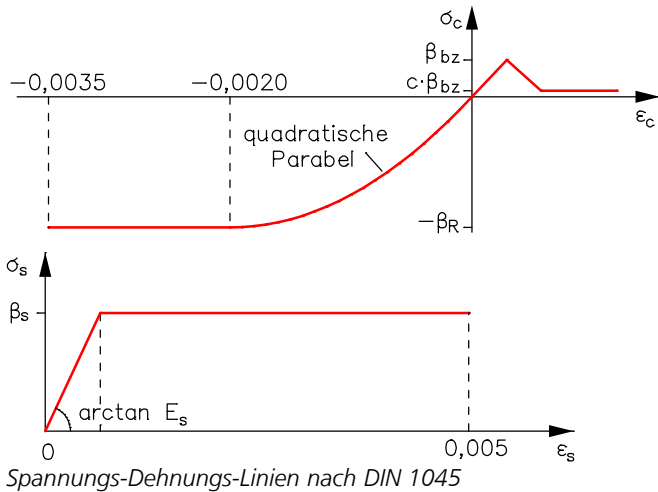


- a) Stahlbetonquerschnitt mit spannungsauslösenden Dehnungen
- b) Beton- und Stahlspannungen
- c) Resultierende Schnittgrößen

In Abhängigkeit von der gewählten Materialart kommen nachfolgende Spannungs-Dehnungs-Linien zur Anwendung. Der Zugbereich des Betons wird nur optional aktiviert.

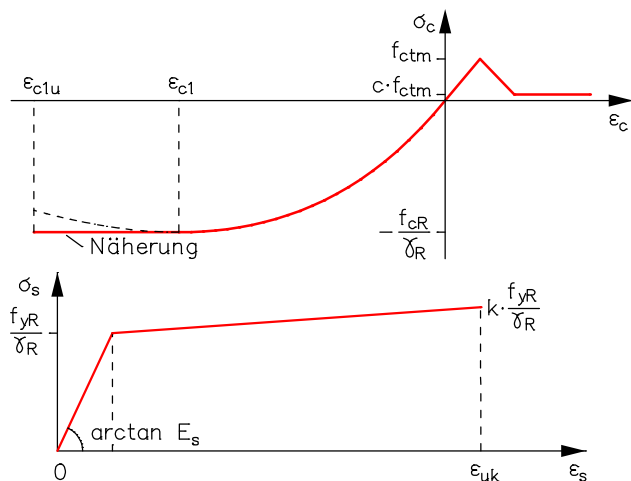
### Spannungs-Dehnungs-Linien für den Tragfähigkeitsnachweis

Die implementierten Material-Teilsicherheitsbeiwerte sind nachfolgend angegeben. Bei Materialien nach EN 1992-1-1 bzw. ÖNORM B 4700 werden gegebenenfalls die vom Benutzer definierten Material-sicherheitsbeiwerte für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation bzw. Grundkombination verwendet.



Beton nach DIN 1045:1988, Bild 11  
 $\beta_R$  nach Tabelle 12  
 $\sigma_c = -\beta_R \cdot (\epsilon_b - 1/4 \cdot \epsilon_b^2)$  für  $0 \geq \epsilon_b \geq -2 \%$

Betonstahl nach DIN 1045:1988, Bild 12  
 $E_s = 210.000 \text{ MN/m}^2$  nach Bild 12



Spannungs-Dehnungs-Linien nach DIN 1045-1

Beton nach DIN 1045-1, 9.1.5

$\sigma_c$  nach Gleichung (62) bzw. Bild 22 für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$

mit  $f_{cR}/\gamma_R$  statt  $f_c$ ;  $\gamma_R = 1,3$

$E_{c0m}$  bzw.  $E_{lc0m}$  statt  $E_{c0}$

$f_{cR}$  nach Gl. (23) bzw. Gl. (24)

Normalbeton:  $\alpha = 0,85$

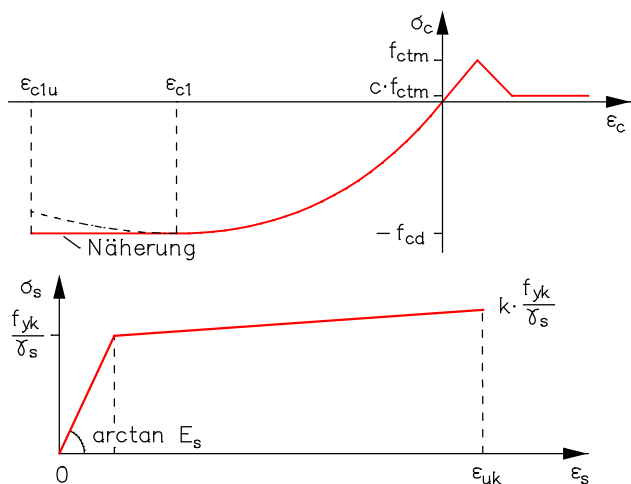
Leichtbeton:  $f_{lck}$  statt  $f_{ck}$  und  $\alpha = 0,75$

Betonstahl nach DIN 1045-1, 9.2.3 Bild 26

$f_{yR} = 1,1 \cdot f_{yk}$ ;  $\gamma_R = 1,3$  nach 8.5.1(4)

$k = 1,05$ ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Tab. 11, Spalte 1 bzw. 2

$E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 9.2.4(4)



Spannungs-Dehnungs-Linien nach EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1 und SS EN 1992-1-1

Beton nach EN 1992-1-1, 3.1.5

$\sigma_c$  nach Gleichung (3.14) für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$  bzw.  $\epsilon_{lc1}$

mit  $f_{cd}$  bzw.  $f_{lcd}$  statt  $f_{cm}$  und nach

Gl. (5.20)  $E_{cd} = E_{cm}/\gamma_{cE}$  statt  $E_{cm}$

mit  $\gamma_{cE} = 1,2$  und  $E_{cm}$  gemäß Eingabe

Normalbeton:  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck}/\gamma_c$  (Gl. 3.15) mit  $\alpha_{cc} = 1,0$

Leichtbeton:  $f_{lcd} = \alpha_{lcc} \cdot f_{lck}/\gamma_c$  (Gl. 11.3.15)

mit  $\alpha_{lcc} = 0,85$

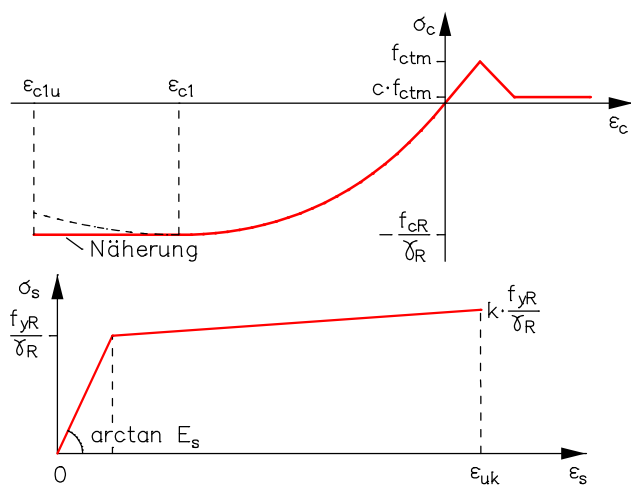
Standard:  $\gamma_c = 1,5$  nach Tab. 2.1N, Zeile 1

Betonstahl nach EN 1992-1-1, 3.2.7 Bild 3.8

$k = 1,05$ ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Tab. C.1, Spalte A

$E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 3.2.7(4)

Standard:  $\gamma_s = 1,15$  nach Tab. 2.1N, Zeile 1



Spannungs-Dehnungs-Linien nach DIN EN 1992-1-1

Beton nach DIN EN 1992-1-1, 3.1.5

$\sigma_c$  nach Gleichung (3.14) für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$  bzw.  $\epsilon_{lc1}$

mit  $f_{cR}/\gamma_R$  statt  $f_{cm}$  und  $E_{cm}/\gamma_R$  statt  $E_{cm}$

mit  $\gamma_R = 1,3$  und  $E_{cm}$  gemäß Eingabe

$f_{cR}$  nach Gl. (NA.5.12.7)

Normalbeton:  $f_{cR} = 0,85 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$  mit  $\alpha_{cc} = 0,85$

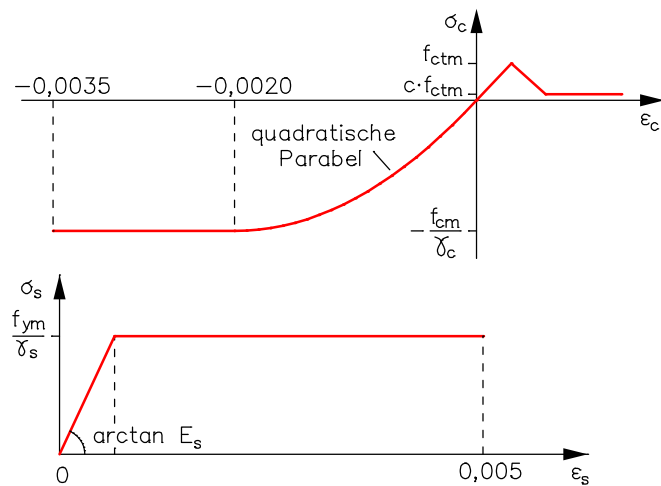
Leichtbeton:  $f_{cR} = 0,85 \cdot \alpha_{lcc} \cdot f_{lck}$  mit  $\alpha_{lcc} = 0,75$

Betonstahl nach DIN EN 1992-1-1, 3.2.7 Bild 3.8

$f_{yR} = 1,1 \cdot f_{yk}$  nach Gl. (NA.5.12.2);  $\gamma_R = 1,3$

$k = 1,05$ ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Gl. (NA.5.12.4) bzw. DIN 488

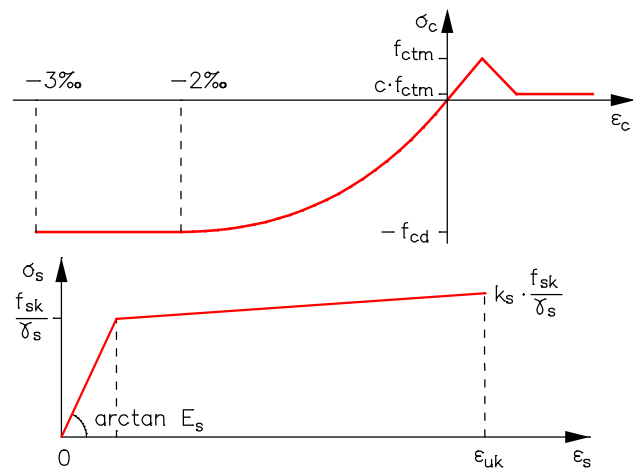
$E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 3.2.7(4)



Spannungs-Dehnungs-Linien nach ÖNORM B 4700

Beton nach ÖNORM B 4700, 3.4.1.1 Bild 7 mit  $f_{cm} = f_{ck} + 7,5$  nach Gleichung (10c) und  $f_{ck} = 0,75 \cdot f_{cwk}$  nach 3.4.1.1(2)  
Standard:  $\gamma_c = 1,5$  nach Tab. 1, Zeile 1

Betonstahl nach ÖNORM B 4700, 3.4.1.2 Bild 9 mit  $f_{ym} = f_{yk} + 10,0$  nach Gleichung (10d)  
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach Bild 9  
Standard:  $\gamma_s = 1,15$  nach Tab. 1, Zeile 1



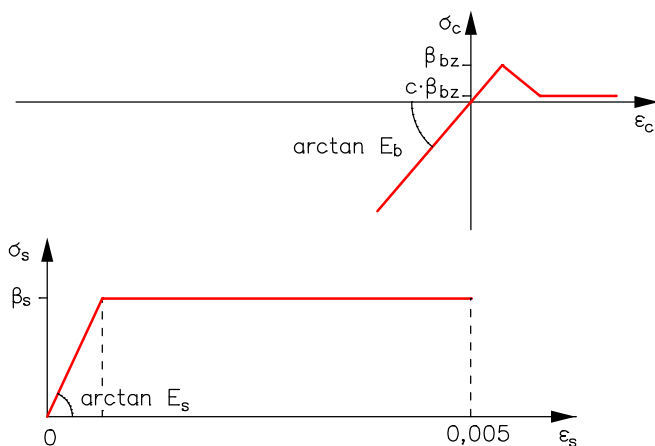
Spannungs-Dehnungs-Linien nach SIA 262

Beton nach SIA 262, 4.2.1.6 und Bild 12  $\sigma_c$  nach Gleichung (28) für  $0 \geq \epsilon_c \geq -2\text{‰}$  mit  $f_{cd}$  nach Gl. (2) und Gl. (26);  $\gamma_c = 1,5$  nach 2.3.2.6  
 $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$  nach Gl. (33)  
 $E_{cm}$  nach Gl. (10) und Gl. (11)  
 $\gamma_{cE} = 1,2$  nach 4.2.1.17

Betonstahl nach SIA 262, 4.2.2.2, Bild 16 mit  $f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$  nach Gl. (4);  $\gamma_s = 1,15$  nach 2.3.2.6  
 $k_s = 1,05$  und  $\epsilon_{uk} = 2\text{‰}$  nach Tab. 9, Spalte A  
 $E_s = 205.000 \text{ MN/m}^2$  nach Bild 16

### Spannungs-Dehnungs-Linien für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis

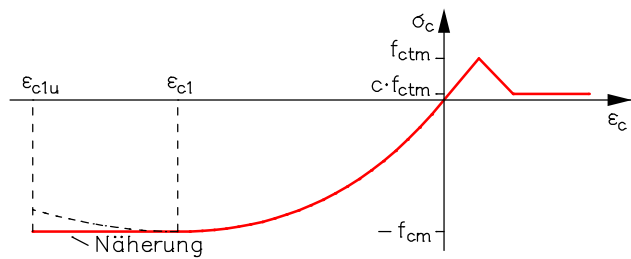
Beim Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird mit den mittleren Festigkeiten der Materialien gerechnet. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden hierbei zu 1,0 angenommen.



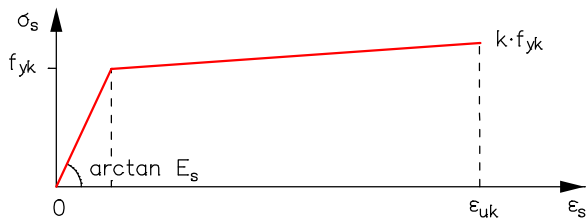
Spannungs-Dehnungs-Linien nach DIN 1045

Beton mit linearer Steifigkeit in der Druckzone ohne Versagensgrenze

Betonstahl nach DIN 1045:1988, Bild 12  
 $E_s = 210.000 \text{ MN/m}^2$  nach 6.2.1

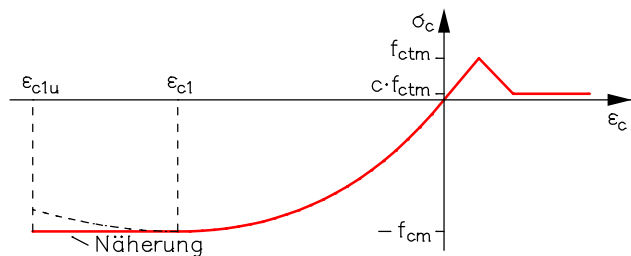


Beton nach DIN 1045-1, 9.1.5  
 $\sigma_c$  nach Gleichung (62) bzw. Bild 22 für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$   
 mit  $f_{cm}$  bzw.  $f_{lcm}$  statt  $f_c$  und  $E_{c0m}$  bzw.  $E_{lc0m}$  statt  $E_{c0}$

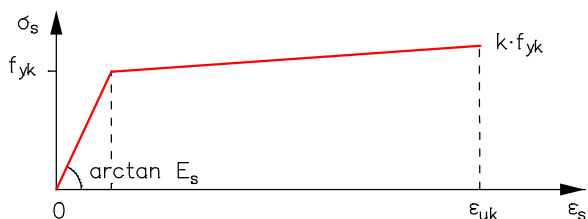


Betonstahl nach DIN 1045-1, 9.2.3 Bild 26  
 $k = 1,05$  ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Tab. 11, Spalte 1 bzw. 2  
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 9.2.4(4)

Spannungs-Dehnungs-Linien nach DIN 1045-1

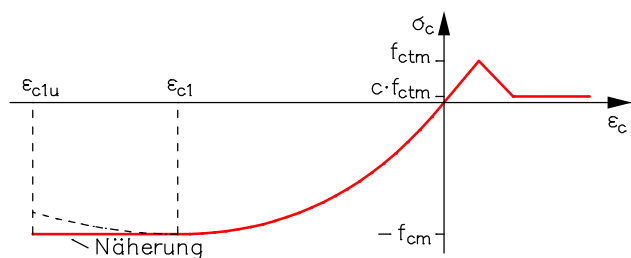


Beton nach EN 1992-1-1, 3.1.5  
 $\sigma_c$  nach Gleichung (3.14) für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$  bzw.  $\epsilon_{lc1}$   
 mit  $f_{cm}$  nach Tab. 3.1 bzw.  $f_{lcm}$  nach Tab. 11.3.1  
 und  $E_{cm}$  bzw.  $E_{lcm}$  gemäß Eingabe

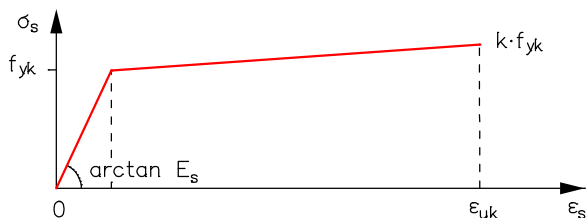


Betonstahl nach EN 1992-1-1, 3.2.7 Bild 3.8  
 $k = 1,05$  ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Tab. C.1, Spalte A  
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 3.2.7(4)

Spannungs-Dehnungs-Linien nach EN 1992-1-1, ÖNORM B 1992-1-1 und SS EN 1992-1-1

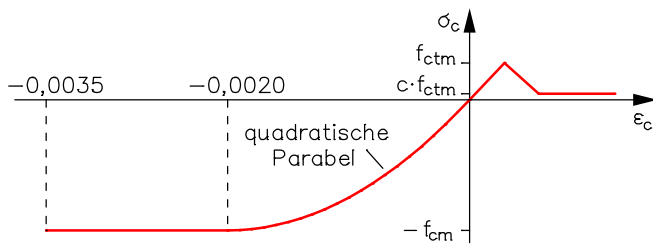


Beton nach DIN EN 1992-1-1, 3.1.5  
 $\sigma_c$  nach Gleichung (3.14) für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$  bzw.  $\epsilon_{lc1}$   
 mit  $f_{cm}$  nach Tab. 3.1 bzw.  $f_{lcm}$  nach Tab. 11.3.1  
 und  $E_{cm}$  bzw.  $E_{lcm}$  gemäß Eingabe

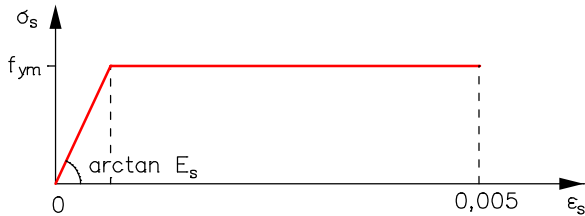


Betonstahl nach DIN EN 1992-1-1, 3.2.7 Bild 3.8  
 $k = 1,05$  ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$   
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$

Spannungs-Dehnungs-Linien nach DIN EN 1992-1-1

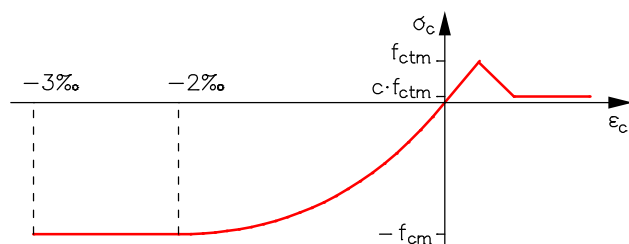


Beton nach ÖNORM B 4700, 3.4.1.1 Bild 7  
 mit  $f_{cm} = f_{ck} + 7,5$  nach Gleichung (10c) und  
 $f_{ck} = 0,75 \cdot f_{cwk}$  nach 3.4.1.1(2)

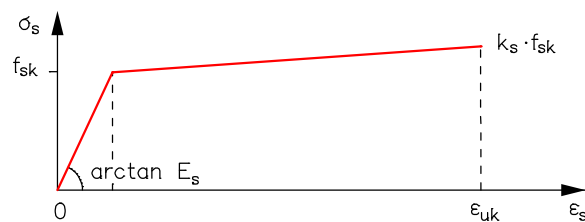


Betonstahl nach ÖNORM B 4700, 3.4.1.2 Bild 9  
 mit  $f_{ym} = f_{yk} + 10,0$  nach Gleichung (10d)  
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach Bild 9

Spannungs-Dehnungs-Linien nach ÖNORM B 4700



Beton nach SIA 262, 4.2.1.6 und Bild 12  
 $\sigma_c$  nach Gleichung (28) für  $0 \geq \epsilon_c \geq -2 \text{ ‰}$  mit  
 $f_{cm} = f_{ck} + 8$  nach Gl. (6) statt  $f_{cd}$   
 $E_{cm}$  nach Gl. (10) und Gl. (11) statt  $E_{cd}$



Betonstahl nach SIA 262, 4.2.2.2, Bild 16  
 mit  $f_{sk}$  statt  $f_{sd}$   
 $k_s = 1,05$  und  $\epsilon_{uk} = 2 \text{ ‰}$  nach Tab. 9, Spalte A  
 $E_s = 205.000 \text{ MN/m}^2$  nach Bild 16

Spannungs-Dehnungs-Linien nach SIA 262

## Torsionssteifigkeit

Bei der Berechnung der Torsionssteifigkeit des Querschnittes wird davon ausgegangen, dass diese im gleichen Maße abnimmt wie die Biegesteifigkeit.

$$GI_{x,II} = \frac{1}{2} \cdot GI_{x,I} \cdot \left( \frac{EI_{y,II}}{EI_{y,I}} + \frac{EI_{z,II}}{EI_{z,I}} \right)$$

Eine Umkehrung dieses Sachverhalts, d.h. eine Minderung der Steifigkeiten infolge Torsionsbeanspruchung, kann nicht erfasst werden. Die physikalisch nichtlineare Berechnung einer reinen Torsionsbeanspruchung ist für Stahlbeton ebenfalls nicht möglich.

## Kontrolle der Grenzdehnungen (Tragfähigkeitsnachweis)

Nach Abschluss der Gleichgewichtsiteration wird bei Stabtragwerken (RSW, ESW) eine Kontrolle der jeweils zulässigen Grenzdehnungen für Beton und Betonstahl durchgeführt. Bei Überschreitung der zulässigen Werte erfolgt eine Bewehrungserhöhung bzw. eine Abminderung der Tragfähigkeit.

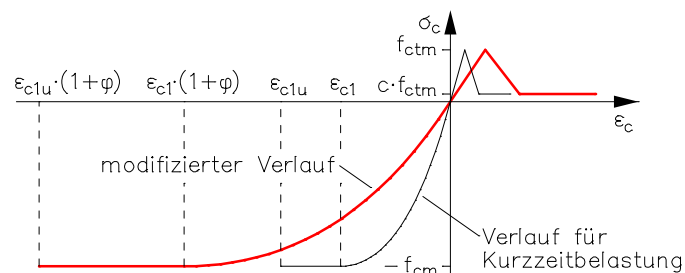


## Automatische Bewehrungserhöhung (Tragfähigkeitsnachweis)

Auf Wunsch wird bei Stabtragwerken (RSW, ESW) zum Erreichen der vollen Tragfähigkeit eine automatische Bewehrungserhöhung durchgeführt. Dabei wird auf Basis der gewählten Ausgangsbewehrung zunächst das erreichbare Lastniveau bestimmt. Ist die erreichte Tragfähigkeit kleiner als 100%, wird die Bewehrung erhöht und dann erneut iteriert. Falls aufgrund nicht ausreichender Ausgangsbewehrung keine Tragfähigkeit vorhanden ist, kann durch Vorgabe einer Grundbewehrung im Rahmen der Betonstahldefinition und erneuter Bemessung Abhilfe geschaffen werden.

## Betonkriechen

Die Berücksichtigung des Betonkriechens bei der nichtlinearen Systemanalyse erfolgt vereinfachend durch Modifikation der zugrundeliegenden Spannungs-Dehnungs-Linien. Diese werden in Dehnungsrichtung mit dem Faktor  $(1+\varphi)$  skaliert. Auch die zugehörigen Grenzdehnungen werden mit  $(1+\varphi)$  multipliziert. Die nachfolgende Abbildung zeigt das qualitative Vorgehen.



Das beschriebene Verfahren postuliert, dass die kriecherzeugenden Spannungen während des gesamten Kriechzeitraums konstant bleiben. Durch Spannungsumlagerungen, z.B. auf die Stahlbetonbewehrung, ist dies jedoch nicht gewährleistet. Daraus resultiert eine geringfügige Überschätzung der Kriechverformungen.

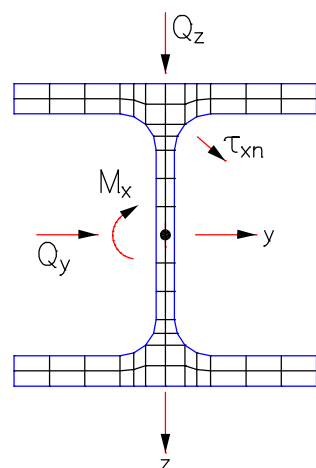
Spannungsrelaxation unter einem konstanten Dehnungszustand ist mit dem beschriebenen Verfahren ebenfalls modellierbar, führt jedoch aufgrund der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Linien zu einer Überschätzung der verbleibenden Spannungen.

Die Aktivierung des nichtlinearen Betonkriechens erfolgt im Dialog „Lastgruppe“.

Die Plausibilität der erzielbaren Berechnungsergebnisse sowie die Wirkungsweise unterschiedlicher Ansätze für die Betonzugfestigkeit und des „Tension-Stiffening“ werden an Hand zweier Beispiele im Abschnitt „Nachberechnung zweier Kurzzeitversuche“ demonstriert.

## Stäbe aus Stahl

Die Querschnittsgeometrie ist durch die polygonale Berandung festgelegt. Für die Querschnittsanalyse wird hieraus programmintern eine Vernetzung abgeleitet. Der implementierte Algorithmus liefert auf der Basis der u.a. quasi-harmonischen Differentialgleichung sämtliche Querschnittswerte, Spannungen und Schnittgrößen.



Stahlquerschnitt mit interner Vernetzung

Die Schubbeanspruchung wird durch das folgende Randwertproblem beschrieben:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Differentialgleichung})$$

$$\tau_{xn} = 0 \quad (\text{Randbedingung})$$

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{xz}^2} - \sigma_{R,d} = 0 \quad (\text{Fließbedingung})$$

Die Differentialgleichung gilt identisch für  $Q_y$ ,  $Q_z$  und  $M_x$ . Die Randbedingung liefert je nach Beanspruchung unterschiedliche Randwerte der Lösungsfunktion  $\varphi$ . Die Lösung erfolgt mittels Integraldarstellung der Randwertaufgabe und Diskretisierung durch finite Differentialgleichungselemente. Die Schnittgrößen werden durch numerische Integration der Spannungen über den Querschnitt unter Beachtung der Huber-v.Mises-Fließbedingung ermittelt. Dabei kann die Interaktion sämtlicher Schnittgrößen berücksichtigt werden. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird der Material Sicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  wie folgt berücksichtigt:

- Baustahl nach DIN 18800 und allgemeine Materialart *Stahl*:  
Der für die Grundkombination nach DIN 18800 eingegebene Beiwert  $\gamma_M$  ist maßgebend.
- Baustahl nach EN 10025-2:  
 $\gamma_M$  wird nach EN 1993-1-1, Kap. 6.1(1), zu  $\gamma_{M0} = 1,0$  angenommen.

Beim Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird generell mit einem Material Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,0$  gerechnet.

In Anlehnung an DIN 18800 wird die Interaktion zwischen Normal- und Schubspannungen jedoch erst bei Erfüllung einer der drei folgenden Bedingungen berücksichtigt.

$$Q_y \geq 0,25 \cdot Q_{pl,y,d}$$

$$Q_z \geq 0,33 \cdot Q_{pl,z,d}$$

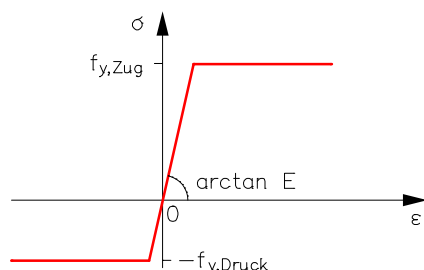
$$M_x \geq 0,20 \cdot M_{pl,x,d}$$

Eine Begrenzung der Biegemomente  $M_{pl,y,d}$  und  $M_{pl,z,d}$  gemäß DIN 18800 auf den 1,25-fachen Wert des jeweiligen elastischen Grenzmomentes wird nicht durchgeführt.

Stabilitätsversagen durch Querschnittsbeulen und Biegedrillknicken wird nicht erfasst.

## Stäbe aus freiem Material

Bei Polygonquerschnitten mit der allgemeinen Materialart *Frei* wird die nachfolgende bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie mit benutzerdefinierter Zugfestigkeit ( $f_{y,Zug}$ ) und Druckfestigkeit ( $f_{y,Druck}$ ) angewendet.

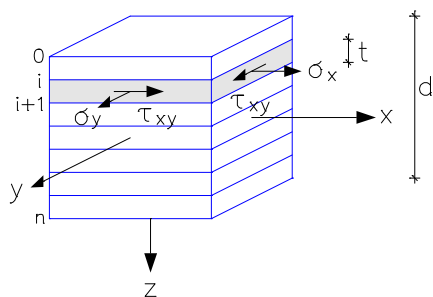


Spannungs-Dehnungs-Linie bei der Materialart *Frei*

Wegen der unterschiedlichen Festigkeiten im Druck- und Zug-Bereich kommt hierbei nicht die Fließbedingung nach Huber-v. Mises zur Anwendung. Eine Interaktion von Normal- und Schubspannungen wird ebenfalls nicht berücksichtigt.

## Flächenelemente

Um die Integration der nichtlinearen Spannungen über den Flächenquerschnitt zu ermöglichen, werden sogenannte Schichtelemente verwendet. Dabei werden in jeder Schicht die Spannungen nach der Scheibentheorie, ebener Spannungszustand, unter Berücksichtigung der physikalischen Nichtlinearitäten ermittelt. Die Integration der Spannungen zu Schnittgrößen erfolgt mit Hilfe der Trapezregel.



$$\begin{aligned}
 n_x &= t \cdot \left( \sigma_{x0} + \sigma_{xn} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{xi} \right) & m_x &= t \cdot \left( \sigma_{x0} \cdot z_0 + \sigma_{xn} \cdot z_n + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{xi} \cdot z_i \right) \\
 n_y &= t \cdot \left( \sigma_{y0} + \sigma_{yn} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{yi} \right) & m_y &= t \cdot \left( \sigma_{y0} \cdot z_0 + \sigma_{yn} \cdot z_n + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{yi} \cdot z_i \right) \\
 n_{xy} &= t \cdot \left( \tau_{xy0} + \tau_{xyn} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{xyi} \right) & m_{xy} &= t \cdot \left( \tau_{xy0} \cdot z_0 + \tau_{xyn} \cdot z_n + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{xyi} \cdot z_i \right)
 \end{aligned}$$

## Flächenelemente aus Stahlbeton

Das biaxiale Betonverhalten wird mit Hilfe des Konzepts der äquivalenten einachsigen Dehnungen (Finite Elemente im Stahlbetonbau, Stempniewski und Eibl, Betonkalender 1993) realisiert. Der vorhandene Dehnungszustand wird zunächst in der jeweiligen Schicht in die Hauptrichtung transformiert und anschließend auf die äquivalente Beziehung der Form

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} = 0 \end{Bmatrix} &= \frac{1}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} E_1 & \nu \cdot \sqrt{E_1 \cdot E_2} & 0 \\ \nu \cdot \sqrt{E_1 \cdot E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} = 0 \end{Bmatrix} \\
 &= \frac{1}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{c,1} \\ \varepsilon_{c,2} \\ \varepsilon_{12} = 0 \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

mit

$$\varepsilon_{c,1} = \varepsilon_{11} + \nu \cdot \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \cdot \varepsilon_{22}$$

$$\varepsilon_{c,2} = \nu \cdot \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \cdot \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}$$

$$G = \frac{1}{4 \cdot (1-\nu^2)} \left[ E_1 + E_2 - 2 \cdot \nu \cdot \sqrt{E_1 \cdot E_2} \right]$$

umgeformt. Der Schubmodul  $G$  wird in diesem Ansatz als richtungsunabhängig angesehen. Die Querdehnzahl  $\nu$  wird als konstant angenommen.

Die erforderlichen tangentialen Steifigkeiten  $E_1$  und  $E_2$  sowie die äquivalenten biaxialen Betonspannungen  $\sigma_{c,i}$  werden unter Verwendung der Saenz-Kurve

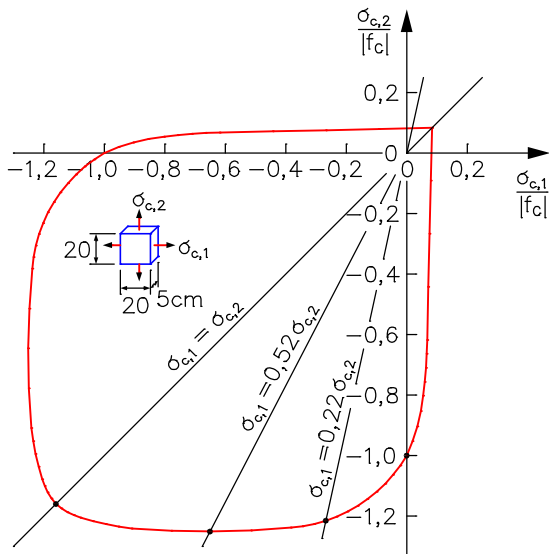
$$\sigma_{c,i} = \frac{E_{c0} \cdot \varepsilon_{c,i}}{1 + \left( \frac{E_{c0}}{E_{cS,i}} - 2 \right) \frac{\varepsilon_{c,i}}{\varepsilon_{cB,i}} + \left( \frac{\varepsilon_{c,i}}{\varepsilon_{cB,i}} \right)^2} \quad \text{mit } i = 1, 2 \text{ (Haupttrichtungen)}$$

unter Beachtung der biaxialen Festigkeiten nach Kupfer/Hilsdorf/Rüsch iteriert.

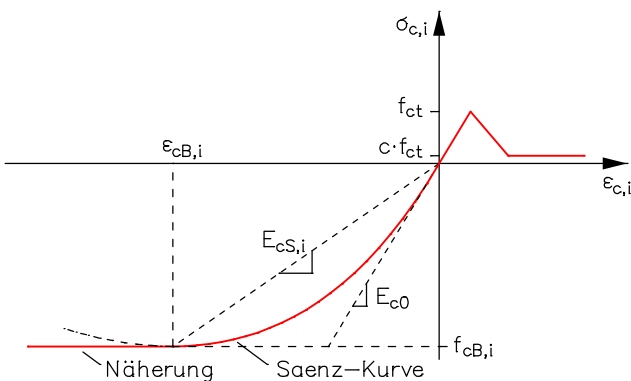
Nur beim Nachweis der Gebrauchsfähigkeit nach DIN 1045 wird im Druckbereich von einem linear elastischen Materialverhalten ausgegangen.

Parameter für die verwendete Spannungs-Dehnungs-Beziehung sind:

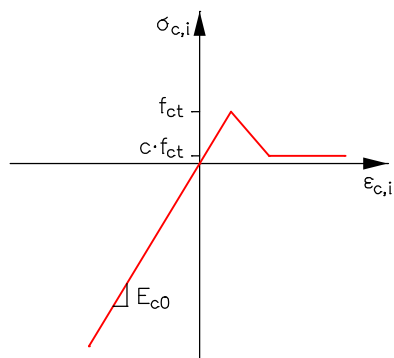
- Ursprungssteifigkeit  $E_{c0}$  der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Linie des gewählten Betons.
- Äquivalente biaxiale Betondehnungen  $\varepsilon_{c,i}$
- Faktor der biaxialen Versagenskurve  $k_i$  nach Kupfer/Hilsdorf/Rüsch in Abhängigkeit von  $\sigma_{c,1} / \sigma_{c,2}$ .
- Sekantensteifigkeiten  $E_{cS,i} = f_{cB,i} / \varepsilon_{cB,i}$  bei Erreichen der biaxialen Betondruckfestigkeiten  $f_{cB,i}$
- Biaxiale Betondruckfestigkeiten  $f_{cB,i} = k_i \cdot f_c$
- Betondruckfestigkeit  $f_c$  der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Linie des gewählten Betons.
- Stauchung  $\varepsilon_{cB,i}$  bei Erreichen von  $f_{cB,i}$ . Den Wert  $\varepsilon_{cB,i}$  erhält man nach Darwin und Pecknold mit den Funktionsparametern  $k_i$  und  $\varepsilon_{c1}$ .
- Stauchung  $\varepsilon_{c1}$  bei Erreichen von  $f_c$  der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Linie des gewählten Betons.



Biaxiale Versagenskurve nach Kupfer/Hilsdorf/Rüsch



Normierte äquivalente einachsige Spannungs-Dehnungs-Linie für Beton



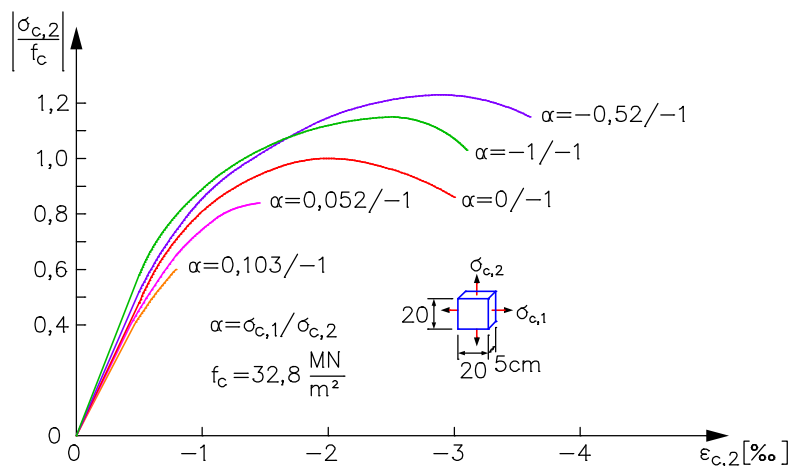
Spannungs-Dehnungslinie für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach DIN 1045

Die Berücksichtigung des Betonkriechens erfolgt analog dem Vorgehen bei Stäben durch Modifikation der zugrundeliegenden Spannungs-Dehnungs-Linien und muss im Dialog *Lastgruppe* aktiviert werden.

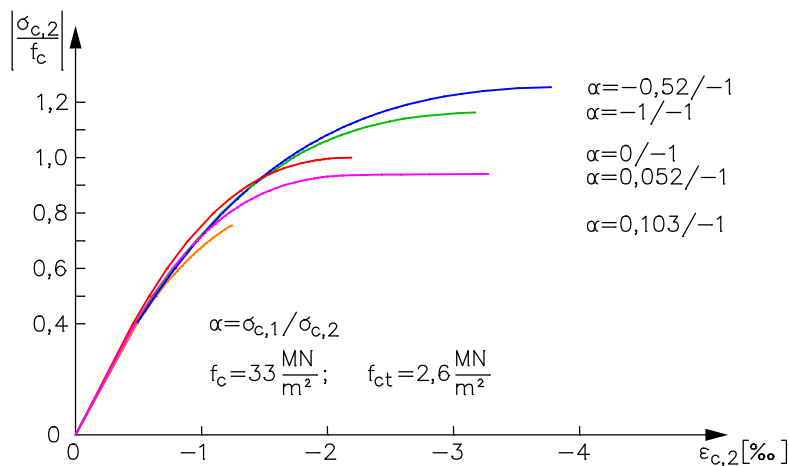
**Eine Interaktion mit den Schubspannungen aus Querkraften findet hierbei keine Berücksichtigung.** Bei der Festlegung der Rissrichtung wird vom sogenannten „Rotating crack model“ ausgegangen, d.h. die Rissrichtung kann sich während der nichtlinearen Iteration jeweils neu in Abhängigkeit vom Dehnungszustand einstellen. Im Gegensatz dazu kann bei einer nach der Erstrissbildung fixierten Rissrichtung eine Überschätzung der Tragfähigkeit resultieren.

**Eine Kontrolle der Grenzdehnungen sowie eine automatische Bewehrungserhöhung zur Steigerung der Tragfähigkeit werden im Finite-Element-Modul wegen des hohen numerischen Aufwandes z.Zt. nicht durchgeführt.**

Zur Verdeutlichung der implementierten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für Beton sind nachfolgend den im Biaxialversuch gemessenen Kurven nach Kupfer/Hilsdorf/Rüsch die mit dem oben beschriebenen Ansatz berechneten gegenübergestellt.

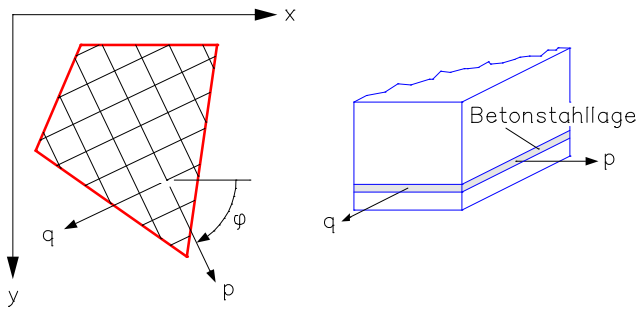


Biaxialversuch nach Kupfer/Hilsdorf/Rüsch



Berechnungsergebnisse für C25/30;  $f_{cm} = 25 + 8 = 33 \text{ MN/m}^2$

Der vorhandene **Betonstahl** wird als „verschmiertes“ orthogonales Bewehrungsnetz modelliert. Dabei wird der zugehörige Dehnungszustand in die Bewehrungsrichtungen (p, q) der jeweiligen Betonstahllage transformiert. Für die Spannungsermittlung wird dann die Spannungs-Dehnungs-Linie der gewählten Stahlbetonnorm verwendet.



### Flächenelemente aus Stahl und freiem Material

Für Flächenelemente aus Stahl wird die Huber-v.Mises-Fließbedingung verwendet. Bei Flächenelementen mit der Materialart *Frei* kann die Raghava- oder die Rankine-Fließbedingung gewählt werden.

$$F = J_2 - 1/3 \cdot f_{yd} \cdot f_{yz} + (f_{yc} - f_{yt}) \cdot \sigma_m = 0$$

mit

$$\sigma_m = 1/3 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

$$J_2 = 1/2 (s_x^2 + s_y^2 + s_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

$$s_x = \sigma_x - \sigma_m$$

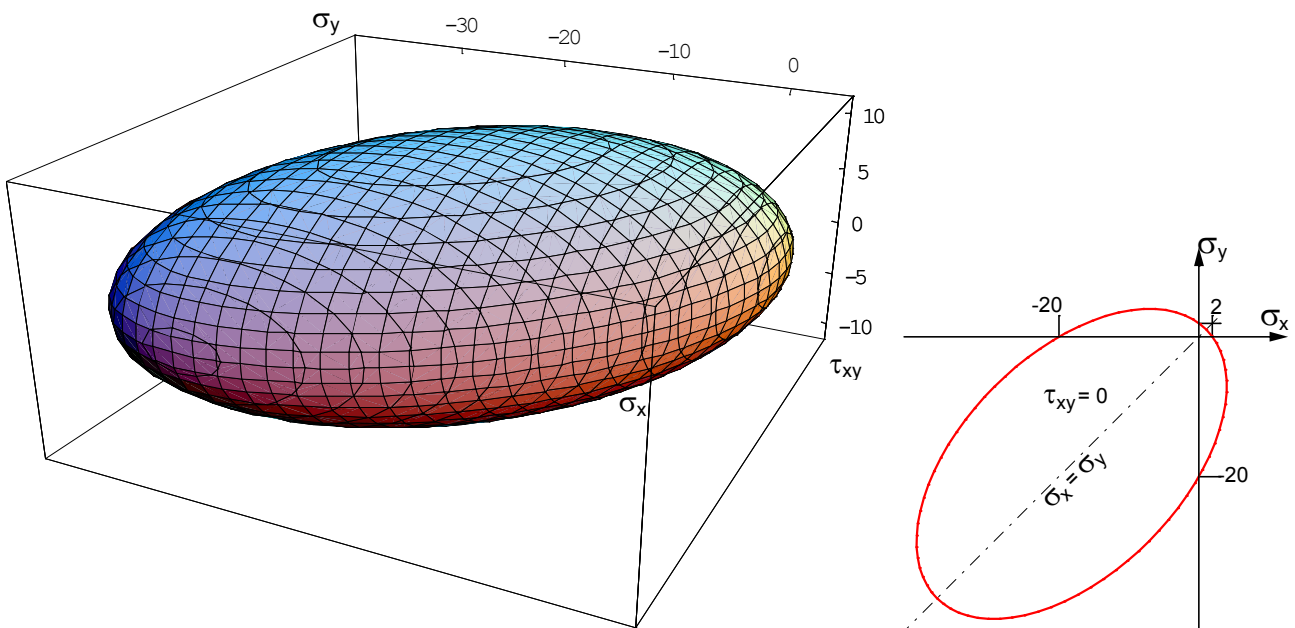
$$s_y = \sigma_y - \sigma_m$$

$$s_z = \sigma_z - \sigma_m$$

Hierfür wird ausgehend vom Dehnungszustand einer Schicht mit Hilfe eines „Backward-Euler-return“ auf die Fließfläche iteriert, was in Verbindung mit dem Newton-Raphson-Verfahren quadratische Konvergenz gewährleistet. (Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, M.A. Crisfield, Verlag John Wiley & Sons).

Nachfolgend ist die o.g. Fließfläche für den ebenen Spannungszustand, wie für die Schichtelemente angewendet, sowohl für die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  als auch für die Komponenten  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  dargestellt.

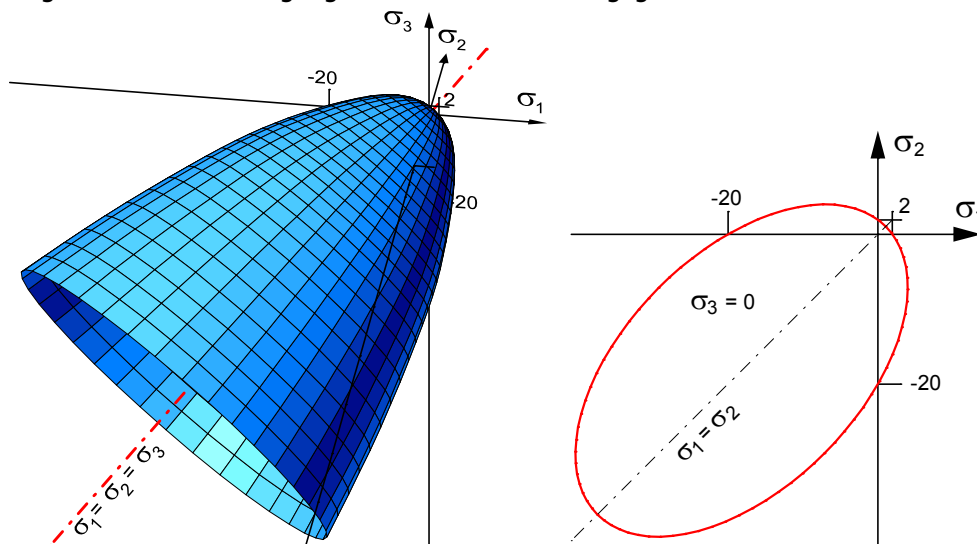
Dabei wurden  $f_{yc} = 20 \text{ MN/m}^2$  und  $f_{yt} = 2 \text{ MN/m}^2$  gesetzt.



Fließfläche nach Raghava für den ebenen Spannungszustand

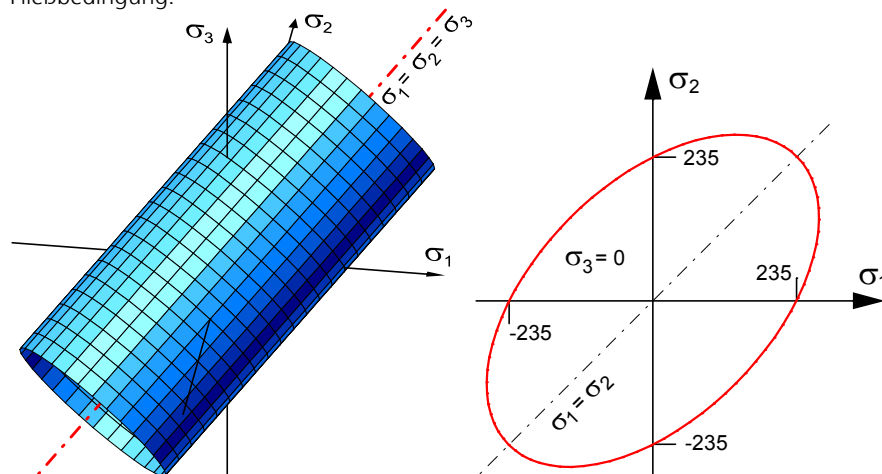
## Volumenelemente

Für Volumenelemente aus Stahl oder einer genormten Betonsorte wird die Fließbedingung nach Raghava verwendet (siehe *Flächenelemente aus Stahl und freiem Material*). Für Volumenelemente mit der Materialart *Frei* kann die Fließbedingung im Dialog für die Materialeigenschaften gewählt werden. Alle anderen Materialarten werden als elastisch angenommen. Bei den genormten Betonsorten wird die Druckfestigkeit auf  $f_{ck}$  gesetzt. Die Betonzugfestigkeit wird bei den Berechnungseinstellungen *Mit Entfestigung* und *Bilinear* auf  $c \cdot f_{ctm}$  und ansonsten auf Null gesetzt. Eine Entfestigung des Materials im Zugbereich wird für Volumenelemente z.Zt. nicht unterstützt. **Die Bruchkriterien von Beton werden mit den unten dargestellten Fließbedingungen nicht korrekt wiedergegeben.**

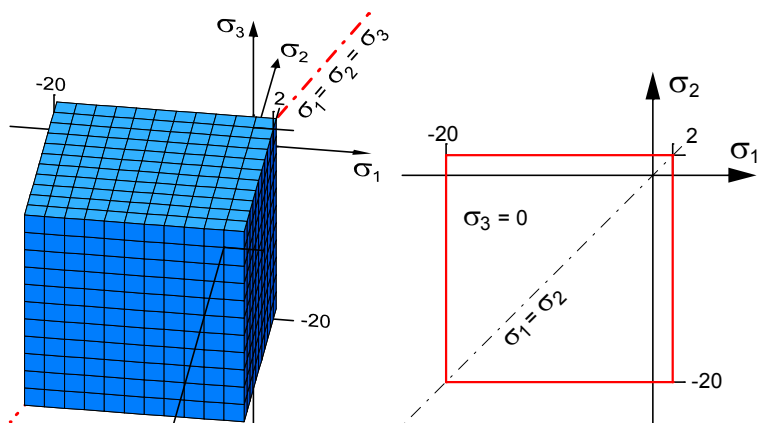


Fließfläche nach Raghava in Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$  für  $f_{yc} = 20 \text{ MN/m}^2$  und  $f_{yt} = 2 \text{ MN/m}^2$

Für Materialien mit identischer Zug- und Druckfestigkeit entspricht die Fließbedingung von Raghava der Huber-v.Mises-Fließbedingung.



Fließfläche nach Raghava in Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$  für  $f_{yc} = 235 \text{ MN/m}^2$  und  $f_{yt} = 235 \text{ MN/m}^2$



Fließfläche nach Rankine in Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$  für  $f_{yc} = 20 \text{ MN/m}^2$  und  $f_{yt} = 2 \text{ MN/m}^2$

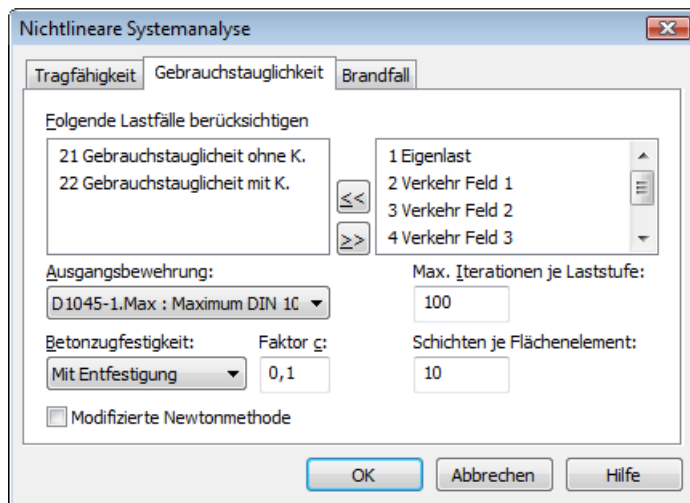
## Hinweise zum Konvergenzverhalten

Aufgrund des implementierten Newton-Raphson-Verfahrens mit tangentialer Steifigkeitsmatrix ergibt sich bei konsistentem Zusammenhang zwischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung und deren Ableitung ein gleichmäßig gutes Konvergenzverhalten. Dies trifft insbesondere wie bereits erwähnt für bilineare Materialien zu. Stahlbeton weist jedoch in aller Regel aufgrund der komplexeren Materialeigenschaften eine schlechtere Konvergenz auf. Dies ist bedingt durch Rissbildung, nicht stetig differenzierbare Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, zwei Komponenten Werkstoff etc.

Besonders bei Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit und Erfassung der Zugfestigkeit mit Entfestigung kann es zu deutlich schlechterem Konvergenzverhalten kommen, da im Entfestigungsbereich eine negative tangentiale Steifigkeit vorliegt. Falls diese zu einer singulären Gesamtsteifigkeitsmatrix führt ist alternativ die Annahme eines bilinearen Verlaufs im Zugbereich oder eine Berechnung ohne Zugfestigkeit möglich.

## Berechnungseinstellungen

Die nachfolgenden Einstellungen können in den Registerkarten *Tragfähigkeit* und *Gebrauchstauglichkeit* in den *Vorgaben* für die nichtlineare Systemanalyse über den Menüpunkt *Berechnung - Einstellungen* vorgenommen werden.



Mit der nichtlinearen Systemanalyse werden Lastfälle unter Berücksichtigung physikalischer und geometrischer Nichtlinearitäten berechnet, wobei letztere nur wirksam wird, wenn im Lastfall die Theorie 2. Ordnung aktiviert ist. Der Tragfähigkeits- und der Gebrauchstauglichkeitsnachweis sowie der Nachweis im Brandfall unterscheiden sich durch die nachzuweisenden Lastfälle, die Materialicherheiten, die unterschiedlichen Spannungs-Dehnungs-Linien und die Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit.

### Folgende Lastfälle berücksichtigen

Die Lastfälle aus dem linken Listenfeld werden berechnet.

### Ausgangsbewehrung

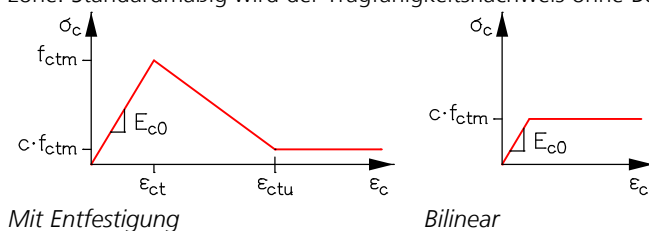
Die nichtlineare Systemanalyse wird bei Stahlbetonquerschnitten auf Basis der hier ausgewählten Bewehrung geführt. Diese resultiert aus einer im Vorlauf durchgeführten Stahlbetonbemessung. Die Ausgangsbewehrung *Null* entspricht der Grundbewehrung der Betonstahllagen. Besonderheiten beim Nachweis im Brandfall sind im Kapitel „*Tragwerksanalyse für den Brandfall*“ erläutert.

### Automatische Bewehrungserhöhung (RSW, ESW)

Beim Tragfähigkeitsnachweis wird bei Stahlbetonquerschnitten zur Erreichung der geforderten Tragsicherheit eine Bewehrungserhöhung durchgeführt.

### Betonzugfestigkeit; Faktor c

Diese Option definiert bei der nichtlinearen Schnittgrößenermittlung für alle Betonquerschnitte das Verhalten in der Zugzone. Standardmäßig wird der Tragfähigkeitsnachweis ohne Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit durchgeführt.





**Max. Iterationen je Laststufe**

Max. Anzahl Iterationsschritte, um innerhalb einer Laststufe Konvergenz zu erreichen. Bei Überschreiten der Fehlerschranke wird die Iteration abgebrochen und lastgesteuert ein aufnehmbares reduziertes Lastniveau ermittelt.

**Schichten je Flächenelement**

Anzahl Integrationsschichten eines Flächenelementes. Bei biegebeanspruchten Bauteilen sollte mit 10 Schichten gerechnet werden. Überwiegend durch Normalkräfte beanspruchte Tragwerke können mit 2 Schichten ausreichend genau analysiert werden.

**Modifizierte Newtonmethode**

Die Iteration erfolgt nach der „Modifizierten Newton-Raphson-Methode“. Ist der Schalter nicht gesetzt, wird mit der „Newton-Raphson-Methode“ gearbeitet.

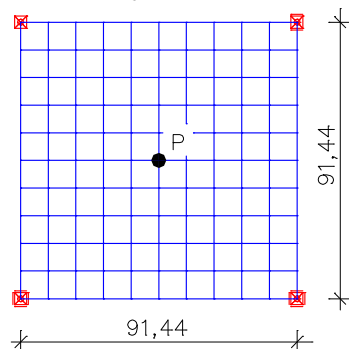
## Beispiele

### Nachberechnung zweier Kurzzeitversuche

Nachfolgend werden zwei einfache Tragwerke aus Stahlbeton (entnommen aus Krätzig/Meschke 2001) analysiert. Hieran sollen zum einen die Plausibilität der erzielten Berechnungsergebnisse sowie die Wirkungsweise unterschiedlicher Ansätze für die Betonzugfestigkeit und des „Tension-Stiffening“ demonstriert werden.

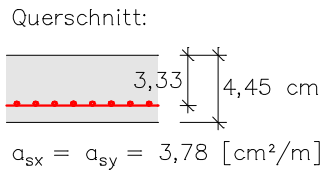
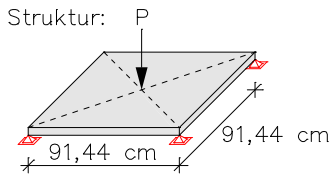
#### Stahlbetonplatte

Das unten abgebildete System wurde von Jofriet & McNeice (1971) experimentell untersucht. Für die Vergleichsberechnung wurde ein System mit 10x10 Schalenelementen wie nachfolgend abgebildet verwendet.



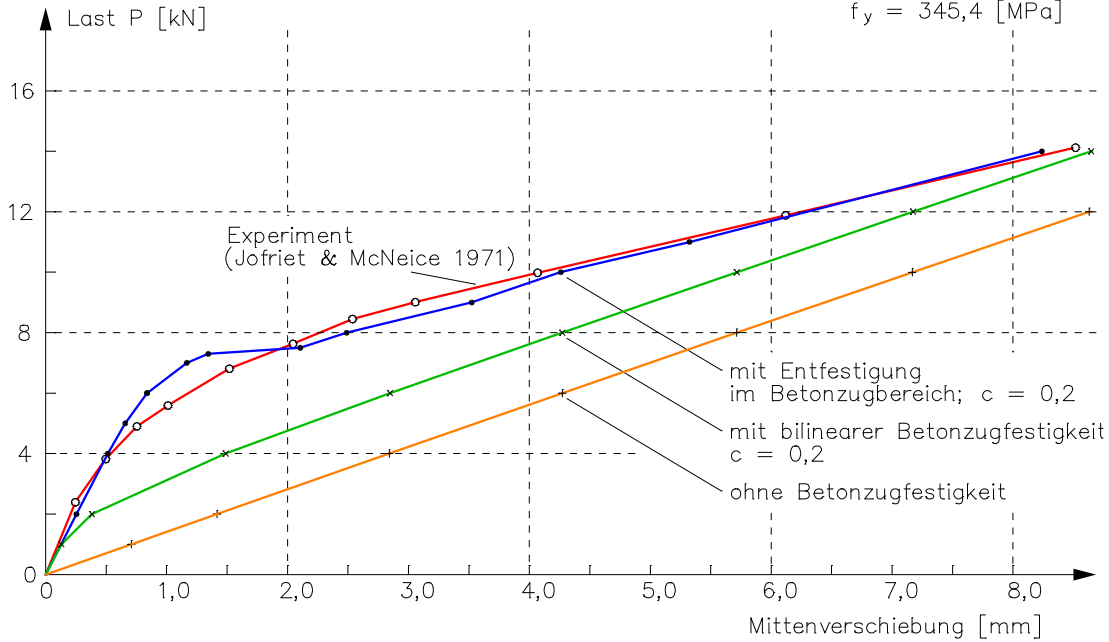
*Elementensystem mit Festhaltungen und Belastung. Abmessungen in [cm]*

Die im Versuch ermittelte Last-Verschiebungs-Kurve für die Plattenmitte ist den Ergebnissen der statischen Berechnung im nachfolgenden Diagramm gegenübergestellt. Die Materialparameter wurden gemäß den Angaben der Autoren eingestellt.



Material:

$f_c = 37,92 \text{ [MPa]}$   
 $E_c = 28613 \text{ [MPa]}$   
 $\nu_c = 0,15$   
 $f_t = 2,91 \text{ [MPa]}$   
 $E_s = 201300 \text{ [MPa]}$   
 $f_y = 345,4 \text{ [MPa]}$



Last-Verschiebungs-Kurven aus Vergleichsberechnung und Experiment (Jofriet / McNeice)

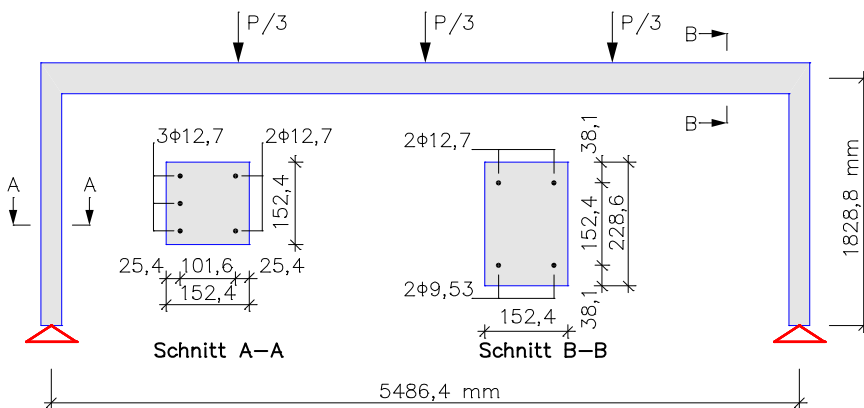
Um die Wirkungsweise der im Programm implementierten Ansätze für die Betonzugspannungen zu demonstrieren, wurden drei Varianten durchgerechnet. Die Kurve unter Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit mit Entfestigung ( $c=0,2$ ) zeigt erwartungsgemäß die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Sowohl das Verhalten zu Beginn der Rissbildung als auch in der Nähe der Tragfähigkeit zeigen eine sehr gut Übereinstimmung. Lediglich beim Übergang in den Zustand II wird die Steifigkeit der Platte etwas überschätzt.

Die Kurve für bilineares Verhalten im Betonzugbereich wurde bewusst mit dem identischen Wert ( $c=0,2$ ) berechnet. Hiermit wird wie zu erwarten die Steifigkeit der Platte zu Beginn der Rissbildung unterschätzt. Die Tragsicherheit wird hierdurch jedoch kaum beeinflusst. Die Berechnung liegt somit auf der sicheren Seite.

Die Kurve für den „nackten Zustand II“ ist weitgehend geprägt durch die Arbeitslinie des Betonstahls und hat insofern im untersuchten Bereich ein nahezu lineares Verhalten. Auch hierfür ergibt sich im Sinne der Plastizitätstheorie eine vergleichbare Tragsicherheit, jedoch bei wesentlich größeren Verformungen.

### Stahlbetonrahmen

Der nachfolgende Stahlbetonrahmen wurde von Ernst, Smith, Riveland & Pierce (1973) untersucht. Das statische System mit Materialparametern ist unten abgebildet.



System mit Querschnitten, Last und Abmessungen [mm]

Materialparameter des Experiments:

Beton:  $f_{cm} = 40,82$  [MPa]

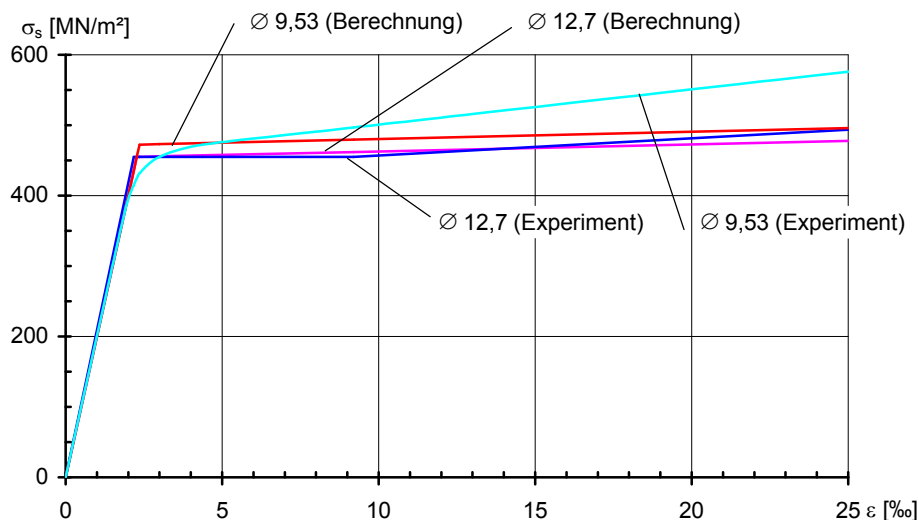
Betonstahl:  $\varnothing 9,53: f_y = 472,3$  [MPa],  $E_s = 209$  [GPa] (kaltgezogen)  
 $\varnothing 12,7: f_y = 455,0$  [MPa],  $E_s = 200$  [GPa] (warmgewalzt)

Materialparameter der Vergleichsberechnung:

Beton: C 30/37 (EN 1992-1-1:2004),  $f_{cm} = 38$  [MPa],  $f_{ctm} = 2,9$  [MPa]

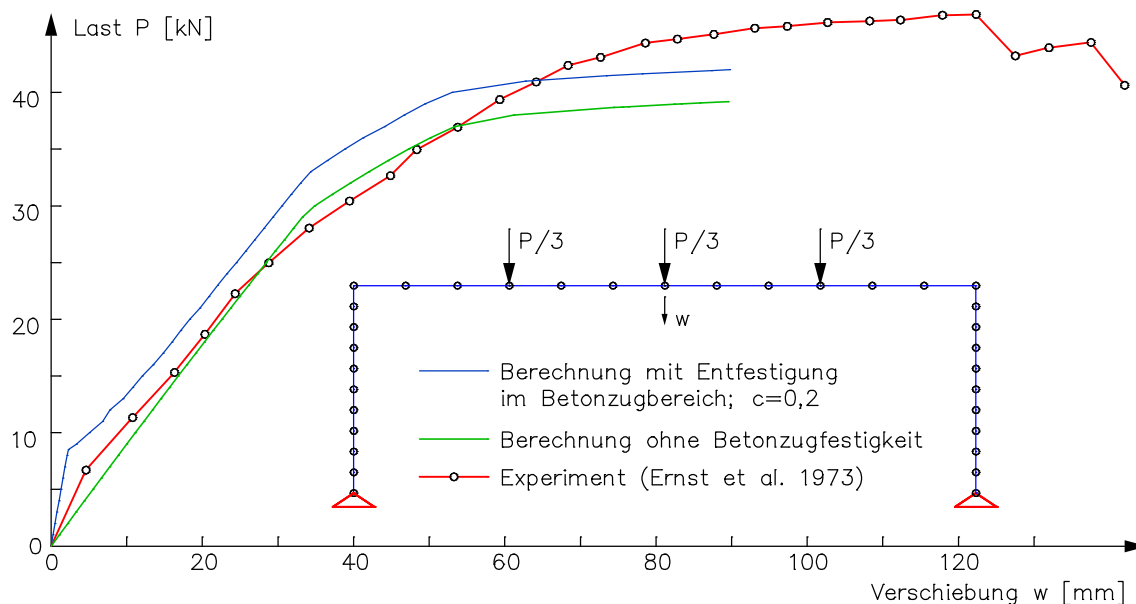
Betonstahl:  $\varnothing 9,53: f_{yk} = 472,3$  [MPa],  $\varnothing 12,7: f_{yk} = 455,0$  [MPa]  
 $E_s = 200$  [GPa],  $(f_t/f_y) \cdot k = 1,05$  (bilinear)

Die folgende Abbildung zeigt den unterschiedlichen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinien des Betonstahls bei Berechnung und Experiment im Dehnungsbereich bis 25 ‰.



Spannungs-Dehnungslinien des Betonstahls aus Experiment und Berechnung

Die Vergleichsberechnung wurde nach Theorie 2. Ordnung in der ersten Variante mit und in der zweiten ohne Zugfestigkeit durchgeführt. Laut Versuch setzt die Rissbildung bei einer Belastung von  $P = 5$  kN ein, was einer Betonzugfestigkeit von etwa 2,2 MPa entspricht. Der Berechnung wurde normgemäß eine Zugfestigkeit von 2,9 MPa zugrunde gelegt, woraus sich das etwas erhöhte Rissniveau ergibt. Das Erreichen der Systemtraglast ist durch Stabilitätsversagen gekennzeichnet. Das Versagen wird durch Fließen der Bewehrung bei einer Belastung von ca. 35-40 kN und Ausbildung eines Fließgelenks in Rahmenmitte eingeleitet. Die etwas niedrigere Versagenslast ist durch die Unterschiede bei den Arbeitslinien für Beton- und Betonstahl in Experiment und Berechnung begründet. Die Berechnung ohne Zugfestigkeit liefert erwartungsgemäß eine untere Schranke für die Last-Verschiebungs-Kurve der Rahmenmitte.

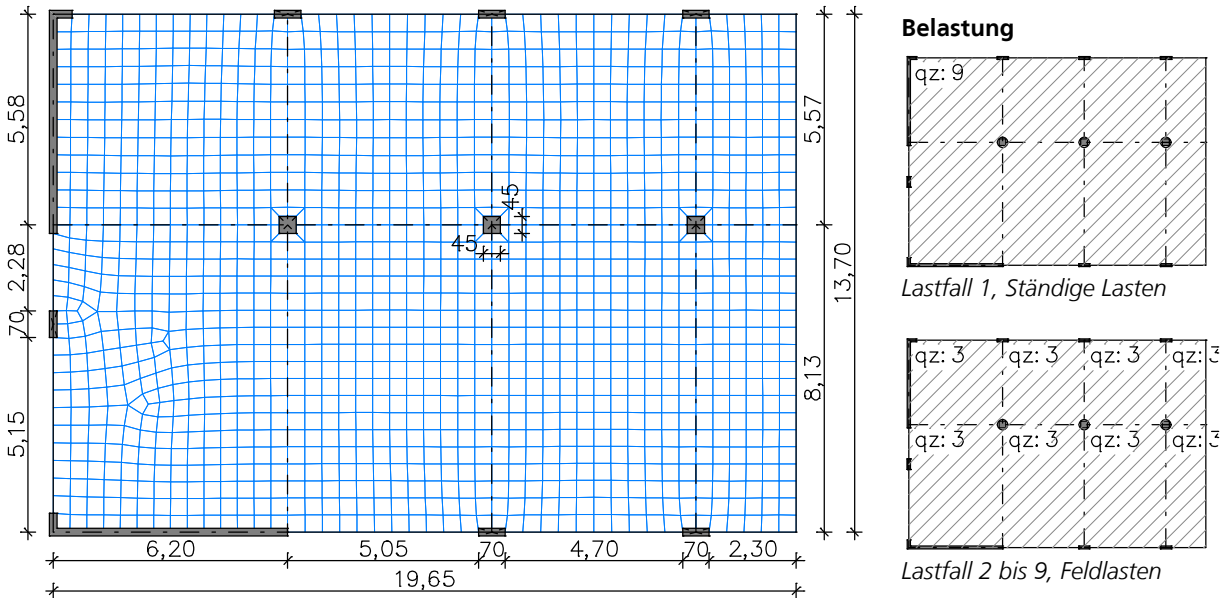


Last-Verschiebungs-Kurven aus Vergleichsberechnung und Experiment (Ernst et al. 1973)

## Verformungsberechnung einer Hochbaudeckenplatte

Bei dem Beispiel handelt es sich um eine Hochbaudeckenplatte, welche sich an das Kapitel 'Grundlagen der Bemessung nach DIN 1045-1 in Beispielen', Betonkalender 2001 anlehnt. Für die abgebildete Platte sollen Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit ermittelt werden. Da sich bei einer nichtlinearen Systemanalyse auch Normalkräfte in der Fläche ergeben sind Schalenelemente zu verwenden und es ist auf eine möglichst zwangungsfreie horizontale Lagerung zu achten.

Da die im Rahmen der nichtlinearen Systemanalyse berücksichtigte Längsbewehrung einen wesentlichen Einfluss auf die Verformungen hat, ist eine realistische Bewehrungsanordnung zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird zunächst eine linear-elastische Lastfallberechnung mit anschließender Bemessung nach EN 1992-1-1 durchgeführt.



Elementsystem mit Abmessungen in [m]

### Bemessung nach EN 1992-1-1

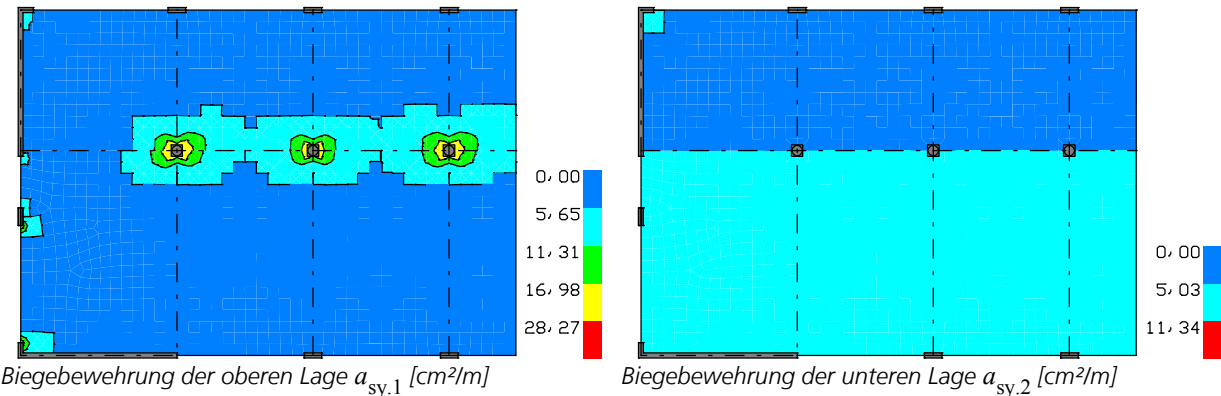
Die Platte aus C30/37 wird für die resultierenden Schnittkräfte aus der 'Ständig und vorübergehenden Situation' unter Verwendung der nachfolgend angegebenen Grundbewehrung bemessen. Nur in den Stütz- und Eckbereichen ergibt sich eine Bewehrungserhöhung, welche in etwa der im Literaturbeispiel eingelegten Bewehrung entspricht.

### Betonstahl für Flächenelemente

Nr.	Lage	Güte	d1x [m]	d2x [m]	asx [cm <sup>2</sup> /m]	d1y [m]	d2y [m]	asy [cm <sup>2</sup> /m]	as fix
1	1	500M	0,045	0,035	5,670	0,035	0,025	5,650	
	2	500M			7,850			11,340	
2	1	500M	0,045	0,035	5,670	0,035	0,025	5,650	
	2	500M			7,850			5,030	

- as Grundbewehrung
- d1 Abstand vom oberen Querschnittsrand
- d2 Abstand vom unteren Querschnittsrand
- Die positive z-Achse des Elementsystems zeigt zum unteren Querschnittsrand

### Biegebewehrung aus Bemessung



### Verformungen und Spannungen

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Verformungsergebnisse gegenüber gestellt. Um Sie besser vergleichen zu können, werden alle Situationen unter Volllast mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma = 1$  gerechnet.

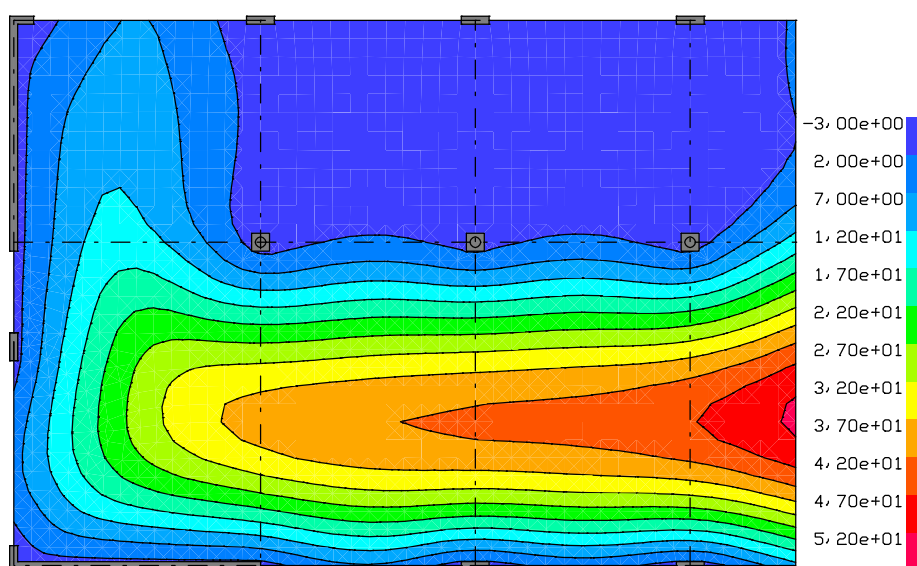
In allen Fällen kann ein Lastfaktor von 1,0 erreicht werden.

Bei den Lastfällen (21 und 22) für die Gebrauchstauglichkeit wird in der Zugzone des Betons mit Entfestigung und einer Restzugfestigkeit von  $c \cdot f_{ctm} = 0,1 \cdot 2,9 = 0,29 \text{ MN/m}^2$  gerechnet.

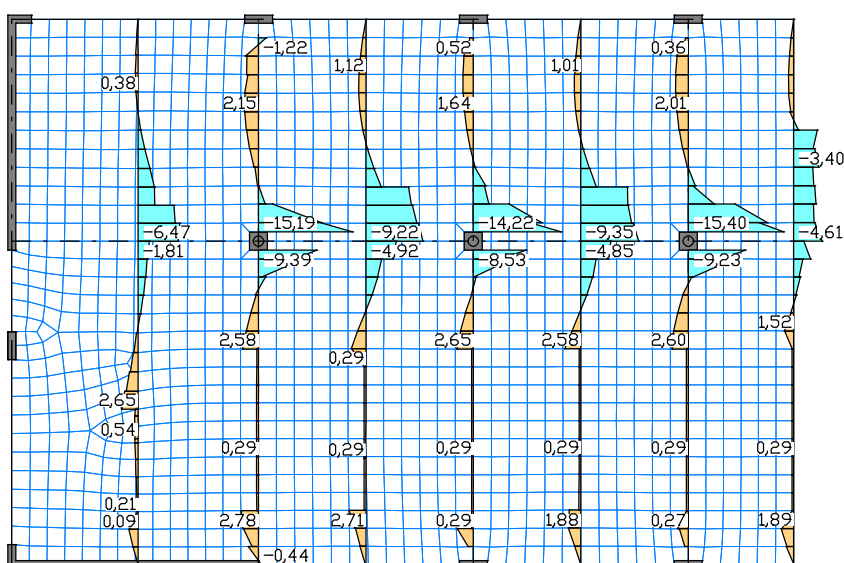
Im Lastfall 22 wird zusätzlich das nichtlineare Kriechen des Betons durch den Kriechbeiwert  $\varphi = 2,5$  erfasst.

Der Lastfall 23 für die Tragfähigkeit wird ohne Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit gerechnet.

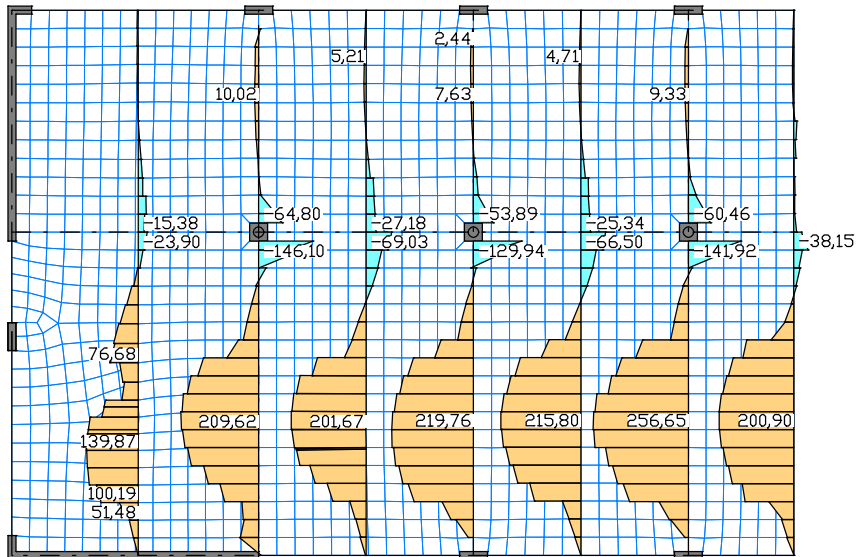
Lastfälle		max $u_z$ [mm]
10	Volllast mit elastischem Materialverhalten	10,8
11	Kriechen mit elastischem Materialverhalten	27,1
12	Summe (Lastfall 10 + Lastfall 11)	37,9
21	Nichtlineare Systemanalyse, Gebrauchstauglichkeit ( $\varphi = 0$ mit Entfestigung)	42,7
22	Nichtlineare Systemanalyse, Gebrauchstauglichkeit ( $\varphi = 2,5$ mit Entfestigung)	53,0
23	Nichtlineare Systemanalyse, Tragfähigkeit ( $\varphi = 0$ und ohne Betonzugfestigkeit)	64,8



Lastfall 22: Farbverlauf der Verformungen  $u_z$  [mm]



Lastfall 22: Betonspannungen [MN/m<sup>2</sup>] in y-Richtung an der Unterseite



Lastfall 22: Stahlspannungen [MN/m²] in der unteren Lage in y-Richtung

## Literaturhinweise

- Darwin, D.; Pecknold, D.A.W.  
Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete.  
A Report on a Research Project Sponsored by The National Science Foundation, Research Grant GI 29934  
University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois 1974.
- Duddeck, H.; Ahrens, H.  
Statik der Stabwerke, Betonkalender 1985.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1985.
- Ernst, G.C.; Smith, G.M.; Riveland, A.R.; Pierce, D.N.  
Basic reinforced concrete frame performance under vertical and lateral loads.  
ACI Material Journal 70(28), S. 261-269.  
American Concrete Institute, Farmington Hills 1973.
- Hirschfeld, K.  
Baustatik Theorie und Beispiele.  
Springer Verlag, Berlin 1969.
- Jofriet, J.C.; McNeice, M.  
Finite element analysis of reinforced concrete slabs.  
Journal of the Structural Division (ASCE) 97(ST3), S. 785-806.  
American Society of Civil Engineers, New York 1971.
- Kindmann, R.  
Traglastermittlung ebener Stabwerke mit räumlicher Beanspruchung.  
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau,  
Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr. 813, Bochum 1981.
- König, G.; Weigler, H.  
Schub und Torsion bei elastischen prismatischen Balken.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1980.
- Krätzig, W.B.; Meschke, G.  
Modelle zur Berechnung des Stahlbetonverhaltens und von Verbundphänomenen unter Schädigungsaspekten.  
Ruhr-Universität Bochum, SFB 398, Bochum 2001.
- Link, M.  
Finite Elemente in der Statik und Dynamik.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
- Petersen, Ch.  
Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.  
Vieweg Verlag, Braunschweig 1980.
- Quast, U.  
Nichtlineare Stabwerksstatik mit dem Weggrößenverfahren.  
Beton- und Stahlbetonbau 100.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.
- Schwarz, H. R.  
Methode der finiten Elemente.  
Teubner Studienbücher.  
Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
- Stempniewski, L.; Eibl, J.  
Finite Elemente im Stahlbetonbau, Betonkalender 1993.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1993.

# Tragwerksanalyse für den Brandfall

## Anwendungsbereich

Die Tragwerksanalyse für den Brandfall erlaubt die Untersuchung von ebenen und räumlichen Stab- und Flächentragwerken innerhalb der Programmsysteme *Ebene Stabwerke*, *Räumliche Stabwerke* und *Finite Elemente*. Dabei kommen Stahl-, Stahlbeton-, Holz und Verbundquerschnitte unter Berücksichtigung der folgenden Normen zur Anwendung:

- EN 1992-1-2:2004/AC 2008 (Eurocode 2)
- EN 1993-1-2:2005/AC 2009 (Eurocode 3)
- EN 1994-1-2:2005/AC:2008 (Eurocode 4)
- EN 1995-1-2:2010 (Eurocode 5)

Als Querschnittsformen können Stahlbauprofile, Polygonquerschnitte und Kombinationen aus diesen sowie Flächenquerschnitte benutzt werden. Bei der Materialauswahl stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Beton nach DIN 1045-1, EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 4700 und SIA 262
- Baustahl nach DIN 18800 und EN 10025-2
- Stahl mit anwenderdefinierten Kennwerten
- Holz nach EN 338:2009 und EN 14080:2013
- Frei definierbares Material

Die Bearbeitung gliedert sich im Regelfall in folgende Arbeitsschritte:

### 1. Tragwerksbemessung für Standardeinwirkungen

- Tragwerksdefinition mit den statisch wirksamen Querschnitten.
- Schnittgrößenermittlung für die maßgebenden Lastfälle.
- Beschreibung der Einwirkungskombinationen nach der anzuwendenden nationalen Norm.
- Spannungsnachweise für Stahlbauteile, Bewehrungsermittlung für Stahlbetonbauteile.

### 2. Thermische Berechnung zur Ermittlung der Querschnittstemperaturen

- Definition der für den Brandfall maßgebenden Querschnitte (Funktion *Thermische Berechnung* im Querschnittsdialog).
- Festlegung der Brandeinwirkung für die betroffenen Querschnittsränder.
- Berechnung des Temperaturverlaufs im Querschnitt (über Dialog *Thermische Berechnung* oder mit Funktion *Querschnittstemperaturen* im Berechnungsmenü).

### 3. Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall

- Eingabe eines maßgebenden Lastfalls. Hierzu werden die vorhandenen Lastfälle mit Hilfe der Lastart *Lastgruppe* zusammengestellt und gewichtet.
- Ergänzung des Lastfalls mit der Lastart *Brandfall*.
- Auswahl dieses Lastfalls auf der Registerkarte *Brandfall* in den Berechnungseinstellungen für die Nichtlineare Systemanalyse.
- Auswahl der unter Punkt 1 ermittelten Bewehrung, sofern relevant.
- Durchführung der Stabwerks- bzw. FEM-Berechnung zur Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall.

Wenn unterschiedliche Brandfälle zu untersuchen sind, können den Querschnittsrändern unter Punkt 2 mehrere Brandeinwirkungen zugeordnet werden. Die einzelnen Brandfälle werden dabei nummeriert. Anschließend ist unter Punkt 3 für jeden Brandfall ein Nachweislastfall zu erzeugen, wobei in der Lastart *Brandfall* auf diese Nummer Bezug genommen wird.



# Berechnung der Querschnittstemperaturen

Dieser Abschnitt beschreibt die thermische Berechnung der Querschnittstemperaturen infolge von Brandeinwirkungen.

## Grundlagen

Die Berechnung der Temperaturverteilung in Festkörpern für den instationären Fall erfolgt über die Lösung der Wärmeleitungsgleichung nach Fourier. Diese hat für den hier behandelten zweidimensionalen Fall den folgenden Aufbau:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

mit

$t$  Zeit [s]

$y, z$  Gebietskoordinaten [m]

Funktionen von  $y, z, t$

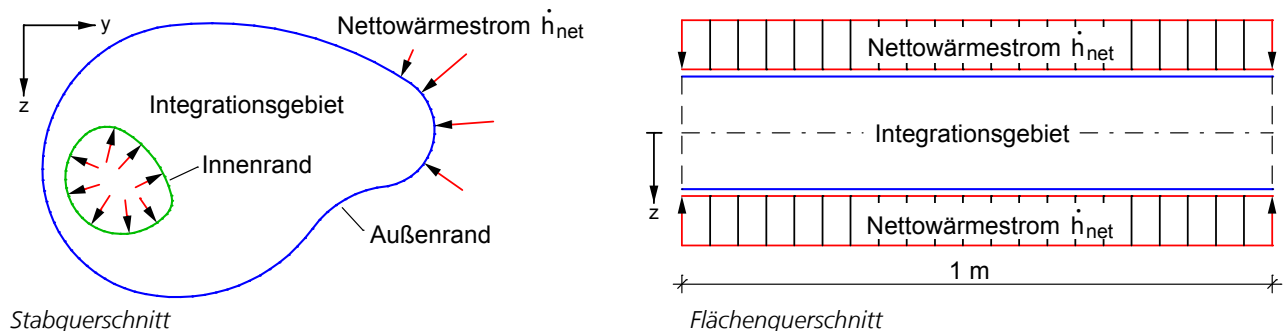
$\theta$  Temperatur [°C]

$\rho$  Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

Bei Flächenquerschnitten reduziert sich die Wärmeleitungsgleichung auf den eindimensionalen Fall mit der Koordinate  $z$ . Eine horizontale Wärmeleitung kann somit nicht erfasst werden. Hierfür müsste ein Volumenmodell herangezogen werden. Wärmequellen im Inneren des Integrationsgebiets werden bei Flächenquerschnitten nicht berücksichtigt. Da sämtliche Einflussgrößen zeitabhängig sind, ist ein Anfangswertproblem unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu lösen. Als Anfangsbedingung wird die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t = 0$  im Integrationsgebiet vorgeschrieben.



Für die hier zu behandelnden Problemstellungen werden die thermischen Einwirkungen hauptsächlich durch den Nettowärmestrom  $\dot{h}_{\text{net}}$  [W/m<sup>2</sup>] normal zur Brandung bestimmt. Dieser setzt sich aus einem Konvektions- und einem Strahlungsanteil zusammen.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad (2)$$

Der konvektive Anteil berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_m) \quad (3)$$

mit

$\alpha_c$  Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

$\Theta_g$  Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils [°C]

$\Theta_m$  Temperatur an der Brandung des Bauteils [°C]

Bei der Berechnung des konvektiven Anteils am Innenrand eines Querschnittslochs wird im Zeitintervall von einer mittleren Gastemperatur ausgegangen.

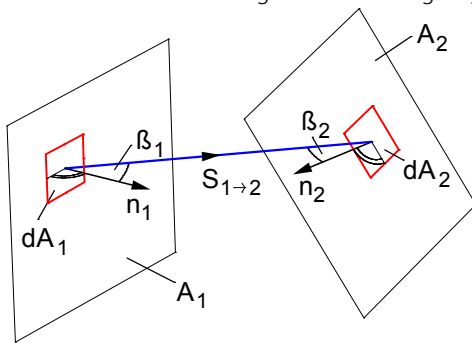
Der Nettowärmestrom zwischen zwei Flächen infolge Strahlung berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot [(\Theta_1 + 273)^4 - (\Theta_2 + 273)^4] \quad (4)$$

mit

$\Phi$	Konfigurationsfaktor
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Emissivitäten der Bauteiloberflächen [-]
$\sigma$	Stephan-Boltzmann-Konstante [= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ ]
$\Theta_1, \Theta_2$	Temperaturen der Bauteiloberflächen [°C]

Der Konfigurationsfaktor wird durch die Oberflächengeometrie, dem Abstand der Flächen sowie ggf. durch Abschattungseffekte bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die zugrundeliegenden Größen.



Der Konfigurationsfaktor kann hiermit wie folgt ermittelt werden:

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s_{1 \rightarrow 2}^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad (5)$$

Im Falle der Strahlungseinwirkung durch Beflammung ergibt sich:

$\Phi = 1$	
$\varepsilon_1 = \varepsilon_m$	Emissivität der Bauteiloberfläche [-]
$\varepsilon_2 = \varepsilon_f$	Emissivität der Flamme (hier $\varepsilon_f = 1$ ) [-]
$\Theta_1 = \Theta_r$	Wirksame Strahlungstemperatur des Brandes (hier $\Theta_r = \Theta_g$ ) [°C]
$\Theta_2 = \Theta_m$	Oberflächentemperatur an der Brandung des Bauteils [°C]

Die Gastemperatur  $\Theta_g$  eines Brandabschnittes wird als bekannt vorausgesetzt und ist in der Regel durch vorgegebene Temperaturzeitkurven definiert.

Das durch die Gleichungen (1) bis (5) gegebene nichtlineare Randwertproblem lässt sich nicht in geschlossener Form lösen. Zur Lösung wird die Methode der Finiten Elemente herangezogen. Hierzu wird das oben beschriebene Randwertproblem unter Verwendung der Methode von Galerkin und anschließender partieller Integration in ein System von Variationsgleichungen umgeformt.

Das Programmsystem verwendet kompatible Elemente mit einem vollständig quadratischen Ansatz. Daraus ergibt sich eine hohe Lösungsgenauigkeit, die weitgehend unabhängig von der Netzgeometrie ist.

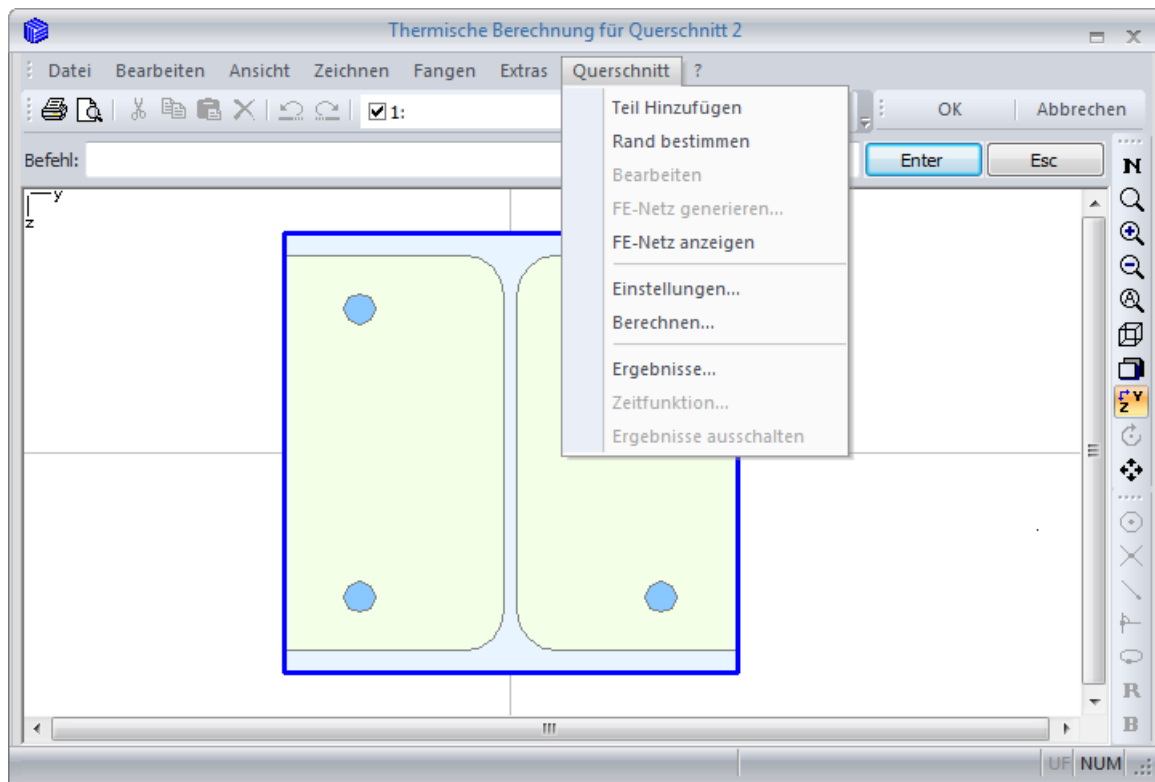
Der Elementansatz erfüllt die sogenannte *adiabatische Randbedingung* automatisch. D.h. wenn keine Randbedingung explizit vorgegeben wird, findet über diesen Rand kein Austausch von thermischer Energie statt.

Das nichtlineare Anfangswertproblem wird mit Hilfe einer Zeitschrittintegration in Verbindung mit einem inkrementellen Newton-Raphson-Algorithmus gelöst. Nach erfolgter Berechnung stehen die Temperaturprofile für alle untersuchten Zeitpunkte zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

## Thermischer Querschnitt

Über den Querschnittsdialog gelangt man über die Funktion *Thermische Berechnung* zu dem nachfolgend abgebildeten Eingabefenster. Im Menü *Querschnitt* und im Kontextmenü stehen die nachfolgend erläuterten Funktionen zur Verfügung:

<i>Teil hinzufügen</i>	Erlaubt es, den Querschnitt durch vorhandene und neue Teile zusammensetzen.
<i>Rand bestimmen</i>	Bestimmt den Rand des aus Teilen zusammengesetzten Querschnitts und stellt ihn mit einer roten Linie dar.
<i>Bearbeiten</i>	Startet den Dialog zur Bearbeitung des markierten Querschnittsteils oder zur Festlegung von Brandeinwirkungen für den markierten Abschnitt des Querschnittsrandes.
<i>FE-Netz generieren...</i>	Startet den Dialog zur Vorgabe der Rasterweite für das Elementnetz der thermische Berechnung.
<i>FE-Netz anzeigen</i>	Zeigt das Elementnetz für die thermische Berechnung an. Das Netz wird vor jeder Berechnung automatisch generiert, auch wenn die Anzeige abgeschaltet ist.
<i>Einstellungen...</i>	Startet den Dialog mit Einstellungen für die thermische Berechnung.
<i>Berechnen...</i>	Startet die thermische Berechnung in einem eigenen Fenster und stellt den Temperaturverlauf für den letzten berechneten Zeitpunkt dar.
<i>Ergebnisse...</i>	Startet den Dialog für die Ergebnisauswahl zu verschiedenen Zeitpunkten.
<i>Zeitfunktion...</i>	Startet den Dialog für die Darstellung einer Zeitfunktion des aktuellen Ergebnisses an einem ausgesuchten Querschnittspunkt.
<i>Ergebnisse ausschalten</i>	Schaltet die Ergebnisdarstellung aus.



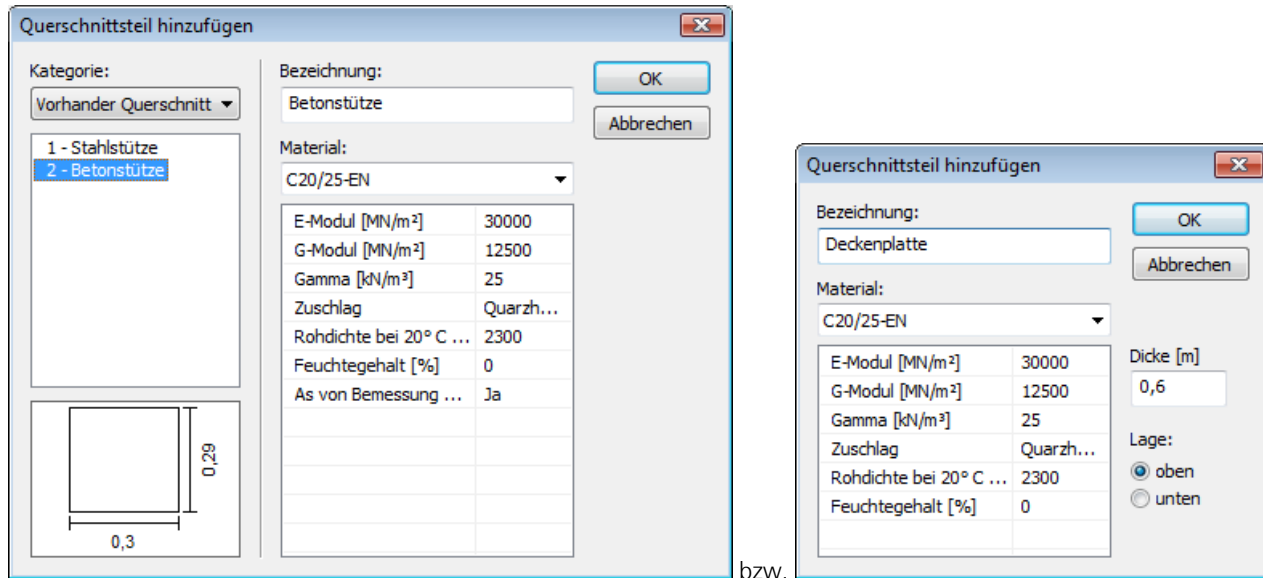
Der thermische Querschnitt kann aus beliebigen Querschnittsteilen zusammengesetzt werden und erlaubt neben der Erfassung statisch relevanter Teile z.B. auch die Berücksichtigung von thermischen Dämmungen.

Für die statische Berechnung (Brandfall) befinden sich die Stabachsen am Ursprung (0; 0) des thermischen Querschnitts.

Die Mittelfläche der Flächenelemente verläuft durch  $z = 0$ .

## Querschnittsteil hinzufügen

Der thermische Querschnitt wird durch Hinzufügen von Querschnittsteilen aufgebaut. Dabei überdecken nachträglich eingefügte Querschnittsteile die zuvor definierten Teile. Die Reihenfolge bestimmt somit die Geometrie des endgültigen Querschnitts. Eine vollständige Überdeckung eines im Hintergrund angeordneten Teils ist unzulässig.



bzw.

Bei Flächenquerschnitten kann ein Querschnittsteil mit der gewählten Dicke oben bzw. unten an bestehende Querschnittsteile angefügt werden. Die Breite der Querschnittsteile beträgt grundsätzlich 1 m.

Bei Stabquerschnitten können folgende Kategorien von Querschnittsteilen eingefügt werden:

### Kategorie

- *Bewehrungsstab*: Wird als Querschnittsteil eingefügt und elementiert, hat somit Einfluss auf die Temperaturverteilung (nur für große Durchmesser sinnvoll).
- *Neudefinition*: Neudefinition eines polygonalen Querschnittsteils, welches auch Betonstahlbewehrung enthalten kann. Diese wird nicht elementiert und hat keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf.
- *Stahlprofil*: Stahlprofil aus der Querschnittsbibliothek.
- *Vorhandener Querschnitt*: Bereits im Projekt definierter Querschnitt.

### Material

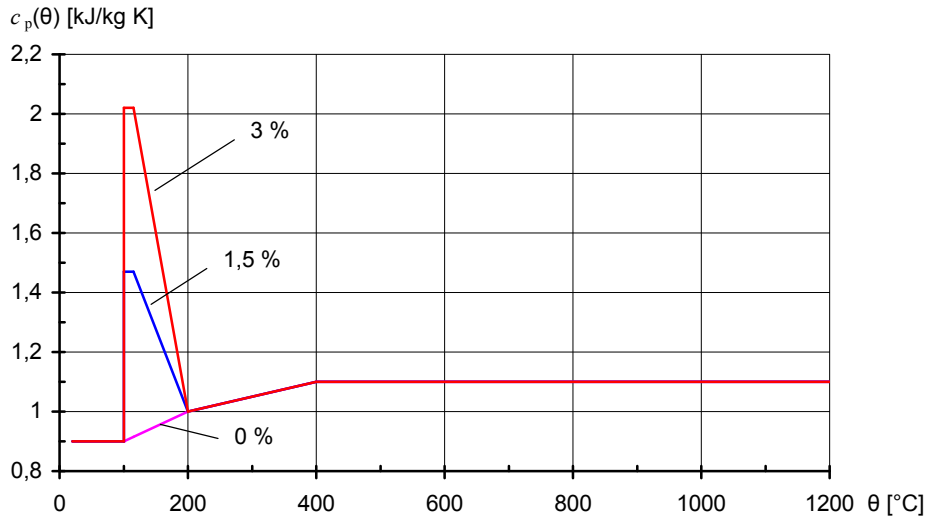
Material des Querschnittsteils mit den zugehörigen thermischen und mechanischen Eigenschaften.

Mit der Option *As von Bemessung übernehmen* wird festgelegt, dass für diesen Querschnitt die Bewehrung übernommen wird, die in den *Berechnungseinstellungen* für die Nichtlineare Systemanalyse auf der Registerkarte *Brandfall* ausgewählt wurde. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese warmgewalzten Bewehrungslagen keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Querschnitt haben und daher die Temperatur des Beton an Ihrer Lage aufweisen.

Für die thermische Berechnung gelten die nachfolgenden spezifischen Materialeigenschaften:

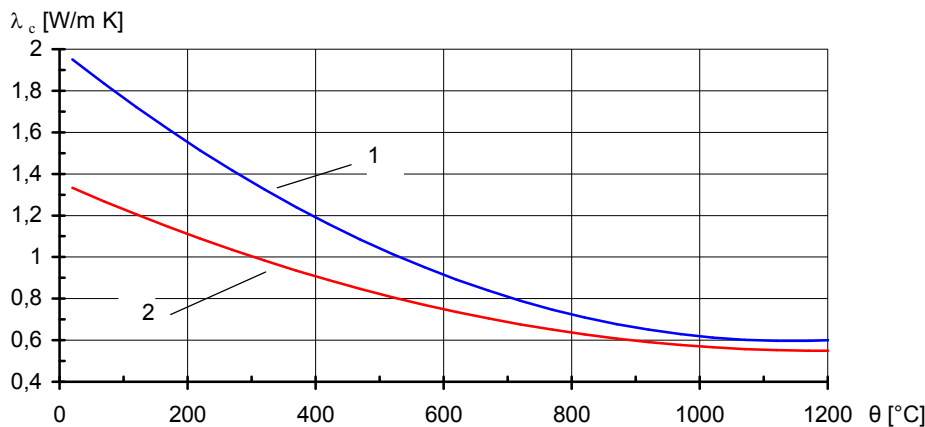
**Beton**

Allen Querschnittsteilen aus Beton werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1992-1-2 automatisch zugewiesen. Gemäß DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 wird für DIN-Beton die obere Grenzfunktion der *thermischen Leitfähigkeit* aus 3.3.3 (2) verwendet. Für die übrigen Betone kommt der untere Grenzwert zur Anwendung. Der *Feuchtegehalt* und die *Rohdichte bei 20° C* kann von Benutzer vorgegeben werden. Für das Material *ÖNBeton* können benutzerdefinierte Verläufe der thermischen Eigenschaften festgelegt werden.

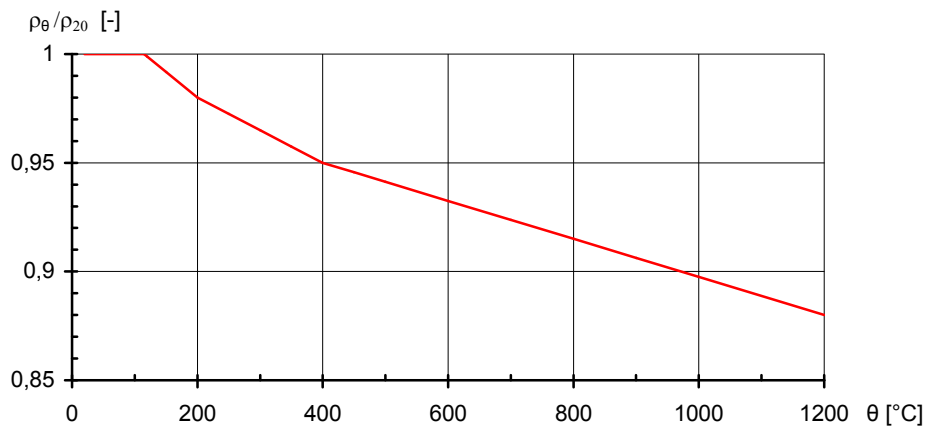


Spezifische Wärme von Beton mit quarz- und kalksteinhaltigem Zuschlag  $c_p(\theta)$  in Abhängigkeit von der Temperatur (Feuchtegehalt  $u = 0, 1,5$  und  $3$  Gew.-%)

Bei einem Feuchtegehalt zwischen den angegebenen Werten wird linear interpoliert.



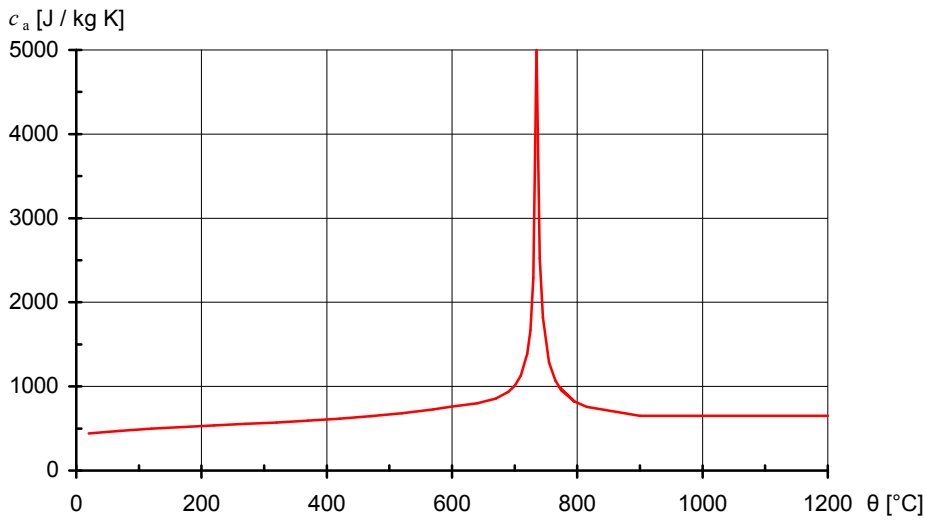
Thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur  
1: obere Grenze (DIN-Beton); 2: untere Grenze



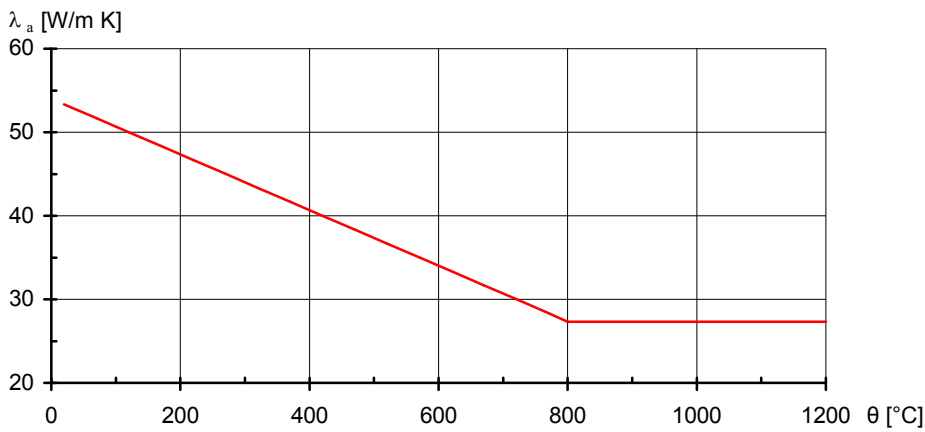
Verhältnis der Rohdichte für Beton in Abhängigkeit von der Temperatur

**Stahl**

Allen Querschnittsteilen aus Stahl werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität* und die *thermische Leitfähigkeit* nach EN 1993-1-2 automatisch zugewiesen.



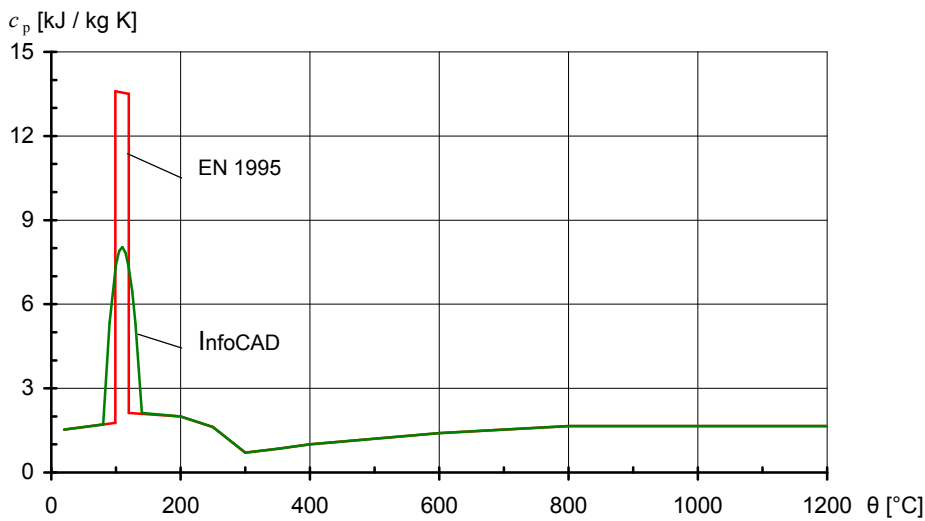
Spezifische Wärmekapazität von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur



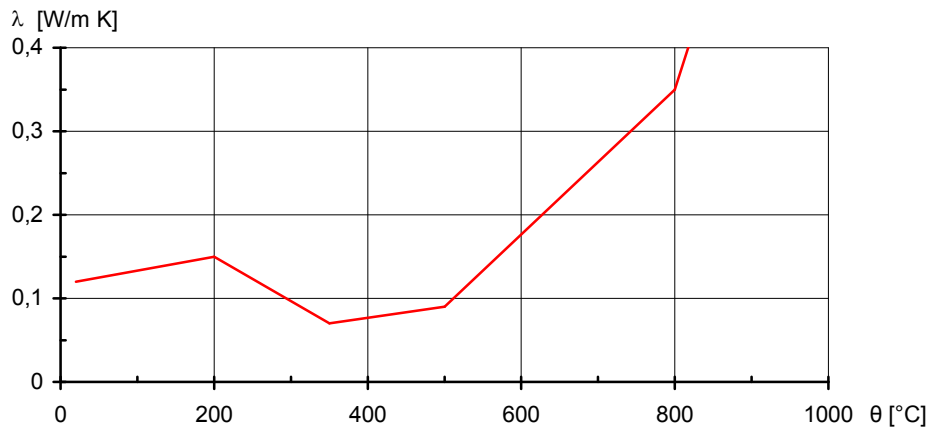
Wärmeleitfähigkeit von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur

**Holz**

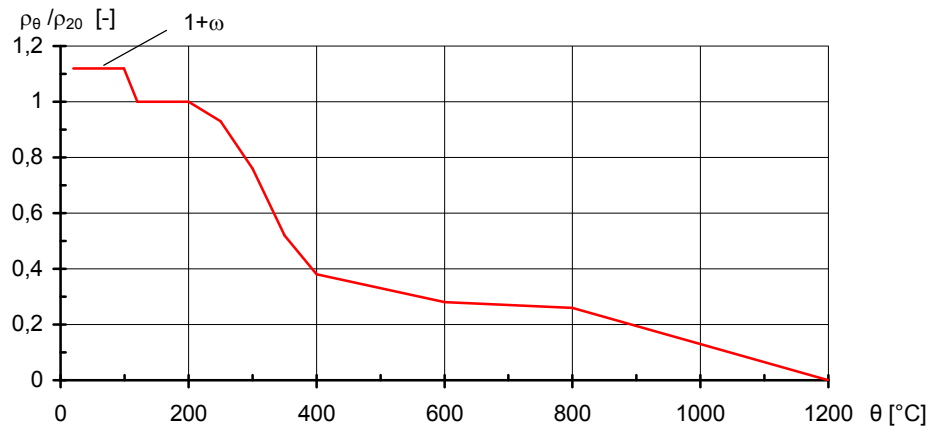
Allen Querschnittsteilen aus Holz werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1995-1-2 automatisch zugewiesen.



Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



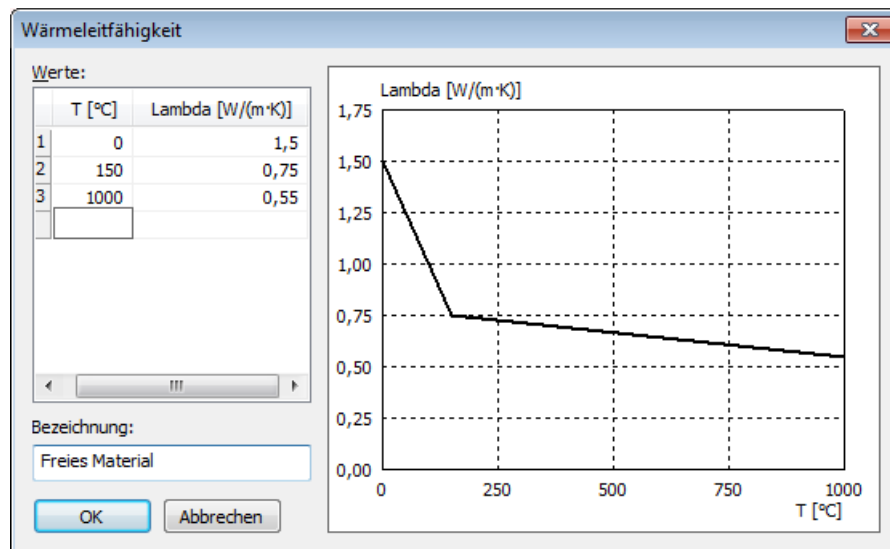
Wärmeleitfähigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



Verhältnis der Rohdichte für Holz mit einer Anfangsfeuchte  $\omega$  von 12 % in Abhängigkeit von der Temperatur

### Freies Material

Querschnittsteile aus freiem Material sind z.B. Dämmstoffe für die der Benutzer beliebige temperaturabhängige Verläufe der spezifischen Wärmekapazität, der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit angeben kann.



Benutzerdefinierte Wärmeleitfähigkeit

### Materialart „NULL“

Querschnittsteile mit dieser Materialart werden von der Berechnung ausgenommen. Dadurch lassen sich nachträglich Öffnungen definieren.

## Querschnittsteil bearbeiten

E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	30000
G-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	12500
Gamma [kN/m <sup>3</sup> ]	25
Zuschlag	Quarzh...
Rohdichte bei 20° C ...	2300
Feuchtegehalt [%]	0
As von Bemessung ...	Ja

Die Funktionen *Bearbeiten* erlaubt es, für markierte Querschnittsteile das Material und weitere Eigenschaften für das thermische Verhalten zu ändern. Bei Querschnittspolygonen kann zusätzlich die Geometrie mit den Bewehrungslagen modifiziert werden.

## Querschnittsrand bearbeiten

Nach dem Einfügen aller Querschnittsteile ist deren Umrandung zu bestimmen. Dies geschieht automatisch mit dem Befehl „*Rand bestimmen*“. Jedem der sich dabei ergebenden Querschnittsränder können die nachfolgenden Eigenschaften zugeordnet werden. Rändern an Löchern wird standardmäßig die Eigenschaft „*Innere Strahlung und Konvektion*“ zugeordnet.

### Netzweite

Der Rand wird mit der gewählten Netzweite eingeteilt [mm]. Ist die gewählte Netzweite "0" und ist dem Rand eine Brandkurve zugeordnet wird der Rand mit ca. 20 mm eingeteilt.

### Bedingungen

Um unterschiedliche Brandszenarien untersuchen zu können, wird zwischen verschiedenen *Brandfällen* unterschieden. Deren Bezeichnung und Nummerierung kann bei Bedarf durch den Benutzer abgeändert werden. Für jeden Brandfall wird eine separate thermische Berechnung durchgeführt. Dabei wirken auf die Ränder Einwirkungen gleicher Brandfallnummer. Ränder, denen unter dieser Nummer keine Einwirkung zugeordnet wurde, verhalten sich adiabatisch.

Jedem Brandfall sind folgende Eigenschaften zugeordnet:

- Brandkurve z.B. *ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)*
- *Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]*
- *Emissivität [-]*

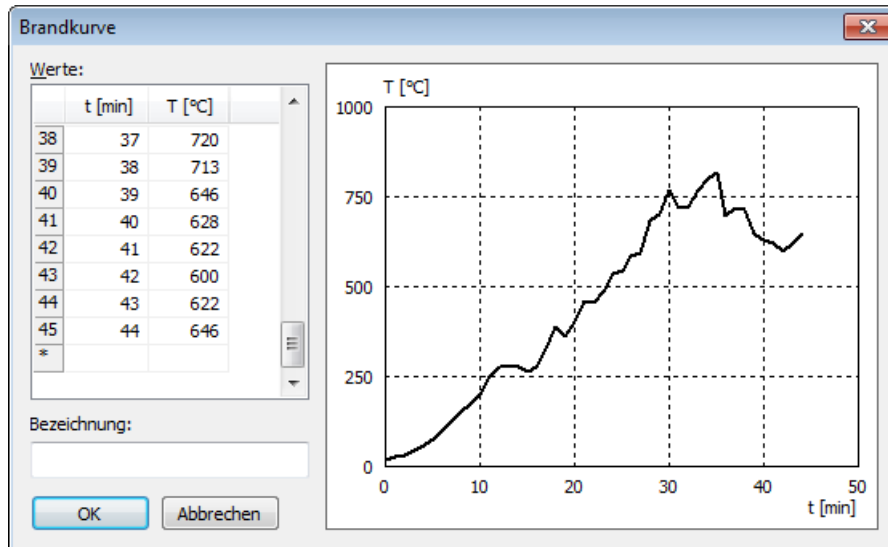
Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient kann EN 1991-1-2, Anhang B entnommen werden.

Die Emissivität von Beton- und Baustahloberflächen sollte nach EN 1992-1-2 bzw. EN 1993-1-2, 2.2(2) mit dem Vorschlagswert von 0,7 angesetzt werden. Bei nichtrostendem Stahl nach Anhang C der Norm sollte die Emissivität 0,4 gesetzt werden.

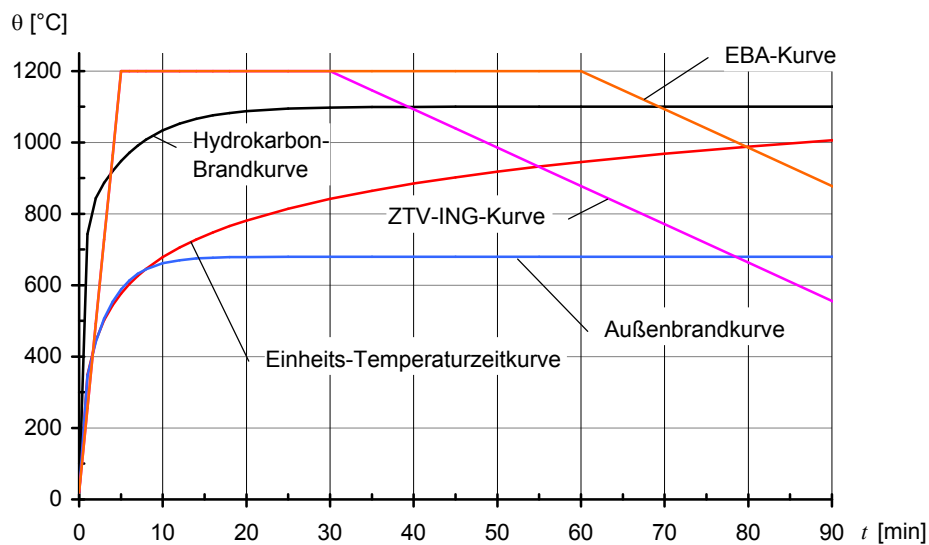


Für den Brandverlauf können die nachfolgenden Brandkurven verwendet werden.

- *Außenbrandkurve*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 (Türkis dargestellt).
- *Benutzerdefinierte Brandkurve*: Vom Benutzer zu definierende Brandkurve (Blau dargestellt).
- *EBA-Kurve*: Brandkurve nach EBA-Richtlinie (Orange dargestellt).
- *ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 bzw. prEN 13501-2 (Rot dargestellt).
- *Hydrokarbon-Brandkurve*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 (Schwarz dargestellt).
- *Konstante Umgebungstemperatur*: Die Höhe der Umgebungstemperatur kann eingestellt werden (Grün dargestellt).
- *ZTV-ING-Kurve*: Brandkurve nach ZTV-ING Teil 5 (Lila dargestellt).



Benutzerdefinierte Brandkurve

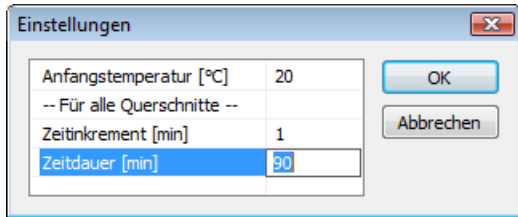


Brandkurven nach EN 1991-1-2, ZTV-ING Teil 5 bzw. EBA-Richtlinie

## FE-Netz generieren

Die Querschnittsgeometrie ist durch die eingefügten Querschnittsteile und die Berandung festgelegt. Für die thermische Berechnung wird hieraus programmintern eine Vernetzung mit finiten Elementen hergeleitet. Diese kann mit dem Befehl „FE-Netz anzeigen“ visualisiert werden. Für Stabquerschnitte kann mit dem Befehl „FE-Netz generieren“ die Netzweite [mm] und ein Netzwinkel [°] (kleinster Innenwinkel der Elemente) gewählt werden. Das FE-Netz hat sowohl Einfluss auf die thermische als auch auf eine spätere mechanische Berechnung, da beide mit der selben Elementierung arbeiten.

## Einstellungen für die Temperaturberechnung



Mit der Anfangstemperatur wird die Anfangsbedingung für die Zeitschrittberechnung zum Zeitpunkt  $t = 0$  festgelegt. Diese gilt für den jeweiligen Querschnitt. Bei einer Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  tritt gemäß Norm keine Temperaturdehnung auf.

Das Zeitinkrement und die Zeitdauer werden sowohl bei der thermischen als auch bei der mechanischen Berechnung verwendet. Beide Größen gelten aus Kompatibilitätsgründen global.

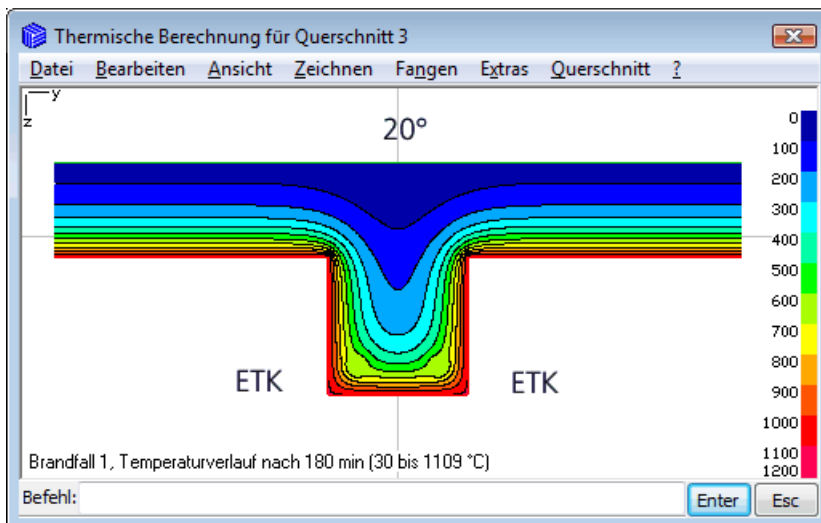
Die Größe des Zeitinkrements beeinflusst die Berechnungsgenauigkeit, sollte jedoch in Hinblick auf die Rechenzeit nur ausnahmsweise kleiner als 1 min gewählt werden.

## Temperaturverlauf berechnen

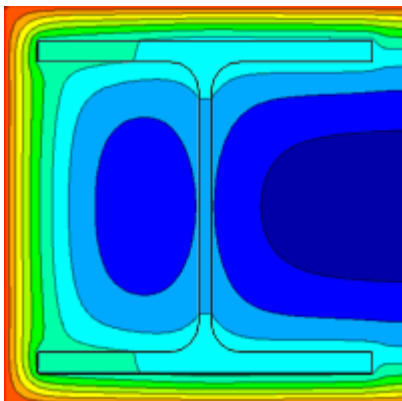
Mit dem Menüpunkt *Berechnen* des Bearbeitungsfensters wird für den aktuellen Querschnitt die Berechnung des Temperaturverlaufes über die gewünschte Zeitdauer gestartet. Im Berechnungsmenü des Hauptfensters kann mit der Funktion *Querschnittstemperaturen* die gleichzeitige Berechnung für alle Querschnitte gestartet werden.

## Ergebnisse darstellen

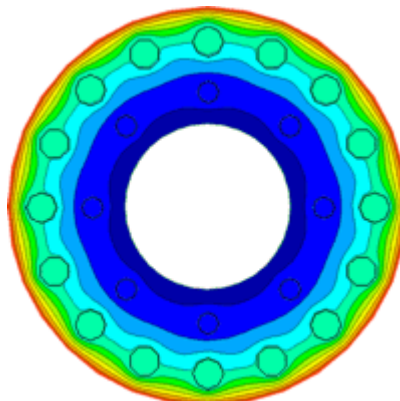
Nach der Berechnung wird die Temperaturverteilung des letzten berechneten Zeitpunkts dargestellt. Mit dem Ergebnis-Dialog können die Temperaturprofile für jeden untersuchten Zeitpunkt angezeigt werden.



Temperaturverteilung aus der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)



Dreiseitig beflammtes Verbundquerschnitt mit einem adiabatischen Rand



Schleuderbetonstütze mit Bewehrungsseisen

## Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall

Nachfolgend werden die Besonderheiten bei der Anwendung der Nichtlinearen Systemanalyse für den Brandfall erläutert. Die allgemeinen theoretischen Grundlagen sind im Kapitel *Nichtlineare Systemanalyse* zu finden.

### Grundlagen

Die nichtlineare Berechnung im Brandfall erfolgt nach dem *Allgemeinen Rechenverfahren* der Normen EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 und EN 1995-1-2. Dabei wird davon ausgegangen, dass die mechanische Analyse unabhängig von der thermischen Berechnung durchgeführt werden kann. Basis für die Berechnung sind die vorab innerhalb der thermischen Querschnittsanalyse ermittelten Temperaturprofile entsprechend dem Kapitel *Berechnung der Querschnittstemperaturen*.

Da die wesentlichen Einflussgrößen zeit- und temperaturabhängig sind, wird bei der *Nichtlinearen Systemanalyse Brandfall* stets eine Zeitschrittberechnung durchgeführt. Dabei werden alle Querschnitte, für die eine thermische Berechnung vorliegt, gemäß den Vorgaben von EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 bzw. EN 1995-1-2 behandelt. Für sämtliche querschnittsbezogenen Integrationen wird dabei der thermische Querschnitt herangezogen. Liegen für einen thermischen Querschnitt für einen Brandfall keine Temperaturprofile vor, so wird dieser unter Normaltemperatur (20°C) nach EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 bzw. EN 1995-1-2 analysiert. Für alle übrigen Querschnitte gelten die Eigenschaften des Basisquerschnitts. Querschnittsteile des thermischen Querschnitts, die weder aus Stahl, Stahlbeton noch aus Holz bestehen, werden bei der mechanischen Analyse nicht berücksichtigt. Da zum Schubtragverhalten im Brandfall insbesondere bei Stahlbetonquerschnitten keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, werden der Berechnung z.Zt. die Schub- und Torsionssteifigkeiten der Basisquerschnitte zugrundegelegt.

Das Programm rechnet nach der nichtlinearen Elastizitätstheorie. D.h. Be- und Entlastung folgen demselben Pfad. Eine mögliche Festigkeitszunahme von Beton oder Holz in der Abkühlphase wird nicht berücksichtigt.

Auf der Widerstandsseite wird programmintern der Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaften im Brandfall zu  $\gamma_{M,fi} = 1,0$  gesetzt.

Auf der Einwirkungsseite (benutzerdefiniert) ist gemäß EN 1990 (Eurocode 0) folgende Einwirkungskombination im Brandfall zu berücksichtigen:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

dabei beinhaltet  $A_d$  neben den Temperatureinflüssen auf die Baustoffeigenschaften auch die thermischen Dehnungen. Der Dehnungsansatz lautet:

$$\varepsilon_s = \varepsilon - \varepsilon_{th}$$

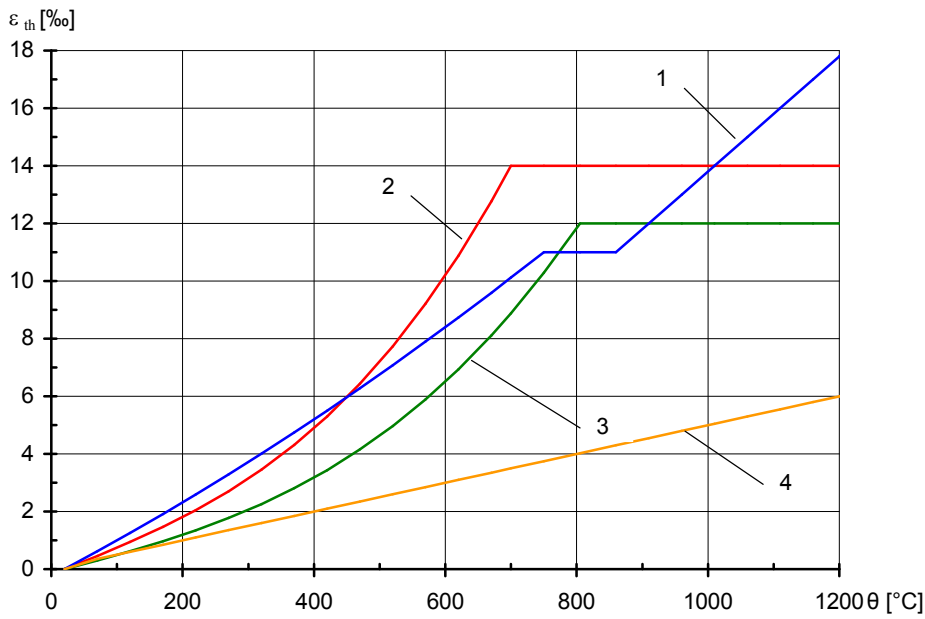
mit

$\varepsilon$  Gesamtdehnung

$\varepsilon_s$  Spannungserzeugende Dehnung

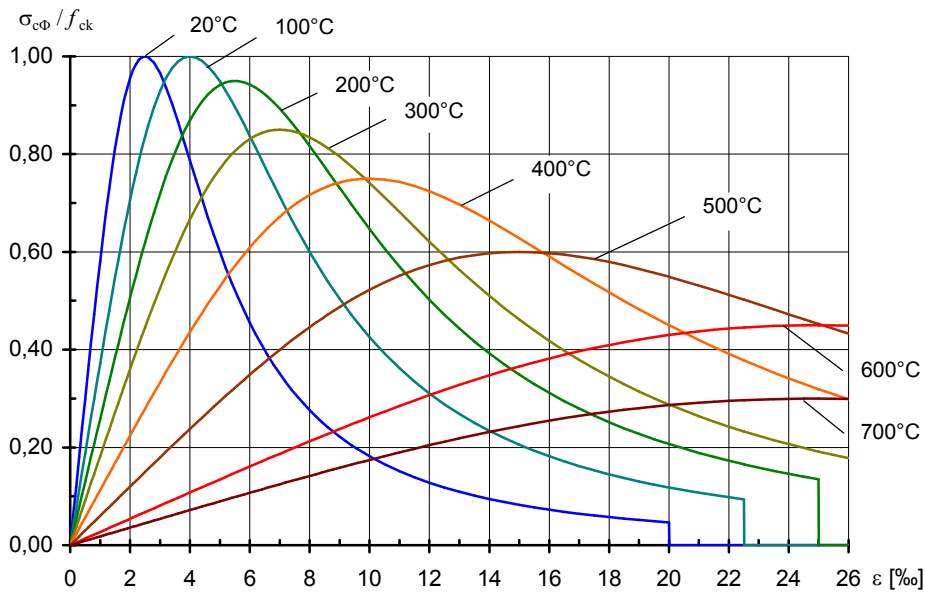
$\varepsilon_{th}$  thermische Dehnung

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der thermischen Dehnung für Stahl, Beton und Holz in Abhängigkeit von der Temperatur.



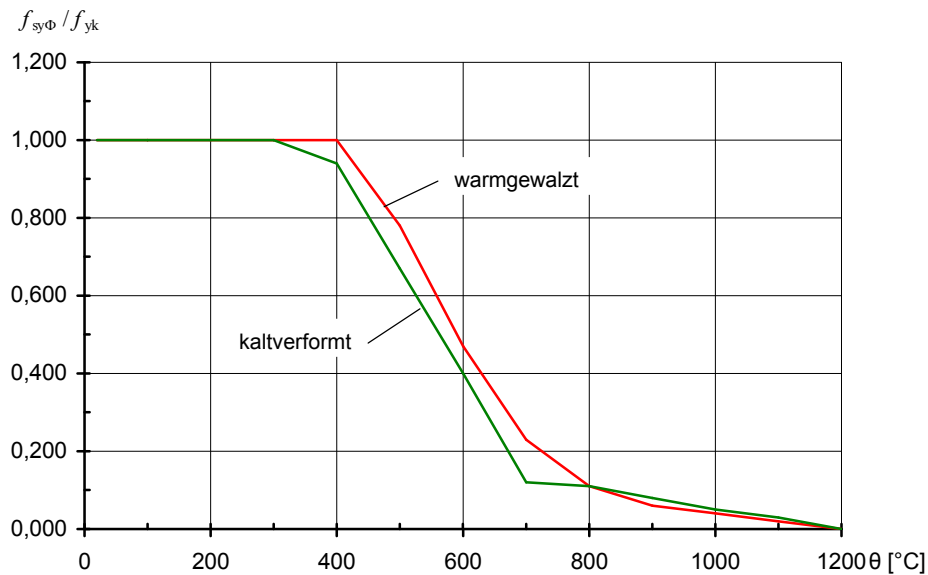
Thermische Dehnung (1:Stahl; 2:Quarzhaltige Zuschläge; 3:Kalksteinhaltige Zuschläge; 4:Holz)

Die Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton verdeutlicht die folgende Abbildung. Eine Betonzugfestigkeit wird gemäß EN 1992-1-2 (Abschnitt 3.2.2.2) im Brandfall nicht berücksichtigt.



Bezogene Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton mit quarzhaltigen Zuschlägen

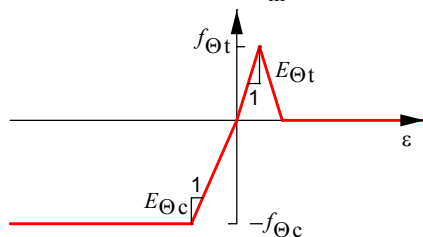
Die Spannungs-Dehnungs-Linien für Stahl sind ebenfalls temperaturabhängig. Sie ergeben sich mit Bild 3.3 und Tabelle 3.2a aus EN 1992-1-2. Bei Bewehrungslagen aus einer Bemessung wird angenommen, dass es sich um warmgewalzten Stahl handelt. Den Festigkeitsabfall bei erhöhten Temperaturen demonstriert die folgende Abbildung.



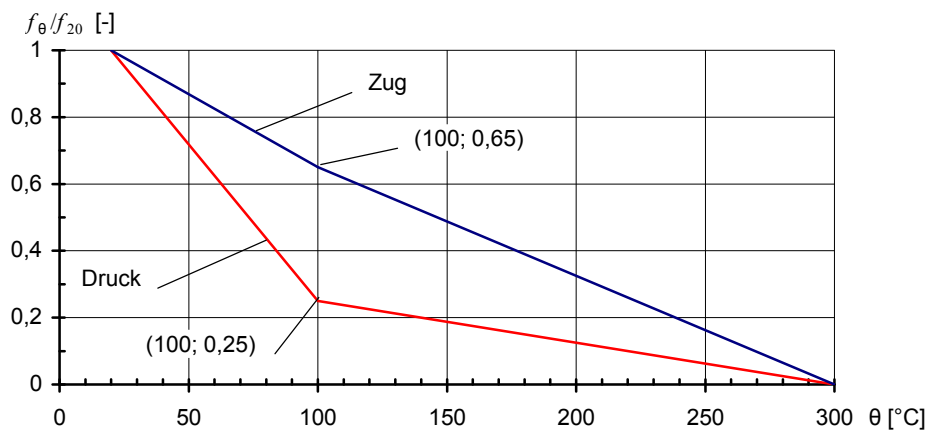
Festigkeitsabfall von Beton- und Baustahl bei erhöhten Temperaturen

In EN 1995-1-2 werden keine Angaben zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz unter erhöhten Temperaturen gemacht. Gleichwohl wird die Erfassung nichtlinearen Materialverhaltens gefordert. Deshalb wird für Stabwerke die nachfolgende Spannungs-Dehnungs-Linie mit Entfestigung im Zugbereich und Fließen im Druckbereich verwendet. Die Festigkeiten  $f_{\Theta t}$ ,

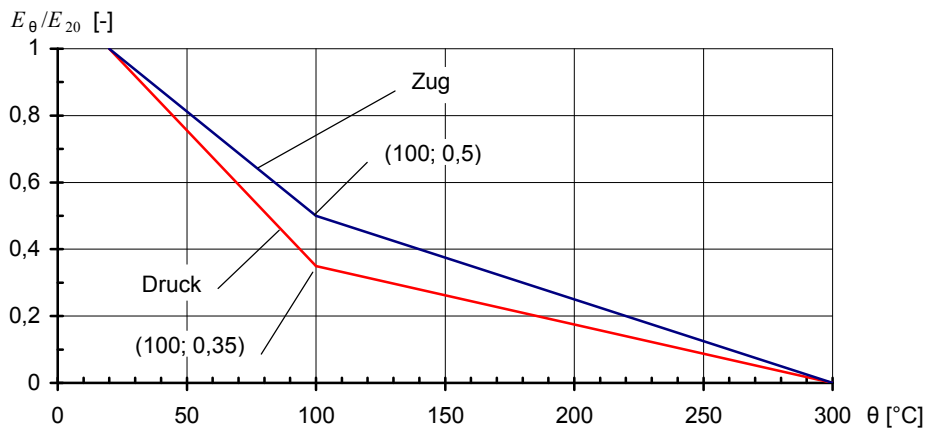
$f_{\Theta c}$  und die Elastizitätsmoduli  $E_{\Theta t}$ ,  $E_{\Theta c}$  entsprechen EN 338:2009 bzw. EN 14080:2013 unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Festigkeitsabfalls. Hiermit ergibt sich insbesondere für biegebeanspruchte Bauteile eine Unterschätzung der Tragfähigkeit gegenüber dem Bemessungsverfahren gemäß EN 1995-1-2, Abschnitt 4.2. Ursache hierfür sind die geringeren Druck- und Zugfestigkeiten ( $f_{\Theta t}$ ,  $f_{\Theta c}$ ) des allgemeinen Berechnungsverfahrens gegenüber der mittleren Biegefestigkeit  $f_{m t}$ , welche beim vereinfachten Nachweis Anwendung findet.



Spannungs-Dehnungs-Linien für Holz



Festigkeitsabfall von Holz bei erhöhten Temperaturen



#### E-Modul-Abfall von Holz bei erhöhten Temperaturen

Die Stabwerkstheorie hat das Ebenbleiben der Querschnitte zur Voraussetzung. Wegen der nichtlinearen thermischen Dehnungsverteilung über dem Querschnitt ergibt sich eine ebenfalls nichtlineare Verteilung der spannungserzeugenden Dehnungen. Die hieraus berechneten Spannungen werden über dem Querschnitt unter Zuhilfenahme der Elementierung zu Schnittgrößen integriert. Der nichtlineare Dehnungszustand wird während der Gleichgewichtsiteration durch Addition linearer Dehnungszustände solange variiert bis Gleichgewicht vorliegt. Diese Methode ist als Standardalgorithmus im Programm implementiert.

Eine alternative Vorgehensweise ist die Zugrundelegung einer sogenannten „Äquivalenten Temperatur“. Hierbei wird die bei der thermischen Berechnung ermittelte nichtlineare Temperaturverteilung durch eine Regressionsebene zuvor linearisiert und dann erst der Berechnung zugeführt. Mit diesem Ansatz bewegt man sich zwar vollständig im Rahmen der Stabwerkstheorie, wird jedoch insbesondere bei Stahlbetontragwerken den thermischen Einwirkungen nicht ausreichend gerecht, da der Einfluss der Steifigkeitsverteilung des gesamten Tragwerks auf die Lage der Regressionsebene nicht erfasst werden kann.

Bei Flächentragwerken wird analog zur nichtlinearen Analyse unter Normaltemperatur mit einem Schichtmodell gerechnet (Siehe "Nichtlineare Systemanalyse / Flächenelemente"). Hierbei wird das biaxiale Tragverhalten von Stahlbeton berücksichtigt. Für Flächentragwerke aus Stahl wird die Raghava-Fließbedingung unter Zugrundelegung temperaturabhängiger Festigkeiten angewendet. Flächentragwerke aus Holz können nicht analysiert werden.

## Lastfalldefinition

Für die nichtlineare Berechnung im Brandfall muss ein maßgebender Lastfall definiert werden. Dazu wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Zusammenstellung und Wichtung vorhandener Lastfälle mit der Lastart *Lastgruppe*.
- Auswahl der Theorie 2. Ordnung, wenn neben der physikalischen auch geometrische Nichtlinearität berücksichtigt werden soll.
- Ergänzung des Lastfalls mit der Lastart *Brandfall*. Die Nummer des Brandfalls bezieht sich auf die Nummerierung im Dialog *Thermischer Querschnitt*.

Wenn unterschiedliche Brandfälle zu untersuchen sind, muss für jeden ein eigener Lastfall erzeugt werden.

## Berechnungseinstellungen

Die nachfolgenden Einstellungen können in der Registerkarte *Brandfall* in den *Vorgaben* für die nichtlineare Systemanalyse über den Menüpunkt *Berechnung - Einstellungen* vorgenommen werden.

### Folgende Lastfälle berücksichtigen

In das linke Auswahlfeld sind die zu berechnenden, oben beschriebenen Lastfälle einzutragen.

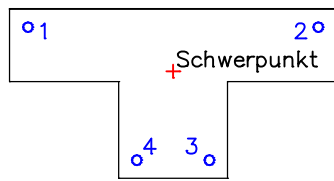
### Modifizierte Newtonmethode

Die Iteration erfolgt nach der „Modifizierten Newton-Raphson-Methode“. Ist der Schalter nicht gesetzt, wird mit der „Newton-Raphson-Methode“ gearbeitet.

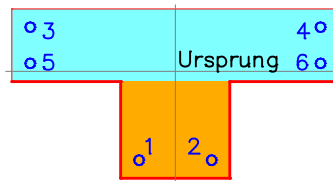
### Ausgangsbewehrung

Die Bewehrungsübernahme bei der *Berechnung im Brandfall* erfolgt auf eine andere Weise als bei der Berechnung unter Standardeinwirkungen. Die aus einer Stahlbetonbemessung resultierende Ausgangsbewehrung bezieht sich auf die

Betonstahllagen des Basisquerschnitts. Die eingebetteten Stahllagen des thermischen Querschnitts werden durch Kopie oder Neudefinition von Querschnittsteilen erzeugt. Deshalb kann eine Zuordnung zu der Ausgangsbewehrung des Basisquerschnitts nur geometrisch durch Koordinatenvergleich erfolgen. Im folgenden Beispiel werden die Lagen 1 bis 4 geometrisch zugeordnet, sofern in beiden Teilen des thermischen Querschnitts die Option „As von Bemessung übernehmen“ bejaht wurde. Dabei ist darauf zu achten, dass der Schwerpunkt des Basisquerschnitts mit dem Nullpunkt des thermischen Querschnitts übereinstimmt.



Basisquerschnitt



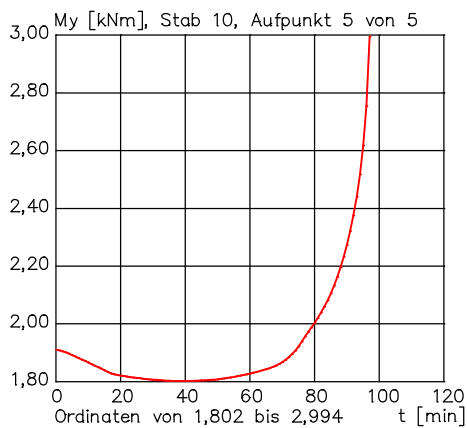
Thermischer Querschnitt

Bei Flächentragwerken wird stets mit den Betonstahllagen des Basisquerschnitts gerechnet. Diese werden entsprechend ihrer Höhenlagen dem thermischen Querschnitt zugeordnet. Daher sollte die Mittellinie des thermischen Betonquerschnitts sich auf der Nulllinie ( $z=0$ ) befinden und die Dicke des Basisquerschnitts gleich der Dicke des thermischen Betonquerschnitts sein.

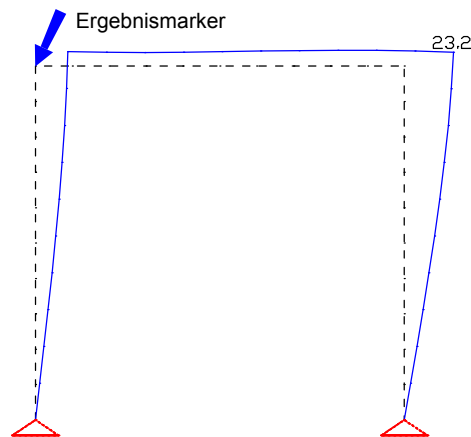
## Ergebnisse

Für die in den Einstellungen ausgewählten Nachweislastfälle werden die Verformungen, Schnittgrößen und Auflagerreaktionen für die gewählten Zeitinkremente in der Datenbasis gespeichert.

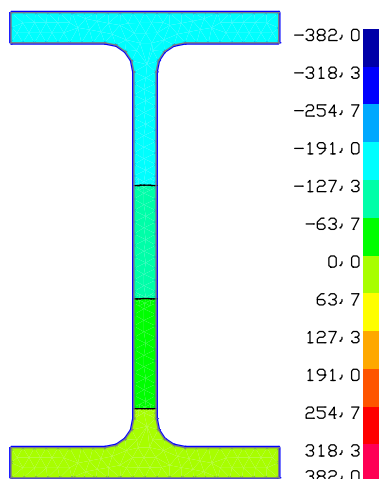
Zusätzlich werden für Stäbe mit thermischem Querschnitt an den Ergebnismarkern die Spannungsverteilungen über den Querschnitt gespeichert.



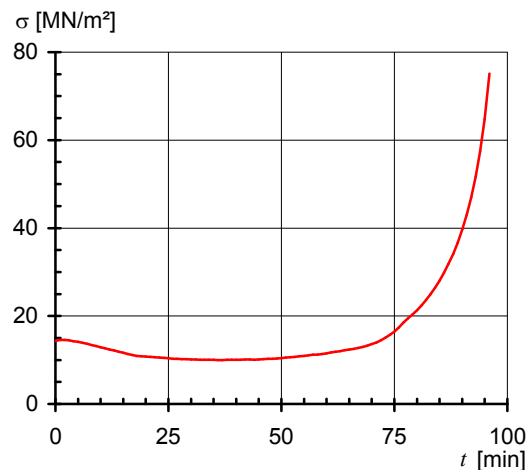
Zeitabhängiger Verlauf des Biegemoments  $M_y$  an einem Stabknoten



Darstellung der Knotenverschiebungen  $u$  [mm] bei  $t = 90$  min



Verlauf der Spannungen  $\sigma_x$  [MN/m<sup>2</sup>] am Ergebnismarker bei  $t = 90$  min



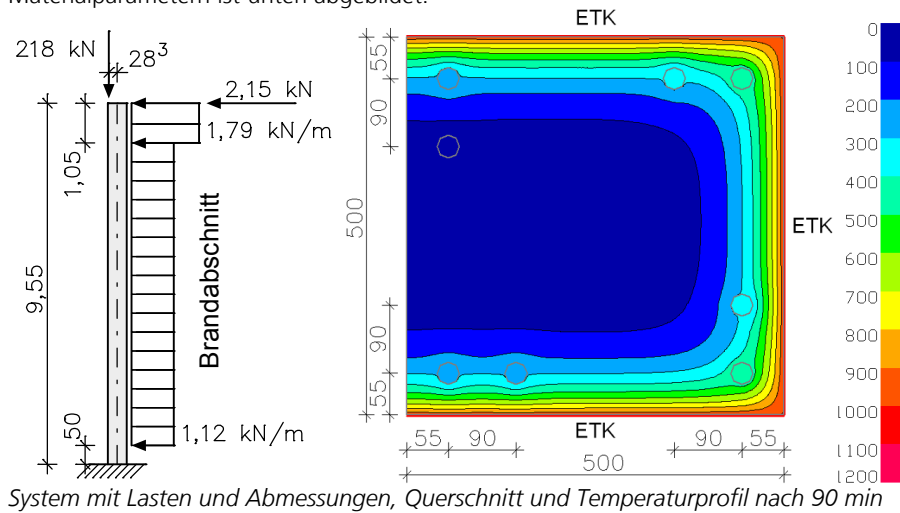
Verlauf der Spannungen  $\sigma_x$  am Ergebnismarker in Mitte der Profilunterkante

## Beispiele

Die nachfolgenden Berechnungsbeispiele sollen Anwendungsmöglichkeiten des Programmsystems demonstrieren und gleichzeitig zur Validierung der erzielten Resultate anhand von Versuchsergebnissen dienen.

### Giebelstütze einer Halle

Die nachfolgende Giebelstütze wurde von Richter untersucht. Das zugrundeliegende statische System mit den zugehörigen Materialparametern ist unten abgebildet.



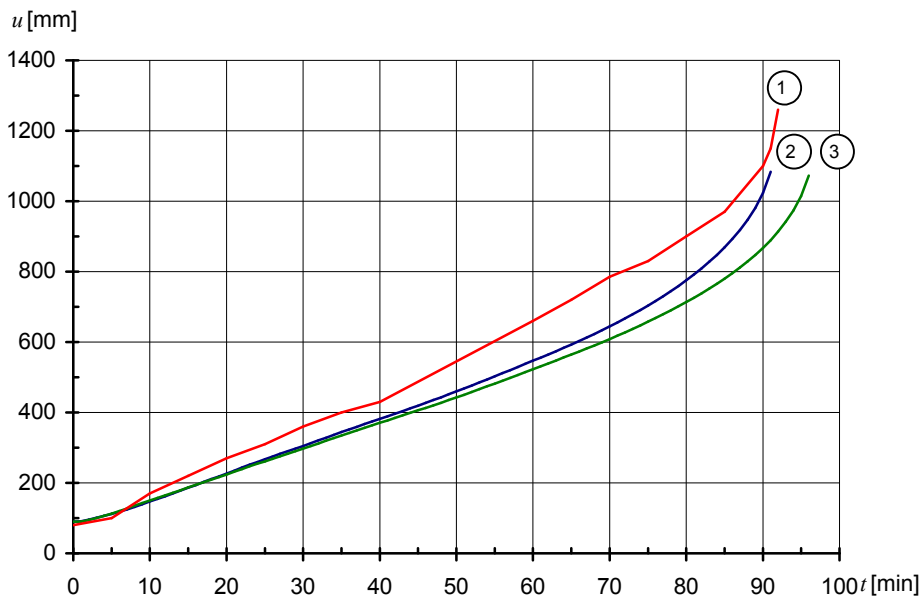
System mit Lasten und Abmessungen, Querschnitt und Temperaturprofil nach 90 min

Materialparameter:

Beton: C30/37-EN, Rohdichte bei 20°C 2300 kg/m<sup>3</sup>, Feuchtegehalt 0 %, Quarzhaltige Zuschläge,  $\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ ,  $\epsilon_m = 0,7$

Betonstahl: BSt 500 S (A), 8 Ø 28 (warmgewalzt), Achsabstand vom Rand  $u = 55 \text{ mm}$

Die Berechnung wurde unter Berücksichtigung einer dreiseitigen Beflammung nach der Einheitstemperaturkurve (ETK) durchgeführt. Dabei wurden geometrische und physikalische Nichtlinearitäten im Rahmen der Zeit-Schritt-Berechnung erfasst. Je nach Art der Modellierung der Bewehrung tritt Systemversagen nach 91 min (Kurve 2) bzw. nach 96 min (Kurve 3) ein. Bei Kurve 3 wurde die vorhandene Bewehrung als Bauteil elementiert. Diese hat somit Einfluss auf die Temperaturverteilung, was aus dem abgebildeten Temperaturprofil gut ersichtlich ist. In beiden Fällen kann die geforderte Feuerwiderstandsklasse R90 eingehalten werden.



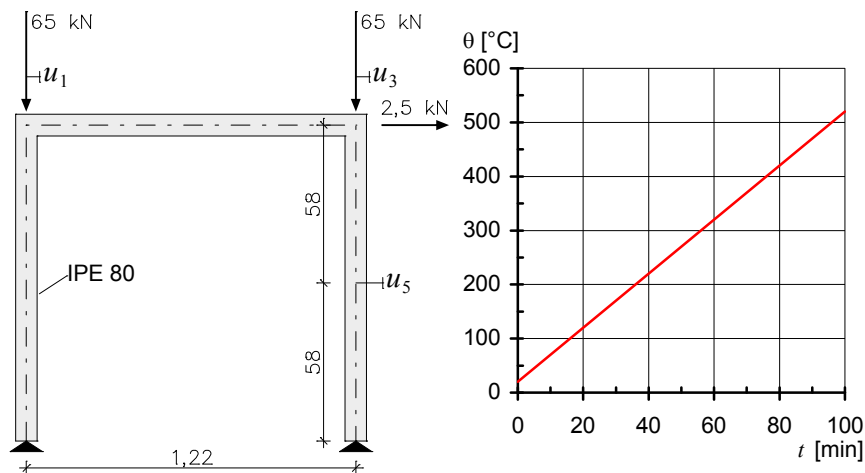
Last-Verschiebungs-Kurven des Stützenkopfes

- 1: Richter: Brandschutzbemessung IBMB TU Braunschweig, Beispiel 6
- 2: InfoGraph: Temperaturprofil ohne Berücksichtigung der Bewehrung
- 3: InfoGraph: Temperaturprofil mit Berücksichtigung der Bewehrung



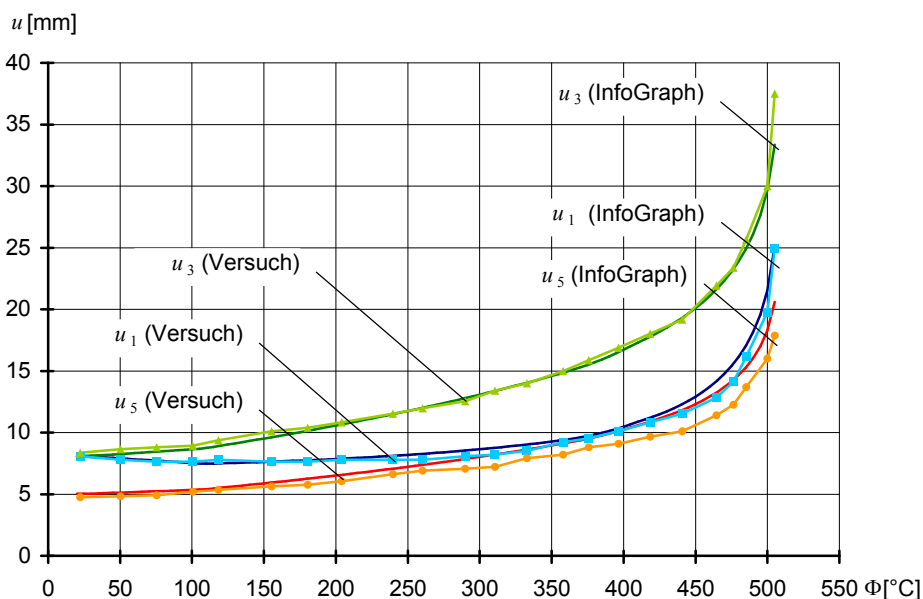
## Stahlrahmen

Der unten abgebildete Großmodellrahmen (Versuch EGR 1c) ist von *Rubert* und *Schaumann* 1985 experimentell und rechnerisch untersucht worden. Im Brandversuch wurde eine gleichmäßige Temperaturerhöhung von ca. 5 K/min realisiert. Die Abweichungen von der Sollgeometrie lagen laut Versuchsbericht in vernachlässigbarer Größenordnung. Sämtliche Materialkennwerte wurden durch Versuche ermittelt. Da diese nicht vollständig dokumentiert sind, wurden der Lastausnutzungsgrad  $1/\nu_u = 0,55$  sowie der Systemschlankheitsgrad  $\lambda_{sys} = 0,93$  unter Normaltemperatur zur Systemeichung herangezogen. Bei gelenkiger Lagerung der Fußpunkte ergab sich ein geringfügig erhöhter Lastausnutzungsgrad von 0,57. Diese Abweichung wurde durch Anbringung einer sehr kleinen elastischen Fußpunkteinspannung eliminiert.



System mit Lasten und Abmessungen, Querschnitt und Temperaturverlauf

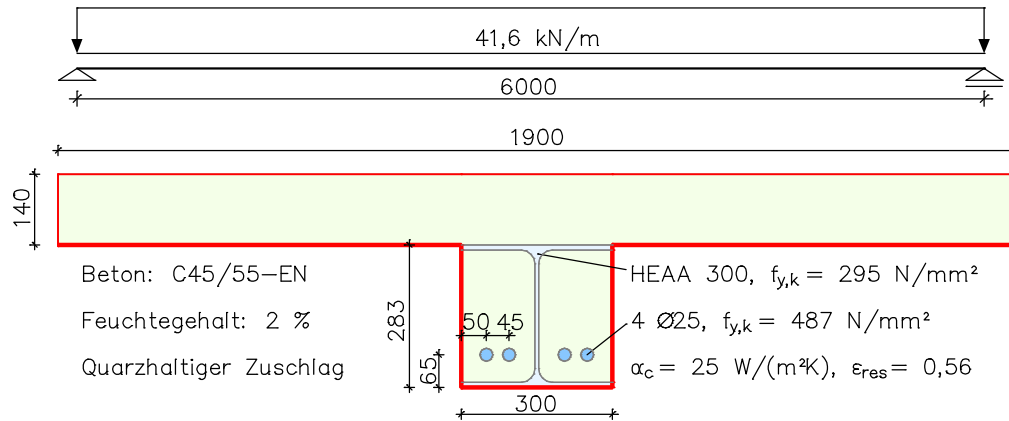
Im nachfolgenden Diagramm wurden die im Versuch ermittelten Temperatur-Verschiebungs-Kurven für die Punkte 1, 3 und 5 den Ergebnissen der Berechnung gegenübergestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Temperaturbereich festzustellen.



Temperatur-Verschiebungs-Kurven aus Vergleichsberechnung und Experiment

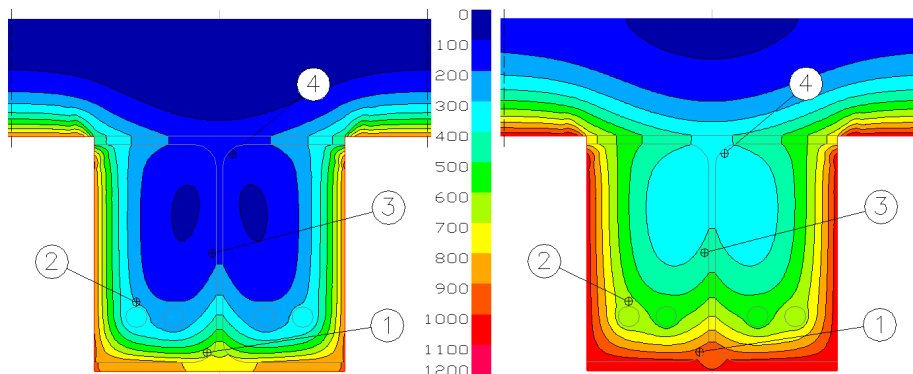
## Verbundträger

Der folgende Verbundträger wurde aus Upmeyer, Dissertation Universität Hannover 2001, entnommen und basiert auf *Brandversuchen an kammerbetonierten Verbundträgern*. Das statische System mit den zugehörigen Materialparametern ist unten abgebildet.

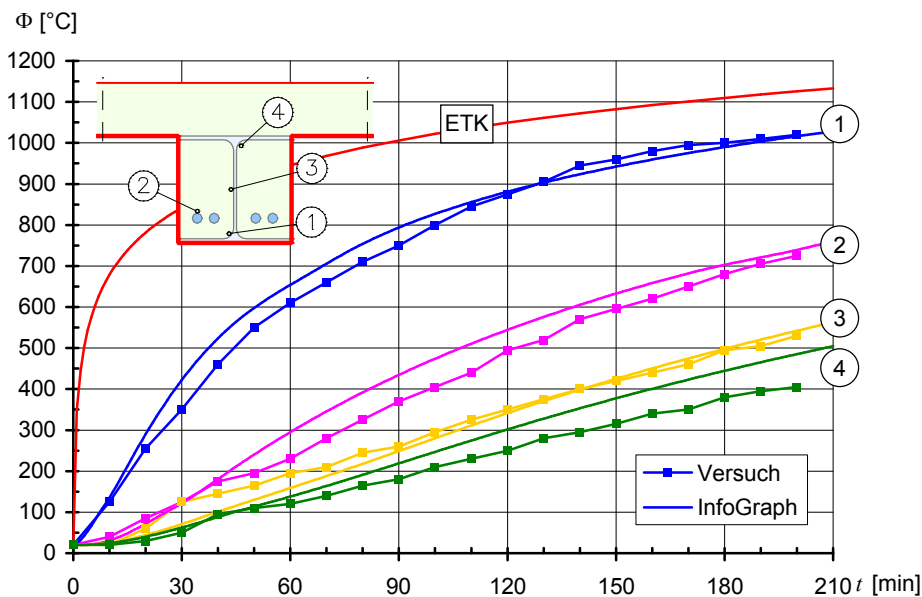


System mit Querschnitt, Lasten und Abmessungen [mm]

Neben der Zeit-Verschiebungs-Kurve der Trägermitte liegen hier auch die während des Versuchs ermittelten Bauteiltemperaturen an vier Messpunkten vor. Die rechnerisch ermittelte Temperaturentwicklung stimmt gut mit den im Versuch gemessenen Werten überein. Nur an Messpunkt 4 zeigt sich ein nennenswerter Unterschied. Dies könnte mit einer Abweichung des Feuchtegehalts oder durch die Temperaturableitung durch die rechnerisch nicht erfassten Kopfbolzen in den kalten Plattenbereich zusammenhängen. Zusätzlich ist die genaue Lage der Thermolemente nicht bekannt. Dies wirkt sich wegen des großen Temperaturgradienten insbesondere bei Messpunkt 1 aus.

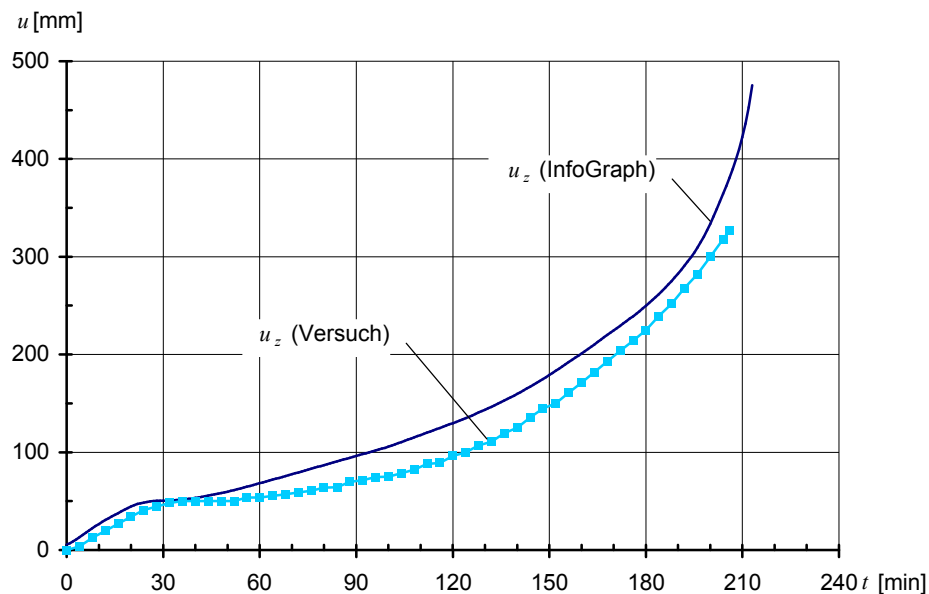


Temperaturprofil nach 60 min bzw. 150 min [°C]



Temperaturverteilung im Querschnitt über die Zeit

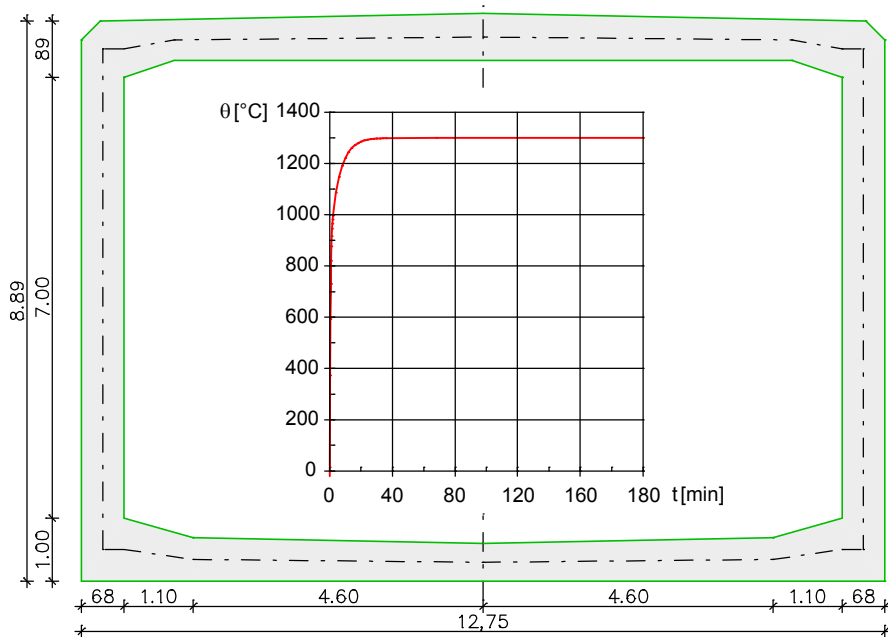
Die gute Übereinstimmung der Zeit-Verschiebungs-Kurven und des Versagenszeitpunktes in Berechnung und Versuch zeigt die nächste Abbildung.



Durchbiegung in Feldmitte über die Zeit

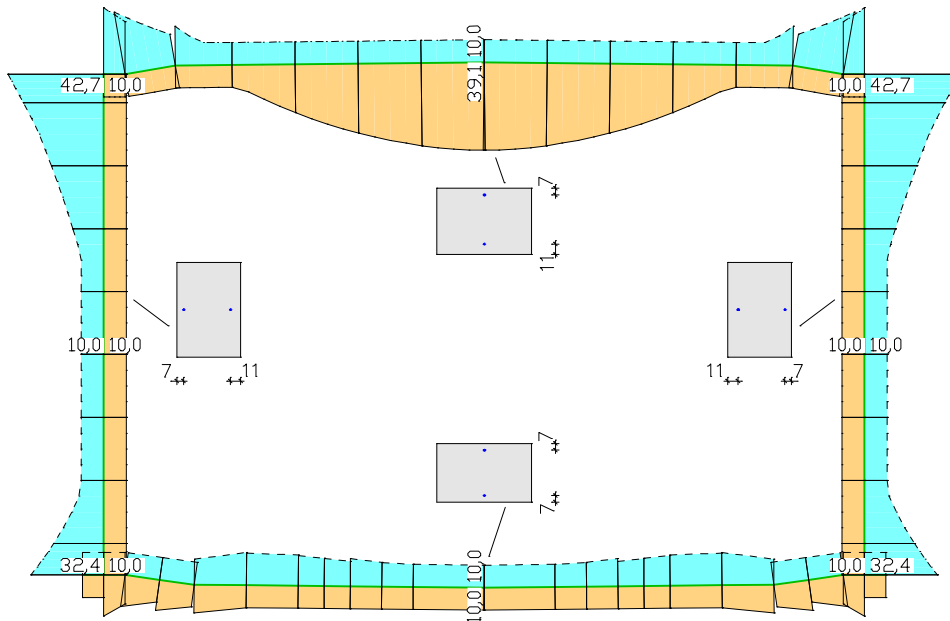
## Tunnelrahmen

Der nachfolgende Tunnelrahmen wurde dem Forschungsbericht „Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton“ entnommen. Hier soll der Schnittgrößen- und Verformungszustand nach 180 min Brandeinwirkung untersucht werden.



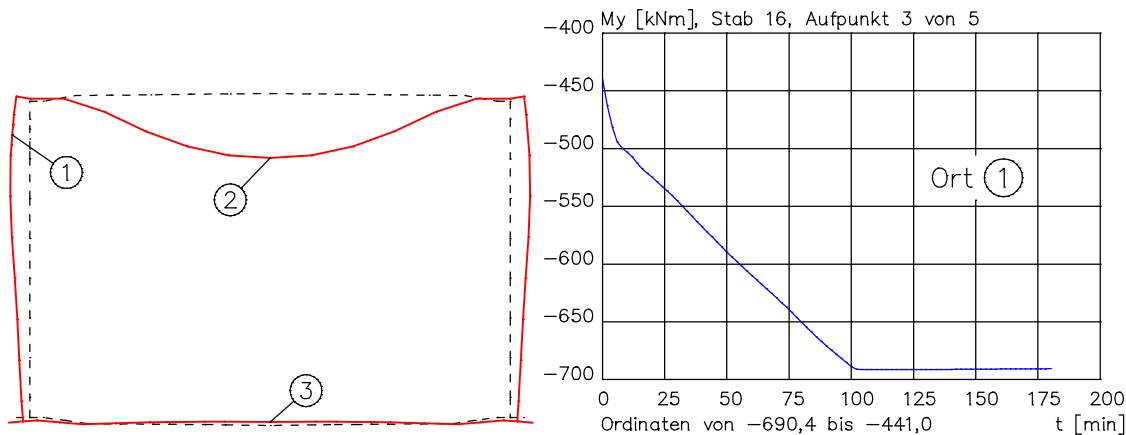
System mit Abmessungen, Temperaturkurve

Der Tunnelrahmen ist an seiner Sohle elastisch gebettet. Die umfangreichen Querschnitts-, Material- und Beanspruchungsparameter sollen hier nicht näher erläutert werden. Die Einwirkungskombination setzt sich neben der Brandbeanspruchung aus Eigenlast, Auftrieb und Überschüttung sowie Wasser-, Erddruck und Auflast aus Verkehr zusammen. Die angenommene Temperaturkurve ist oben wiedergegeben. Der thermische Querschnitt ist geometrisch identisch mit dem Basisquerschnitt. Deshalb konnte die vorhandene Bewehrung automatisch übernommen werden. Die Bewehrungsverteilung ist nachfolgend abgebildet.

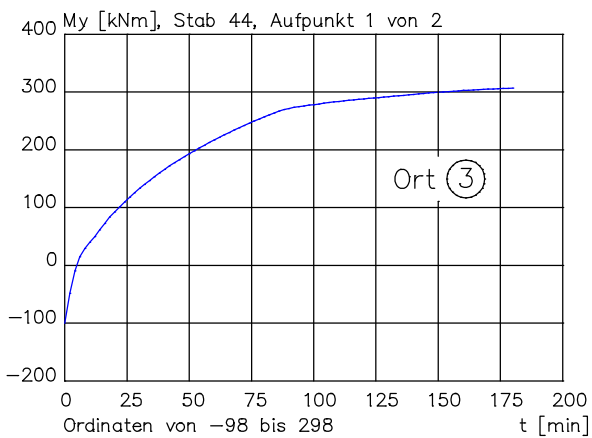
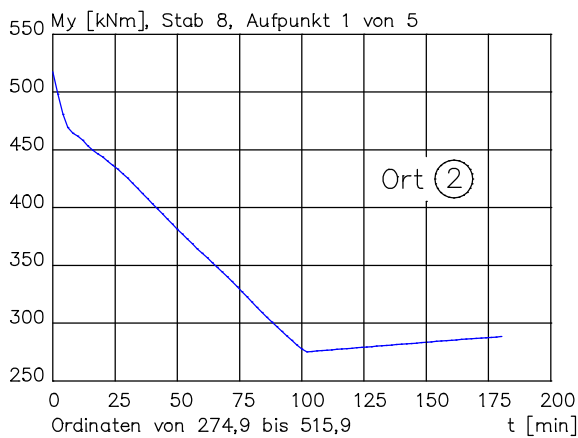


Vorhandene Bewehrungsanordnung [cm<sup>2</sup>/m]

Im Bereich der Rahmenecken ergeben sich negative Momente aus der Beanspruchungskombination. D.h. die Zugbewehrung hat hier Normaltemperatur. Im Feldbereich des Rahmenriegels (Ort 2) ist die untere Bewehrung für die Tragfähigkeit maßgebend. Wegen der großen Überdeckung von 11 cm ergibt sich hierfür nach 180 min eine Temperatur von ca. 250 °C. Diese bewirkt noch keinen nennenswerten Festigkeitsabfall.



Überhöhte Verformungsfigur nach 180 min und Momentenverlauf über die Zeit



Momentenverläufe über die Zeit

Die dargestellten Momentenverläufe zeigen, dass sich am Ort 1 des Tunnelrahmens nach ca. 100 min ein plastisches Gelenk ausbildet. Die Tragsicherheit nach 180 min ist jedoch für das Gesamtsystem gesichert. Eine andere Beanspruchungssituation würde sich jedoch durch Betonabplatzungen im Feldbereich des Rahmenriegels (Ort 2) ergeben. Die hohen Temperaturen würden dann weiter in den Querschnitt eindringen und ein Ausfall der Feldbewehrung würde zum Versagen des Gesamtsystems führen.


## Hochbaudeckenplatte unter Brandeinwirkung

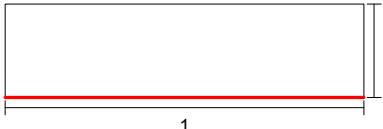
Dieses Beispiel behandelt eine Hochbaudeckenplatte, welche bereits im Handbucheil *Nichtlineare Systemanalyse* untersucht wurde. Hier soll nachgewiesen werden, dass die Platte einer 90 minütigen Brandeinwirkung standhält.

Im **ersten Berechnungsschritt** wird eine thermische Berechnung der Deckenplatte für einen Brandfall (Einheits-Temperaturzeitkurve) an der Plattenunterseite durchgeführt.

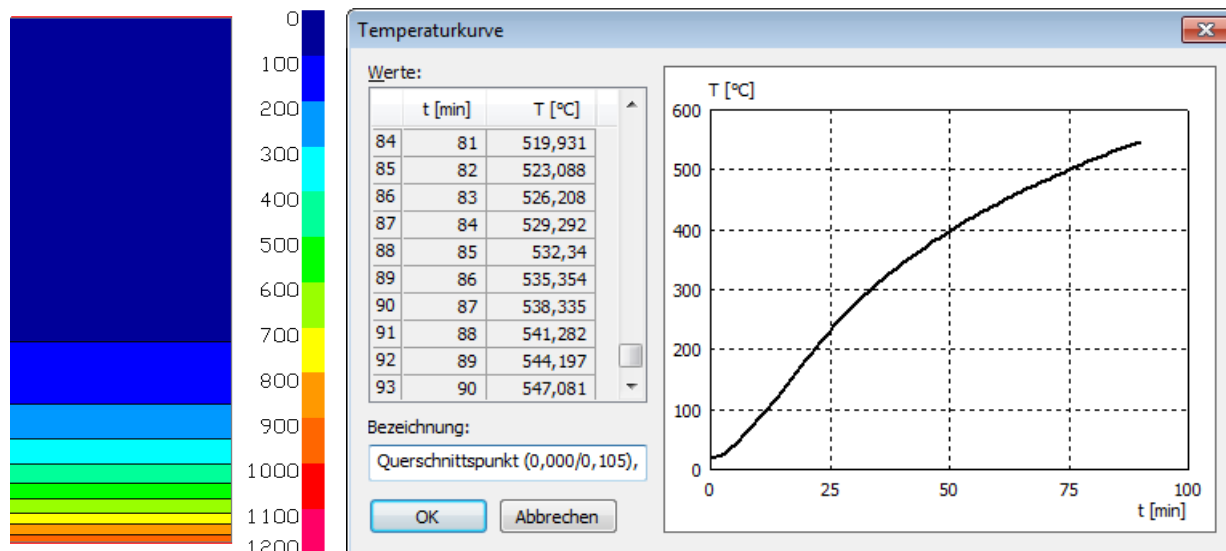
### Thermischer Querschnitt 1 - Deckenplatte

Anfangstemperatur = 20 °C; Zeitinkrement = 1 min; Zeitdauer = 90 min

1. Teil - (Querschnitt 1)			
	Material	C30/37-EN	
	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	33000	
	G-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	13800	
	Gamma [kN/m <sup>3</sup> ]	25	
	Zuschlag	Kalksteinhaltig	
	Rohdichte bei 20° C [kg/m <sup>3</sup> ]	2300	
	Feuchtegehalt [%]	3	
	As von Bemessung übernehmen	Ja	

1. Brandfall - (Querschnitt 1)		
	ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)	
	Emissivität	0,7
	Wärmeübergangskoeffizient	25 W/(m <sup>2</sup> ·K)

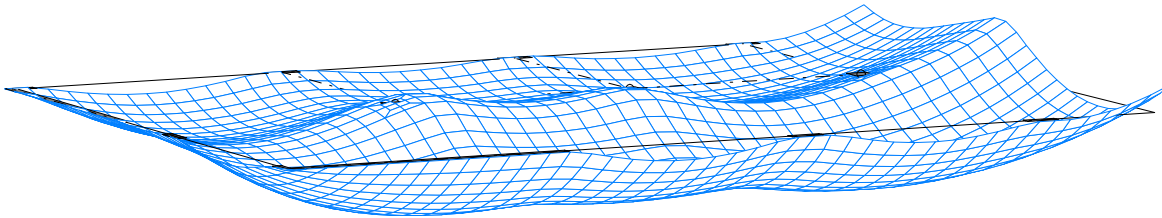
Die nachfolgende Abbildung dokumentiert die Ergebnisse.



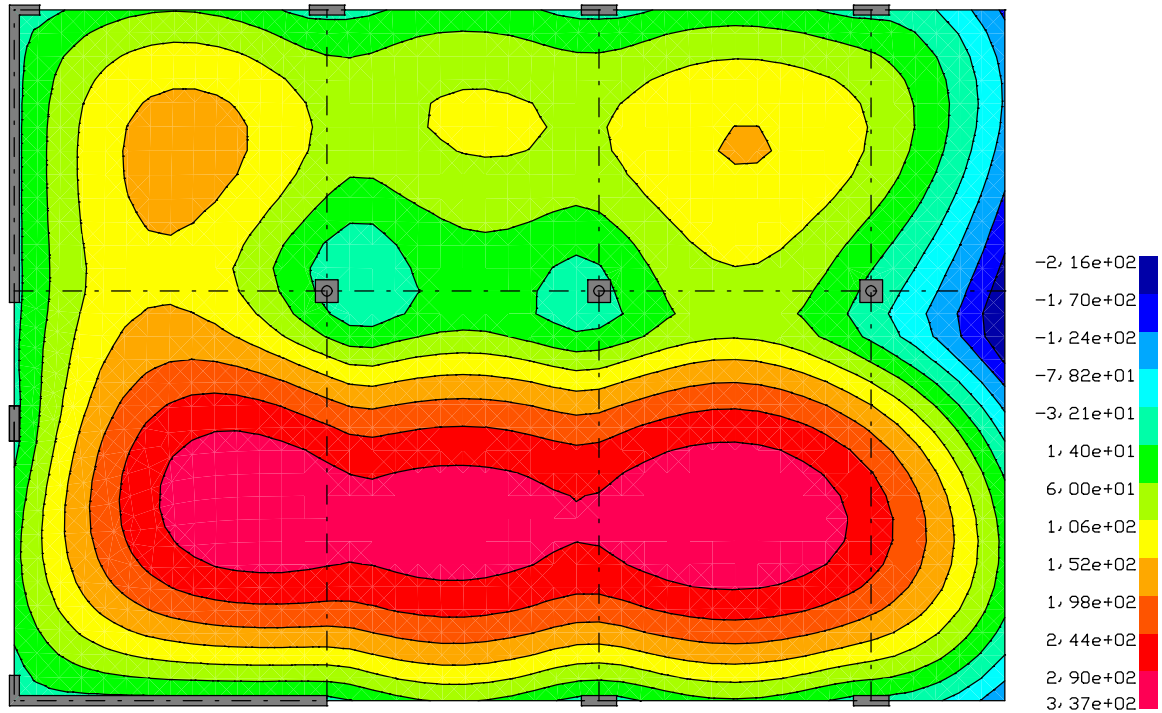
Temperaturverlauf nach 90 min über dem Querschnitt bzw. über die Zeit am Ort der unteren Bewehrungslage

Im **zweiten Berechnungsschritt** wird eine nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall durchgeführt. Dabei wird, wie im oben genannten Beispiel, die aus einer zuvor durchgeführten Bemessung berechnete Längsbewehrung zugrundegelegt.

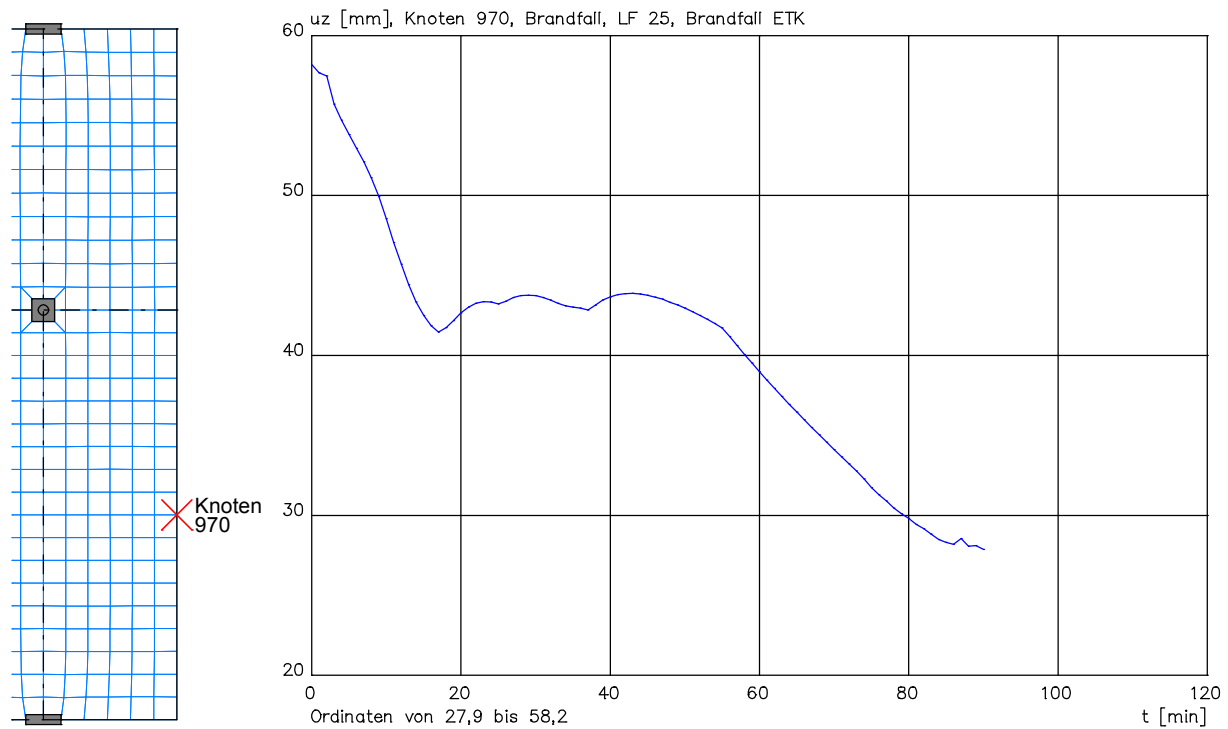
Unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens im Brandfall kann für die außergewöhnliche Situation unter einfacher G-Last und 50% der Verkehrslast die Tragfähigkeit für 90 min nachgewiesen werden, da in jedem Zeitschritt Gleichgewicht erzielt wurde.



Verformungsfigur nach 90 min in 5-facher Überhöhung



Farbverlauf der Verformungen  $u_z$  [mm] nach 90 min unter Brandlast (ETK)



Verformungen  $u_z$  des Knotens 970 unter Brandlast (ETK)

## Literaturhinweise

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)  
Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton.  
Straßenforschung Heft 544.  
BMVIT, Wien 2004.

DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1993-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1995-1-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EBA-Richtlinie

Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln.  
Herausgeber: Eisenbahnbundesamt. Stand: 1.7.2008.

EN 1991-1-2:2010

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –  
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1992-1-2:2004/AC:2008

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2008.

EN 1993-1-2:2005/AC:2009

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2009.

EN 1994-1-2:2005/AC:2008

Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EN 1995-1-2:2010

Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –  
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.  
Beuth Verlag, Berlin 2010.

Lienhard IV, J.H.; Lienhard V, J.H.

A Heat Transfer Textbook.  
Phlogiston Press, Cambridge (Massachusetts) 2008.

Hosser, D. (Hrsg.)

Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdB TB 04/01.  
Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdB), Altenberge 2006.

Richter, E.

Brandschutzbemessung im Massivbau - insbesondere Stahlbetonstützen.  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB),  
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2007.

Rubert, A.; Schaumann, P.

Tragverhalten stählerner Rahmensysteme bei Brandbeanspruchung.  
Stahlbau 9/1985.  
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1985.

Upmeyer, J.

Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten (Dissertation).  
Technische Universität Hannover, Hannover 2001.

Zehfuß, J.

Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung  
(Dissertation).  
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2004.

ZTV-ING

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 – Tunnelbau.  
Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Stand: 3/2012.



# Thermische Berechnung von Volumentragwerken

## Anwendungsbereich

Die *Thermische Berechnung* erlaubt die Ermittlung von stationären oder instationären Temperaturverteilungen in Volumenmodellen aus Tetraederelementen innerhalb des Programmsystems *Finite Elemente*. Dabei können beliebige räumliche Geometrien untersucht werden.

Die Materialeigenschaften sind im Abschnitt *Thermische Materialeigenschaften* beschrieben.

Die Bearbeitung gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Die Tragwerksgeometrie wird durch Modellobjekte *Volumen* beschrieben.
- Den einzelnen Modellvolumen werden Eigenschaften wie ein Material und Vorgaben für die Vernetzung zugewiesen.
- Die thermischen Materialeigenschaften werden im Querschnittsdialog festgelegt.
- Nach Markierung der Oberfläche eines Volumens, kann dieser eine Oberflächeneigenschaft zugewiesen werden.
- Im Dialog *Thermische Einwirkung* werden den Oberflächen thermische Randbedingungen zugewiesen.
- Nachdem alle tragwerksrelevanten Eigenschaften definiert wurden, wird mit dem Netzgenerierer *Tetraeder aus Volumen* das Finite-Elemente-Modell generiert.
- Im Anschluss wird die thermische Berechnung durchgeführt.
- Zusätzlich kann eine statische Berechnung unter Berücksichtigung der thermischen Dehnungen infolge einer thermischen Einwirkung (Lastart *Thermische Einwirkung*) erfolgen.

Es können mehrere unabhängige *Thermische Einwirkungen* definiert werden.

## Grundlagen

Die Berechnung der Temperaturverteilung in Festkörpern für den instationären Fall erfolgt über die Lösung der Wärmeleitungsgleichung nach Fourier. Diese hat den folgenden Aufbau:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

mit

$t$  Zeit [s]

$x, y, z$  Gebietskoordinaten [m]

Funktionen von  $y, z, t$

$\theta$  Temperatur [°C]

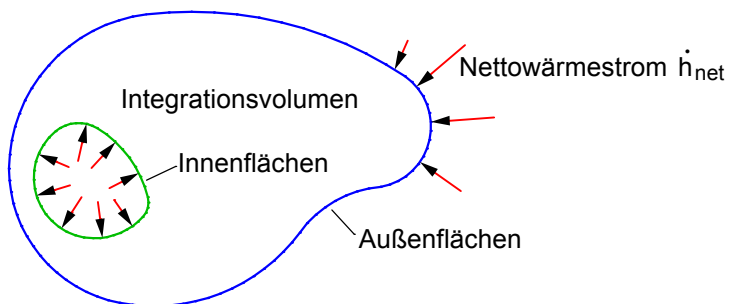
$\rho$  Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

$\dot{q}$  Wärmequelle (Leistungsdichte) [W/m<sup>3</sup>]

Da sämtliche Einflußgrößen zeitabhängig sind, ist ein Anfangswertproblem unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu lösen. Als Anfangsbedingung wird die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t = 0$  im Integrationsvolumen vorge-schrieben.



Für die hier zu behandelnden Problemstellungen werden die thermischen Einwirkungen hauptsächlich durch den Nettowärmestrom  $\dot{h}_{net}$  [W/m<sup>2</sup>] normal zu den Oberflächen bestimmt. Dieser setzt sich aus einem Konvektions- und einem Strahlungsanteil zusammen.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2)$$

Der konvektive Anteil berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_m) \quad (3)$$

mit

$\alpha_c$  Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

$\Theta_g$  Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils [°C]

$\Theta_m$  Temperatur an den Oberflächen des Bauteils [°C]

Der Nettowärmestrom zwischen zwei Flächen infolge Strahlung berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot [(\Theta_1 + 273)^4 - (\Theta_2 + 273)^4] \quad (4)$$

mit

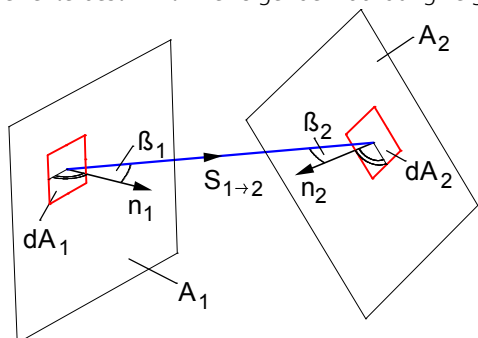
$\Phi$  Konfigurationsfaktor

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  Emissivitäten der Bauteiloberflächen [-]

$\sigma$  Stephan-Boltzmann-Konstante [= 5,67 · 10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)]

$\Theta_1, \Theta_2$  Temperaturen der Bauteiloberflächen [°C]

Der Konfigurationsfaktor wird durch die Oberflächengeometrie, dem Abstand der Flächen sowie ggf. durch Abschattungseffekte bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die zugrundeliegenden Größen.



Der Konfigurationsfaktor kann hiermit wie folgt ermittelt werden:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s_{1 \rightarrow 2}^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2$$

Im Falle der Strahlungseinwirkung durch Beflammung ergibt sich:

$$\Phi = 1$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m \quad \text{Emissivität der Bauteiloberfläche [-]}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f \quad \text{Emissivität der Flamme (hier } \varepsilon_r = 1) \text{ [-]}$$

$$\Theta_1 = \Theta_r \quad \text{Wirksame Strahlungstemperatur des Brandes (hier } \Theta_r = \Theta_g) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Theta_2 = \Theta_m \quad \text{Oberflächentemperatur an der Berandung des Bauteils [}^\circ\text{C]}$$

Die Gastemperatur  $\Theta_g$  wird als bekannt vorausgesetzt und ist in der Regel durch vorgegebene Temperaturzeitkurven definiert.

Das durch die Gleichungen (1) bis (4) gegebene nichtlineare Randwertproblem lässt sich nicht in geschlossener Form lösen. Zur Lösung wird die Methode der Finiten Elemente herangezogen. Hierzu wird das oben beschriebene Randwertproblem unter Verwendung der Methode von Galerkin und anschließender partieller Integration in ein System von Variationsgleichungen umgeformt.

Das Programmsystem verwendet kompatible Elemente mit einem vollständig quadratischen Ansatz. Daraus ergibt sich eine hohe Lösungsgenauigkeit, die weitgehend unabhängig von der Netzgeometrie ist.

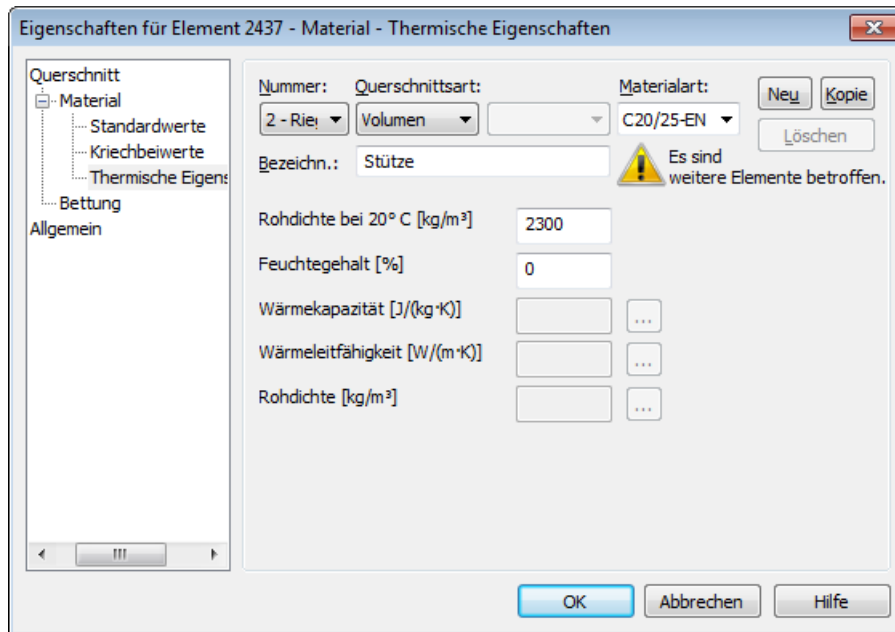
Der Elementansatz erfüllt die sogenannte *adiabatische Randbedingung* automatisch. D.h. wenn keine Randbedingung explizit vorgegeben wird, findet über diese Oberfläche kein Austausch von thermischer Energie statt.

Das nichtlineare Anfangswertproblem wird mit Hilfe einer Zeitschrittintegration in Verbindung mit einem inkrementellen Newton-Raphson-Algorithmus gelöst. Nach erfolgter Berechnung stehen die Temperaturprofile für alle untersuchten Zeitpunkte zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

## Eingabedaten

### Thermische Materialeigenschaften

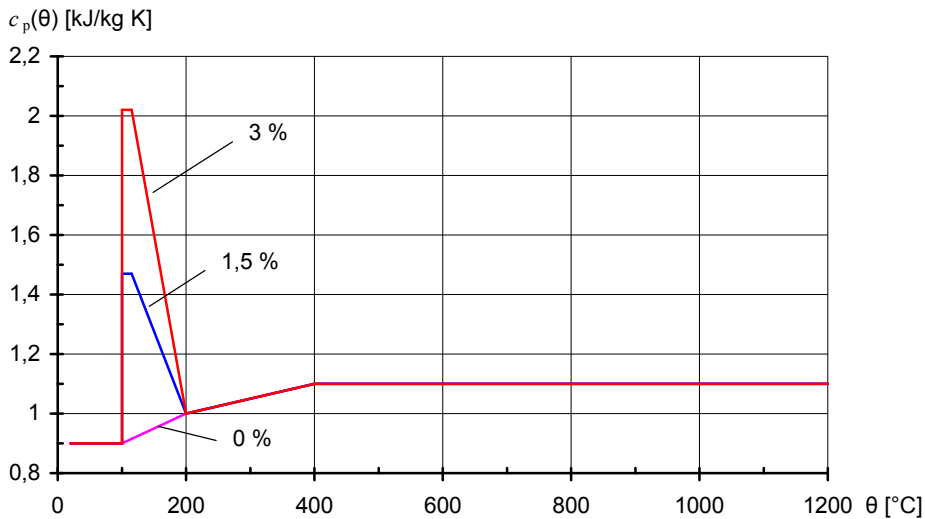
Die verwendeten Funktionsverläufe der temperaturabhängigen Materialeigenschaften sind nachfolgend beschrieben. Die dafür notwendigen benutzerdefinierten Werte sind im Querschnittsdialog festzulegen.



Alle Materialkennwerte außerhalb des Temperaturbereiches von 20 °C bis 1200 °C werden als konstant angenommen.

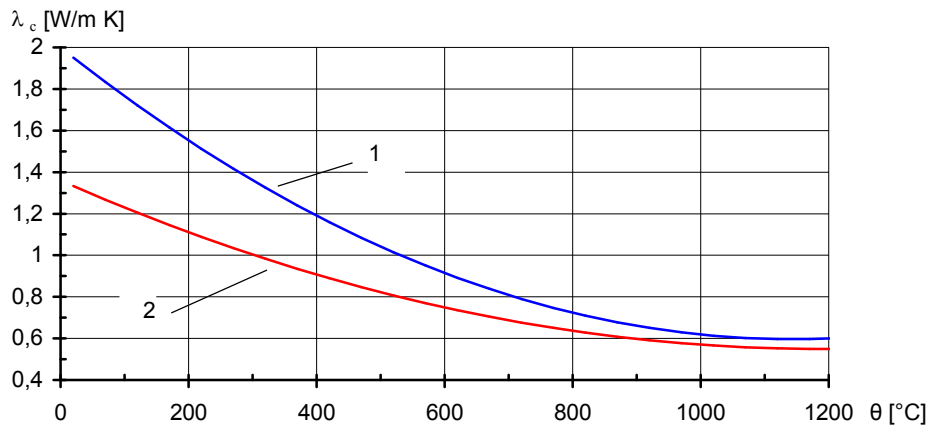
### Beton

Allen Betonsorten werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1992-1-2 zugewiesen. Gemäß DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 wird für DIN-Beton die obere Grenzfunktion der *thermischen Leitfähigkeit* aus 3.3.3 (2) verwendet. Für die übrigen Betone kommt der untere Grenzwert zur Anwendung. Der *Feuchtegehalt* und die *Rohdichte bei 20° C* kann vom Benutzer vorgegeben werden.

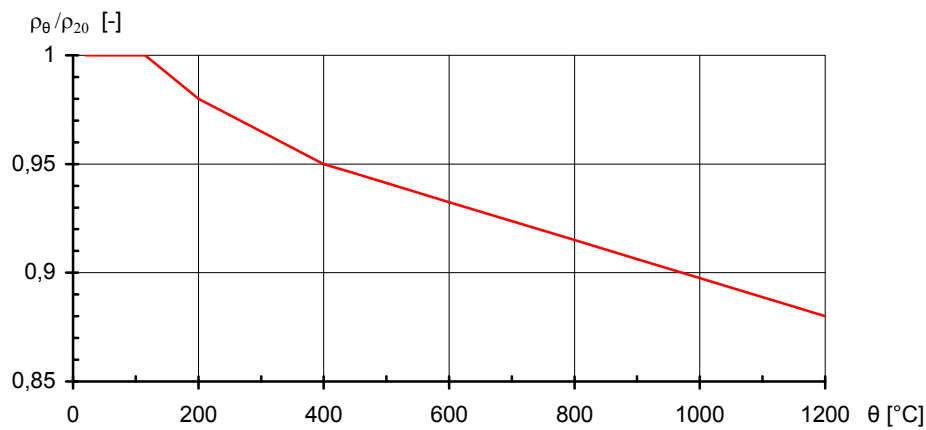


Spezifische Wärme von Beton mit quarz- und kalksteinhaltigem Zuschlag  $c_p(\theta)$  in Abhängigkeit von der Temperatur (Feuchtegehalt  $u = 0, 1,5$  und  $3$  Gew.-%)

Bei einem Feuchtegehalt zwischen den angegebenen Werten wird linear interpoliert.



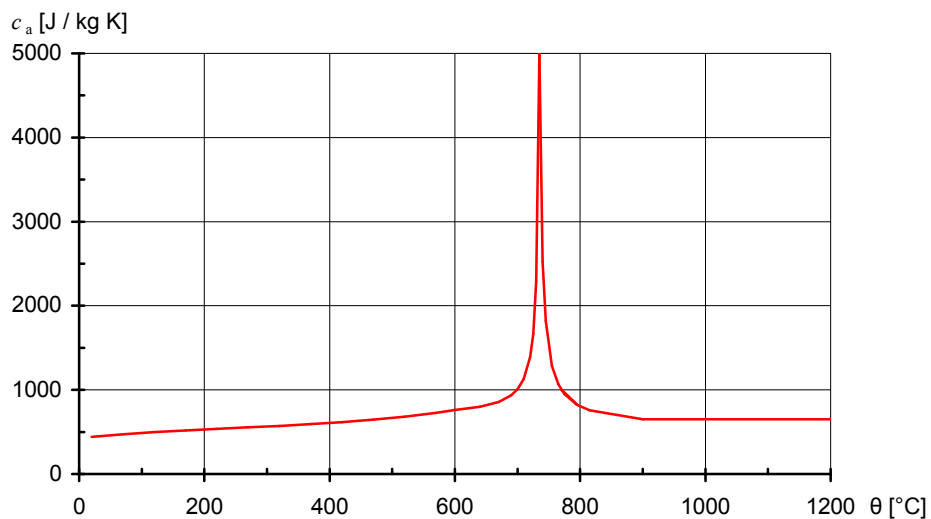
Thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur  
1: obere Grenze (DIN-Beton); 2: untere Grenze



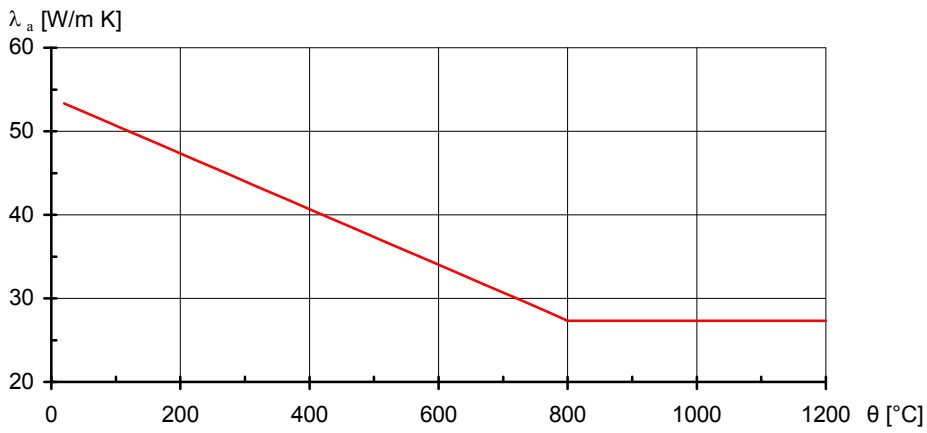
Verhältnis der Rohdichte für Beton in Abhängigkeit von der Temperatur

### Stahl

Allen Stahlsorten werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität* und die *thermische Leitfähigkeit* nach EN 1993-1-2 zugewiesen.



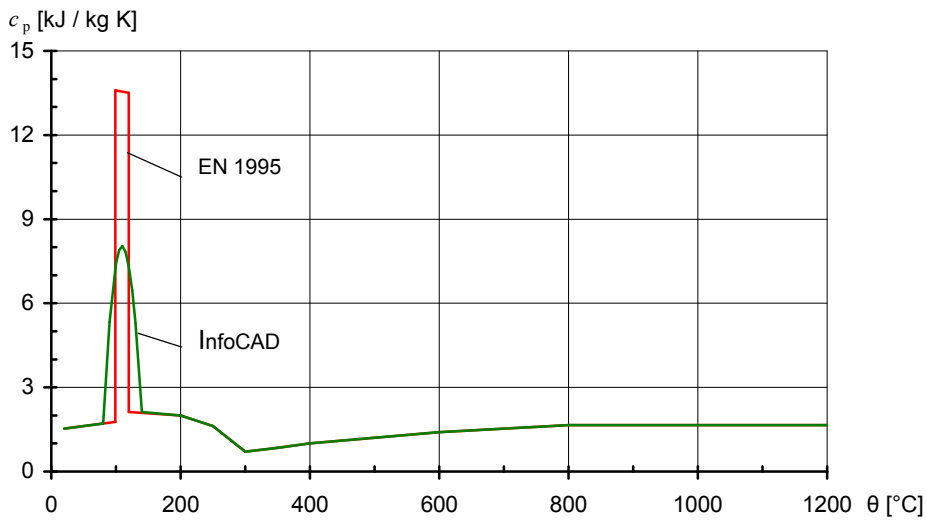
Spezifische Wärmekapazität von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur



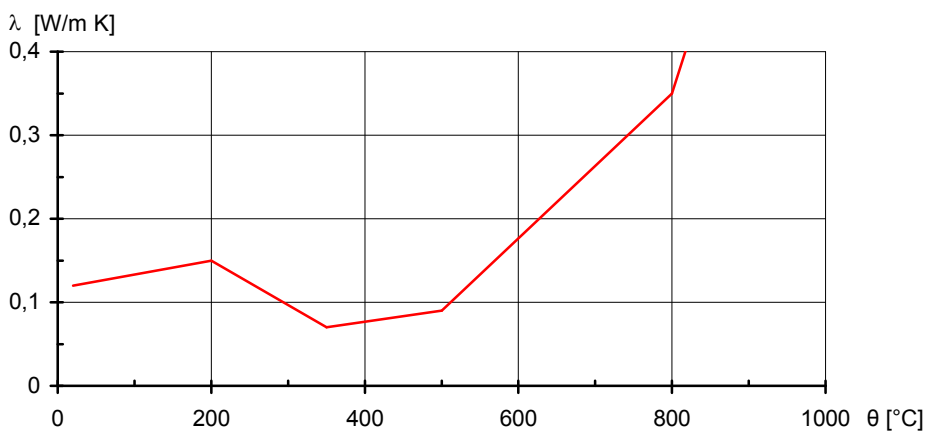
Wärmeleitfähigkeit von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur

### Holz

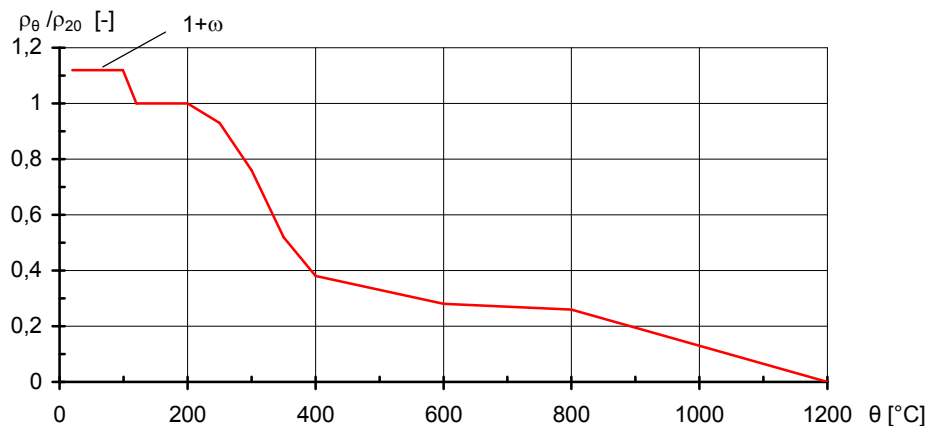
Allen Holzsorten werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1995-1-2 zugewiesen.



Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



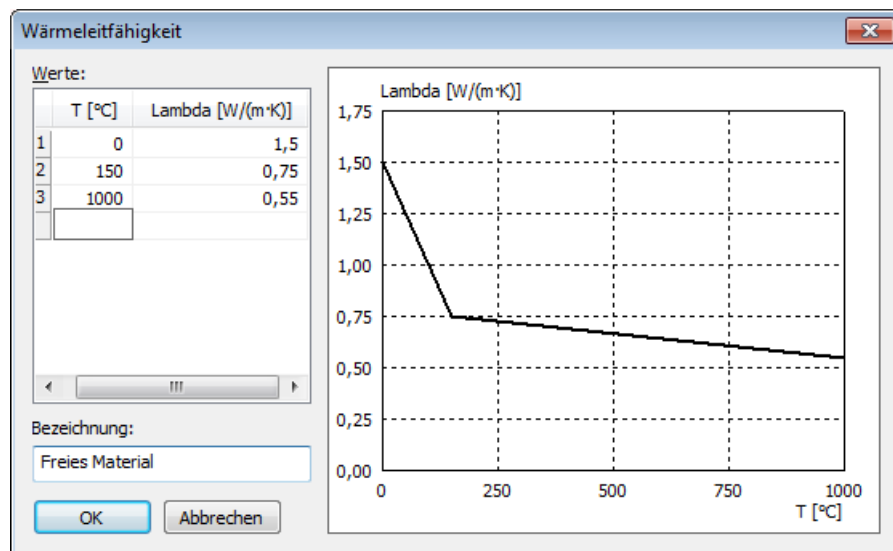
Wärmeleitfähigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



Verhältnis der Rohdichte für Holz mit einer Anfangsfeuchte  $\omega$  von 12 % in Abhängigkeit von der Temperatur

### Freies Material

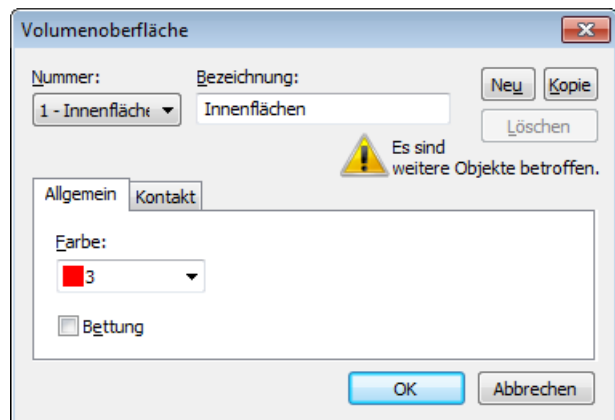
Freie Materialien sind z.B. Dämmstoffe für die der Benutzer beliebige temperaturabhängige Verläufe der *spezifischen Wärmekapazität*, der *Rohdichte* und der *Wärmeleitfähigkeit* angeben kann.



Benutzerdefinierte Wärmeleitfähigkeit

### Volumenoberfläche

Jeder Oberfläche eines Modellvolumens können über das Kontextmenü Eigenschaften zugewiesen werden. An Kontaktflächen findet Wärmeleitung wie in einem monolithischen Tragwerk statt, wenn diese identisch elementiert sind und sich im Ausgangszustand berühren.

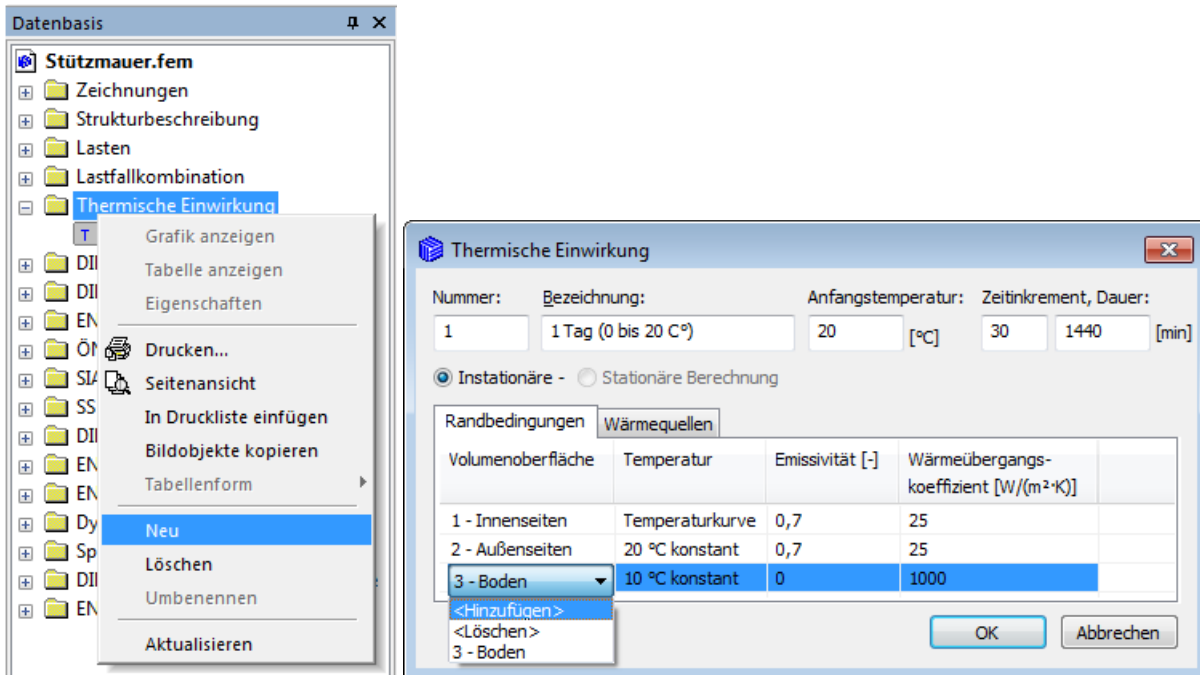


## Thermische Einwirkung

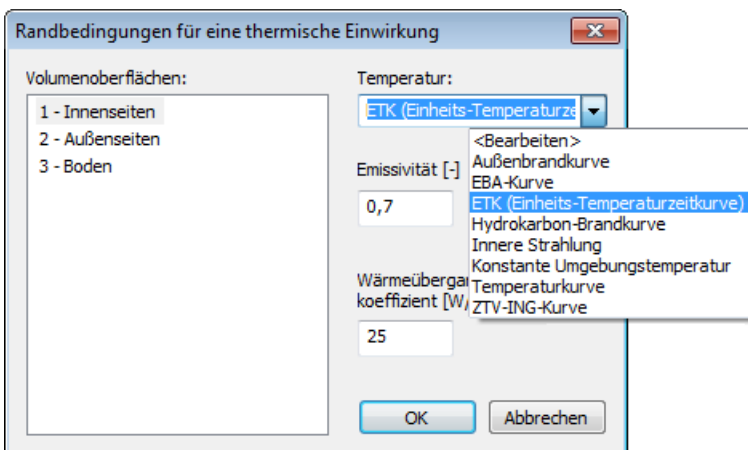
Neue thermische Einwirkungen werden über das Kontextmenü der Datenbasis erzeugt. Für jede thermische Einwirkung wird eine separate Berechnung durchgeführt.

Über den Dialog der jeweiligen thermischen Einwirkung werden folgende Eigenschaften definiert:

- *Instationäre- oder Stationäre Berechnung:* Für eine instationäre Berechnung sind zusätzlich die Anfangstemperatur [°C], das Zeitinkrement und die Dauer der Berechnung [min] anzugeben.
- Jeder Volumenoberfläche können die nachfolgend beschriebenen Randbedingungen zugewiesen werden.
- Zusätzlich kann für jeden Querschnitt eine Wärmequelle definiert werden. Die Leistungsdichte [W/m<sup>3</sup>] der Wärmequelle des Materials kann als konstanter Wert oder als benutzerdefinierter Verlauf über die Zeit beschrieben werden.



### Randbedingungen von Volumenoberflächen



Die thermische Einwirkung auf eine Oberfläche ist durch folgende Randbedingungen definiert:

- Temperaturverlauf der Einwirkung z.B. ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)
- Emissivität [-]
- Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

Oberflächen, denen unter dieser thermischen Einwirkung keine Randbedingung zugeordnet wurde, verhalten sich adiabatisch. Oberflächen, die sich gegenseitig bestrahlen, kann die Eigenschaft *Innere Strahlung* zugeordnet werden.

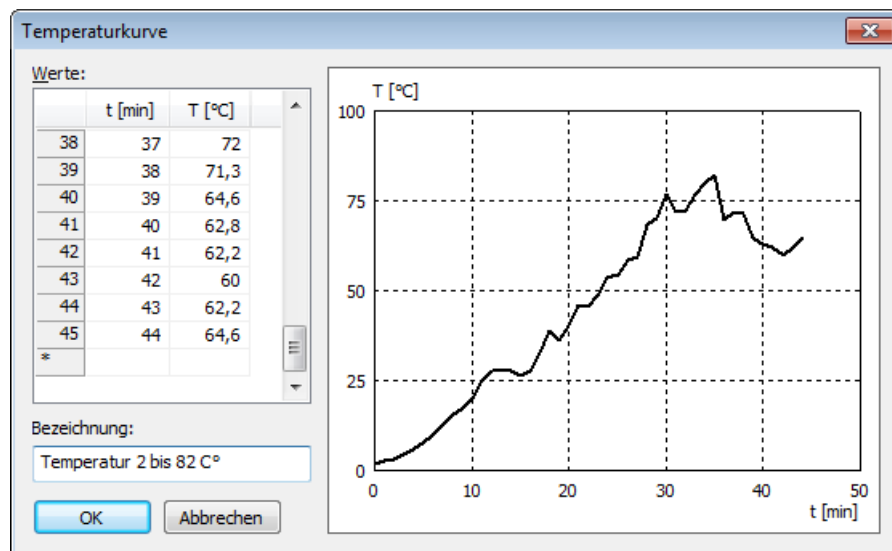
Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient kann EN 1991-1-2, Anhang B, entnommen werden.

Die Emissivität von Beton- und Baustahloberflächen sollte nach EN 1992-1-2 bzw. EN 1993-1-2, 2.2(2) mit dem Vorschlagswert von 0,7 angesetzt werden. Bei nichtrostendem Stahl nach Anhang C der Norm sollte die Emissivität 0,4 gesetzt werden.

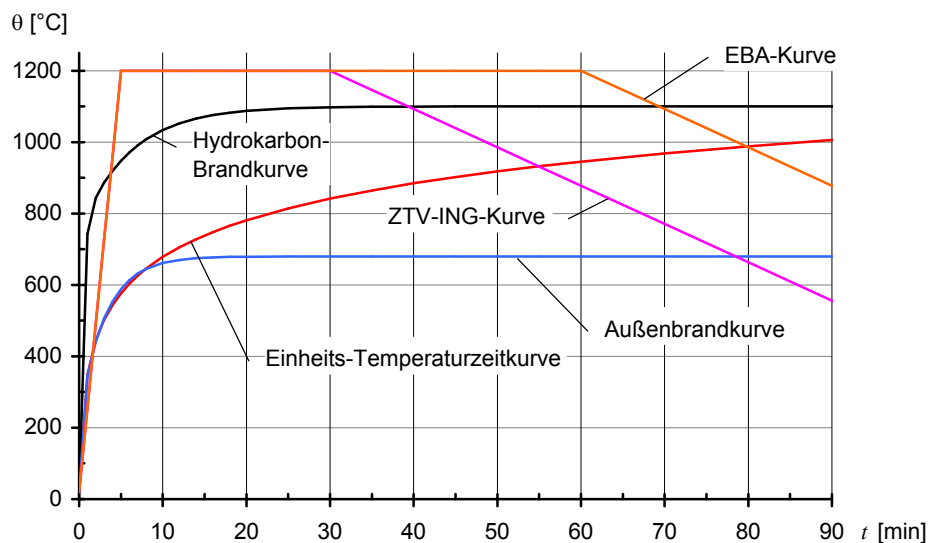


Für den zeitlichen Verlauf der Einwirkung können die nachfolgenden Temperaturkurven verwendet werden.

- *Benutzerdefinierte Temperaturkurve*: Vom Benutzer zu definierende Temperaturkurve.
- *EBA-Kurve*: Brandkurve nach EBA-Richtlinie (Orange dargestellt).
- *ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 bzw. prEN 13501-2.
- *Hydrokarbon-Brandkurve*: Brandkurve nach EN 1991-1-2.
- *Konstante Umgebungstemperatur*: Die Höhe der Umgebungstemperatur kann eingestellt werden.
- *ZTV-ING-Kurve*: Brandkurve nach ZTV-ING Teil 5 (Lila dargestellt).
- *Innere Strahlung*: Oberflächen, die strahlen, oder auf die Strahlung einwirkt.



Benutzerdefinierte Temperaturkurve



Brandkurven nach EN 1991-1-2, ZTV-ING Teil 5 bzw. EBA-Richtlinie

## Thermische Berechnung

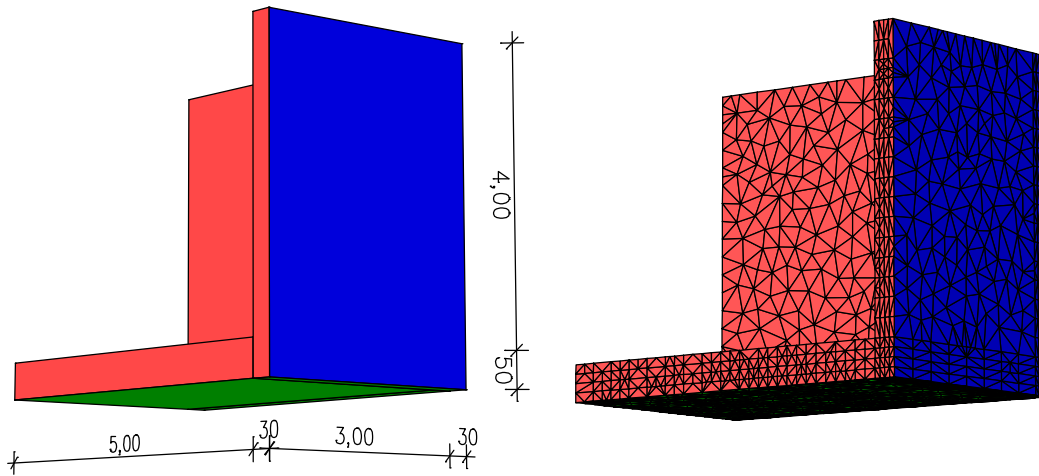
Mit dem Menüpunkt *Thermische Berechnung* des Berechnungsmenüs werden alle definierten thermischen Einwirkungen berechnet.

## Beispiele

Die nachfolgenden Berechnungsbeispiele sollen Anwendungsmöglichkeiten des Programmsystems demonstrieren und gleichzeitig zur Validierung der erzielten Resultate dienen.

### Instationärer Temperaturverlauf in einer Winkelstützmauer

Dieses Beispiel simuliert den Temperaturverlauf während eines Tages in einer Winkelstützmauer.



Volumenmodell

Tetraederelemente

#### Materialkennwerte

Nr.	Art	E-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	G-Modul [MN/m <sup>2</sup> ]	Quer- dehnz.	alpha.t [1/K]	gamma [kN/m <sup>3</sup> ]
1	C35/45-EN	34000	14200	0,20	1,000e-05	25,000

#### Thermische Eigenschaften

Material	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtegehalt [%]	Wärmekapazität [J/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
1 - C35/45-EN	2300	1,5		

#### Bettung

Nr.	k <sub>bx</sub>	k <sub>by</sub> [MN/m <sup>3</sup> ]	k <sub>bz</sub>	b <sub>x</sub>	b <sub>y</sub> [m]	b <sub>z</sub>
1	10	10	100			

Die Bettung wirkt in Richtung der Achsen des lokalen Elementsystems.

#### Volumenoberflächen

Nummer	Bezeichnung	Farbe	Bet- tung	Slave von	Faktor Kontakt- steifigkeit	Reibungs- koeffizient	Einfluß- radius [m]
1	1 Luftseite	■					
2	2 Außenseite	■					
3	3 Boden	■	X				

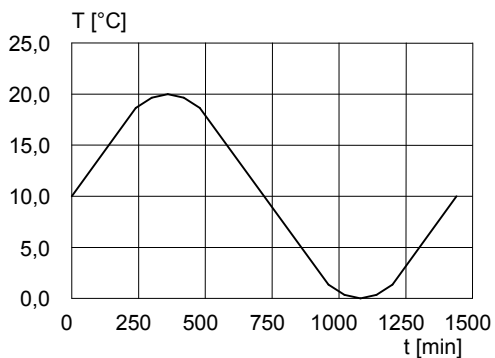
**Thermische Einwirkung 1 - 1 Tag (0 bis 20 C°)**

Instationäre Berechnung. Anfangstemperatur = 10 °C; Zeitinkrement = 30 min; Zeitdauer = 1440 min

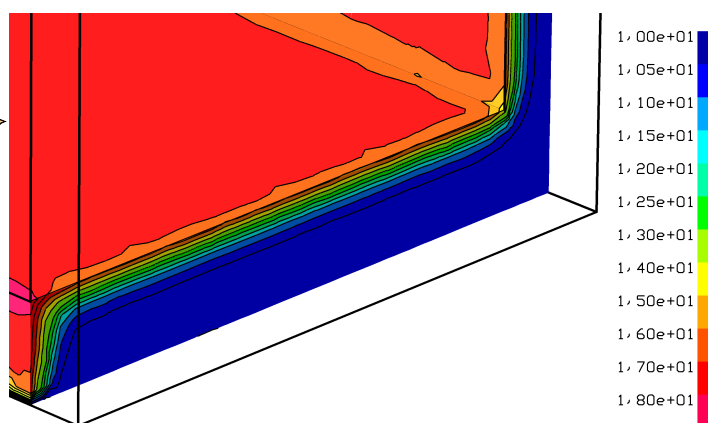
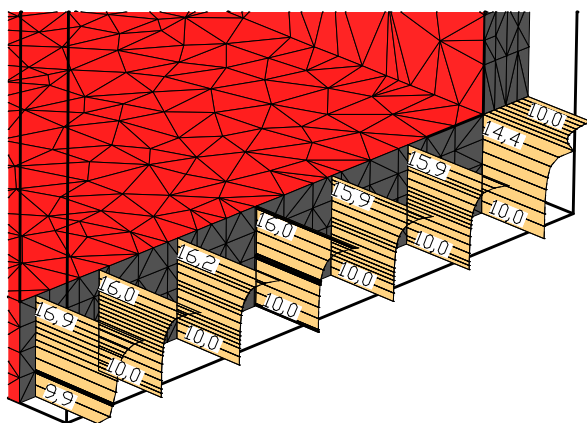
**Randbedingungen**

Volumenoberfläche	Temperatur	Emissivität [-]	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²·K)]
1 - Luftseite	Temperaturkurve	0,7	25
2 - Außenseite	10 °C konstant	0	1000
3 - Boden	10 °C konstant	0	1000

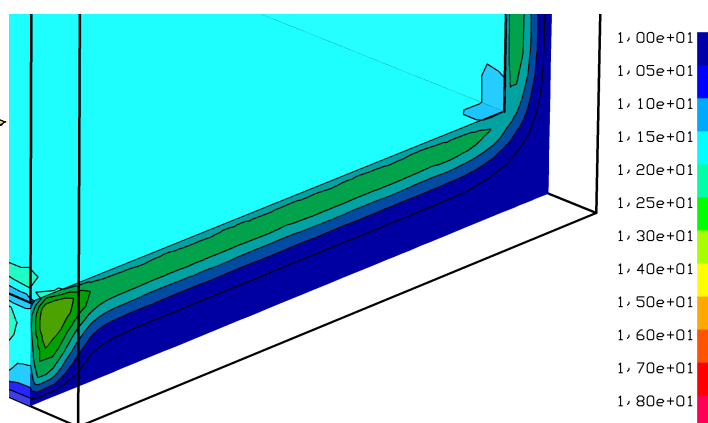
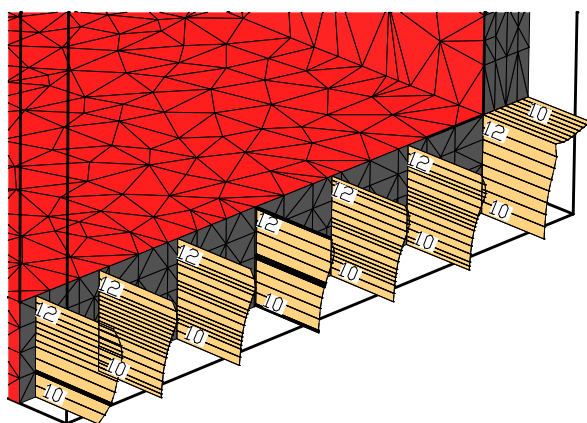
Temperaturkurve 1 - Tagestemperatur 0 bis 20 C°



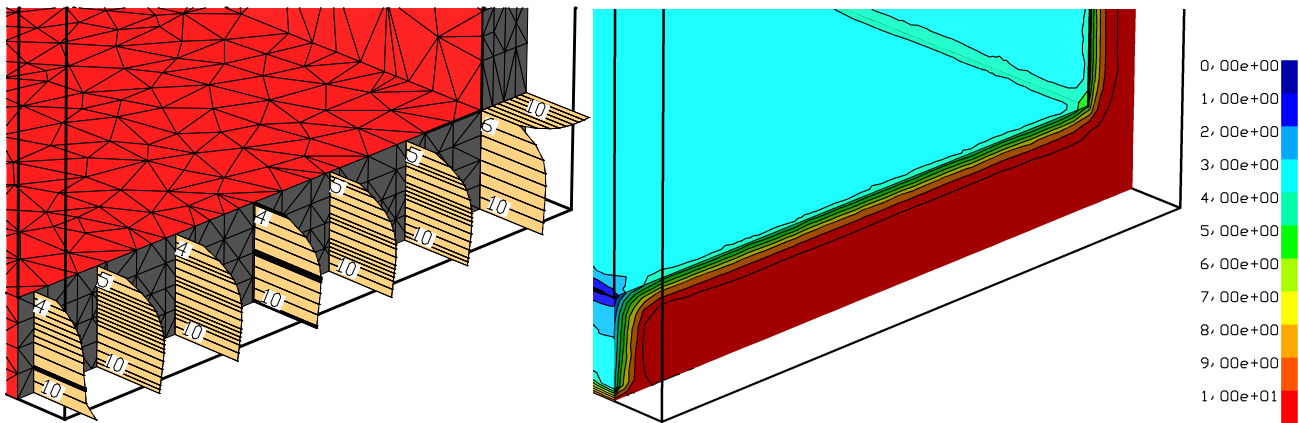
Pkt.	t [min]	T [°C]
1	0	10
2	240	18,6603
3	300	19,6593
4	360	20
5	420	19,6593
6	480	18,6603
7	960	1,33975
8	1020	0,340742
9	1080	0
10	1140	0,340742
11	1200	1,33975
12	1440	10



Temperaturverlauf [°C] nach 6 Stunden an der Schnittfläche zwischen Wand und Bodenplatte

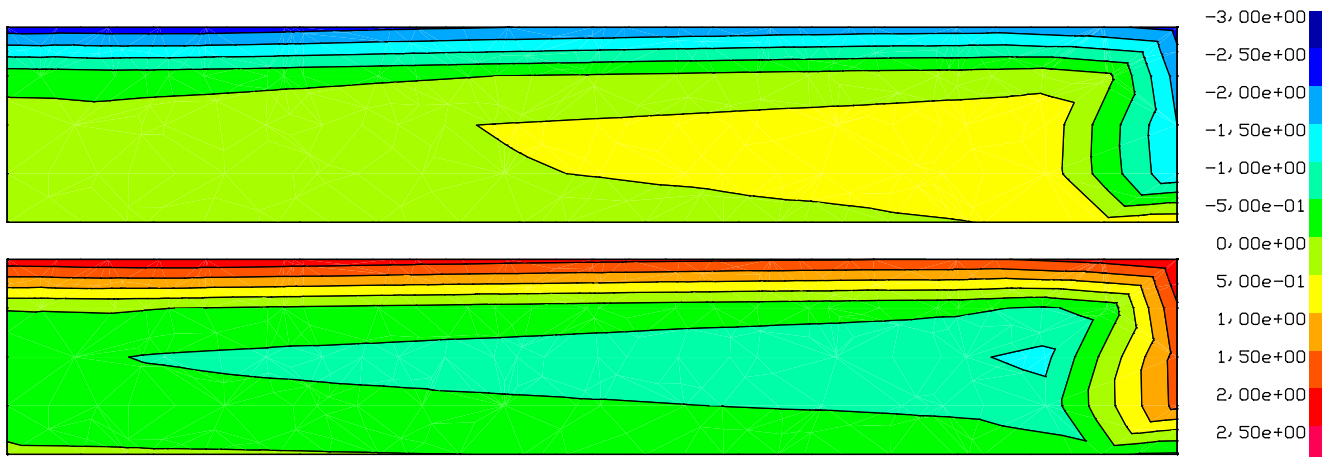
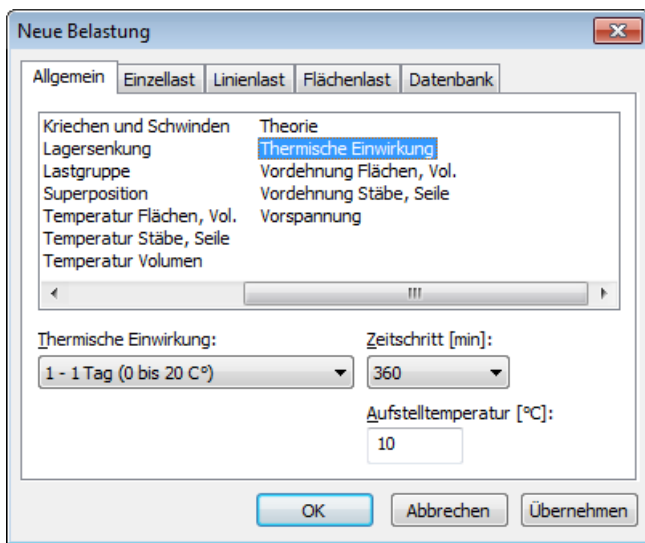


Temperaturverlauf [°C] nach 12 Stunden an der Schnittfläche zwischen Wand und Bodenplatte



Temperaturverlauf [°C] nach 18 Stunden an der Schnittfläche zwischen Wand und Bodenplatte

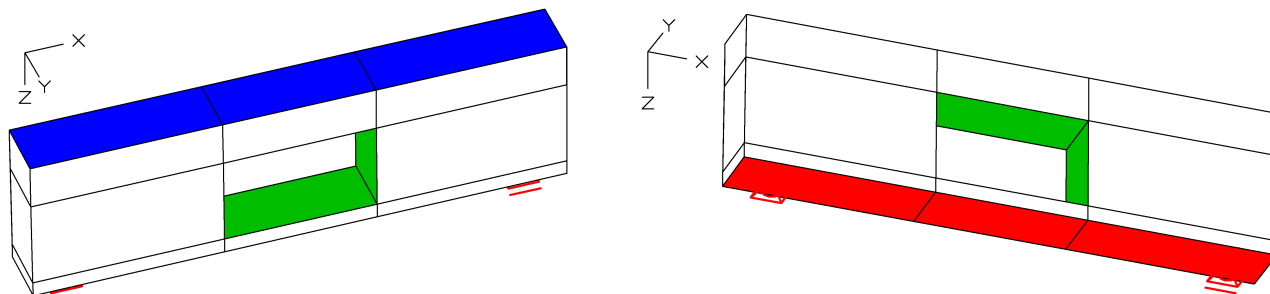
Die Spannungen wurden bei maximaler und minimaler Lufttemperatur (6/18 h) berechnet. Es wurde eine Aufstelltemperatur von 10 °C vorausgesetzt.



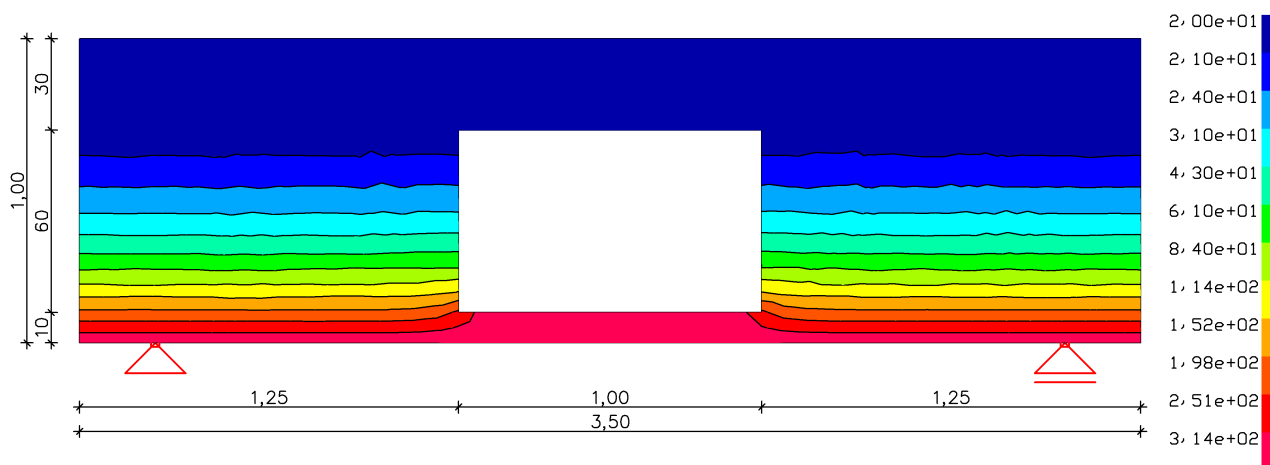
Spannungen [MN/m<sup>2</sup>] nach 6 und 18 Stunden senkrecht zur Schnittfläche in der Mitte der Bodenplatte

## Vergleichsberechnung mit und ohne Strahlung

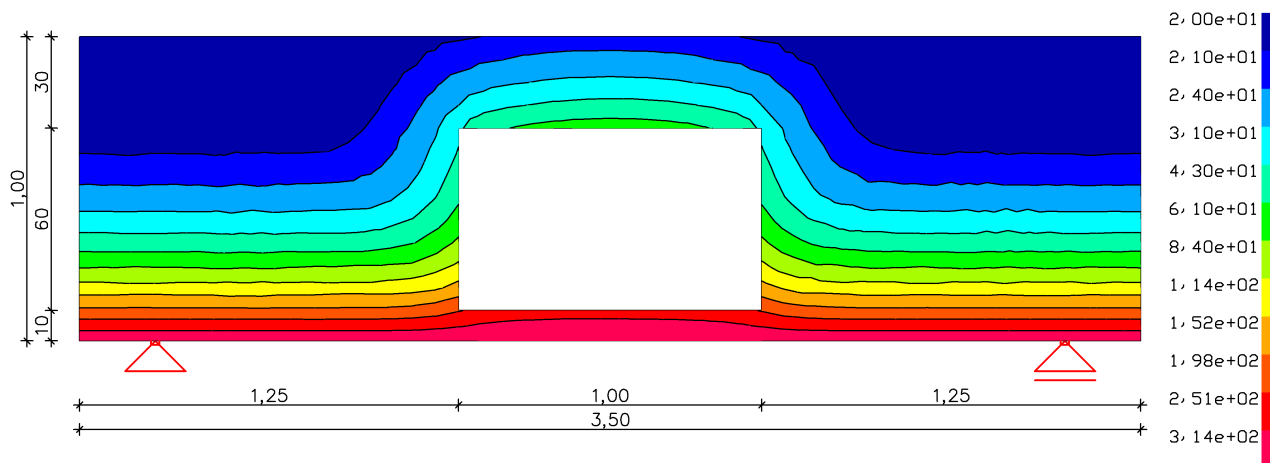
Dieses Beispiel verdeutlicht den Einfluss der inneren Strahlung auf die Temperaturverteilung. Der abgebildete 40 cm dicke Betonkörper zeigt nach 10-stündiger Temperatureinwirkung strahlungsabhängig deutlich unterschiedliche Temperaturverteilungen. Die Strahlung wirkt an den vier Innenflächen der Öffnung. Alle definierten Oberflächen weisen eine Emissivität von 0,7 auf. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt 25 W/(m<sup>2</sup>·K). Die Oberflächen, denen keine Randbedingung zugewiesen wurde (weiß), verhalten sich adiabatisch.



Volumenmodell mit den Oberflächen 1. Temperatur konstant 400 °C (rot); 2. Strahlung (grün); 3. Außenfläche 20 °C (blau)



Temperatur  $T$  [K] ohne innere Strahlung (adiabatisch) nach 10 h



Temperatur  $T$  [K] mit innerer Strahlung nach 10 h

## Stationäre Temperaturverteilung

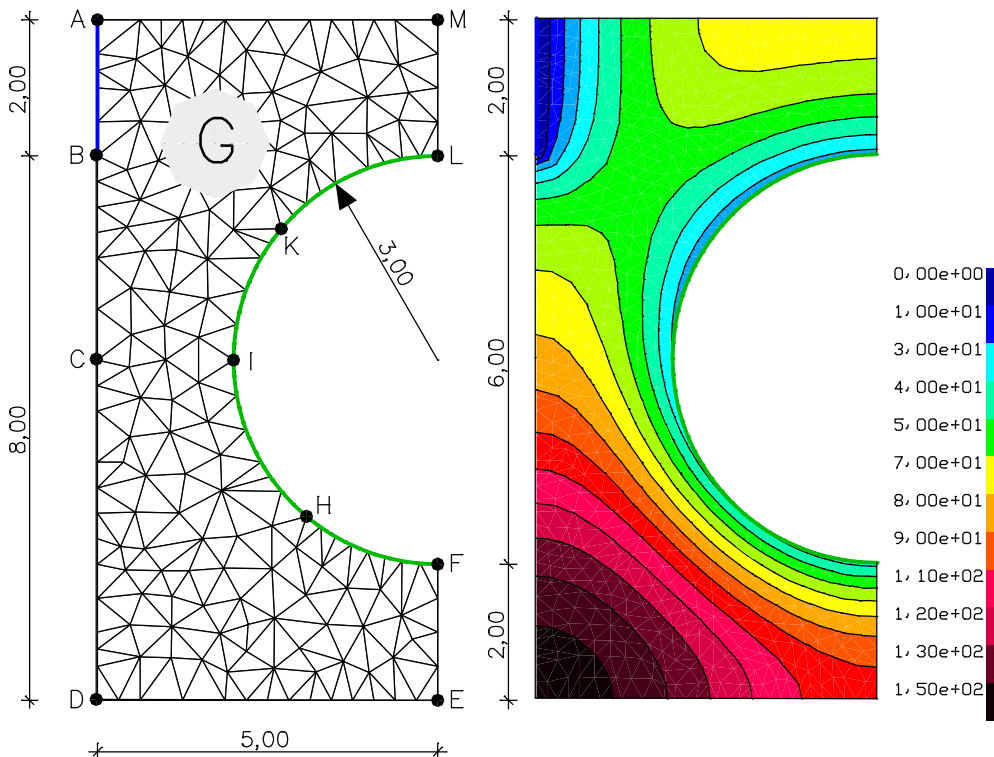
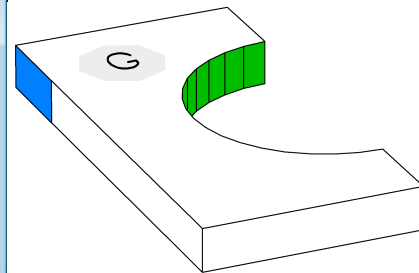
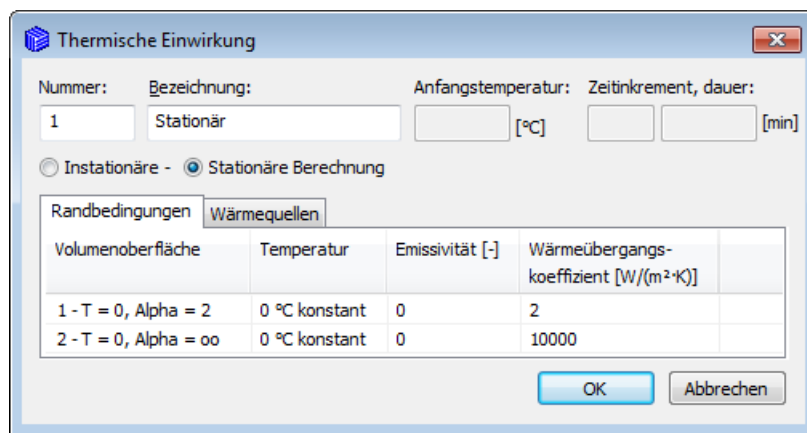
Im folgenden wird eine stationäre Temperaturverteilung unter Berücksichtigung einer Wärmequelle berechnet. Das Beispiel wurde dem Lehrbuch *Methode der finiten Elemente*, Schwarz (1984) S. 285 entnommen.

### Aufgabenstellung

- Wärmequelle  $\dot{q} = 20 \text{ W/m}^3$  in G
- $T = 0 \text{ °C}$  auf AB
- Adiabatische Oberfläche bei BD, DE, EF, LM, MA
- Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha = 2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ,  $T = 0 \text{ °C}$  auf FHIKL
- Leitfähigkeit  $1,0 \text{ W/(m K)}$

### Volumenoberflächen

	Nummer	Bezeichnung	Farbe	Bet- tung	Slave von	Faktor Kontakt- steifigkeit	Reibungs- koeffizient	Einfluß- radius [m]
1	1	T = 0, Alpha = 2	■					
2	2	T = 0, Alpha = ∞	■					



Elementnetz, Abmessungen [m] und Temperaturverteilung [K]

## Literaturhinweise

- DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- DIN EN 1993-1-2/NA:2010-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- DIN EN 1995-1-2/NA:2010-12  
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EBA-Richtlinie  
Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln.  
Herausgeber: Eisenbahnbundesamt. Stand: 1.7.2008.
- EN 1991-1-2:2010  
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1992-1-2:2004/AC:2008  
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. Beuth Verlag, Berlin 2008.
- EN 1993-1-2:2005/AC:2009  
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. Beuth Verlag, Berlin 2009.
- EN 1994-1-2:2005/AC:2008  
Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- EN 1995-1-2:2010  
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall.  
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- Lienhard IV, J.H.; Lienhard V, J.H.  
A Heat Transfer Textbook.  
Phlogiston Press, Cambridge (Massachusetts) 2008.
- Hosser, D. (Hrsg.)  
Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdB TB 04/01.  
Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdB), Altenberge 2006.
- Schwarz, H. R.  
Methode der finiten Elemente.  
Teubner Studienbücher. Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
- Zehfuß, J.  
Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung (Dissertation).  
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2004.
- ZTV-ING  
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 – Tunnelbau.  
Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Stand: 3/2012.





## Stichwortverzeichnis

### 2

2D Solid 45

### 3

3D-Darstellung 41

### 6

64-Bit Edition 79

## A

Abhängiger Knoten 109, 179, 212, 244

Aktualisierung 13

Ändern 38

Anforderungsklasse 391, 540

Animierte Ergebnisse 139, 190, 223, 252

Ankerschlupf 264, 268, 269

Anpassen von Elementen 108, 243

Anpassen von Stäben 178, 212

Ansicht 41

Anspannen 264, 269, 270

Antwortspektrum 666, 676

    Alternativ 673, 679, 685

    DIN 4149 668, 669, 677, 678, 694, 697

    EN 1998-1 670, 678, 695

    ÖNORM B 4015 671, 678

    SIA 261 672, 679

    Statische Ersatzlast 115, 679

Anwenderdatenbank (Anwend.pro) 13, 92, 95, 166, 201

Archivieren 63

Arithmetik 20

Auflagerreaktionen 83, 145, 235

Aufnehmbare Belastung 566

Ausfall Zugbettung

    Grundlagen 68, 234

    Lastgruppe 122, 183, 217, 249

Ausnutzungsgrad der Bewehrung 567

Ausrichten 113, 178, 213

Ausschneiden 34

Außergewöhnliche Bemessungssituationen 294, 357, 403, 476, 557, 610, 641

Aussparung 51

Auswahl anzeigen 19, 43

AutoCAD Austauschdateien (\*.dxf) 28

Automatisches Speichern 63

## B

Baugrundmodelle 68

Bauzustand 21, 158

Bearbeiten 33

Beispiel

Abgespannter Mast 707

Bauzustände, Kriechumlagerungen 158

Biegedrillknicken eines Schalenmodells 154

Biegedrillknicknachweis Rahmenstiel mit zweiachsiger Biegung und Normalkraft 628

Biegedrillknicknachweis Zweigelenkrahmen 625

Brandfall an einem Stahlrahmen 753

Brandfall an einem Verbundträger 754

Brandfall an einer Giebelstütze einer Halle 752

Brandfall in einem Tunnelrahmen 755

Brückenwiderlager DIN-Fachbericht 443

Brückenwiderlager EN 1992-2 518

Dreigelenkrahmen unter Normaltemperatur und im Brandfall 654

Dynamische Zugüberfahrt 709

Einflusslinien 230

Einzelbemessung nach SIA 262 382

Einzelbemessung Spannbeton nach EN 1992-1-1 338

Einzelbemessung Spannbeton nach Nachrechnungsrichtlinie 595

Einzelbemessung Stahlbeton nach EN 1992-1-1 337

Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau DIN-Fachbericht 433

Eisenbahnüberführung mit Spannbetonüberbau EN 1992-2 508

Erdbebennachweis nach DIN 4149:2005 697

Exzentrisch angeschlossene Träger 110

Faulbehälter 257

Gekoppelter Zweimassenschwinger 686

Hochbaudeckenplatte unter Brandeinwirkung 757

Holznachweise an einer Gelenkpfette EN 1995-1-1 651

Instationärer Temperaturverlauf in einer Winkelstützmauer 770

Knickeigenformen einer Stütze 152

Lastfallkombination an einem Mehrfeldträger 261

Lastfallkombination bei einer Deckenplatte 262

Maschinenfundament 704

Naturzugkühlturm mit Eigenform 696

Nichtlineare Vergleichsberechnung einer Stahlbetonplatte 729

Nichtlineare Vergleichsberechnung eines Stahlbetonrahmens 730

Platte mit Mindlin-Reissner Elementen 151

Platte mit Unterzug nach EN 1992-1-1 320

Platte mit Unterzug nach SIA 262 368

Seilnetz 160

Silogründung 156

Spannbetonbrücke mit Hohlkasten Nachrechnungsrichtlinie 585

Stahlbetonrahmen 228

Stahlhalle nach Theorie 2. Ordnung 195

Stahlnachweise am Gesamtsystem EN 1993-1-1 619

Stationäre Temperaturverteilung 774

Straßenbrücke in Massivbauweise DIN-Fachbericht 424

Straßenbrücke in Massivbauweise EN 1992-2 499

Beispiel

- Substrukturtechnik 161
- Torsionsbalken nach EN 1992-1-1 336
- Torsionsbalken nach SIA 262 380
- Verformungsberechnung einer Hochbaudeckenplatte 732
- Vergleichsrechnung mit und ohne Strahlung 773
- Vorgespannte Dachkonstruktion nach EN 1992-1-1 326
- Vorgespannte Dachkonstruktion nach SIA 262 373
- Wasserbehälter 256

Belastung 115, 180, 214, 245

Belastungsvektor 662

Bemaßung 58

Bemessung

- DIN EN 1992-1-1 275
- DIN EN 1992-2 454
- DIN EN 1993-1-1 601
- DIN EN 1995-1-1 635
- DIN FB 102 404, 406, 409
- EN 1992-1-1 275, 296, 298, 301
- EN 1992-2 454, 477, 479, 482
- EN 1993-1-1 601
- EN 1995-1-1 635
- Nachrechnungsrichtlinie 558, 560, 563, 564
- ÖNORM EN 1992-1-1 275
- ÖNORM EN 1992-2 454
- ÖNORM EN 1993-1-1 601
- ÖNORM EN 1995-1-1 635
- SIA 262 342, 358, 360
- SS EN 1992-1-1 275
- SS EN 1993-1-1 601
- SS EN 1995-1-1 635

Bemessungsgruppe 276, 342, 602, 635

Bemessungsmodus 280, 346, 392, 462, 541, 542

Bemessungsnormen 13, 61

Bemessungsobjekte 132, 133, 134

Bemessungssituationen

- DIN FB 102 388
- EN 1992-1-1 276
- EN 1992-2 457
- EN 1993-1-1 602
- EN 1995-1-1 635
- Nachrechnungsrichtlinie 536
- SIA 262 342

Benutzerkonfiguration 13

Berechnung 135, 187, 220, 250

Berechnungsergebnisse 80, 234

Berechnungsmethode 64, 232

Berechnungsort 136

Berechnungstheorie 118, 182, 216, 248

Beschleunigungen 83

Besondere Kombination 610, 642

Beton 92, 166, 201, 237

Betonalter 284, 396, 466, 547

Betondruckspannungen

- DIN FB 102 395, 414
- EN 1992-1-1 283, 310
- EN 1992-2 465, 487
- Nachrechnungsrichtlinie 545, 574
- SIA 262 348, 364

Betonkriechen 122, 183, 217, 721

Betonquerschnitt 263

Betonstahl 95, 96, 101, 240

Betonstahlspannungen

- DIN FB 102 414
- EN 1992-1-1 283, 311
- EN 1992-2 465, 488
- Nachrechnungsrichtlinie 574

Bettungskräfte 83

Bettungsmodul 101, 173, 208, 240

Bettungsmodulverfahren 68, 234

Bewegen 35

Bewegungsgleichungen 662

Bewehrung 318, 366, 422, 497, 583

Bewehrung exportieren 150

Bewehrungserhöhung 721

Bewehrungssystem 67, 104

Bezogener Knoten 109, 179, 212, 244

Bezugspunkt 59

Bibliothek der Stahlbauprofile 92, 166, 201

Biegebemessung 296, 358, 404, 477, 558

Biegebewehrung 318, 366, 422, 497, 583

Biegedrillknicken eines Schalenmodells 154

Biegedrillknicknachweis

- EN 1993-1-1 601

Bild erzeugen 21

Bildausschnitt 26

BIM-Daten 28

Blattnummer 25

Bodenbeschleunigungen 666, 677

Bodenpressungen 83, 235

Bodenschichten 113

Bogen 38, 45

Brandeinwirkungen 638

Brandfall 122, 183, 216, 736, 744, 747

Brandversuche 752

Brückennachweise 384, 454, 529

Brückenquerrichtung 415, 489, 576

Bügelbewehrung 318, 366, 422, 497, 583

**C**

Charakteristische Situationen 309, 413, 486, 573, 617, 650

**D**

Dämpfung 111, 664, 682, 684

Darstellung 102, 174, 208, 241

- Dateiservice 33
- Datenaustausch 27, 28, 150
- Datenbank 131
- Datenbankquerschnitt 92, 95, 166, 201
- Deformationen 80, 234
- Dehnungen 82
- Dehnungsbereiche 296, 404, 477, 558
- Deinstallation 14
- Dekompression 311, 415, 488, 575
- Demarkieren 35
- Deviationsmoment 611, 642
- DIN 1072 533
- DIN 4149 668, 669, 677, 678, 694, 697
- DIN EN 1992-1-1 275
- DIN EN 1992-2 454
- DIN EN 1993-1-1 601
- DIN EN 1995-1-1 635
- DIN 1045 11
- DIN 1045-1 11
- DIN 1052 11
- DIN 18800 11
- DIN 4227 11
- DIN-Fachbericht 384
- Direkte Zeitschrittintegration 665, 676
- Distanz messen 61
- Downloads 63
- Drehbettung 609
- Drillweich 94
- Drucken 25, 26
- Druckgliedbemessung
  - DIN FB 102 392, 404
  - EN 1992-1-1 280, 296
  - EN 1992-2 462, 477
  - Nachrechnungsrichtlinie 541, 542, 558
  - SIA 262 346, 358
- Druckliste 26
- Druckstab 97, 171, 206
- DSTV Schnittstellendateien (\*.stp) 27
- Durchdringung 54, 56
- Durchstanznachweis 150
  - DIN FB 102 410
  - EN 1992-1-1 290, 303
  - EN 1992-2 483
  - SIA 262 353, 360
- DXF-Format 28
- Dynamik 662
  - Berechnungseinstellungen 676
  - Lastfälle 680
- Dynamischer Elementkollaps 121
- E**
- EC2 275
- EC3 601
- EC5 635
- EC8 670
- Effektive Zugzone Ac,eff
  - DIN FB 102 416, 417, 419, 420
  - EN 1992-1-1 312, 314, 315
  - EN 1992-2 489, 491, 493
  - Nachrechnungsrichtlinie 576, 578, 580
  - SIA 262 365
- EG vermindern 94
- Eigendämpfung 682
- Eigenform 84, 686
- Eigenlast 116, 180, 214, 245
- Eigenwerte 71, 84, 117, 676, 677, 686
- Einflussfläche 84, 116
- Einflusslinie 84, 117, 181, 215
- Einfügen 34
- Einfügen von Lastdaten 117, 181, 215, 245
- Eingabedaten drucken 85, 165, 200, 236
- Einheit 20
- Einheitsschubspannungen 612, 643
- Einheits-Temperaturzeitkurve 744
- Einheitsverwölbung 95, 612, 643
- Einstellungen
  - DIN FB 102 399
  - Dynamik 676
  - EN 1992-1-1 288
  - EN 1992-2 471
  - EN 1993-1-1 604
  - EN 1995-1-1 640
  - Lastfallkombination 260
  - Nachrechnungsrichtlinie 551
  - Nichtlineare Systemanalyse 136, 187, 221
  - SIA 262 351
  - Statik 136, 187, 221, 250
- Einwirkungen
  - DIN FB 101 387, 388, 390
  - EN 1992-1-1 276, 277
  - EN 1992-2 457, 458, 460
  - EN 1993-1-1 602, 603
  - EN 1995-1-1 635, 637
  - Lastfallkombination 259
  - Nachrechnungsrichtlinie 536, 537, 538
  - SIA 262 342, 344
  - Vorspannung 264
- Einwirkungen infolge Erdbeben 674
- Einzelbemessung 135, 187, 220
  - EN 1992-1-1 289, 337, 338
  - EN 1992-2 472
  - Nachrechnungsrichtlinie 553, 595
  - SIA 262 352, 382
- Einzeldämpfer 111, 684
- Einzellast
  - Elementlast 124, 184, 218, 246

- Einzellast
  - Freie Einzellast 124
  - Knotenlast 124, 185, 218, 246
  - Volleinspannkkräfte 125, 186, 220, 249
- Einzelmoment 124, 184
- Einzelplatzlizenz 12
- Elastizitätstheorie 2. Ordnung
  - Eingaben 118, 122, 182, 183, 216, 217
  - EN 1993-1-1 Bemessungswerte 610
  - EN 1995-1-1 Bemessungswerte 642
  - Grundlagen 69
- Elementart 65, 91
- Elementdicke 94
- Elemente ausrichten 113
- Elemente suchen 108, 243
- Elementeigenschaften 91, 166, 201, 237
- Elementeingabe 90, 165, 200, 236
- Elementinformationen 102, 173, 208, 240
- Elementnummern 102, 105, 241, 242
- Elementsystem 67, 104, 175, 210, 242
- EMF-Datei erzeugen 26
- Emissivität 737, 762
- E-Modul 98, 172, 206, 239
- EN 1990 294, 309, 476, 486, 610, 641, 747
- EN 1991-2 455
- EN 1992-1-1 275
- EN 1992-1-2 736, 747
- EN 1992-2 454
- EN 1993-1-1 601
- EN 1993-1-2 736, 747
- EN 1995-1-1 635
- EN 1995-1-2 736, 747
- EN 1998-1 670, 678, 695
- Endpunkt ändern 38
- Erdbeben 666, 697
- Erdbeben Bemessungssituationen 294, 357, 403, 476, 557, 610, 641
- Erdbebenersatzlasten 115, 679
- Ergebnisdiagramm 147
- Ergebniskategorien 139, 190, 223, 252
- Ergebnisliste 149, 194, 227, 255
- Ergebnisse
  - Animierte 139, 190, 223, 252
  - Brandfall 147, 746, 751
  - Darstellung 138, 189, 222, 223, 251, 252
  - DIN FB 101 und 102 422
  - Dynamik 147
  - EN 1992-1-1 318
  - EN 1992-2 497
  - EN 1993-1-1 618
  - EN 1995-1-1 650
  - Farbig 140
  - Finite Element 80
  - Höhenlinien 141
  - Isoflächen 140
  - Kategorien 139, 190, 223, 252
  - Kombinationsinfo 149, 194, 227, 255
  - Lagerlinien 145
  - Lastfallkombination 260
  - Leiste 138, 189, 223, 252
  - Letzte Kombination 149, 194, 227, 255
  - Liste 149, 194, 227, 255
  - Löschen 33
  - Marker 138, 189, 223, 252
  - Nachrechnungsrichtlinie 583
  - Numerisch 142, 191, 224, 253
  - Querschnittsspannungen 147, 192, 225
  - Rotationsschale 234
  - Schnitt 143
  - SIA 262 366
  - Tabelle 138, 189, 222, 251
  - Vektoriell 144
  - Verformungsfigur 139, 190, 224, 253
  - Volumenschnitt 144
  - Zustandslinien 146, 191, 224, 254
- Ermüdung
  - DIN FB 102 387, 397, 403, 410
  - EN 1990 294, 476
  - EN 1992-1-1 276, 286, 294, 307
  - EN 1992-2 457, 468, 476, 483
  - Nachrechnungsrichtlinie 536, 549, 557, 568
  - SIA 262 350
- Ermüdungslastmodell 3 535
- Erregerfrequenzbereich 685
- Erregungsspektrum 685
- Ersatzstab
  - EN 1993-1-1 605
  - EN 1995-1-1 639, 649
- Eurocode 0 275, 454, 601, 635, 747
- Eurocode 1 275, 454, 601, 635
- Eurocode 2 275, 454, 736
- Eurocode 3 601, 736
- Eurocode 4 736
- Eurocode 5 635, 736
- Eurocode 8 662
- Export
  - Biegebewehrung 150
  - Bildausschnitt 34
  - DXF-Datei 27, 28
  - ICX-Datei 27
  - IFC-Datei 27, 28
  - Projektdatei 27
  - Stahlbau nach DSTV 27
  - Tabellen und Protokolle 19
- Externe Vorspannung 292, 356, 400, 473, 554
- Exzentrisch angeschlossene Träger 110

**F**

Fachbericht 384  
 Fachwerkstab 90, 91, 166  
 Fangmodi 59, 60  
 Fangradius 60  
 Farbdarstellung 25, 140, 144  
 Farbe 37, 52, 54  
 Farbfläche 45  
 Färbung 102, 174, 208, 241  
 Federelemente 68, 81, 111  
 Fehlerschranke 122, 183, 217, 249  
 Fenster 18, 20, 42  
 Festhaltungen
 

- Auflagerreaktionen 83, 145, 235
- Eingabe 106, 176, 210, 242
- Koordinatensysteme 68, 106, 199, 233
- Lagerlinien 145
- Symbole 102, 174, 208, 241

 Fläche berechnen 61  
 Flächenelement 65, 67, 81  
 Flächenlast
 

- Flächenelement-Last 127
- Flächenlast auf Stäbe 131
- Flüssigkeitsdruck 130
- Gebietslast 128
- Gleichlast auf Modellflächen 130
- n-Eck 129
- Rechteck 129

 Flächenlast auf Stäbe 131  
 Flächenquerschnitt 94  
 Fließbedingung 721, 722, 726, 727  
 Flüssigkeitsdruck 130, 246  
 Formatierungen von Text und Tabelle 60  
 Freier Stab 52  
 Freiheitsgrade 65, 109, 179, 212, 244  
 Fugenkoppelung 109, 110  
 Funktionen 20

**G**

Gebietslast 128  
 Gebrauchstauglichkeitsnachweis
 

- DIN FB 391, 413
- EN 1990 309, 486
- EN 1992-1-1 279, 309
- EN 1992-2 461, 486
- EN 1993-1-1 617
- EN 1995-1-1 650
- Nachrechnungsrichtlinie 540, 573
- Nichtlineare Systemanalyse 713, 728
- SIA 262 345, 364

 Gelenke 91, 166, 201, 237  
 Gelenkige Koppelung 109, 179, 212, 244

**Generieren 36**

- Elemente 86, 236
- Lastfälle 115, 180, 214, 245
- Stäbe 90, 165, 200

 Geschwindigkeiten 83  
 Gleichungslöser 136  
 G-Modul 98, 172, 206  
 Graphikansicht 18  
 Grauwerte 25  
 Grenzbiegemomente 615  
 Grenzdehnung 296, 404, 477, 558, 720  
 Große Symbole 61  
 Grundbewehrung 101, 142, 191, 224, 240, 253  
 Gruppe markieren 35
**H**

Hardlock 12  
 Häufige Situationen 309, 364, 413, 486, 573, 617, 650  
 Hauptdruckspannungen 409, 464, 482, 564, 566  
 Hauptzugspannungen 420, 494, 581  
 HEA-, HEB-, HEM-Träger 92, 166, 201  
 Hilfethemen 63  
 Höhenlinien 141  
 Holz 92, 166, 201, 237  
 Holznachweise
 

- EN 1995-1-1 646, 647, 648, 649

 Huber-v.Mises-Fließbedingung 82, 722, 727  
 Hüllrohrdurchmesser 268

**I**

ICE 121  
 ICX-Format 27  
 Ideales Biegedrillknickmoment 615  
 IFC-Datenaustausch 28  
 lgraph.dat 13  
 Image 44  
 Import
 

- Auflagerreaktionen 115
- DXF-Datei 27, 28
- ICX-Datei 27
- IFC-Datei 27, 28
- Projektdatei 27
- Stahlbau nach DSTV 27

 Info über InfoCAD 63  
 InfoGraph Schnittstellendateien (\*.icx) 27  
 InfoMonitor 14  
 Innerer Hebelarm
 

- DIN FB 102 394, 405, 406
- EN 1992-1-1 282, 297, 298
- EN 1992-2 464, 478, 479
- Nachrechnungsrichtlinie 544, 559, 560
- SIA 262 358, 364

 Installation 12

Instationärer Last-Zeit-Verlauf 683, 693  
 Integrationsschema 663  
 Interne Vorspannung 292, 356, 400, 473, 554  
 IPE-Träger 92, 166, 201  
 Isoflächendarstellung 140  
 Iterativer Gleichungslöser 76, 136, 728  
 I-Träger 92, 166, 201

## J

Jacobi-Matrix singularär 664

## K

Kapazitätsgrenze 79  
 Kartesische Koordinaten 20  
 Kastenquerschnitt 282, 391, 394, 464, 544  
 Kegel 56  
 Kernquerschnitt 282, 347, 394, 464, 544  
 Kirchhoff 65  
 Knickeigenformen 71, 84, 152  
 Knickeigenwerte 117, 122  
 Knicklängen 84, 152  
 Knicknachweis 640, 649  
 Knoten bewegen 107, 177, 211, 243  
 Knoten suchen 108, 177, 212, 243  
 Knotenbeschleunigungen 680, 681  
 Knotenlast 124, 185, 218, 246  
 Knotenmassen 680, 681  
 Knotennummer  
     Darstellen 102, 174, 208, 241  
     Sortieren 105, 175, 210, 242  
 Knotenverformungen 80, 234  
 Kollapszeitpunkt 121  
 Kombinationsbeiwerte 390, 460, 538  
 Kombinationsinfo 149, 194, 227, 255  
 Kombinationsvorschriften  
     Antwortspektrumverfahren 673  
     DIN FB 101 403, 413  
     EN 1990 294, 309, 476, 486  
     EN 1992-1-1 294, 309  
     EN 1992-2 476, 486  
     EN 1993-1-1 610, 617  
     EN 1995-1-1 641, 650  
     Lastfallkombination 259  
     Nachrechnungsrichtlinie 557, 568, 573  
     SIA 262 357, 364  
 Kondensationsprozess 77  
 Kontakt 72  
 Kontur 54, 103  
 Konvektion 737, 762  
 Koordinatenanzeige 61  
 Koordinateneingabe 18, 20, 59  
 Koordinatensysteme  
     Ändern 104, 175, 210, 242

Darstellen 102, 174, 208, 241  
 EN 1993-1-1 611  
 EN 1995-1-1 642  
 Grundlagen 66, 199, 233  
 Kopieren 34  
 Kopieren direkt 36  
 Koppelungen 109, 179, 212, 244  
 Kreis 38, 45  
 Kreisring 88  
 Kriechen (nichtlinear) 122, 183, 217, 721  
 Kriechen und Schwinden  
     DIN FB 102 387, 401  
     EN 1992-1-1 276, 293  
     EN 1992-2 457, 474, 478  
     Grundlagen 263, 264  
     Lastfall 118  
     Materialkennwerte 100  
     Nachrechnungsrichtlinie 536, 555  
     SIA 262 356  
 Kriechumlagerungen 158  
 Krümmungsradius 273  
 Kundennummer 63

## L

Lagerlinien 145  
 Lagersenkung 118, 181, 215, 247  
 Laminatquerschnitt 75, 97  
 Länge ändern 38  
 Längsspannung 611, 642  
 Längungen (Spannstrang) 273  
 Lastarten 116, 180, 214, 245  
 Lastfall 115, 180, 214, 245  
 Lastfallauswahl 136, 187, 221, 250  
 Lastfälle generieren 115, 180, 214, 245  
 Lastfallkombination 259, 260  
 Lastfrequenz 680  
 Lastgruppe 122, 183, 217, 249  
 Lastmodell 1 385, 455, 530  
 Lastvektor 662  
 Last-Zeit-Verlauf 680  
     Instationär 683, 693  
     Knotenbezogen 683  
     Konstant 691  
     Periodisch 688, 690  
 Layer 37, 52, 54  
 Layout-Ansicht 43  
 Lehr'sches Dämpfungsmaß 664, 666, 668, 671, 682  
 Letzte Kombination 149, 194, 227, 255  
 Linie 44  
 Linienbreite 25, 38  
 Liniengelenke 54, 112  
 Linienlager 106  
 Linienlast 185, 219

- Linienlast 185, 219  
     Freie Linienlast - global 125  
     Freie Linienlast - lokal 125, 126  
     Seillast 126  
     Stablast 126  
     Trapezlast 126  
 Linienmoment 127  
 Linientorsionsmoment 185  
 Linientyp 38  
 Liste von Objekteigenschaften 61  
 Literaturhinweise 162, 340, 383, 452, 527, 598, 633, 660, 712, 735, 759, 775  
 Lizenzierung 12  
 Lizenzinformationen 63  
 Lizenzmanager 14  
 Loch 51  
 Lokale Systeme 104  
 Löschen 34  
 Löschen (Ergebnisse) 33
- M**
- Markieren 18, 19, 34, 35  
 Markierte Elemente 135, 187, 220, 250  
 Maschinenfundament 704  
 Massen 677, 680, 681  
 Maßlinie 58  
 Material 98, 172, 206, 239  
 Mauszeiger 18  
 Menü  
     Ansicht 40  
     Bearbeiten 33  
     Berechnung 135, 187, 220, 250  
     Datei 21  
     Extras 61  
     Fangen 59  
     Format 60  
     Hilfe 63  
     Tragwerk 85, 165, 200, 236  
     Zeichnen 44  
 Mindestbewehrung  
     DIN FB 102 396, 405, 416, 419  
     EN 1992-1-1 284, 297, 312, 315  
     EN 1992-2 466, 478, 489, 493  
     Nachrechnungsrichtlinie 547, 559, 576, 580  
     SIA 262 349, 364, 365  
 Mindestoberflächenbewehrung 298, 405, 478, 560  
 Mindlin-Reissner 65, 151  
 Mischbauweise 292, 356, 400, 473, 554  
 Mitwirkende Breite 95, 169, 204  
 Modale Analyse 664  
 Modale Dämpfung 664  
 Modale Masse 666  
 Modale Zeitschrittintegration 676
- Modell 44, 51  
 Modellfläche 54  
 Modellflächenkontur 54  
 Modifikationsbeiwert 643
- N**
- Nachlassen 264, 269  
 Nachrechnungsrichtlinie 384, 385, 390, 392, 396, 398, 403, 529, 530, 538, 541, 542, 547, 550, 557  
 Nachweiskombinationen  
     DIN FB 101 403, 413  
     EN 1990 294, 309, 476, 486  
     EN 1992-1-1 294, 309  
     EN 1992-2 476, 486  
     EN 1993-1-1 610  
     EN 1995-1-1 641  
     Nachrechnungsrichtlinie 557, 568, 573  
     SIA 262 357  
 Nachweisstufe 551  
 Netzgenerierer 86  
     Dreieckiges Gebiet 88  
     Formtreu 87  
     Kreis- oder Kegelform 88  
     NURBS 46  
     Parabolisch berandetes Viereck 88  
     Polygonales Gebiet 87  
     Rasterförmig 87  
     Tetraeder aus Volumen 89  
     Viereck - Raster auf vier Seiten 89  
     Viereck - variables Raster auf zwei Seiten 89  
     Viereck oder Quader 89  
 Netzprüfung 103, 175, 209, 242  
 Netzwerkconfiguration 14  
 Netzwerklizenz 12  
 Neuigkeiten 63  
 Neuzeichnen 41  
 Newmark (Integrationsschema) 663  
 Newton-Raphson-Methode 713, 728  
 Nicht häufige Situationen 413, 573  
 Nichtlineare Iteration 69  
 Nichtlineare Systemanalyse  
     Anwendungsbereich 713  
     Berechnungsverfahren 713  
     Betonkriechen 721  
     Einstellungen 728  
     Finite Stabelemente 714  
     Flächenelemente 723, 726  
     Konvergenzverhalten 728  
     Lastgruppe 122, 183, 217  
     Querschnittsanalyse 715  
     Stäbe aus freiem Material 722  
     Stäbe aus Stahl 721  
     Stäbe aus Stahlbeton 715, 716, 718, 720, 721

Nichtlineare Systemanalyse  
 Volumenelemente 727  
 Numerische Darstellung 142, 191, 224, 253  
 Nummern 102, 174, 208, 241  
 Nummern sortieren 105, 175, 210, 242  
 NURBS 46  
 Nutzhöhe  
 Flächenelemente 280, 346, 392, 462, 541, 542  
 Stäbe 282, 347, 394, 464, 544

## O

OMP\_NUM\_THREADS 76  
 ÖNORM B 4015 671, 678  
 ÖNORM EN 1992-1-1 275  
 ÖNORM EN 1992-2 454  
 ÖNORM EN 1993-1-1 601  
 ÖNORM EN 1995-1-1 635  
 ÖNORM B 4700 11  
 ÖNORM B 4750 11  
 OpenMP-Standard 76  
 Orthogonal Modus 60  
 Orthotropie 94

## P

Packen der Projektdatei 33  
 Parallele 36  
 Paralleler Sparse Solver 76, 136  
 Parallelperspektive 42  
 Patch Test 65  
 Phasenverschiebung 84  
 Plastische Ausnutzung 614  
 Plastische Grenzschnittgrößen 614  
 Plattenbalken 114  
 Plattenelement 65  
 Plattensteifigkeit 94  
 Polare Generierung 36  
 Polarkoordinaten 20  
 Polygonquerschnitte 94, 168, 203  
 Programmkapazitäten 80, 236  
 Programmstart 12  
 Projektdatei 11  
 Projektion 42  
 Punkteingabe 20  
 Punktlager 106  
 Punktmassen 680, 681

## Q

Quasi-ständige Situationen 309, 364, 413, 486, 573, 617, 650  
 Querdehnzahl 98, 239  
 Querkraftbemessung  
 DIN FB 102 406  
 EN 1992-1-1 298

EN 1992-2 479  
 Nachrechnungsrichtlinie 560, 563  
 SIA 262 358  
 Querschnitt 92, 166, 201, 237  
 Querschnittsbibliothek 92, 166, 201  
 Querschnittsdarstellung 42  
 Querschnittsdicke 237  
 Querschnittseingaben  
 DIN FB 102 391  
 EN 1992-1-1 279  
 EN 1992-2 461  
 Nachrechnungsrichtlinie 540  
 SIA 262 345  
 Thermische Berechnung 740  
 Querschnittsfläche 94, 97, 168, 171, 203, 206  
 Querschnittsklassifizierung 613  
 Querschnittsnachweise 646  
 Querschnittsnummer 92, 166, 201, 237  
 Querschnittspolygon 94, 168, 203  
 Querschnittsspannungen 147, 192, 225, 751  
 Querschnittstemperaturen 737, 746  
 Querschnittstragfähigkeit 613, 614

## R

Raghava 726, 727  
 Rand 51, 52  
 Rand-Element-Methode 612, 643  
 Randspannungen 612, 643  
 Rankine 727  
 Rasterpunkte 60  
 Rayleigh'sche Dämpfung 684  
 Rechteckquerschnitt 97, 171, 205  
 Reibungsbeiwert 268  
 Reibungskraft 264  
 Relativkoordinaten 20, 59  
 Relaxation  
 DIN FB 102 387, 401, 402  
 EN 1992-1-1 276, 293, 294  
 EN 1992-2 457, 474, 475, 478  
 Grundlagen 264  
 Materialkennwerte 100  
 Nachrechnungsrichtlinie 536, 555, 556  
 SIA 262 356, 357  
 Residuum 122, 183, 217, 249  
 Response 84, 687  
 Rissbreite  
 DIN FB 102 396, 416, 417, 419, 420  
 EN 1992-1-1 284, 312, 314, 315  
 EN 1992-2 466, 489, 491, 493  
 Nachrechnungsrichtlinie 547, 576, 578, 580  
 SIA 262 365, 366  
 Risskontrolle  
 SIA 262 349



- Robustheitsbewehrung 297, 405, 478, 559  
 Rohdichte 98, 172, 206, 239  
 Rotationsachse 233  
 Rotationsschale 232  
 Rotieren 35, 36, 41  
 Rückgängig machen 26, 34
- S**
- Saenz-Kurve 723  
 Schalenelement 65  
 Scheibenelement 65  
 Schiefe Hauptzugspannungen 420, 494, 581  
 Schiefstellung 107, 176, 211  
 Schiefwinklige Bewehrung 104  
 Schnittdarstellung 143, 144, 273  
 Schnittgrößen
  - Federelemente 81
  - Flächenelemente 67, 81
  - Rotationsschale 234
  - Stäbe 80
- Schnittkraftsystem 67, 81, 104  
 Schnittkurven 54, 56  
 Schriftart 38, 44  
 Schrumpfmodus 102, 174, 208, 241  
 Schubbemessung
  - DIN FB 102 394, 406
  - EN 1992-1-1 282, 298
  - EN 1992-2 464, 479
  - Nachrechnungsrichtlinie 544, 560
  - SIA 262 347, 358
- Schubkenngrößen 612, 643  
 Schubmittelpunkt 80, 95, 115, 180  
 Schubspannungen 98, 171, 206
  - EN 1993-1-1 612
  - EN 1995-1-1 643
- Schubverwölbung 612, 643  
 Schubweiches Stabelement 714  
 Schutzstecker 12  
 Schwinden
  - DIN FB 102 401
  - EN 1992-1-1 293
  - EN 1992-2 474
  - Grundlagen 263, 264
  - Lastfall 118
  - Materialkennwerte 100
  - Nachrechnungsrichtlinie 555
  - SIA 262 356
- Schwingbreite 286, 350, 397, 468, 549  
 Seile 65, 67, 83, 122  
 Seilvorspannung 91  
 Seite einrichten 25  
 Seitennummer 25  
 Seitenrahmen 13, 25, 62
- Seltene Situationen 364, 413, 573  
 Senden 21  
 SIA 261 672, 679  
 SIA 262 342  
 Sicherheitsbeiwerte
  - DIN FB 390, 400, 403
  - EN 1992-1-1 277, 278, 288, 292
  - EN 1992-2 460, 471, 473
  - EN 1993-1-1 603, 610
  - EN 1995-1-1 637, 639, 642
  - Nachrechnungsrichtlinie 538, 554, 557
  - Nichtlineare Systemanalyse 716, 721
  - SIA 262 342, 344, 345, 351
- Singuläres Gleichungssystem 78, 234, 664  
 Skalieren 35, 107, 177, 211, 243  
 Solid 38  
 Sortieren von Element- oder Knotennummern 105, 242  
 Sortieren von Stab- oder Knotennummern 175, 210  
 Spannanweisung 269, 273  
 Spannbetonnachweise
  - DIN FB 102 384
  - EN 1992-1-1 275
  - EN 1992-2 454
  - Nachrechnungsrichtlinie 529
- Spannkraftverlauf 273  
 Spannstahlspannungen
  - DIN FB 102 413, 414
  - EN 1992-1-1 310, 311
  - EN 1992-2 487, 488
  - Nachrechnungsrichtlinie 573, 574
- Spannstränge 266, 267, 273  
 Spannungen
  - Flächenelemente 82
  - Hauptdruckspannungen 566
  - Hauptspannungen 394, 409, 413, 420, 494, 544, 564, 573, 581
  - Rotationsschalen 235
  - Seile 83
  - Stäbe 82
  - Volumenelemente 82
- Spannungsnachweise
  - DIN FB 102 413, 414
  - EN 1992-1-1 310, 311
  - EN 1992-2 487, 488
  - EN 1993-1-1 611, 612, 613
  - EN 1995-1-1 642, 643, 646, 647, 648, 649
  - Nachrechnungsrichtlinie 573, 574
  - SIA 262 364
- Spannungsschwingbreite 286, 350, 397, 468, 549  
 Spannverfahren 268, 273  
 Sparse Solver 76, 136  
 Speicherkapazität 79  
 Speichern unter 21

- Spezifisches Gewicht 98, 172  
Spiegeln 35, 36  
Splinefunktion 266  
Sprache 13, 61  
SS EN 1992-1-1 275  
SS EN 1993-1-1 601  
SS EN 1995-1-1 635  
St. Venant'sche Torsion 69, 612, 643  
Stäbe 65, 67, 80, 90, 199  
Stäbe ausrichten 178, 213  
Stäbe suchen 177, 212  
Stabilitätsversagen 122, 183, 217  
Stablasten 115, 180, 214  
Stabnummer 174, 175, 208, 210  
Stabquerschnitt 97, 102, 171, 174, 206, 208  
Stabsystem 67  
Stabzug 52, 90, 114  
Stahl 92, 166, 201, 237  
Stahlbauprofil 92, 166, 201  
Stahllagen 146, 191, 224, 254  
Stahlspannungen  
  DIN FB 102 413, 414  
  EN 1992-1-1 283, 310, 311  
  EN 1992-2 465, 487, 488  
  EN 1993-1-1 611, 612, 613  
  EN 1995-1-1 642, 643  
  Nachrechnungsrichtlinie 573, 574  
Standardausrichtung 67  
Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen 294, 357, 403, 476, 557, 610, 641  
Stapelberechnung 137, 188, 222, 251  
Starre Koppelung 109, 179, 212, 244  
Stationärer Response 84, 665, 676, 687  
Statische Ersatzlast 679  
Statistische Kombinationsmethoden 673  
Steifemodulverfahren 68, 113, 122, 136, 156  
Steifigkeitsmatrix 69, 70, 136, 187, 221, 250  
STP-Datei 27  
Strahlung 737, 762  
Streckgrenze  
  Betonstahl 101, 240  
  Grundlagen 404, 558, 615  
  Materialart Frei 99  
  Materialart Stahl 98, 172, 206, 239  
Streuung der Vorspannkraft  
  Grundlagen 292, 400, 473, 554  
  Streufaktoren 287, 398, 470, 550  
Strichstärke 25, 38  
Strukturbeschreibung 85, 165, 200, 236  
Studienversion 80, 236  
Stütze 53  
Stützensenkung 118, 181, 215, 247  
Substrukturtechnik 77, 136, 161  
Suchen 19, 108, 177, 212, 243  
Superposition  
  Lastart SUP 118, 181, 215, 247  
  Lastgruppe 122, 183, 217, 249  
Symbolleiste 17  
Systemdatei 13, 61, 62  
Systemfestigkeit 646
- ## T
- Tabellen 19, 138, 189, 222, 251  
Tandemsystem 385, 386, 455, 456, 530, 532  
Teilen 39  
  Elemente 243  
  Stäbe 108, 178, 212  
Teilflächen 54  
Teilsicherheitsbeiwerte  
  DIN FB 390, 400, 403  
  EN 1992-1-1 277, 278, 288, 292  
  EN 1992-2 460, 471, 473  
  EN 1993-1-1 603, 610  
  EN 1995-1-1 637, 639, 642  
  Nachrechnungsrichtlinie 538, 554, 557  
  Nichtlineare Systemanalyse 716, 721  
  SIA 262 342, 344, 345, 351  
Teilsicht 43  
Temperaturausdehnungskoeffizient 98, 172, 206, 239  
Temperaturbeanspruchung 119, 182, 216, 247  
Tension Stiffening 715, 723  
Tetraederelement 65  
Text 26, 38, 44, 60  
Theorie 2. Ordnung  
  Eigenwerte 677  
  Eingaben 118, 122, 182, 183, 216, 217  
  EN 1993-1-1 Bemessungswerte 610  
  EN 1995-1-1 Bemessungswerte 642  
  Grundlagen 69  
Thermische Berechnung 761  
Thermische Einwirkung 122, 768  
Torsionsbemessung  
  DIN FB 102 394, 409  
  EN 1992-1-1 282, 301  
  EN 1992-2 464, 482  
  Nachrechnungsrichtlinie 544, 564  
  SIA 262 347, 360  
Torsions-Schubspannungen 98, 171  
Torsionsträgheitsmoment 94, 168, 612, 643  
Tragfähigkeitskombinationen  
  DIN FB 101 403  
  EN 1990 294, 476  
  EN 1992-1-1 294  
  EN 1992-2 476  
  EN 1993-1-1 610  
  EN 1995-1-1 641

- Tragfähigkeitskombinationen  
 Nachrechnungsrichtlinie 557, 568  
 SIA 262 357
- Tragfähigkeitsnachweis  
 DIN FB 102 391, 403  
 EN 1992-1-1 279, 294  
 EN 1992-2 461, 476  
 EN 1993-1-1 604, 610  
 EN 1995-1-1 640, 641  
 Lastgruppe 122, 183, 217  
 Nachrechnungsrichtlinie 540, 557  
 Nichtlineare Systemanalyse 713, 728  
 SIA 262 345, 357
- Trägheitshauptachsen 611, 642  
 Trägheitsmoment 94, 97, 168, 171, 203, 206  
 Tragwerksart 385, 454  
 Tragwerksmenü 85, 165, 200, 236  
 Tragwerkstypen 11  
 Trapezlast 126, 186, 219, 248  
 Trost (Relaxation) 100, 264, 293, 356, 401, 474, 555  
 T-Träger 92, 166, 201
- U**
- Überspannreserve 269  
 UDL-Last 385, 455, 530  
 Umlagerungen 263  
 Umlenkkräfte 264  
 Umlenkwinkel 268, 273  
 Umwandeln 40  
 Ungedämpftes Eigenschwingungsproblem 663  
 Unterzug 90, 114  
 Update 13  
 U-Träger 92, 166, 201
- V**
- Variable definieren 61  
 Vektordarstellung 144  
 Verbinden 39  
 Verbundbeiwert  
 Ermüdung 286, 350, 397, 468, 549  
 Rissbreiten 284, 396, 466, 547  
 Verbundquerschnitt 98, 263  
 Verdecktdarstellung 42  
 Verdichten 108, 178, 212, 243  
 Verformungsbegrenzung 317, 366, 422, 496, 582, 617, 650  
 Verformungsfigur 139, 190, 224, 253  
 Vergleichsspannung 82, 147, 613, 618, 650  
 Verschiebungsvektor 35, 36  
 Verschmelzen von Dreieckselementen 108  
 Verschneiden 39  
 Verwölbung 95  
 Virtualisierte Server 15  
 Viskoser Einzeldämpfer 111, 684
- VMware 15  
 Volleinspannkkräfte 125, 186, 220, 249  
 Vollquerschnitt 395, 545  
 Volumen 38, 57  
 Volumenelement 65, 67, 82, 91  
 Volumenoberfläche 58, 767, 768  
 Volumenschnitt 144  
 Vordehnung 120, 182, 216, 247  
 Vorkrümmung 107, 176, 211  
 Vorspannkraft 268, 269  
 Vorspannung  
 DIN FB 102 400  
 Einwirkungen 264  
 EN 1992-1-1 292  
 EN 1992-2 473  
 Nachrechnungsrichtlinie 554  
 SIA 262 356  
 Spannstränge 121, 263, 266  
 Statisch bestimmt 263
- Vorverformung  
 Definieren 107, 176, 211  
 Lastart 121, 182, 183, 216, 217
- Voute 90, 165, 200, 236  
 VQ83 Volumenelement 65  
 VT10 Tetraederelement 65
- W**
- Wand 52  
 Wandöffnung 39  
 Wärmeleitfähigkeit 737, 762  
 Wendel 36  
 Widerstandsmomente 95, 611, 642  
 Wiederherstellen 34  
 Wilson (Integrationschema) 663  
 Winkel messen 61  
 WMF Format 26, 34
- Z**
- Zeichnen 44  
 Zeitabhängige Materialkennwerte 100  
 Zeitschrittintegration 680  
 Zeitschrittlösung 663  
 Zentralperspektive 42  
 Ziellastniveaus BK 60/30, BK 60, BK 30/30 533  
 Zoom 41  
 Zufällige Torsionswirkung 700  
 Zugbettung  
 Grundlagen 68, 234  
 Lastgruppe 122, 183, 217, 249  
 Zuglager 122, 183, 217, 249  
 Zugstab 97, 122, 171, 183, 206, 217  
 Zugüberfahrt 121, 675, 680, 709  
 Zustandslinien 146, 191, 224, 254

Zwischenablage 34

Zylinderkoordinaten 20



## InfoGraph GmbH

Kackertstraße 10  
52072 Aachen

Tel.: +49 241 889980  
Fax: +49 241 8899888

[info@infograph.de](mailto:info@infograph.de)  
[www.infograph.de](http://www.infograph.de)



**InfoGraph**   
*Software für die Tragwerksplanung*