



Fassung
März 2018

Zusatzmodul

BETON

Stahlbetonbemessung

Programmbeschreibung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der DLUBAL SOFTWARE GMBH ist es nicht gestattet, diese Programmbeschreibung oder Teile daraus auf jedwede Art zu vervielfältigen.



© Dlubal Software GmbH 2018
Am Zellweg 2
D-93464 Tiefenbach
Deutschland

Tel.: +49 9673 9203-0
Fax: +49 9673 9203-51
E-mail: info@dlubal.com
Web: www.dlubal.de



Inhalt

	Inhalt	Seite
1.	Einleitung	4
1.1	Zusatzmodul BETON	4
1.2	Gebrauch des Handbuchs	5
1.3	Aufruf von BETON	5
2.	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Tragfähigkeitsnachweis	7
2.1.1	Biegung und Normalkraft	7
2.1.2	Querkraft	8
2.1.3	Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten	10
2.1.4	Schubübertragung in Fugen	11
2.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	14
2.2.1	Vorhandene Bewehrung	14
2.2.2	Begrenzung der Spannungen	14
2.2.3	Mindestbewehrung	15
2.2.4	Begrenzung der Rissbreiten	16
2.2.5	Begrenzung der Verformungen	18
2.2.6	Kriechen und Schwinden	19
2.3	Brandschutznachweis	24
2.3.1	Unterteilung des Querschnitts	24
2.3.2	Reduzierung des Querschnitts	25
2.3.3	Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons	27
2.3.4	Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls	29
2.4	Nichtlineare Bemessung	31
2.4.1	Methode	31
2.4.2	Dehnung und Krümmung	33
2.4.3	Tension Stiffening	35
2.4.3.1	Modell: Zugfestigkeit des Betons	36
2.4.3.2	Modifizierte Stahlkennlinie	38
2.4.4	Mittlere Momenten-Krümmungs-Beziehung	39
2.4.5	Ermittlung der Element-Steifigkeiten	40
2.4.5.1	Biegesteifigkeit	40
2.4.5.2	Längs-, Schub- und Torsionssteifigkeit	41
2.4.6	Kriechen und Schwinden	44
2.4.7	Grenzzustand der Tragfähigkeit	45
2.4.7.1	Materialkennwerte	46
2.4.7.2	Sicherheitsnachweis	47
2.4.8	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	49
2.4.9	Konvergenz	51
3.	Eingabedaten	53
3.1	Basisangaben	53
3.1.1	Tragfähigkeit	56
3.1.2	Gebrauchstauglichkeit	58
3.1.3	Details	60
3.1.4	Brandschutz	61
3.2	Materialien	62
3.3	Querschnitte	64



3.4	Lager	68
3.5	Bewehrung	70
3.5.1	Längsbewehrung	72
3.5.2	Bügel	74
3.5.3	Bewehrungsanordnung	76
3.5.4	Mindestbewehrung	79
3.5.5	Schubfuge	81
3.5.6	Norm	82
3.5.7	Gebrauchstauglichkeit	84
3.5.8	Vouten	89
3.5.9	Brandschutz	91
3.6	Durchbiegungsdaten	93
4.	Berechnung	95
4.1	Detaileinstellungen	95
4.1.1	Tragfähigkeit	95
4.1.2	Gebrauchstauglichkeit	96
4.2	Details für nichtlineare Berechnung	97
4.2.1	Nachweisverfahren	97
4.2.2	Tension Stiffening	99
4.2.3	Konvergenzeinstellungen	101
4.3	Kontrolle	103
4.4	Start der Berechnung	104
5.	Ergebnisse	105
5.1	Erforderliche Bewehrung	106
5.1.1	Erforderliche Bewehrung querschnittsweise	106
5.1.2	Erforderliche Bewehrung stabsatzweise	109
5.1.3	Erforderliche Bewehrung stabweise	109
5.1.4	Erforderliche Bewehrung x-stellenweise	110
5.1.5	Erforderliche Bewehrung unbemessbar	111
5.2	Vorhandene Bewehrung	112
5.2.1	Vorhandene Längsbewehrung	112
5.2.2	Vorhandene Bügelbewehrung	117
5.2.3	Vorhandene Bewehrung x-stellenweise	120
5.2.4	Stahlliste	121
5.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	123
5.3.1	Gebrauchstauglichkeitsnachweis querschnittsweise	123
5.3.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabsatzweise	126
5.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise	127
5.3.4	Gebrauchstauglichkeitsnachweis x-stellenweise	127
5.4	Brandschutznachweis	128
5.4.1	Brandschutznachweis querschnittsweise	128
5.4.2	Brandschutznachweis stabsatzweise	130
5.4.3	Brandschutznachweis stabweise	131
5.4.4	Brandschutznachweis x-stellenweise	131
5.4.5	Brandschutznachweis unbemessbar	132
5.5	Nichtlineare Berechnung	133
5.5.1	Nichtlineare Berechnung - Tragfähigkeit	133
5.5.2	Nichtlineare Berechnung - Gebrauchstauglichkeit	135
5.5.3	Nichtlineare Berechnung - Brandschutz	137
5.5.4	Nichtlineare Berechnung - Berechnungsdetails	138
6.	Ergebnisauswertung	139
6.1	Bewehrungsvorschlag	139



6.2	3D-Rendering der Bewehrung	142
6.3	Ergebnisse am RSTAB-Modell	145
6.3.1	Hintergrundgrafik und Ansichtsmodus	145
6.3.2	RSTAB-Arbeitsfenster	146
6.4	Ergebnisverläufe	149
7.	Ausdruck	150
7.1	Ausdruckprotokoll	150
7.2	Grafikausdruck	152
8.	Allgemeine Funktionen	155
8.1	Bemessungsfälle	155
8.2	Querschnittsoptimierung	157
8.3	Einheiten und Dezimalstellen	158
8.4	Export der Ergebnisse	158
9.	Beispiele	160
9.1	Direkte Verformungsberechnung	160
9.1.1	Eingabedaten	160
9.1.2	Vorwerte der Verformungsberechnung	161
9.1.3	Krümmung im Zustand I	161
9.1.4	Krümmung im Zustand II	162
9.1.5	Ermittlung der Durchbiegung	163
9.1.6	Ergebnis in BETON	164
9.2	Nichtlineare Verformungsberechnung	166
9.2.1	Eingabedaten	166
9.2.2	Eingaben in BETON	167
9.2.3	Kontrolle der Bewehrung	169
9.2.4	Vorgaben für nichtlineare Berechnung	170
9.2.5	Ergebnisse von BETON	173
9.2.6	Handrechnung	174
9.2.6.1	Materialkennwerte für Verformungsberechnung	174
9.2.6.2	Zustand I	174
9.2.6.3	Zustand II	176
9.2.6.4	Mittlere Krümmungen	179
9.2.7	Ergebnisbewertung	180
9.3	Stabilitätsuntersuchung Kragstütze	183
9.3.1	Modell in RSTAB	183
9.3.2	Nichtlineare Berechnung	185
9.3.2.1	EN 1992-1-1, 5.7	185
9.3.2.2	EN 1992-1-1, 5.8.6	190
A.	Literatur	195
B.	Index	197

1 Einleitung

1.1 Zusatzmodul BETON

BETON ist ein Zusatzmodul für RSTAB. Durch die Integration in die RSTAB-Oberfläche ist die lückenlose Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauteilen gewährleistet, die im RSTAB-Modell definiert wurden.

Das Zusatzmodul übernimmt alle relevanten Modellparameter wie Materialien, Querschnitte, Stäbe, Stabsätze, Lager sowie die Schnittgrößen der Lastfälle und Kombinationen aus RSTAB. Im Programm sind aber auch Bemessungsalternativen mit geänderten Querschnitten einschließlich Optimierung möglich.

BETON untersucht die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Die Riss- und Durchbiegungsnachweise werden durch eine direkte Berechnung der Rissbreiten und Verformungen geführt. Optional wird überprüft, ob der Brandschutznachweis nach EN 1992-1-2:2004 [1] erfüllt ist.

Die Bemessung ist nach folgenden Normen möglich:

- EN 1992-1-1:2004/A1:2014
- DIN 1045-1:2008-08
- DIN 1045:1988-07
- ACI 318-14
- ACI 318-11
- CSA A23.3-14 (R2015)
- SIA 262:2013
- GB 50010-2010

CEN	EU
BDS:2011	Bulgarien
BS:2005	Vereinigtes Königreich
CSN:2016	Tschechien
CYS:2009	Zypern
DIN:2015	Deutschland
DK:2013	Dänemark
LST:2011	Litauen
LVS:2014	Lettland
MS:2010	Malaysia
NBN:2010	Belgien
NEN:2016	Niederlande
NF:2016	Frankreich
NP:2010	Portugal
NS:2008	Norwegen
PN:2010	Polen
SFS:2007	Finnland
SingaporeS:2008	Singapur
SIST:2006	Slowenien
SR:2008	Rumänien
STN:2008	Slowakei
Svensks:2008	Schweden
UNE:2013	Spanien
UNI:2007	Italien
ÖNORM:2011	Österreich

Nationale Anhänge für EN 1992-1-1

Das Bild links zeigt die Nationalen Anhänge für EN 1992-1-1 [2], die zurzeit in BETON implementiert sind.

Die ermittelte erforderliche Bewehrung beinhaltet einen Bewehrungsvorschlag, der die benutzerdefinierten Vorgaben für die Längs- und Bügelstäbe berücksichtigt. Diese Bewehrungsausführung kann jederzeit angepasst werden; die mit den Änderungen verbundenen Nachweise werden automatisch aktualisiert.

BETON ermöglicht auch eine nichtlineare Analyse (Zustand II) mit Berücksichtigung von *Tension Stiffening*. Dabei kann der Einfluss von Kriechen und Schwinden erfasst werden.

Die eingelegte Bewehrung wird fotorealistisch visualisiert – sowohl im Zusatzmodul als auch an den Betonquerschnitten des RSTAB-Modells. Diese wirklichkeitstretue Darstellung des Bewehrungskorbes kann mit den übrigen Ein- und Ausgabedaten der Bemessung im Ausdruckprotokoll dokumentiert werden.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Erfolg mit BETON.

Ihr DLUBAL-Team

1.2 Gebrauch des Handbuchs

Da die Themenbereiche Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck im RSTAB-Handbuch ausführlich erläutert sind, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit dem Zusatzmodul BETON ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnis-masken. Im Text sind die beschriebenen **Schaltflächen** (Buttons) in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Ansichtsmodus]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Tabellen und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie dort nicht fündig werden, können Sie die Suchfunktion für die [Knowledge Base](#) auf unserer Website nutzen, um unter den Beiträgen zu den Betonmodulen eine Lösung zu finden. Auch unsere [FAQs](#) bieten eine Reihe an Hilfestellungen.

1.3 Aufruf von BETON

Es bestehen in RSTAB folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul BETON zu starten.

Menü

Sie können das Zusatzmodul aufrufen mit dem RSTAB-Menü

Zusatzmodule → **Stahlbetonbau** → **BETON**.

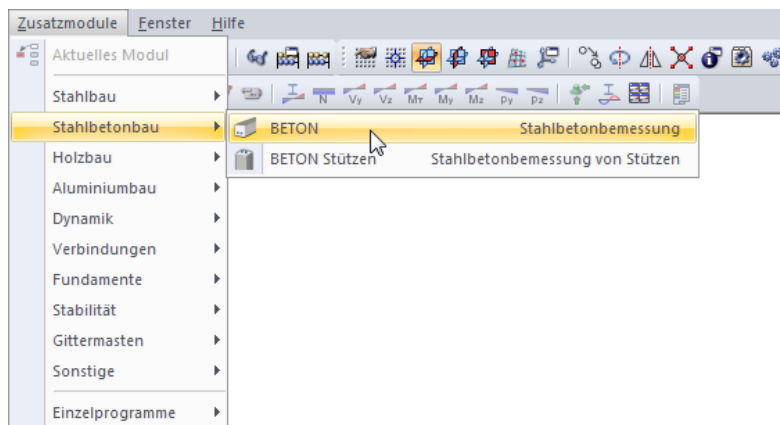


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stahlbetonbau* → *BETON*

Navigator

Alternativ rufen Sie das Zusatzmodul im *Daten*-Navigator auf durch Anklicken des Eintrags

Zusatzmodule → **BETON**.

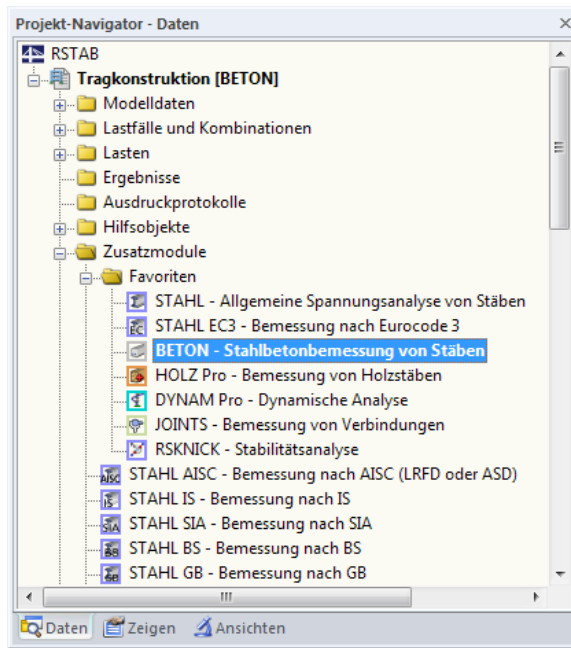
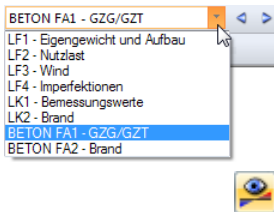


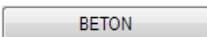
Bild 1.2: Daten-Navigator: Zusatzmodule → BETON



Panel

Wenn im RSTAB-Modell schon Ergebnisse von BETON vorliegen, können Sie das Bemessungsmodul auch über das Panel starten:

Stellen Sie den relevanten BETON-Bemessungsfall in der Lastfallliste der Menüleiste ein. Lassen Sie über die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] die Bewehrungen grafisch darstellen.

Im Panel können Sie nun die Schaltfläche  zum Aufruf des Moduls benutzen.

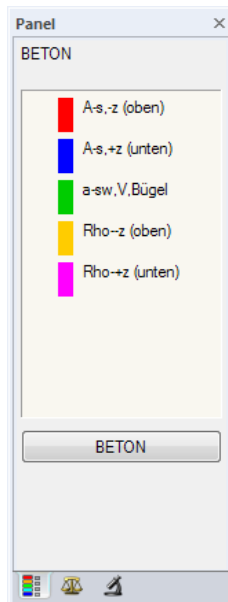


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [BETON]

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Tragfähigkeitsnachweis

Auf eine ausführliche Beschreibung der linearen Bemessungsverfahren wird verzichtet, da das Handbuch kein Lehrbuch ersetzen soll.

2.1.1 Biegung und Normalkraft

In EN 1992-1-1, Abschnitt 6.1 oder DIN 1045-1, Abschnitt 10.2 werden die Bemessungsgrundlagen für den Nachweis in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit dargestellt. Diese Regelungen gelten für Biegung mit oder ohne Normalkraft und für Normalkraft allein.

Der rechnerische Versagenszustand tritt ein, wenn die Grenzdehnungen erreicht werden. Je nachdem, wo diese Grenzdehnungen auftreten, kann das Versagen durch den Beton oder den Betonstahl ausgelöst werden.

Das folgende Bild verdeutlicht die zulässigen Dehnungsverteilungen bei Biegung mit und ohne Längskraft nach EN 1992-1-1, Abschnitt 6.1.

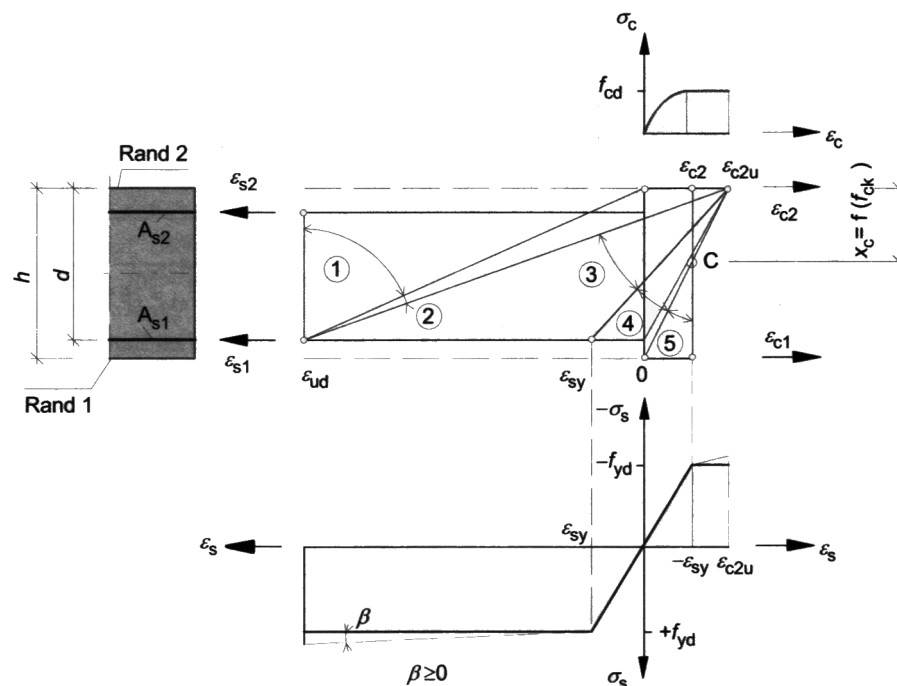


Bild 2.1: Rechnerisch mögliche Dehnungsverteilungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die im Bild gezeigten Bereiche der Dehnungsverteilungen bedeuten nach [3]:

Bereich 1

Dieser Bereich stellt sich bei einer mittigen Zugkraft oder bei einer Zugkraft mit geringer Ausmitte ein. Über dem gesamten Querschnitt treten nur Dehnungen auf. Der statisch wirksame Querschnitt besteht nur aus den beiden Bewehrungslagen A_{s1} und A_{s2} . Die Bewehrung versagt, weil die Grenzdehnung ε_{ud} erreicht wird.

Bereich 2

Bereich 2 tritt bei reiner Biegung und bei Biegung mit Längskraft (Druck- und Zugkraft) auf. Die Nulllinie liegt innerhalb des Querschnitts. Die Biegezugbewehrung wird voll ausgenutzt, d. h. der Stahl versagt durch das Erreichen der Grenzdehnung. Der Betonquerschnitt wird in der Regel nicht voll ausgenutzt: Die Stauchungen erreichen nicht die Grenzdehnung ε_{c2u} .

Bereich 3

Dieser Bereich stellt sich nur bei reiner Biegung und bei Biegung mit Längskraft (Druck) ein. Die Tragkraft des Stahls ist größer als die Tragkraft des Betons. Der Beton versagt, weil seine Grenzdehnung ε_{c2u} erreicht wird.

Das Versagen des Betons kündigt sich wie in den Bereichen 1 und 2 durch Risse an, da der Stahl die Fließgrenze überschreitet (Bruch mit Vorankündigung).

Bereich 4

Bereich 4 tritt bei Biegung mit einer Längsdruckkraft auf. Er stellt den Übergang eines vorwiegend auf Biegung beanspruchten Querschnitts zu einem auf Druck beanspruchten Querschnitt dar. Der Beton versagt, bevor im Stahl die Fließgrenze erreicht wird, da die möglichen Dehnungen sehr klein sind. Dieser Bereich hat einen stark bewehrten Querschnitt zur Folge. Er wird daher durch Einlegen einer Druckbewehrung vermieden.

Kleine Stahldehnungen in der Zugzone führen zum Bruch ohne Vorankündigung (die Biegezugbewehrung gerät nicht ins Fließen).

Bereich 5

Dieser Bereich liegt bei einer Druckkraft mit geringer Ausmitte (z. B. Stütze) oder bei einer zentrischen Druckkraft vor. Über dem gesamten Querschnitt treten nur Stauchungen auf.

Die Stauchung am weniger gedrückten Rand liegt zwischen $0 > \varepsilon_{c1} > \varepsilon_{c2}$. Alle Stauchungsverteilungen schneiden sich im Punkt C.

2.1.2 Querkraft

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ist nur im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu führen. Die Einwirkungen und die Widerstände gehen mit ihren Bemessungswerten ein. Das allgemeine Nachweisformat nach EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.1 lautet:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

mit

V_{Ed} : Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

V_{Rd} : Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit

Je nach Versagensmechanismus wird der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit durch einen der folgenden drei Werte bestimmt.

$V_{Rd,c}$: Querkraftwiderstand eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung

$V_{Rd,s}$: Querkraftwiderstand eines Bauteils mit Querkraftbewehrung, der durch die Fließgrenze der Querkraftbewehrung begrenzt ist (Zugstrebenversagen)

$V_{Rd,max}$: Querkraftwiderstand, der durch die Betondruckstrebenfestigkeit begrenzt ist

Bleibt die einwirkende Querkraft V_{Ed} unter dem Wert von $V_{Rd,c}$, dann ist rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich und der Nachweis ist erfüllt.

Liegt die einwirkende Querkraft V_{Ed} über dem Wert von $V_{Rd,c}$, ist eine Querkraftbewehrung vorzusehen. Die Querkraftbewehrung muss die gesamte Querkraft aufnehmen. Außerdem ist die Tragfähigkeit der Betondruckstrebe nachzuweisen.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} \quad \text{und} \quad V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Die verschiedenen Querkrafttragfähigkeiten bestimmen sich nach EN 1992-1-1 wie folgt.

Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Der Bemessungswert für den Querkraftwiderstand $V_{Rd,c}$ darf ermittelt werden mit:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} - k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.2a)}$$

mit

$$C_{Rd,c} : \text{Empfohlener Beiwert: } 0,18/\gamma_c$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 : \text{Maßstabsfaktor zur Berücksichtigung der Querschnittshöhe}$$

d : Mittlere statische Höhe in [mm]

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 : \text{Längsbewehrungsgrad}$$

A_{sl} : Fläche der Zugbewehrung, die mindestens $(l_{bd} + d)$ über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird

$$f_{ck} : \text{Charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit in [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_1 : \text{Empfohlener Beiwert: } 0,15$$

$$b_w : \text{Kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone in [mm]}$$

$$d : \text{Statische Nutzhöhe der Biegebewehrung in [mm]}$$

Bemessungswert der Betonlängsspannung in [N/mm²]

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd} : \text{Bemessungswert der Betonlängsspannung in [N/mm}^2\text{]}$$

Es darf jedoch ein Mindestwert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c,min}$ angesetzt werden.

$$V_{Rd,c,min} = [v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.2b)}$$

mit

$$v_{min} = 0,035 \cdot \sqrt{k^3 \cdot f_{ck}}$$

Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

Für Bauteile mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse ($\alpha = 90^\circ$) gilt:

$$V_{Rd,s} = \left(\frac{A_{SW}}{s} \right) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.8)}$$

mit

$$A_{SW} : \text{Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung}$$

$$s : \text{Bügelabstand}$$

$$z : \text{Hebelarm der inneren Kräfte angenommen zu } 0,9 \cdot d$$

$$f_{ywd} : \text{Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung}$$

$$\theta : \text{Neigung der Betondruckstrebe}$$

Die Neigung der Betondruckstrebe θ darf in Abhängigkeit von der Beanspruchung innerhalb bestimmter Grenzen gewählt werden. Damit soll der Tatsache Rechnung getragen werden, dass ein Teil der Querkraft über die Rissreibung abgetragen wird und somit das Fachwerk nicht belastet. Folgende Grenzen sind in Gleichung (6.7) der EN 1992-1-1 empfohlen.

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$$

Die Druckstrebenneigung θ kann damit zwischen folgenden Werten variieren:

	Mindestneigung	Höchstneigung
θ	21,8 °	45,0 °
$\cot \theta$	2,5	1,0

Tabelle 2.1: Empfohlene Grenzen der Druckstrebenneigung

Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe

Für Bauteile mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$ gilt:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.9)}$$

mit

- α_{cw} : Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustands im Druckgurt
- b_w : Querschnittsbreite
- z : Hebelarm der inneren Kräfte (exakt berechnet in Biegebemessung)
- ν_1 : Abminderungsbeiwert für Betonfestigkeit bei Schubrisen
- f_{cd} : Bemessungswert der Betonfestigkeit
- θ : Neigung der Betondruckstrebe

2.1.3 Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten

Die Längsschubspannung $v_{Ed,f}$ am Gurtanschluss an den Steg wird durch die Längskraftdifferenz $\Delta F_{d,f}$ im maßgebenden Teil des Gurtes nach EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.4 (3), Gleichung (6.20) bestimmt.

$$v_{Ed,f} = \frac{\Delta F_{d,f}}{h_f \cdot \Delta x_f}$$

mit

- h_f : Gurtdicke am Anschluss
- Δx_f : betrachtete Länge
- $\Delta F_{d,f}$: Längskraftdifferenz im Gurt über die Länge Δx

Dabei darf höchstens der halbe Abstand zwischen Momentenmaximum und Momentennullpunkt für die Länge Δx_f herangezogen werden, wobei bei Einwirkung von Einzellasten der Abstand zwischen den Einzellasten nicht überschritten werden sollte.

Die Ermittlung von $\Delta F_{d,f}$ erfolgt optional über eine Steuerung in den Moduldetails nach zwei unterschiedlichen Methoden, die im Folgenden vorgestellt sind.

1. Vereinfachtes Verfahren mittels innerem Hebelarm $z = 0,9 d$ ohne Berücksichtigung von $M_{z,Ed}$

$$F_{d,i} = \left(\frac{M_{y,Ed}}{z} - \frac{N_{Ed}}{z} \cdot z_s \right) \cdot \frac{b_{eff,i}}{b_{eff}} \quad \text{für Druckgurte}$$

$$F_{d,i} = \left(\frac{M_{y,Ed}}{z} - \frac{N_{Ed}}{z} \cdot z_s + N_{Ed} \right) \cdot \frac{A_{sa}}{A_s} \quad \text{für Zuggurte}$$

mit

z_s : Distanz zwischen Schwerpunkt des Querschnitts und der Zugbewehrung

z : Hebelarm der inneren Kräfte $0,9 d$

$b_{eff,j}$: Breite des abliegenden Flansches (Druckgurt) bzw. Breite der Bewehrungsverteilung im abliegenden Flansch (Zuggurt) unter Berücksichtigung der Option *Bewehrung gleichmäßig über die gesamte Plattenbreite verteilen* (siehe Bild 3.28, Seite 76)

b_{eff} : Gurtbreite

A_{sa} : im angeschlossenen Zuggurt ausgelagerte Bewehrung

A_s : Gesamtfläche der Zugbewehrung

2. Berechnung von F_d aus allgemeiner Spannungsintegration in Querschnittsteilflächen

Die erforderliche Zuggurtbewehrung infolge der Schubkräfte pro Abschnittslänge a_{sf} darf nach Gleichung (6.21) ermittelt werden.

$$a_{sf} \geq \frac{V_{Ed,f} \cdot h_f}{\cot \theta_f \cdot f_{yd}}$$

mit

$1,0 \leq \cot \theta_f \leq 2,0$: Neigung der Betondruckstrebe für Druckgurte

$1,0 \leq \cot \theta_f \leq 1,25$: Neigung der Betondruckstrebe für Zuggurte

f_{yd} : Bemessungswert der Streckgrenze der Bewehrung

Dabei muss gleichzeitig vermieden werden, dass die Druckstreben im Gurt versagen. Dies geschieht durch Erfüllung der folgenden Anforderung:

$$V_{Ed} \leq \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta_f \cdot \cos \theta_f \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.22)}$$

mit

f_{cd} : Bemessungswert der Betonfestigkeit

ν_1 : Abminderungsbeiwert für Betonfestigkeit bei Schubrisen

2.1.4 Schubübertragung in Fugen

Bei nachträglich ergänzten Betonbauteilen muss die Übertragung der Schubkraft zwischen den unterschiedlichen Betonierabschnitten nachgewiesen werden. Diese sogenannten Schubfugen treten bei Betonbauteilen unterschiedlichen Alters auf. Hier müssen beispielsweise Anschlussfugen zwischen Bauabschnitten bei Neubau oder Sanierung oder Fugen zwischen Fertigteilen und Ortbetonergänzungen betrachtet werden.

Die Schubkraftübertragung soll dabei wie folgt nachgewiesen werden:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.23)}$$

Für die Berechnung der Schubspannung in der Schubfuge gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Berechnung aus $V_{z,Ed}$ und β -Faktor gemäß EN 1992-1-1 Gleichung (6.24) ohne Berücksichtigung von $M_{z,Ed}$

Hier ist v_{Edi} der Bemessungswert der aufzunehmenden Schubkraft je Längeneinheit in der Fuge. Dieser Wert wird durch Gleichung (6.24) ermittelt.

$$v_{Edi} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{z \cdot b_i}$$

mit

β : Quotient aus der Längskraft im Aufbeton und der Gesamtlängskraft in der Druck- bzw. Zugzone im betrachteten Querschnitt

V_{Ed} : Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

z : Hebelarm des zusammengesetzten Querschnitts

b_i : Breite der Kontaktfuge

Der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit v_{Rdi} wird mit folgender Gleichung (6.25) bestimmt.

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot \nu \cdot f_{cd}$$

mit

c und μ : von der Rauigkeit der Fuge abhängige Beiwerte nach EN 1992-1-1, 6.2.5 (2)

f_{ctd} : Bemessungswert der Betonzugfestigkeit nach EN 1992-1-1, 3.1.6 (2)P

σ_n : kleinste Spannung rechtwinklig zur Fuge, welche gleichzeitig mit der Querkraft wirkt (positiv für Druck) mit $\sigma_n < 0,6 \cdot f_{cd}$

ρ : A_s/A_i
mit

A_s : Querschnittsfläche der die Fuge kreuzenden Bewehrung

A_i : Verbundfläche

α : Neigungswinkel der Verbundbewehrung

ν : Festigkeitsabminderungsbeiwert nach EN 1992-1-1, 6.2.2 (6)

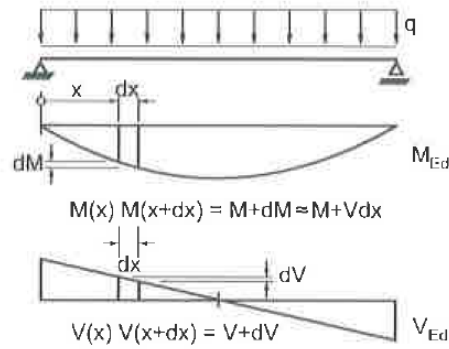
2. Berechnung aus Längskraftdifferenz in der Querschnittsergänzung aus allgemeiner Spannungsintegration

Der starre Verbund, welcher für den Nachweis der Schubfugen im GZT vorausgesetzt wird, soll vornehmlich durch Haftverbund, d. h. Adhäsion und mikromechanische Verzahnung, erreicht werden. Damit ist die Fugenbewehrung für die Übertragung der Kräfte nach Überwindung des starren Verbundes und für die Duktilität der Verbindung zuständig, während die Schubfuge ausschließlich für den Haftverbund ausgelegt werden müsste.

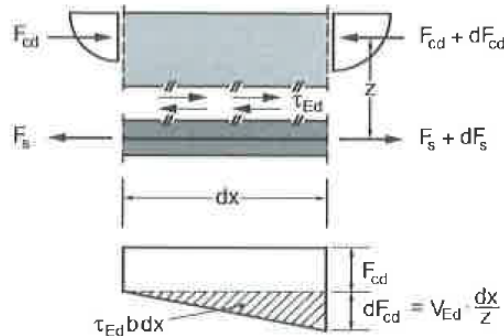
In den aktuellen Normen wird diesem Ansatz nur in geringem Maße Rechnung getragen. Ein verschieblicher Verbund wird zwar zugelassen, aber auf der sicheren Seite liegend konservativ abgegrenzt und durch Konstruktionsregeln ergänzt.

Bei Schubfugen, welche im Grenzzustand der Tragfähigkeit planmäßig auf verschieblichen Verbund ausgelegt sind, müssen zusätzlich Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt werden. Für diesen Fall muss der verschiebliche Verbund konsequent in die Bestimmung der Schnittgrößen und Spannungen in GZT und GZG einbezogen werden.

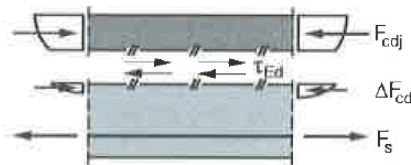
Eigenspannungen, die normalerweise mit Schubspannungen in der Fuge einhergehen (beispielsweise aus verschiedenem Schwindverhalten zweier Betonteile unterschiedlichen Alters), werden in der Regel nicht berücksichtigt. Die einwirkende Schubkraft v_{Edi} wird ausschließlich aus Schnittgrößen am Querschnitt berechnet.



a Schnittgrößen am Balken



b Gleichgewicht am Element



c Fuge in der Druckzone

Bild 2.2: Schubspannungen in Fugen nach [4]

In Bild 2.2 ist ein Ausschnitt der Länge dx aus einem Balken mit Schubfuge parallel zur Bauteilachse dargestellt. Hier bewirkt das variable Biegemoment über die Länge eine Veränderung der Gurtkräfte. Es gilt beispielsweise für den Druckgurt:

$$dF_{cd} = \frac{dM_{Ed}}{z} = \frac{V_{Ed} dx}{z}$$

Es besteht ein Gleichgewicht zwischen der Druckkraftänderung und den Schubspannungen in der Fuge.

$$\tau_{Ed} = \frac{dF_{cd}}{bdx} = \frac{V_{Ed} dx}{bz dx} = \frac{V_{Ed}}{bz}$$

Danach steht bei konstanten Hebelarm z die Beanspruchung der Schubfuge im Verhältnis zur Querkraft V_{Ed} , wobei eine gleichbleibende Normalkraft keinen Einfluss auf die Schubkraft in der Fuge parallel zur Bauteilachse hat.

Liegt die Schubfuge innerhalb der Druckzone, muss lediglich der Anteil der Gurtkraftdifferenz zwischen Fuge und Druckgurtrand übertragen werden. Damit wird τ_{Ed} zu:

$$\tau_{Ed} = \frac{F_{cdi}}{F_{cd}} \cdot \frac{V_{Ed}}{bz}$$

2.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit bestehen aus verschiedenen Einzelnachweisen, die z. B. für den Eurocode in folgenden Abschnitten geregelt sind:

- Begrenzung der Spannungen: EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2
- Begrenzung der Rissbreiten: EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3
- Begrenzung der Verformungen: EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4

2.2.1 Vorhandene Bewehrung

Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird zuerst untersucht, ob der Querschnitt bewehrt werden kann und ob der Bewehrungsvorschlag im Querschnitt untergebracht werden kann. Ist dies nicht der Fall, wird für diesen Stab keine Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen.

Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden mit den Bewehrungsquerschnitten geführt, die in Maske 3.1 *Vorhandene Längsbewehrung* vorliegen.

2.2.2 Begrenzung der Spannungen

Betondruckspannungen

Die Betondruckspannungen müssen nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2 (1) begrenzt werden, um Risse oder starkes Kriechen zu vermeiden, falls diese die Funktion des Tragwerks beeinträchtigen können. In Abschnitt 7.2 (2) wird deshalb ein Reduktionsfaktor für die charakteristische Betondruckfestigkeit angeraten.

$$\sigma_c = k_1 \cdot f_{ck}$$

Der empfohlene Wert für k_1 ist 0,6.

Betonstahlspannungen

Zur Vermeidung nichtelastischer Dehnungen, unzulässiger Rissbildungen und Verformungen sind gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2 (4) die Zugspannungen in der Bewehrung zu begrenzen. In Abschnitt 7.2 (5) werden Reduktionsfaktoren für die charakteristische Zugfestigkeit empfohlen, die von der Art der Einwirkungskombination abhängig sind.

$$\sigma_s = k_3 \cdot f_{yk} \quad \text{für charakteristische Einwirkungskombination}$$

$$\sigma_s = k_4 \cdot f_{yk} \quad \text{für indirekte Einwirkung (Zwang)}$$

Die empfohlenen Werte für k_3 und k_4 sind 0,8 bzw. 1,0.

2.2.3 Mindestbewehrung

Der Mindestbewehrungsquerschnitt zur Begrenzung der Rissbreite ermittelt sich gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2 (2) nach Gl. (7.1) vereinfacht wie folgt:

$$A_{s,\min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,\text{eff}} \cdot A_{ct}$$

mit

$A_{s,\min}$: Mindestquerschnittsfläche der Betonstahlbewehrung in der Zugzone

σ_s : Zulässige Spannung der Betonstahlbewehrung nach Bild 2.3

k_c : Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung in der Zugzone

$k_c = 1,0$ bei reinem Zug

$k_c = 0,4$ bei Biegung

Bei Biegung mit Normalkraft wird k_c folgend bestimmt:

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot (h/h^*) \cdot f_{ct,\text{eff}}} \right] \leq 1 \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (7.2)}$$

mit

σ_c : mittlere Betonspannung, die auf den untersuchten Teil des Querschnitts wirkt, $\sigma_c = N_{Ed}/(b \cdot h)$

N_{Ed} : Normalkraft, die auf den untersuchten Teil des Querschnitts wirkt

h^* : $h^* = h \leq 1,0 \text{ m}$

k_1 : Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Normalkräfte auf die Spannungsverteilung:

$k_1 = 1,5$ für $N_{Ed} = \text{Druckkraft}$

$k_1 = 2h^*/(3h)$ für $N_d = \text{Zugkraft}$

k : Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Eigenspannungen

$k = 1,0$ für Stege mit $h \leq 300 \text{ mm}$

$k = 0,65$ für $h \geq 800 \text{ mm}$

$k = 1,0$ bei außerhalb hervorgerufenen Zwang (z. B. Stützensenkung)

$f_{ct,\text{eff}}$: Mittelwert der wirksamen Zugfestigkeit des Betons beim Auftreten der Risse

$f_{ct,\text{eff}} = f_{ctm}$

A_{ct} : Fläche der Betonzugzone

Stahlspannung ² [N/mm ²]	Grenzdurchmesser der Stäbe [mm]		
	$w_k=0,4 \text{ mm}$	$w_k=0,3 \text{ mm}$	$w_k=0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	—

Bild 2.3: Grenzdurchmesser σ_s^* bei Betonstählen gemäß EN 1992-1-1, Tabelle 7.2

2.2.4 Begrenzung der Rissbreiten

Kontrolle des Stabdurchmessers

Der Grenzdurchmesser der Bewehrungsstäbe $\max \varnothing_s$ wird gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.3 (2) wie folgt überprüft.

$$\varnothing_s = \varnothing_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c \cdot h_{cr}}{2 \cdot (h - d)} \quad \text{für Biegung}$$

$$\varnothing_s = \varnothing_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{h_{cr}}{8 \cdot (h - d)} \quad \text{für gleichmäßig verteilte Zugnormalspannungen}$$

mit

\varnothing_s^* : Grenzdurchmesser nach [Bild 2.3](#)

$f_{ct,eff}$: Wirksame Zugfestigkeit des Betons zum betrachteten Zeitpunkt, hier f_{ctm}

k_c : Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung in der Zugzone, siehe hierzu [Kapitel 2.2.3](#)

h_{cr} : Höhe der Zugzone unmittelbar vor der Rissbildung

h : Gesamthöhe des Querschnitts

d : Statische Nutzhöhe bis zum Schwerpunkt der außenliegenden Bewehrung

Nachweis des Stababstands

Der maximale Stababstand $\max s_l$ ist nach EN 1992-1-1 in Tabelle 7.3 geregelt.

Stahlspannung [N/mm ²]	Höchstwerte der Stababstände [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	—
360	100	50	—

Bild 2.4: Höchstwerte der Stababstände gemäß EN 1992-1-1, Tabelle 7.3

Nachweis der Rissbreite mit direkter Berechnung

Die charakteristische Rissbreite w_k wird gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 nach Gl. (7.8) bestimmt.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

mit

$s_{r,max}$: Größter Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild nach Gl. (7.11) bzw. (7.14)

ε_{sm} : Mittlere Dehnung der Bewehrung unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen

ε_{cm} : Mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen

Maximaler Rissabstand $s_{r,max}$

Ist der Stababstand in der Zugzone nicht größer als $5 \cdot (c + \varnothing/2)$, darf der maximale Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 (3) nach Gleichung (7.11) ermittelt werden:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \varnothing}{\rho_{p,eff}} \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (7.11)}$$

mit

- k_3 : Empfohlener Beiwert: 3,4 (deutscher Nationaler Anhang: 0)
- c : Betondeckung der Längsbewehrung
- k_1 : Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung:
0,8 für Rippenstähle bzw. 1,6 für Stäbe mit glatter Oberfläche
- k_2 : Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung:
0,5 für Biegung bzw. 1,0 für reinen Zug
- k_4 : Empfohlener Beiwert: 0,425 (deutscher Nationaler Anhang: 1/3,6)
- $\rho_{p,eff}$: Wirksamer Bewehrungsgrad

Wenn der Abstand der im Verbund liegenden Stäbe $5 \cdot (c + \varnothing/2)$ übersteigt oder wenn in der Zugzone keine im Verbund liegende Bewehrung vorhanden ist, darf als Grenzwert der Rissbreite angenommen werden:

$$s_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x) \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (7.14)}$$

Der Ansatz der Gleichungen (7.11) und (7.14) sind „Kann“-Regelungen im Sinne des Eurocodes. Interne Untersuchungen der beiden Rissabstandsgleichungen haben ergeben, dass die klare Trennung der Anwendung von Gleichung (7.14) auf Bewehrungsstäbe mit einem größeren Abstand wie $5 \cdot (c + \varnothing/2)$ nicht immer zur gewollten Rissbreite führt. Untersucht wurden Querschnitte mit geringfügig unterschiedlichen Bewehrungsabständen im Bereich von $5 \cdot (c + \varnothing/2)$. Bei plattenartigen Querschnitten ergab sich bei einem Stababstand von $1,01 \cdot [5 \cdot (c + \varnothing/2)]$ mit Gl. (7.14) ein kleinerer Rissabstand als mit Gl. (7.11) bei einem Stababstand von $0,99 \cdot [5 \cdot (c + \varnothing/2)]$. Dies würde bedeuten, dass bei Erhöhung des Bewehrungsgehaltes die Rissbreite ansteigt, sobald der Grenzwert des Stababstandes $5 \cdot (c + \varnothing/2)$ unterschritten ist. Drastisch ausgedrückt bedeutet dies: Die errechnete Rissbreite im unbewehrten Bereich ist kleiner als im bewehrten Bereich!

Im Programm wird der Rissabstand standardmäßig immer mit Gleichung (7.11) berechnet. Optional kann als oberer Grenzwert $s_{r,max}$ nach Gleichung (7.14) aktiviert werden. Aufgrund des oben erläuterten Sachverhalts wird der obere Grenzwert unabhängig vom vorhandenen Stababstand der Zugbewehrung immer berücksichtigt.

Differenz der mittleren Dehnung ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$)

Die Differenz der mittleren Dehnung von Beton und Betonstahl wird nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 (2), Gl. (7.9) wie folgt ermittelt.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

mit

- σ_s : Spannung in Zugbewehrung unter Annahme eines gerissenen Querschnitts
- k_t : Faktor für Verbundkriechen
 $k_t = 0,6$ bei kurzzeitiger Lasteinwirkung
 $k_t = 0,4$ bei langfristiger Lasteinwirkung
- $f_{ct,eff}$: Wirksame Zugfestigkeit des Betons zum betrachteten Zeitpunkt (hier f_{ctm})
- α_e : Verhältnis der E-Moduln E_s/E_{cm}
- ρ_{eff} : Wirksamer Bewehrungsgrad

2.2.5 Begrenzung der Verformungen

EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3 ermöglicht es, die Begrenzung der Verformungen vereinfacht mit einer direkten Berechnung nachzuweisen. Die Durchbiegungen sind dabei wirklichkeitsnah zu ermitteln: Das Berechnungsverfahren muss das tatsächliche Bauwerksverhalten mit einer Genauigkeit wiedergeben, die auf den Nachweiszweck abgestimmt ist.

Die Durchbiegung wird durch zweimalige Integration aus der Differentialgleichung der Biegelinie ermittelt. Da sich bei einem Stahlbetonquerschnitt die Steifigkeit jedoch abschnittsweise infolge Rissbildung ändert, ist das Momenten-Krümmungs-Diagramm nichtlinear. Es bestehen große Unterschiede in der Krümmung und damit auch in der Durchbiegung für Zustand I und Zustand II.

Die Durchbiegung wird daher mit dem Prinzip der virtuellen Arbeiten für die Stelle der maximalen Verformung bestimmt. Für die Krümmung wird eine Näherungslinie verwendet, die die Extremwerte der Krümmung mit einer zum Momentenverlauf affinen Linie verbindet.

In der Handrechnung werden nach [3] drei Werte der Durchbiegung erfasst:

Unterer Rechenwert der Durchbiegung

Die geringste Durchbiegung erhält man, wenn die Berechnung für einen vollständig ungerissenen Querschnitt durchgeführt wird (Zustand I). Diese Durchbiegung wird als f_I bezeichnet.

Oberer Rechenwert der Durchbiegung

Die größte Durchbiegung erhält man, wenn die Berechnung für einen vollständig gerissenen Querschnitt durchgeführt wird (Zustand II). Diese Durchbiegung wird als f_{II} bezeichnet.

Wahrscheinlicher Wert der Durchbiegung

Es ist anzunehmen, dass Teilbereiche des Querschnitts ungerissen und andere, höher beanspruchte Bereiche gerissen sind. Dabei verläuft die Momenten-Krümmungs-Beziehung bis zum ersten Riss nach Zustand I und dann teilweise gerissen. Diese Annahme liefert den wahrscheinlichen Wert der Durchbiegung f , der zwischen dem unteren und oberen Rechenwert liegt. Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3 (3), Gl. (7.18) kann dieser aus folgender Beziehung gewonnen werden:

$$\alpha = \zeta \cdot \alpha_{II} + (1 - \zeta) \cdot \alpha_I$$

Die Werte α_I und α_{II} kennzeichnen allgemeine Durchbiegungsparameter (z. B. f_I oder f_{II}). Dies kann eine Dehnung, Krümmung, Durchbiegung oder Verdrehung sein. ζ ist der Verteilungsbeiwert zwischen Zustand I und Zustand II und liegt wie in EN 1992-1-1, Gl. (7.19) dargestellt zwischen $0 \leq \zeta < 1$. Die Verformungsberechnung ist in der Regel mit der quasi-ständigen Einwirkungskombination zu führen (siehe EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3 (4)).



Im [Kapitel 9.1](#) ab [Seite 160](#) ist ein Beispiel vorgestellt, in dem die Handrechnung einer Verformungsberechnung mit den Ergebnissen des Programms verglichen wird.

2.2.6 Kriechen und Schwinden

Ermittlung der Eingangsgrößen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die zeitabhängigen Spannungen und Dehnungen aus Kriechen und Schwinden. Der Kriech- und Schwindeinfluss wird im analytischen Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Bestimmung der Verformung verwendet. Der Ansatz von Kriechen und Schwinden in der nichtlinearen Berechnung wird im [Kapitel 2.4.6](#) erläutert.

Kriechen bezeichnet die zeitabhängige Verformung des Betons unter Belastung über einen bestimmten Zeitraum. Die wesentlichen Einflussgrößen sind ähnlich denen des Schwindens, wobei zusätzlich die sogenannte kriecherzeugende Spannung einen wichtigen Einfluss auf die Kriechverformungen hat. Besondere Beachtung bedarf dabei die Dauer der Belastung, der Zeitpunkt der Lastaufbringung sowie die Höhe der Beanspruchung. Die Größe, durch die das Kriechen erfasst wird, ist die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ zum betrachteten Zeitpunkt t .

Schwinden beschreibt eine zeitabhängige Änderung des Volumens ohne Einwirkung von äußeren Lasten oder Temperatur. Auf die weitere Verzweigung des Schwindproblems in einzelne Erscheinungsformen (Trocknungsschwinden, autogenes Schwinden, plastisches Schwinden und Karbonatisierungsschwinden) wird hier nicht näher eingegangen. Wesentliche Einflussgrößen des Schwindens sind die relative Luftfeuchte, die wirksame Bauteildicke, die Gesteinskörnung, die Betonfestigkeit, der Wasserzementwert, die Temperatur sowie die Art und Dauer der Nachbehandlung. Die Größe, durch die das Schwinden erfasst wird, ist das Schwindmaß $\varepsilon_{c,s}(t, t_s)$ zum betrachteten Zeitpunkt t .

Im Folgenden wird die Ermittlung der Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und des Schwindmaßes $\varepsilon_{c,s}(t, t_s)$ gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 und Anhang B vorgestellt.

Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$

Voraussetzung zur Anwendung der nachfolgenden Formeln ist, dass die kriecherzeugende Spannung σ_c der einwirkenden Dauerlast folgenden Wert nicht überschreitet:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ckj}$$

mit f_{ckj} : Zylinderdruckfestigkeit des Betons zum Zeitpunkt des Aufbringens der kriecherzeugenden Spannung

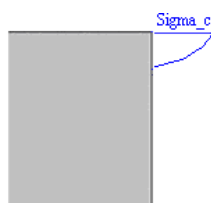


Bild 2.5: Kriecherzeugende Spannung

Unter der Annahme eines linearen Kriechverhaltens ($\sigma_c \leq 0,45f_{ckj}$) kann das Kriechen des Betons durch eine Abminderung des Elastizitätsmodul für den Beton erfasst werden.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{eff}(t, t_0)}$$

mit

E_{cm} : mittlerer Elastizitätsmodul nach EN 1992-1-1, Tabelle 3.1

$\varphi_{eff}(t, t_0)$: effektive Kriechzahl, $\varphi_{eff}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot M_{QS}/M_{Ed}$

t : Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen

t_0 : Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen

Die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ zum untersuchten Zeitpunkt t darf wie folgt berechnet werden:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{CM}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t, t_0)$$

mit

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$$

RH : Relative Luftfeuchte in [%]

h_0 : Wirksame Bauteildicke [mm]

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$$

A_c : Querschnittsfläche

u : Querschnittsumfang

α_1, α_2 : Anpassungsfaktoren

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{CM}} \right)^{0,7}$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{CM}} \right)^{0,2}$$

f_{CM} : Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{CM}}}$$

f_{cm} : Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons in [N/mm²]

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}$$

t_0 : Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3}$$

t : Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen

t_0 : Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

RH : Relative Luftfeuchte [%]

h_0 : Wirksame Bauteildicke [mm]

α_3 : Anpassungsfaktor

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{CM}} \right)^{0,5} \leq 1,0$$



Folgende Eingaben sind zur Berechnung der Kriechzahl erforderlich:

- RH : Relative Luftfeuchte [%]
- t_0 : Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen
- t : Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen (wahlweise ∞)

Der Einfluss hoher oder niedriger Temperatur in einem Bereich von 0 °C bis 80 °C auf den Aushärtungsgrad des Betons kann durch eine Korrektur des Betonalters durch folgende Gleichung berücksichtigt werden:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left[\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65\right]} \cdot \Delta t_i$$

mit

- n : Anzahl der Perioden mit gleicher Temperatur
- T(Δt_i) : Temperatur in °C während des Zeitraums Δt_i
- Δt_i : Anzahl der Tage mit dieser Temperatur T

Der Einfluss der Zementart auf die Kriechzahl des Betons kann dadurch berücksichtigt werden, dass das Belastungsalter t₀ mit Hilfe folgender Formel verändert wird.

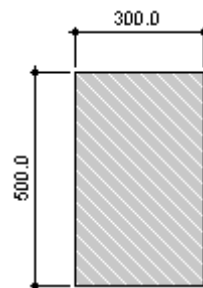
$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1,2}}\right)^\alpha \geq 0,5$$

mit

- t_{0,T} = t_T : Wirksames Betonalter bei Belastungsbeginn unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur
- α : Exponent, abhängig von der Zementart

α	Zementart
-1	langsam erhärtende Zemente der Klasse S
0	normal oder schnell erhärtende Zemente der Klasse N
1	schnell erhärtende hochfeste Zemente der Klasse R

Beispiel



- Beton C25/30
- Zement CEM 42,5 N
- RH: 50%
- Zwei Temperaturwechsel:
- 6 Tage - Temperatur 15 °C
- 8 Tage - Temperatur 7 °C
- Betrachtetes Betonalter t_k: 365 Tage

Bild 2.6: Querschnitt

Betonalter bei Kriechbeginn:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left[\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65\right]} \cdot \Delta t_i = e^{-\left[\frac{4000}{273+T(\Delta t_1)} - 13,65\right]} \cdot 6 + e^{-\left[\frac{4000}{273+T(\Delta t_2)} - 13,65\right]} \cdot 8 = 8,96 \text{ Tage}$$

Betonalter unter Einfluss der Zementart:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1,2}}\right)^\alpha = 8,96 \cdot \left(1 + \frac{9}{2 + (8,96)^{1,2}}\right)^0 = 8,96 \text{ Tage}$$

Wirksame Bauteildicken:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,5}{2 \cdot (0,3 + 0,5)} = 0,1875 \text{ cm}$$

Kriechzahl:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{CM}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t, t_0) = 1,933 \cdot 2,923 \cdot 0,606 \cdot 0,758 = 2,595$$

mit

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{187,5}} \cdot 1,042 \right] \cdot 1,012 = 1,933$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7} = \left(\frac{35}{33} \right)^{0,7} = 1,042 \quad \alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2} = \left(\frac{35}{33} \right)^{0,2} = 1,012$$

$$\beta(f_{CM}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{33}} = 2,923$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 8,96^{0,2}} = 0,606$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} = \left[\frac{365 - 8,96}{538,779 + 365 - 8,96} \right]^{0,3} = 0,758$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 = 1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot 50)^{18} \right] \cdot 187,5 + 250 \cdot 1,030 = 538,779$$

$$\beta_H \leq 1500 \cdot \alpha_3 = 1500 \cdot 1,030 = 1545; \quad \alpha_3 = \left(\frac{35}{33} \right)^{0,5} = 1,030$$

Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$

Bei der Ermittlung des Schwindmaßes $\varepsilon(t, t_s)$ gemäß [2] 3.1.4 kann die Schwinddehnung $\varepsilon_{cs}(t)$ aus dem autogenen Schwinden $\varepsilon_{ca}(t)$ und Trocknungsswinden $\varepsilon_{cd}(t, t_s)$ berechnet werden.

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t, t_s)$$

Die autogene Schwinddehnung ε_{ca} (Schrumpfen) zum betrachteten Zeitpunkt (t) folgt aus:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

mit

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad \text{charakteristische Betondruckfestigkeit } f_{ck} \text{ in [N/mm}^2\text{]}$$

Der Anteil aus Trocknungsswinden ε_{cd} ermittelt sich wie folgt:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd0}(f_{cm})$$

mit

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}$$

t Betonalter in Tagen zum betrachteten Zeitpunkt

t_s Betonalter in Tagen zum Beginn des Schwinds

h₀ Wirksame Querschnittsdicke in [mm]: h₀ = 2 · A_c/u

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

f_{cm} Mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons in [N/mm²]

f_{cm0} 10 N/mm²

Zementklasse	Merkmal	α_{ds1}	α_{ds2}
S	Langsam erhärtend	3	0,13
N	Normal erhärtend	4	0,12
R	Schnell erhärtend	6	0,11

Tabelle 2.2: α_{ds1} und α_{ds2}

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

RH Relative Luftfeuchte der Umgebung in [%]
RH₀ 100%

Beispiel

Beton C25/30

Zement CEM 42,5N

RH: 50 %

Betonalter t_s bei Schwindbeginn: 28 Tage

Betrachtetes Betonalter t : 365 Tage

Wirksame Querschnittsdicke:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,5}{2 \cdot (0,3 + 0,5)} = 0,1875 \text{ m}$$

Autogenes Schwinden:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 0,978 \cdot 0,000375 = 0,000367$$

mit

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2t^{0,5}} = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{365}} = 0,978$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (25 - 10) \cdot 10^{-6} = 0,000375$$

Trocknungsschwinden:

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,766 \cdot 0,87 \cdot 0,000512 = 0,000341$$

mit

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = \frac{(365 - 28)}{(365 - 28) + 0,04 \cdot \sqrt{187,5^3}} = 0,766$$

$$h_0 = 157,5 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad k_h = 0,87$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cd,0} &= 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} = \\ &= 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{-0,12 \frac{33}{10}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356 = \\ &= 0,000512 \end{aligned}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] = 1,356$$

$$\begin{aligned} \text{Zementklasse N} \quad \Rightarrow \quad \alpha_{ds1} &= 4 \\ \alpha_{ds2} &= 0,12 \end{aligned}$$

Gesamtschwindmaß:

$$\varepsilon(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) = 0,000367 + 0,000341 = 0,000708 = 0,378 \text{ ‰}$$

2.3 Brandschutznachweis

Die Brandschutzbemessung mit BETON erfolgt nach dem vereinfachten Rechenverfahren gemäß EN 1992-1-2, Abschnitt 4.2. Dabei wird die in Anhang B.2 beschriebene *Zonenmethode* verwendet:

Die Verringerung der Tragfähigkeit bei Brandeinwirkung wird durch eine Verkleinerung des Bauteilquerschnittes und eine Abminderung der Baustofffestigkeiten abgebildet. Bei dem zur Brandbemessung benutzten Ersatzquerschnitt werden die dem Brand direkt ausgesetzten und dadurch zermürbten Betonbereiche nicht berücksichtigt. Der Brandschutznachweis erfolgt dann mit dem reduzierten Querschnitt und den abgeminderten Baustoffeigenschaften analog zum Tragfähigkeitsnachweis bei Normaltemperatur.

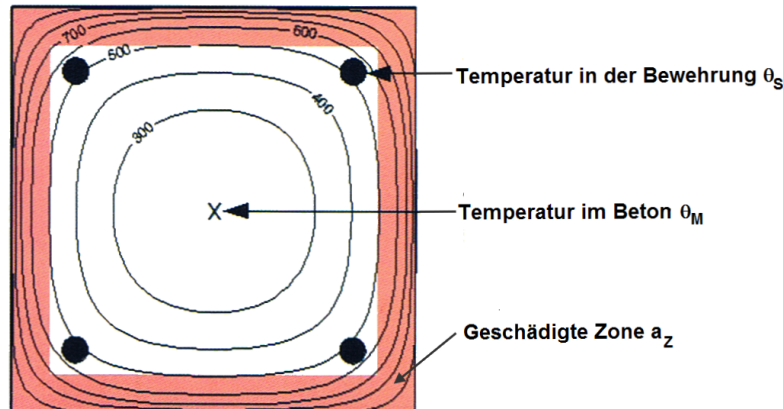


Bild 2.7: Brandbeanspruchter Querschnitt mit geschädigten Zonen

2.3.1 Unterteilung des Querschnitts

Der Querschnitt wird in eine Anzahl paralleler ($n \geq 3$) Zonen gleicher Dicke eingeteilt. Für jede Zone wird die mittlere Temperatur, die entsprechende Druckfestigkeit $f_{c,\theta}$ und ggf. der Elastizitätsmodul ermittelt.

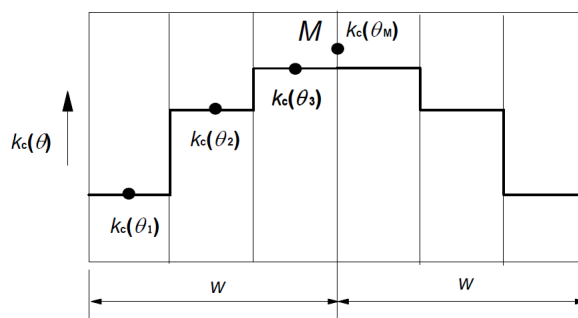


Bild 2.8: Unterteilung einer beidseits brandbeanspruchten Wand in Zonen gemäß [5], Bild B.4

Der brandbeanspruchte Querschnitt wird auf eine äquivalente Wand zurückgeführt. Dabei beträgt die Breite der gleichwertigen Wand $2 \cdot w$. Diese Ersatzbreite ist wie im Bild 2.8 gezeigt symmetrisch in Zonen zu unterteilen.

Die halbe Ersatzbreite w ist abhängig von der Brandbeanspruchung, die auf das Bauteil wirkt. Die folgende Tabelle 2.3 bietet eine Übersicht über die normgemäße Ermittlung der Ersatzbreiten.

Brandbeanspruchung	Halbe Ersatzbreite w
Einseitig brandbeanspruchtes Bauteil	Bauteilbreite in Brandeinwirkungsrichtung
Zweiseitig (gegenüberliegend) brandbeanspruchte Stütze oder Wand	0,5 · Bauteilbreite in Brandeinwirkungsrichtung
Vierseitig brandbeanspruchte Stütze	0,5 · kleineres Querschnittsmaß

Tabelle 2.3: Ermittlung der Ersatzbreiten

2.3.2 Reduzierung des Querschnitts

Ermittlung der Temperatur θ_i in Zonenmitte

Nach der Zoneneinteilung des Querschnitts wird die Temperatur θ_i in der Mitte einer jeden Zone i ermittelt. Dies erfolgt anhand der Temperaturprofile gemäß EN 1992-1-2, Anhang A, die auf folgenden Annahmen basieren:

- Die spezifische Wärme von Beton entspricht den Angaben nach EN 1992-1-2, Abschnitt 3.2.2.
- Die Feuchte beträgt 1,5 % (für Feuchten $> 1,5$ % liegen die dargestellten Temperaturen auf der sicheren Seite).
- Die thermische Leitfähigkeit von Beton ist der untere Grenzwert aus EN 1992-1-2, Abschnitt 3.3.3.
- Der Emissionswert für die Betonoberfläche beträgt 0,7.
- Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient beträgt $25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ermittlung des Reduktionsfaktors $k_c(\theta_i)$

Für die ermittelte Temperatur im Zentrum der Zone i wird der Reduktionsfaktor $k_c(\theta_i)$ bestimmt, um den Abfall der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} zu berücksichtigen. Dieser Reduktionsfaktor $k_c(\theta_i)$ ist abhängig von den Zuschlägen des Betons:

Bei Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen ist die Kurve 1, bei Normalbeton mit kalksteinhaltigen Zuschlägen die Kurve 2 gemäß EN 1992-1-2, Bild 4.1 zu verwenden.

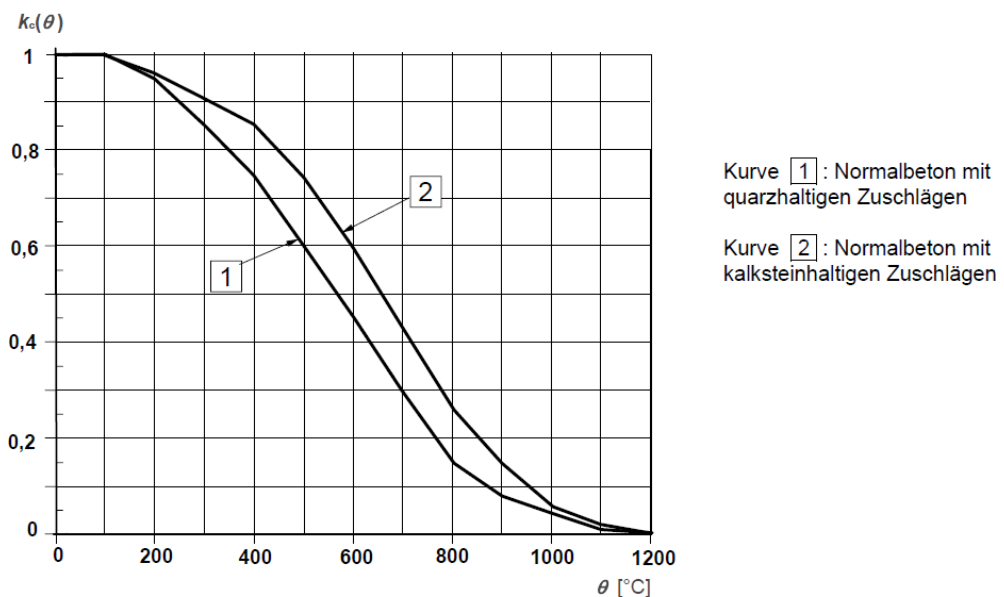


Bild 2.9: Beiwert $k_c(\theta_i)$ zur Berücksichtigung des Abfalls der Betondruckfestigkeit gemäß [5], Bild 4.1

Ermittlung der geschädigten Zone mit der Dicke a_z

Der brandgeschädigte Querschnitt wird durch einen reduzierten Querschnitt abgebildet. Dies bedeutet, dass eine geschädigte Zone der Dicke a_z an den brandbeanspruchten Seiten beim Nachweis der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt wird.

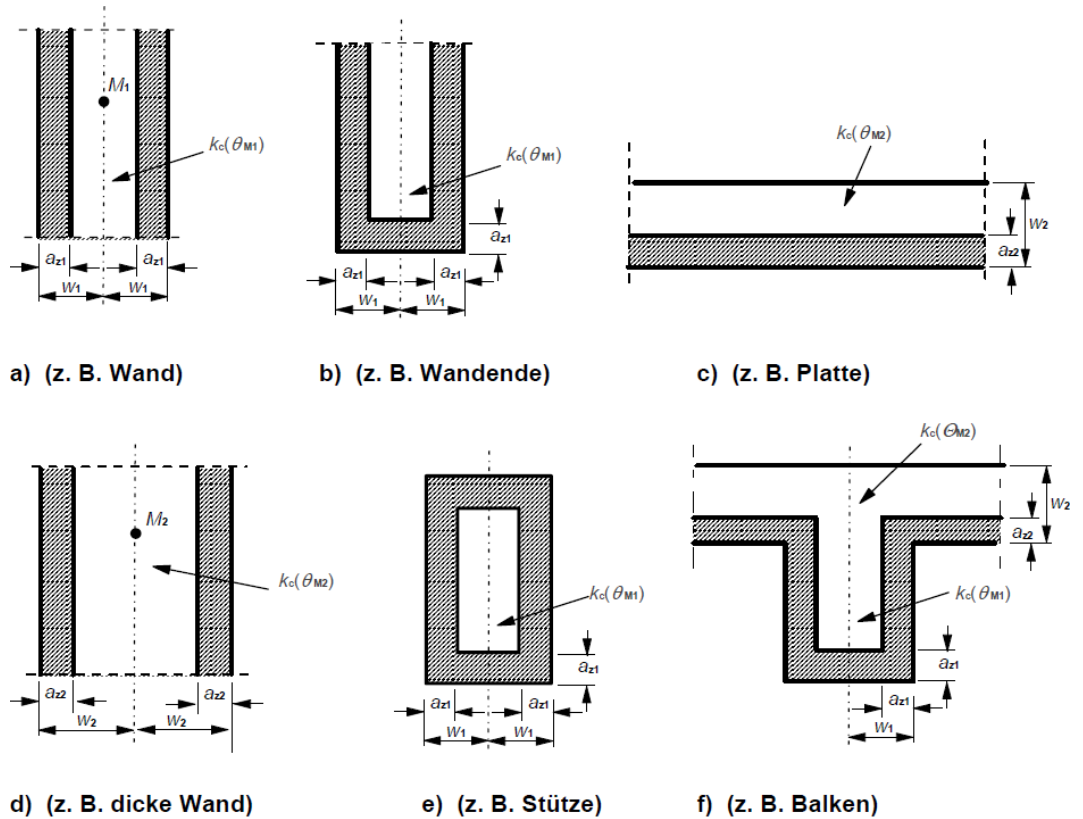


Bild 2.10: Reduktion der Festigkeit und des Querschnitts bei Brandbeanspruchung gemäß [5], Bild B.3

Die Berechnung der geschädigten Zonendicke a_z erfolgt abhängig vom Bauteiltyp:

• **Balken, Platten**

$$a_z = w \cdot \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right]$$

• **Stützen, Wände** und andere Konstruktionen, bei denen **Auswirkungen infolge Theorie II. Ordnung** berücksichtigt werden müssen

$$a_z = w \cdot \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right]$$

mit

w : halbe Breite der äquivalenten Wand

$k_{c,m}$: mittlerer Reduktionskoeffizient für einen bestimmten Querschnitt

$$k_{c,m} = \frac{1 - \frac{0,2}{n}}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i)$$

n : Anzahl paralleler Zonen in w

Über den Faktor $(1 - \frac{0,2}{n})$ wird die Temperaturveränderung in jeder Zone berücksichtigt.

$k_c(\theta_M)$: Reduktionskoeffizient für Beton am Punkt M (siehe Bild 2.9)

2.3.3 Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons

Für die Abminderung der Materialeigenschaften des Betons ist der Punkt M – ein Punkt auf der zentralen Linie der gleichwertigen Wand (vgl. Bild 2.8, Seite 24) – maßgebend. Damit wird der Reduktionsfaktor $k_c(\theta_M)$ ermittelt. Die abgeminderten Materialeigenschaften des Betons sind für den gesamten reduzierten Querschnitt (ohne der geschädigten Zone a_z) beim Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall zu verwenden.

Druckfestigkeit des Betons für die Heißbemessung

Die Spannungs-Dehnungs-Linie für die Druckfestigkeit des Betons wird in Abhängigkeit von der Temperatur im Punkt M und der Art der Zuschläge bestimmt. Die Werte der Stauchung $\epsilon_{cu1,\theta}$ bei der Druckfestigkeit $f_{c,\theta}$ werden EN 1992-1-2, Tabelle 3.1 entnommen.

$$f_{c,\theta} = k_c(\theta_M) \cdot f_{ck}$$

mit

$k_c(\theta_M)$: Reduktionskoeffizient für Beton am Punkt M (siehe Bild 2.9, Seite 25)

f_{ck} : charakteristische Druckfestigkeit des Betons bei Normaltemperatur

Beton Temp. θ	Quarzh. Zuschläge			Kalksteinhaltige Zuschläge		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	–	–	0,00	–	–

Bild 2.11: Parameter der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton bei Brandbeanspruchung gemäß [5], Tabelle 3.1

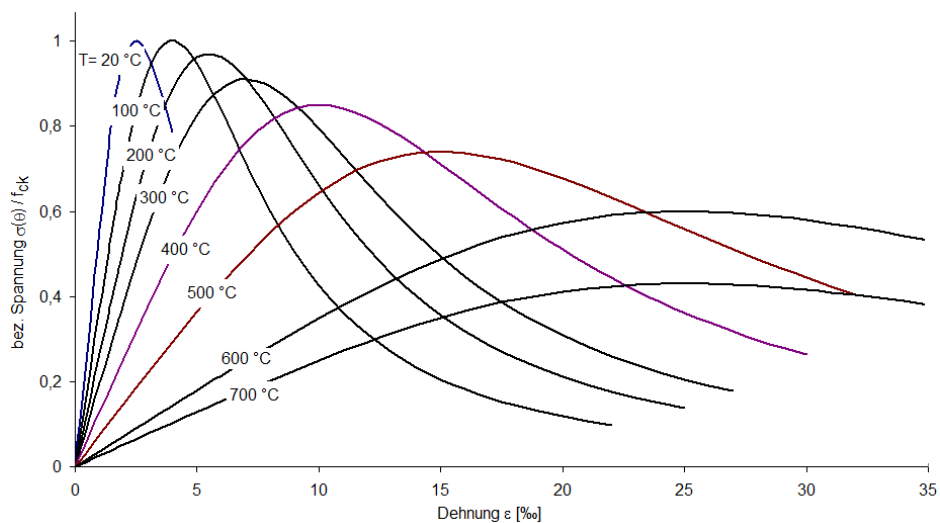


Bild 2.12: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton mit kalksteinhaltigen Zuschlägen in Abhängigkeit der Temperatur



Im Diagramm (Bild 2.12) ist zu erkennen, wie sich die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Normalbeton mit kalksteinhaltigen Zuschlägen in Abhängigkeit von der Temperatur ändert. Für den Brandschutznachweis wird der abfallende Ast nicht berücksichtigt.

Der reduzierte Beton-Elastizitätsmodul für den Brandschutznachweis ermittelt sich nach folgender Gleichung:

$$E_{cd,\theta} = [k_c(\theta_M)]^2 \cdot E_c$$

mit

$k_c(\theta_M)$: Reduktionskoeffizient für Beton am Punkt M (siehe Bild 2.9, Seite 25)

E_c : E-Modul des Betons bei Normaltemperatur (20 °C)

Zugfestigkeit des Betons für die Heißbemessung

Die Zugfestigkeit des Betons wird – auf der sicheren Seite liegend – weder bei der Querschnittsbemessung noch beim Brandschutznachweis angesetzt. Der Vollständigkeit halber werden die Werte jedoch bei den Materialeigenschaften angegeben (vgl. Kapitel 3.2, Seite 62).

Nach [5] Bild 3.2 ist die Betonzugfestigkeit für die Heißbemessung generell zu reduzieren:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta_M) \cdot f_{ck,t}$$

mit

$k_{c,t}(\theta_M)$: Reduktionskoeffizient für Betonzugfestigkeit nach Bild 2.13

$f_{ck,t}$: charakteristische Zugfestigkeit des Betons bei Normaltemperatur

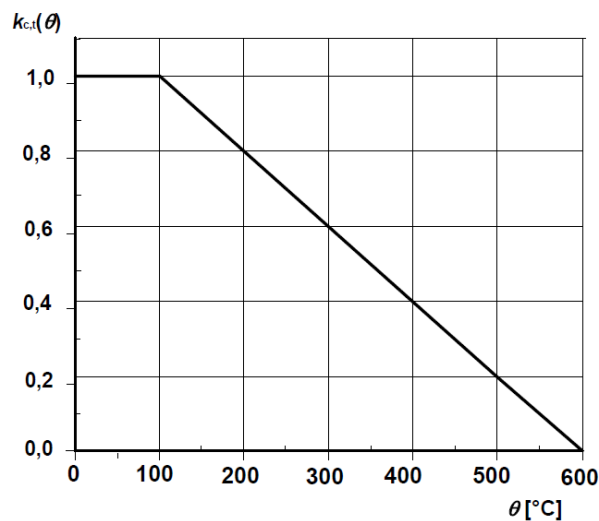


Bild 2.13: Reduktionsfaktor $k_{c,t}(\theta)$ zur Berücksichtigung temperaturabhängiger Betonzugfestigkeit f_{ct} nach [5] Bild 3.2

2.3.4 Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls

Reduktionsfaktor $k_s(\theta)$ für Stahlzugfestigkeit

Zur Ermittlung des Reduktionsfaktors $k_s(\theta)$ ist zunächst die Temperatur in der Stabmitte des ungünstigsten Bewehrungsstabes zu bestimmen. Abhängig von der Herstellungsart und der Klassifizierung des Betonstahls (Klasse N oder Klasse X) sowie der vorhandenen Stahldehnung wird der Reduktionsbeiwert $k_s(\theta)$ ermittelt.

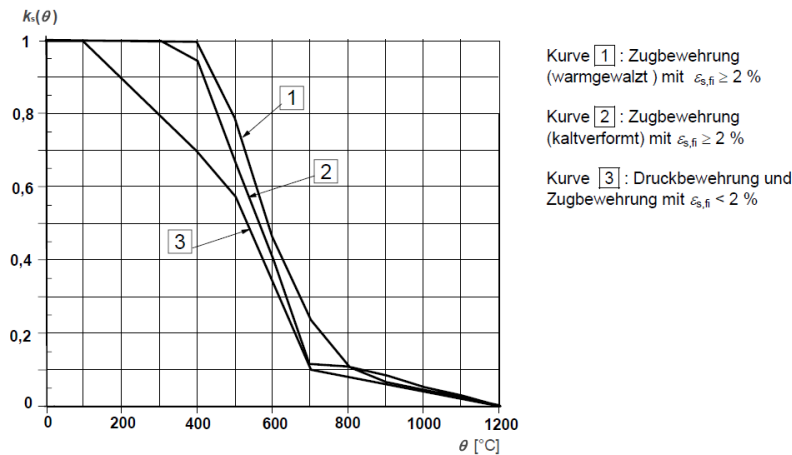


Bild 2.14: Klasse N – Reduktionsfaktor $k_s(\theta)$ nach [5] Bild 4.2a

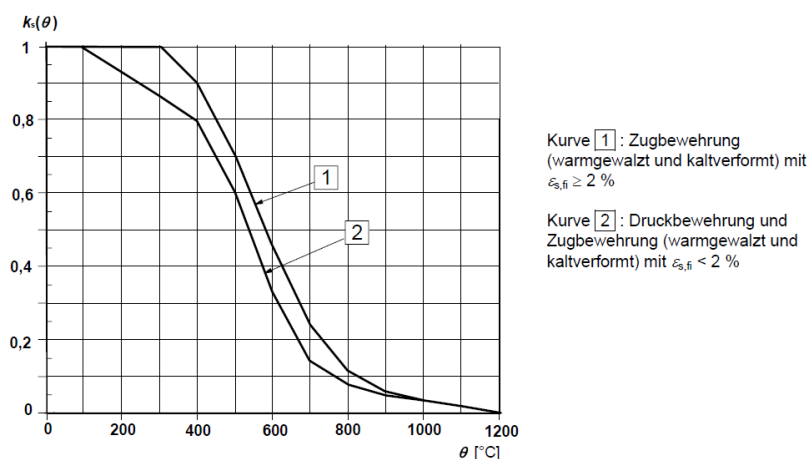


Bild 2.15: Klasse X – Reduktionsfaktor $k_s(\theta)$ nach [5] Bild 4.2b

Reduzierung der Betonstahlfestigkeit $f_{sy,\theta}$

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betonstahls wird durch folgende Parameter definiert:

- Neigung im linear-elastischen Bereich $E_{s,\theta}$
- Proportionalitätsgrenze $f_{sp,\theta}$
- maximales Spannungsniveau $f_{sy,\theta}$

Die in der Heißbemessung maximal anzusetzende Betonstahlfestigkeit ermittelt sich wie folgt:

$$f_{sy,\theta} = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$$

mit

$k_s(\theta)$: Reduktionskoeffizient für Betonstahl (siehe Bild 2.14 und Bild 2.15)

f_{yk} : charakteristische Festigkeit des Betonstahls bei Normaltemperatur

Ermittlung des reduzierten E-Moduls $E_{s,\theta}$ des Betonstahls

Kann der Betonstahl in Kurve 1 oder Kurve 2 der Bilder 4.2a bzw. 4.2b in EN 1992-1-2 eingeordnet werden (vgl. Bild 2.14 und Bild 2.15), so lässt sich der reduzierte E-Modul des Betonstahls in Abhängigkeit von Betonstahltemperatur und Herstellungsart des Stahls aus EN 1992-1-2, Tabelle 3.2a bzw. 3.2b entnehmen.

Stahltemperatur θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	w.-gewalzt	kaltverformt	w.-gewalzt	kaltverformt	w.-gewalzt	kaltverformt
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Bild 2.16: Klasse N – Parameter der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Stahl nach [5] Tabelle 3.2a

Stahl Temperatur θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$	$f_{sp,\theta} / f_{yk}$	$E_{s,\theta} / E_s$
	warmgewalzt und kaltverformt	warmgewalzt und kaltverformt	warmgewalzt und kaltverformt
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00
200	1,00	0,87	0,95
300	1,00	0,74	0,90
400	0,90	0,70	0,75
500	0,70	0,51	0,60
600	0,47	0,18	0,31
700	0,23	0,07	0,13
800	0,11	0,05	0,09
900	0,06	0,04	0,07
1 000	0,04	0,02	0,04
1 100	0,02	0,01	0,02

Bild 2.17: Klasse X – Parameter der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Stahl nach [5] Tabelle 3.2b

Für Betonstähle, die in Kurve 3 nach EN 1992-1-2, Bild 4.2a einzustufen sind, wird der reduzierte E-Modul wie folgt berechnet:

$$E_{sy,\theta} = k_s(\theta) \cdot E_s$$

mit

$k_s(\theta)$: Reduktionskoeffizient für Betonstahl (siehe Bild 2.14 bzw. Bild 2.15)

E_s : E-Modul des Betonstahls bei Normaltemperatur (20 °C)

2.4 Nichtlineare Bemessung

EN 1992-1-1 ermöglicht eine nichtlineare Schnittgrößenermittlung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Dabei werden die Schnittgrößen und Verformungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Schnittgrößen-Verformungs-Verhaltens (physikalisch) ermittelt.

2.4.1 Methode

Das Prinzip zur Analyse nichtlinearer Probleme wird am Beispiel der einachsigen Biegung vorgestellt. Zur Ermittlung des nichtlinearen Verformungs- und Schnittkraftverlaufs wird die Finite-Elemente-Methode mit elementweise konstanten Ersatzsteifigkeiten benutzt. Aus diesem Grund hat die gewählte Elementierung einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse und die Konvergenz der Berechnung.

Um gravierende Eingabefehler und ein elementweises Oszillieren zu vermeiden, wird bei der Berechnung zum einen eine adaptive Stabteilung und zum anderen eine gedämpfte „Steifigkeitsaufbringung“ benutzt. Mit diesen beiden Maßnahmen sollen zu große Steifigkeitsunterschiede zwischen benachbarten Elementen verhindert werden, die zu einem Oszillieren zum nächsten Iterationszyklus führen. Im [Kapitel 2.4.9](#) wird auf das Thema *Konvergenz* näher eingegangen.

Das folgende Bild zeigt schematisch die vom Momentenverlauf abhängige Verteilung der Steifigkeiten.

Detailpunkt zur Verdeutlichung der adaptiven Teilung

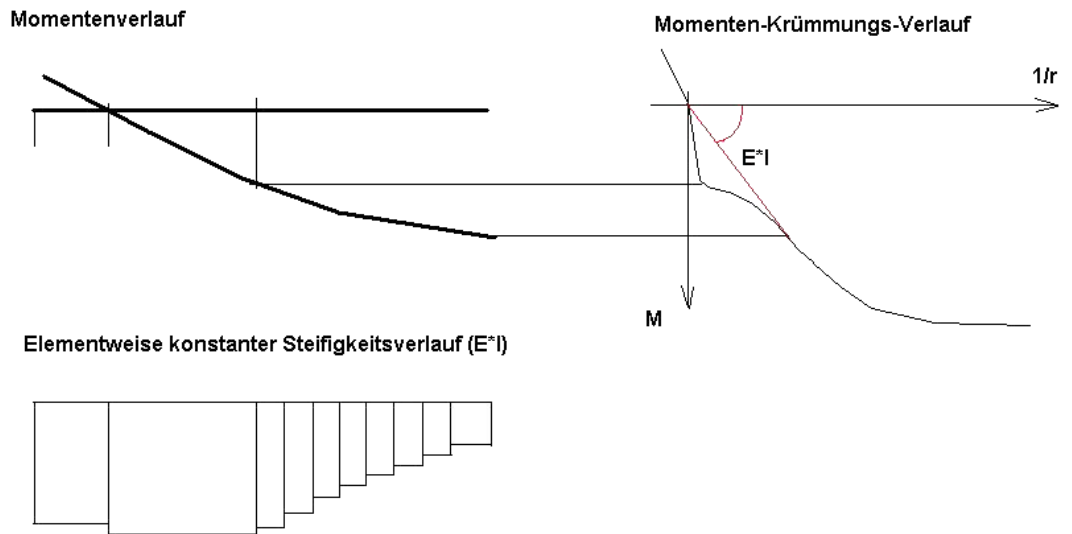


Bild 2.18: Prinzip der adaptiven Teilung anhand eines Detailpunkts

Folgendes Flussdiagramm stellt den allgemeinen Ablauf einer nichtlinearen Berechnung dar.

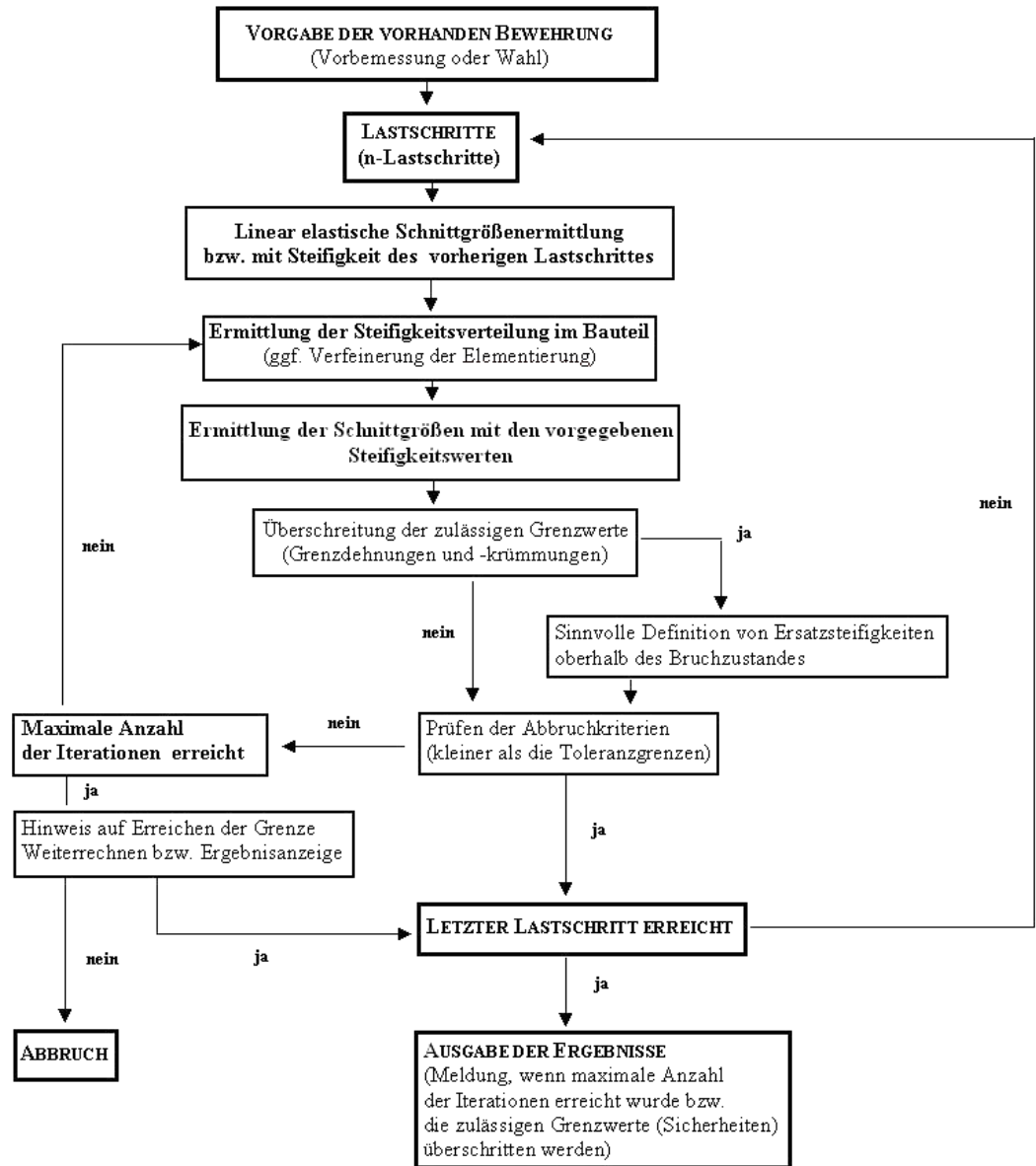


Bild 2.19: Allgemeiner Berechnungsablauf einer nichtlinearen Bemessung

Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.4.2 Dehnung und Krümmung

Dieses Kapitel beschreibt die Ermittlung signifikanter Kenngrößen auf Querschnittsebene. Dabei wird die Beschreibung auf einen einfachen Rechteckquerschnitt unter einachsiger Biegung reduziert. Dies bietet den Vorteil einer geschlossenen Angabe der Momenten-Krümmungs-(Normalkraft)-Beziehung, die die beanspruchungsabhängige Steifigkeitsentwicklung am deutlichsten widerspiegelt. Dies bedeutet, dass der Momenten-Krümmungs-Verlauf abhängig ist von der Normalkraftbeanspruchung des Querschnitts.

Die beiden [Kapitel 2.4.7.1](#) und [2.4.8](#) gehen auf die Materialkennwerte näher ein, die für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit angesetzt werden.

Es bestehen folgende grundlegende Zusammenhänge zwischen Dehnung und Krümmung:

Linearisierte Darstellung

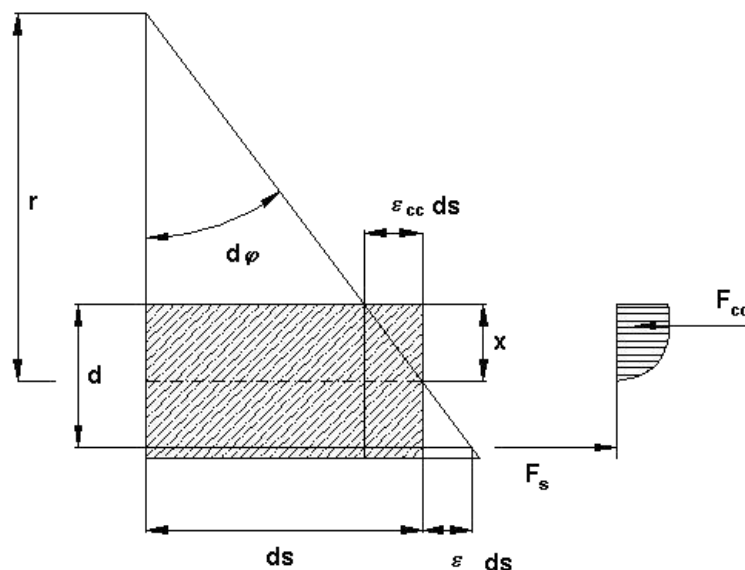


Bild 2.20: Zusammenhang zwischen Dehnung und Krümmung am infinitesimalen Element

Anhand der oben dargestellten Zusammenhänge ergeben sich folgende Beziehungen.

$$d\varphi \approx \tan(d\varphi) = \frac{ds}{r}$$

$$d\varphi \approx \tan(d\varphi) = \frac{\varepsilon_s \cdot ds - \varepsilon_{cc} \cdot ds}{d} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{cc}}{d} ds$$

Durch Gleichsetzen ergibt sich

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{cc}}{d}$$

mit

ε_{cc} : negativ bei Stauchung des Betons

Für den ungerissenen Zustand I ergibt sich unter Zugrundelegung linear elastischen Werkstoffverhaltens der Zusammenhang zwischen Moment und Krümmung wie folgt.

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M}{E \cdot I}$$

Im gerissenen Zustand (Zustand II) geht die direkte Affinität zwischen dem Verlauf der Momenten- und Krümmungslinie verloren. Der Wert $E \cdot I$ (die Sekantenbiegesteifigkeit) ist belastungsabhängig und somit nicht mehr konstant im Bereich gleicher geometrischer Randbedingungen.

Das folgende Bild verdeutlicht den grundlegenden Unterschied zwischen Sekanten- und Tangenteinsteifigkeit.

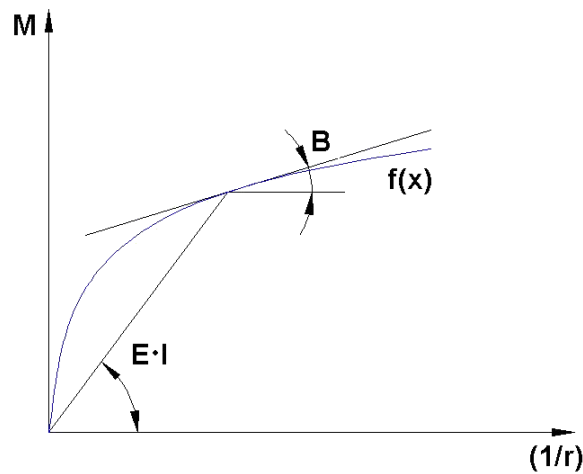


Bild 2.21: Sekantensteifigkeit ($E \cdot I$) und Tangentenbiegesteifigkeit (B)

Bei der Berechnung der Verformungen hängt die Herangehensweise stark vom verwendeten Verfahren ab. QUAST weist in [6] auf die Vorteile der Nutzung des Übertragungsmatrizenverfahrens unter Ansatz der tangentialen Biegesteifigkeiten (bei bereichsweiser Linearisierung $(1/r)_0 + M/B_{II}$) hin. Dies ist im Hinblick auf das erwähnte Verfahren oder für „Handrechnungen“ zur Ermittlung der Verformungen oder Gelenkrotationen mit dem Prinzip der virtuellen Arbeit sicher zweckmäßig.

Bei der Nutzung der FEM empfiehlt sich die Berechnung auf Grundlage konstanter Ersatzsteifigkeiten. Um den nichtlinearen Verlauf der Momenten-Krümmungs-Beziehung des Querschnitts auch im Bereich von sprunghaften Änderungen der tangentialen Biegesteifigkeit ausreichend genau zu erfassen, ist in den Übergangsbereichen (M_{cr} ; M_y) eine feinere Teilung zwingend erforderlich. Diese erfolgt programmintern durch die Begrenzung der Steifigkeitsunterschiede von benachbarten Elementen.

2.4.3 Tension Stiffening

Aus der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist bekannt, dass bei gerissenen Stahlbetonteilen die Zugkräfte im Riss allein durch die Bewehrung aufgenommen werden müssen. Zwischen zwei Rissen werden jedoch Zugspannungen über den (verschieblichen) Verbund in den Beton eingeleitet. Somit beteiligt sich der Beton – bezogen auf die Bauteillänge – an der Aufnahme innerer Zugkräfte, was zu einer Erhöhung der Bauteilsteifigkeit führt. Dieser Effekt wird als *Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen* oder auch als *Tension Stiffening* bezeichnet.

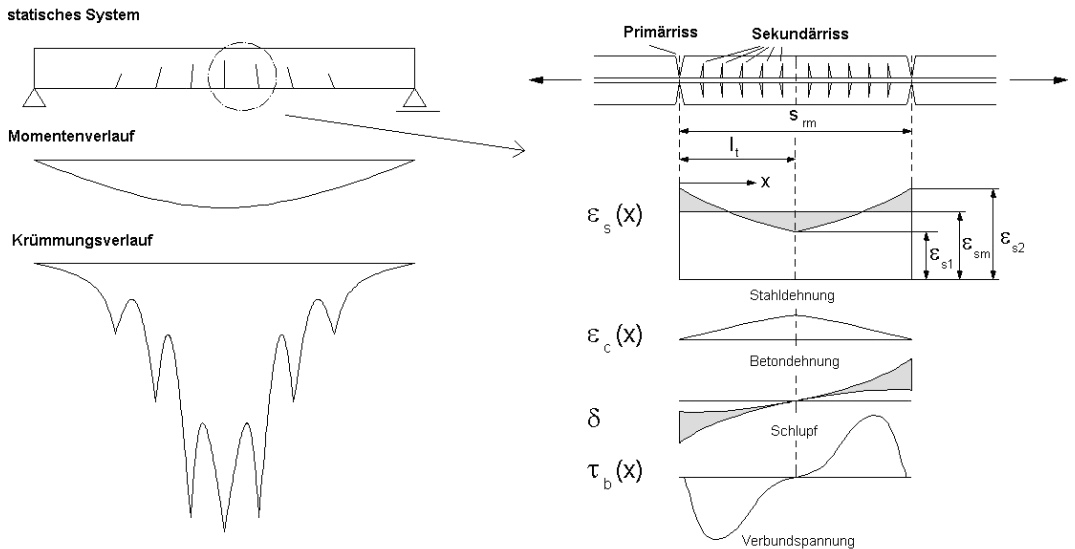


Bild 2.22: Spannungs- und Dehnungsverhalten zwischen zwei Primärrissen

Diese Erhöhung der Bauteilsteifigkeit durch die Zugversteifung kann auf zwei Arten berücksichtigt werden:

- In der Betonarbeitslinie wird eine nach der Rissbildung verbleibende konstante Restzugspannung abgebildet. Die Restzugspannung ist dabei deutlich kleiner als die Zugfestigkeit des Betons. Alternativ können modifizierte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für den Zugbereich eingeführt werden, die das Mitwirken des Betons auf Zug zwischen den Rissen in Form eines abfallenden Astes nach Erreichen der Zugfestigkeit beachten. Dieses Vorgehen erweist sich bei der numerischen Berechnung oft als sinnvoll.
- Die für praktische Nachweise gebräuchlichere und auch anschaulichere Variante ist die Änderung der „nackten“ Arbeitslinie des Stahls. Dabei wird im jeweils betrachteten Querschnitt eine verringerte Stahldehnung ϵ_{sm} angesetzt, die sich aus ϵ_{s2} und einem Abzugsterm infolge der Zugversteifung ergibt.

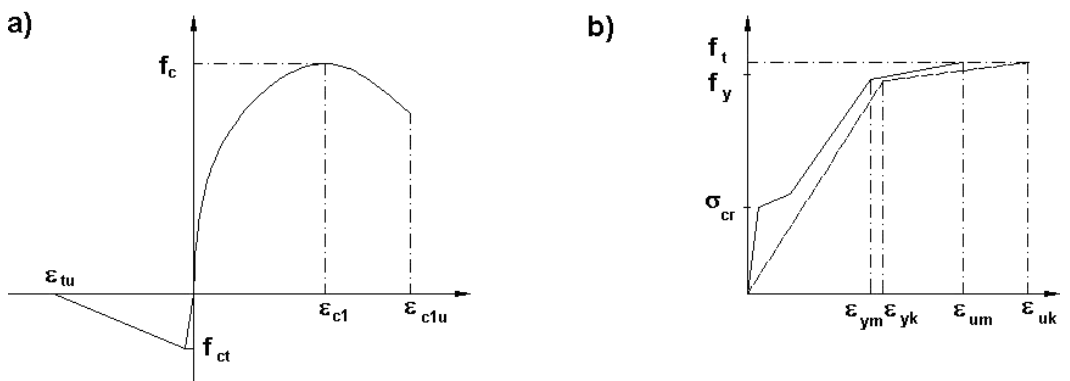


Bild 2.23: Unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung des Tension Stiffening Effekts
a) über Betonkennlinie b) modifizierte Stahlkennlinie

In BETON kann der Effekt des *Tension Stiffening* sowohl über eine modifizierte Stahlkennlinie nach [7] als auch über eine Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Zugbereich gemäß [8] und [9] berücksichtigt werden.

Vor- und Nachteile der Verfahren sowie der zweckmäßige Einsatz der einzelnen Methoden sind mehrfach in der Literatur (z. B. [9]) untersucht.

2.4.3.1 Modell: Zugfestigkeit des Betons

Dieses Modell zur Erfassung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen basiert auf einer definierten Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Zugbereich (Parabel-Rechteck-Diagramm). Dabei ist die rechnerische Zugfestigkeit **keine** fixe Größe, sondern bezieht sich auf die vorhandene Dehnung in der maßgebenden Stahl(zug)faser. Der Ansatz wurde affin zu den Angaben in [8] dahingehend aufgegriffen, dass die maximale Zugfestigkeit f_{ctR} ab der definierten Rissdehnung bis zum Erreichen der Fließdehnung ϵ_{sy} in der maßgebenden Stahlfaser linear auf null abnimmt.

In verschiedenen Forschungsvorhaben (u. a. [9]) wurde der Ansatz von QUASt weiter verfeinert bzw. modifiziert und an die Auswertung von Versuchen angepasst.

Folgende Abbildung veranschaulicht das schematische Vorgehen.

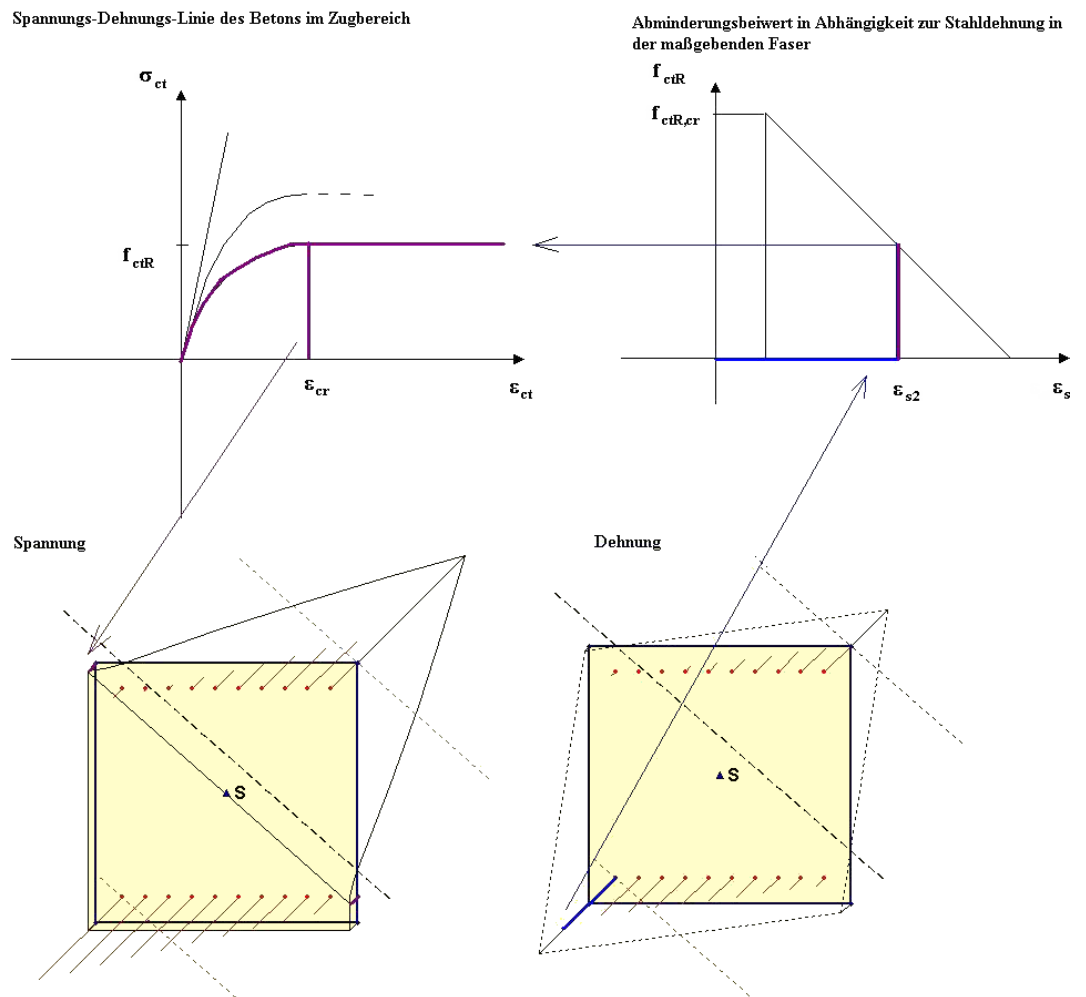


Bild 2.24: Berechnung der Restzugfestigkeit für das Tension Stiffening Modell nach QUASt

Die Ermittlung des Parabel-Rechteck-Diagramms für die Zugzone erfolgt nach folgenden formellen Zusammenhängen:

$$f_{ct,R} = \alpha_{red} \cdot f_{ct,grund}$$

$$v = \frac{f_{ct}}{f_{ct,R}}$$

$$\varepsilon_{cr} = \left| \frac{\varepsilon_{ct1}}{v} \right|$$

$$n_{ct} = 1,05 \cdot E_{ctm} \cdot \frac{\varepsilon_{cr}}{f_{ct,R}}$$

$$\sigma_{ct,R} = f_{ct,R} \cdot \frac{\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{cr}} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_{s2} \leq \varepsilon_{sy}$$

mit

α_{red} : Abminderungsfaktor des Basiswertes der Zugfestigkeit

$f_{ct,grund}$: Grundwert Zugfestigkeit (z. B. f_{ctm})

$f_{ct,R}$: Rechnerische Zugfestigkeit

v : Verhältniswert Druck- zu Zugfestigkeit

ε_{cr} : Rechnerische Dehnung bei Erreichen von $f_{ct,R}$

n_{ct} : Exponent der Parabel im Zugbereich

$\sigma_{ct,R}$: Rechnerische Spannung in Abhängigkeit der maßgebenden Dehnung der Stahlfaser

ε_{sy} : Rechnerische Fließdehnung

ε_{s2} : Dehnung der maßgebenden Stahlfaser

2.4.3.2 Modifizierte Stahlkennlinie

Der *Tension Stiffening*-Effekt kann auch über eine modifizierte Stahlkennlinie berücksichtigt werden. Dabei wird die geringere tangentielle Steifigkeit (sprunghafte Änderung bei erneuter Rissbildung) während der Rissentwicklung näherungsweise über eine Unterscheidung zwischen Rissbildung und abgeschlossener Rissbildung erfasst.

Spannungs-Dehnungs-Linie des Stahls

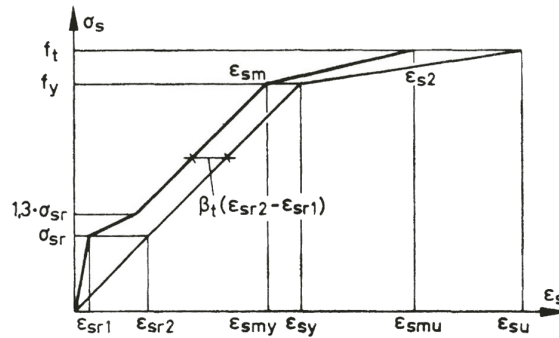


Bild 2.25: Modifizierte Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls nach [7]

Erläuterung

Ungerissen – Zustand I ($0 < \sigma_s \leq \sigma_{sr}$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s1}$$

Zustand der Erstrissbildung ($\sigma_{sr} < \sigma_s \leq 1,3\sigma_{sr}$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \frac{\beta_t (\sigma_s - \sigma_{sr}) + (1,3\sigma_{sr} - \sigma_s)}{0,3\sigma_{sr}} (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1})$$

Zustand der abgeschlossenen Rissbildung ($1,3\sigma_{sr} < \sigma_s \leq f_y$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_t (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1})$$

Plastisches Stahlfließen bis zum Versagen ($f_y < \sigma_s \leq f_t$)

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sy} - \beta_t (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) + \delta_d \left(1 - \frac{\sigma_{sr}}{f_y} \right) (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{sy})$$

Bezeichnungen:

ε_{sm} : mittlere Stahldehnung

ε_{su} : Bruchdehnung des Betonstahls

ε_{s1} : Stahldehnung im ungerissenen Zustand

ε_{s2} : Stahldehnung im gerissenen Zustand (im Riss)

ε_{sr1} : Stahldehnung im ungerissenen Zustand unter Risschnittgrößen

ε_{sr2} : Stahldehnung im Riss unter Risschnittgrößen

β_t : Beiwert zur Berücksichtigung der Belastungsdauer bzw. Lastwiederholungen

0,40 kurzzeitige Belastung

0,25 andauernde Last oder häufige Lastwechsel

σ_{sr} : Spannung in Zugbewehrung, berechnet auf Grundlage eines gerissenen Querschnitts für die Einwirkungskombination, die zur Erstrissbildung führt

σ_s : Stahlspannung im gerissenen Zustand (im Riss) in $[\text{N}/\text{mm}^2]$

σ_d : Beiwert zur Berücksichtigung der Duktilität der Bewehrung

0,8 hochduktiler Stahl

0,6 normalduktiler Stahl

2.4.4 Mittlere Momenten-Krümmungs-Beziehung

Die mittlere Momenten-Krümmungs-Beziehung beschreibt den Zusammenhang zwischen Moment und Krümmung unter Berücksichtigung der zugversteifenden Wirkung des Betons. Anhand diskreter Dehnungszustände (Krümmungen) kann ein zugehöriges Moment ermittelt werden. In der Regel wird ausgehend von der Bruchdehnung eine je nach Aufgabe variierende Teilung der Bruchkrümmung vorgenommen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist die Notwendigkeit einer sehr feinen Teilung, um bei signifikanten Fließpunkten auch die Übergangsbereiche abzubilden. Durch Verbindung der betreffenden Einzelpunkte erhält man einen Polygonzug als charakteristische Momenten-Krümmungs-Linie. Deren Verlauf wird auch von der wirkenden Längskraft beeinflusst bzw. ist davon abhängig. In den meisten baupraktischen Anwendungsfällen ist aber der Ansatz einer bereichsweise linearisierten Momenten-Krümmungs-Beziehung ausreichend.

BETON ermittelt verfahrensbedingt (Doppelbiegung, keine konstante Längskraft) die Steifigkeit an jedem Elementknoten direkt aus der Schnittgröße der vorhergehenden Iteration. Ein Unterschied zwischen den zwei Methoden des Tension Stiffening Ansatzes besteht darin, dass beim Ansatz nach QUAST die mittlere Steifigkeit direkt aus der Spannungsberechnung hervorgeht. Im Gegensatz hierzu ist bei dem Ansatz über die modifizierte Stahlkennlinie die mittlere Krümmung nochmals separat zu bestimmen, was je nach Geometrie und System zu gewissen Geschwindigkeitseinbußen führen kann.

Für Druckglieder ist das Mitwirken des Betons grundsätzlich über das Modell von QUAST [8] zu berücksichtigen. Der Grund ist die vereinfachte Berechnung im ungerissenen Zustand bei dem Modell über die modifizierte Stahlkennlinie (siehe Kapitel 2.4.3.2 und Kapitel 4.2.2).

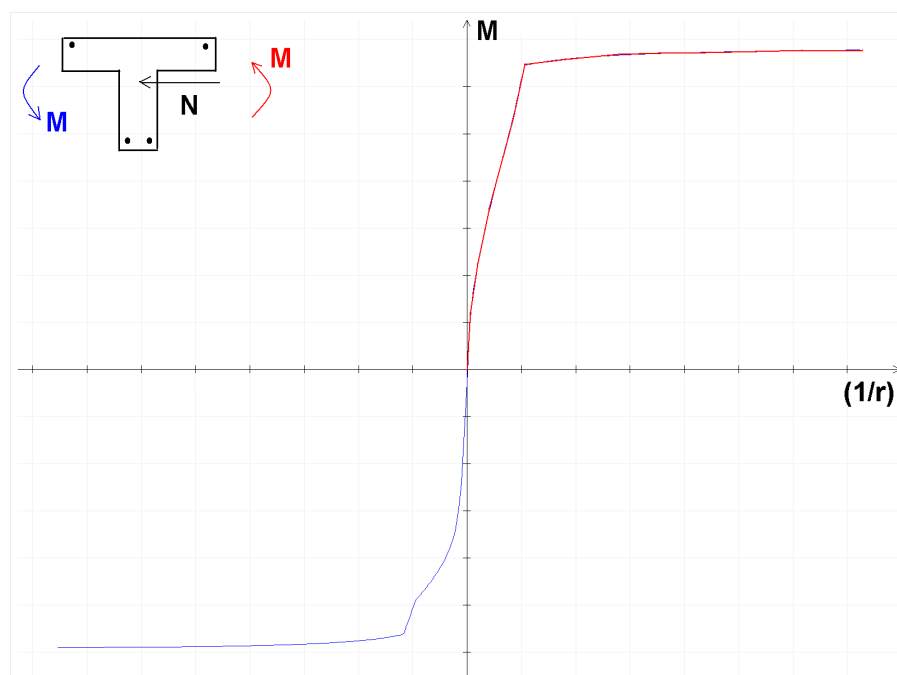


Bild 2.26: Beispielhafte Darstellung einer Momenten-Krümmungs-Beziehung

2.4.5 Ermittlung der Element-Steifigkeiten

2.4.5.1 Biegesteifigkeit

Wie im Kapitel 2.4.1 erläutert wird bei der Berechnung von elementweise konstanten Ersatzsteifigkeiten ausgegangen. Wichtig bei dieser Vorgehensweise ist eine sehr feine Teilung in Bereichen von signifikanten Steifigkeitssprüngen (Reißen, Fließen). Eine zu große Elementierung kann sowohl zu einer bereichsweisen Fehlinterpretation der Steifigkeitsverhältnisse als auch zu einem Oszillieren der Steifigkeiten führen. BETON nimmt daher eine adaptive Stabteilung vor, um diese Effekte zu unterbinden. Dabei wird der Steifigkeitsunterschied zwischen den Elementknoten geprüft. Ist dieser zu groß, werden Zwischenknoten zur Minimierung der Steifigkeitsunterschiede eingefügt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Minimierung einer Inkongruenz statisch unbestimmter Systeme ist die Dämpfung der Steifigkeitsänderung. Speziell in Fällen, in denen die Steifigkeit bei Rissbildung und Fließen (schwach bewehrte Querschnitte) stark abnimmt, kann eine zu abrupte Änderung der Steifigkeiten zu einem „Ausbrechen“ der Iteration führen.

Folgende Abbildung veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Moment, Krümmung und Steifigkeit.

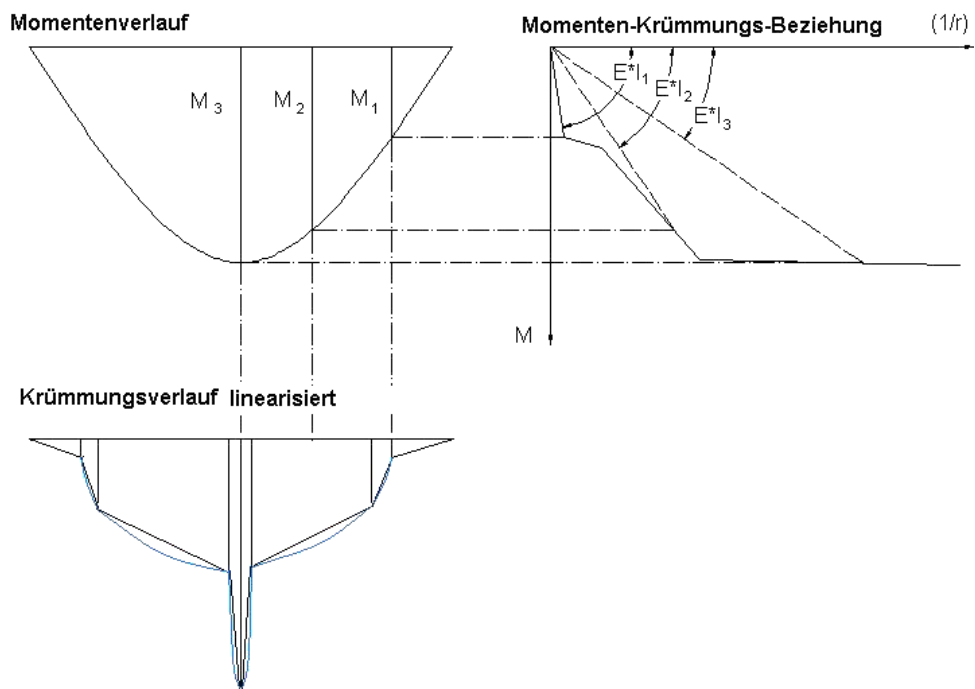


Bild 2.27: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Moment, Krümmung und Steifigkeit

Nach den zuvor erläuterten Zusammenhängen ergibt sich die beanspruchungsabhängige Sekantensteifigkeit nach folgender Gesetzmäßigkeit:

$$E \cdot I(X) = \frac{M(X)}{(1/r)(X)}$$

2.4.5.2 Längs-, Schub- und Torsionssteifigkeit

Die Ermittlung der Biegesteifigkeit als Eingangsgröße für die nichtlineare Berechnung wurde in den vorherigen Kapiteln erläutert. Die noch fehlenden Steifigkeitsparameter können wie folgt bestimmt werden.

Längssteifigkeit

Die Längssteifigkeit $E \cdot A$ wird ähnlich dem Vorgehen bei Biegung aus der Relation der Dehnung ε_0 zur wirkenden Normalkraft bestimmt. Bei gleichzeitigem Auftreten von Biegemoment und Normalkraft kann diese Beziehung nicht mehr direkt angewendet werden, da sich aus konsequenter Auslegung des Vorgehens bereichsweise negative Steifigkeiten ergeben würden. Dies resultiert aus der vereinfachten Betrachtung ohne Berücksichtigung der Verschiebung der Dehnungsnulllinie. Diese fällt bei nichtlinearen Berechnungen nicht mehr mit dem Querschnittsschwerpunkt zusammen. Allgemein kann dies durch eine Entkopplung der Steifigkeitsmatrix vom Schwerpunkt beachtet werden. Daraus resultiert dann allerdings auch ein direkter Zusammenhang zwischen Moment und Normalkraft in den Termen der Steifigkeitsmatrix. BETON berücksichtigt die durch die Rissbildung bzw. physikalische Nichtlinearität bedingte Achsdehnung nicht.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen Normalkraft und Biegemoment, ist ein direkter Zusammenhang beider Steifigkeitsterme erkennbar. Zur Verdeutlichung stelle man sich eine Stütze mit konstanter Druckkraft vor: Wirkt nun zusätzlich zur Normalkraft ein ansteigendes Moment, so wird sich zum reinen konstanten Dehnungsverlauf eine Krümmung einstellen, die zu einer Verschiebung der resultierenden Normalkraft aus dem Schwerpunkt führt. Damit reduziert sich unter plastischem Gesichtspunkt auch die Wirkungsfläche der Resultierenden, was zwangsläufig zu größeren Dehnungen und damit fallenden Steifigkeiten führt. Deshalb stellt die näherungsweise Berücksichtigung über eine Affinität zwischen Biege- und Dehnsteifigkeit bei Biegung mit Längskraft eine praktisch sinnvolle Lösung dar.

Schubsteifigkeit

Eine detaillierte Erfassung der Schubsteifigkeit ist im Stahlbetonbau sehr schwierig und bei diversen Geometrie- und Lastkonstellationen ein kaum überschaubares Unterfangen. Die Balkentheorie stößt schnell an die Grenzen, da zur Abbildung bei mäßiger Querkraftbeanspruchung die Tragwirkung über die Fachwerkwirkung erfasst werden sollte. Zwar wurden mit derartigen Modellen verschiedene Ansätze entwickelt, die in ihrer Anwendung im allgemeinen Fall allerdings nicht oder nur teilweise geeignet sind.

PFEIFFER [9] mindert in einem einfachen Ansatz die Schubsteifigkeit affin zur vorhandenen Biegesteifigkeit ab. Mag dieser Gedanke auf den ersten Blick etwas befremdlich wirken, so steckt doch ein recht einfacher und plausibler Grundgedanke hinter diesem Ansatz. Man stelle sich die Biege- und Schubbeanspruchung als unabhängige Größen vor. Bei Betrachtung der veränderten Momenten- und Längskraftbeanspruchung ändert sich die Biegesteifigkeit entsprechend des Dehnungs- und Krümmungsverlaufs. Hiervon wird jedoch nicht nur die Steifigkeit in Trägerlängs-, sondern auch die in Trägerquerrichtung beeinflusst, die zur Abtragung von Querkraften dient.

Dieser Ansatz ist als eine Näherung zu verstehen, der eine ausreichende Schubtragfähigkeit voraussetzt und geneigte Risse, Zugkraftehöhung etc. nicht oder nur vage erfasst. Trotz dieser Vereinfachungen kann der Ansatz nach PFEIFFER für mäßig schlanke Balken als ausreichend genaue Näherung bezeichnet werden. Alternativ kann in BETON auch die linear elastische Schubsteifigkeit der Berechnung zugrunde gelegt werden.

Torsionssteifigkeit

Im Vergleich zur Biegesteifigkeit wird die Torsionssteifigkeit bei Rissbildung sehr stark abgebaut. Dies hat einerseits den positiven Aspekt, dass Torsionsmomente aus Zwang, die im Hochbau recht häufig vorkommen, bei Laststeigerung bis zum Bruch fast gänzlich abgebaut werden. Auf der anderen Seite steht die sogenannte Gleichgewichtstorsion, bei welcher der starke Abfall der Torsionssteifigkeit schon im Gebrauchszustand zu erheblichen Verdrehungen und somit zu einer Minderung des Gebrauchszustandes führen kann.

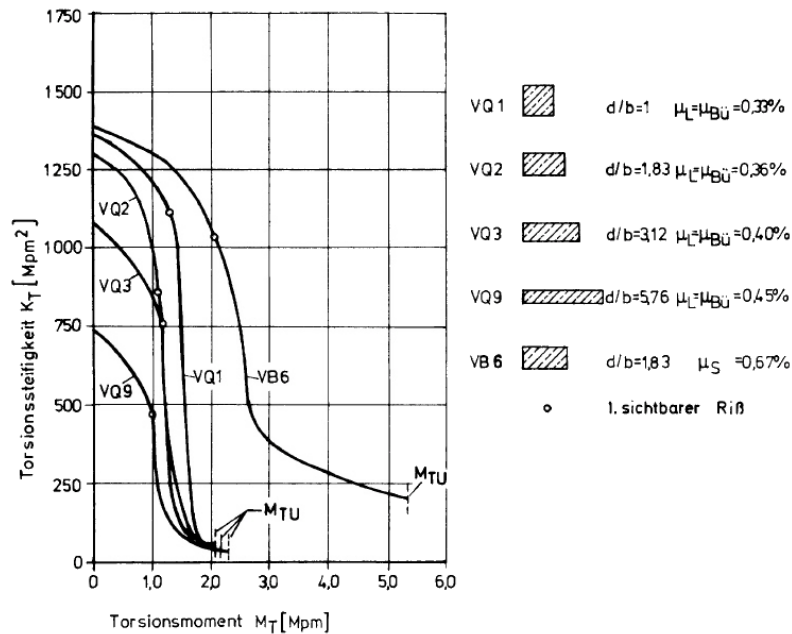


Bild 2.28: Abbildung aus LEONHARDT [10] zum Abfall der Torsionssteifigkeit bei Rissbildung

Für die Berechnung mit BETON stehen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit zur Verfügung.

Torsionssteifigkeit nach LEONHARDT [10]

Torsionssteifigkeit im ungerissenen Zustand I

Bei der Torsionssteifigkeit im Zustand I wird berücksichtigt, dass sich bis zum Erreichen des Rissmoments die Steifigkeit um 30 und 35 % abbaut. Als Gründe hierfür gibt LEONHARDT an, dass sich der Betonkern der Beanspruchung entzieht und die Spannungen sich nach außen verlagern. Zum Teil ist auch eine Mikrorissbildung an der Abnahme beteiligt.

$$(G_c \cdot I_T(X))_I = 0,8 \cdot G_c \cdot I_{T,0}(X) \quad \text{als Mittelwert}$$

mit

I_T : Torsionsträgheitsmoment

G_c : Schubmodul

Torsionssteifigkeit im gerissenen Zustand II

Die Torsionssteifigkeit im Zustand II leitet sich aus einem räumlichen Fachwerkmodell her. Zur Vereinfachung kann die Neigung der Druckstrebe unter 45° angenommen werden. Nach LEONHARDT ist diese Annahme auch legitim, wenn Längs- und Querbewehrungsgrad nicht übereinstimmen. Aus der Gleichgewichtsbetrachtung bzw. aus der Bemessungsannahme ergeben sich geringere Strebenneigungen, falls der Bewehrungsgrad der Bügel geringer ist als der der Längsbewehrung. Allerdings ist in Versuchen zu beobachten, dass die angenommene flachere Neigung der Risse erst bei hoher Beanspruchung auftritt.

Versuche haben gezeigt, dass das Fachwerkmodell einen guten Algorithmus zur Erfassung der Torsionsbeanspruchung für den Versagenszustand bietet. Für den Gebrauchszustand ist allerdings festzustellen, dass die Stahlspannungen in der Bügel- und Längsbewehrung auch bei mehrmaliger Lastwiederholung nicht die Werte nach der Fachwerkanalogie erreichen.

Bügelneigungen von 90°:

$$(G_c \cdot I_T(X))_{II} = \frac{4 \cdot E_s \cdot A_k^3}{u_k^2} \cdot \frac{1}{k_t \left(\frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_{Bü}} \right) + \frac{4 \cdot \alpha \cdot A_k}{u_k \cdot t} \cdot (1 + \varphi)}$$

Bügelneigungen von 45°:

$$(G_c \cdot I_T(X))_{II} = \frac{E_s \cdot A_k^2 \cdot t}{u_k} \cdot \frac{1}{\frac{k_T}{\mu_{Bü}} + \frac{\alpha}{4} \cdot (1 + \varphi)}$$

mit

$$k_T = 1 - \frac{T_{Ed} - 0,7 \cdot T_{cr}}{T_{Rd,sy} - 0,7 \cdot T_{cr}} \quad \text{bei 90° Druckstrebenneigung}$$

$$k_T = 1 - \frac{T_{Ed} - 0,9 \cdot T_{cr}}{T_{Rd,sy} - 0,9 \cdot T_{cr}} \quad \text{bei 45° Druckstrebenneigung}$$

$$\mu_L = \frac{A_{sl}}{A_k} \quad \text{auf Kernfläche bezogener Längsbewehrungsgrad}$$

$$\mu_{Bü} = \frac{a_{sw} \cdot u_k}{A_k} \quad \text{auf Kernfläche bezogener Querbewehrungsgrad}$$

$$T_{Rd,sy} = \min \left\{ \begin{array}{l} A_{sw}/s_w \cdot f_y \cdot 2 \cdot A_k \\ A_{sl}/u_k \cdot f_y \cdot 2 \cdot A_k \end{array} \right.$$

Ermittlung des Rissmoments für Vollquerschnitt:

Beginn: $f_{ctr1} = 0,55 \cdot f_{ck}^{2/3}$

Abschluss: $f_{ctr2} = 0,65 \cdot f_{ck}^{2/3}$

Ermittlung des Rissmoments für Hohlquerschnitt:

Beginn: $f_{ctr1} = 0,45 \cdot f_{ck}^{2/3}$

Abschluss: $f_{ctr2} = 0,55 \cdot f_{ck}^{2/3}$

$T_{Rd,sy}$ Torsionsmoment, bei dem die Stahlspannung im Fachwerkmodell die Fließgrenze erreicht (aufnehmbares Torsionsmoment)

Torsionsmoment bei Übergang zum Zustand II (Rissmoment)

$$T_{cr} = \min \left\{ \begin{array}{l} W_T \cdot f_{ctr1} \\ 2 \cdot A_k \cdot t \cdot f_{ctr1} \end{array} \right.$$

A_k durch Mittellinie der Wände eingeschlossene Fläche

A_{sl} Querschnittsfläche der Längsbewehrung

A_{sw} Querschnittsfläche der Bügelbewehrung

α Verhältnisse der E-Moduln E_s/E_c

u_k Umfang der Fläche A_k

s_w Bügelabstand

t effektive Dicke der Wand

φ Kriechbeiwert zur Berücksichtigung



Eine gegenseitige Beeinflussung von Torsions- und Biegesteifigkeit erfolgt nicht.

Pauschale Abminderung der Torsionssteifigkeit

Alternativ kann auch mit einer prozentual abgeminderten, linear elastischen Torsionssteifigkeit im gerissenen Bereich gerechnet werden.

2.4.6 Kriechen und Schwinden

Die Ermittlung der Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und des Schwindmaßes $\varepsilon_{c,s}(t, t_s)$ gemäß EN 1992-1-1, Anhang B ist im [Kapitel 2.2.6](#) ab [Seite 19](#) beschrieben.

Rechnerisch werden Kriechen und Schwinden im Modell wie folgt berücksichtigt.

Kriechen

Wird von der Kenntnis der Dehnungen zum Zeitpunkt $t = 0$ sowie zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt t ausgegangen, so lässt sich der Kriechbeiwert φ_t folgendermaßen angeben.

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t=0}} - 1$$

Die Gleichung wird umgestellt auf die Dehnung zum Zeitpunkt t . Damit ergibt sich folgender Zusammenhang, der bei konstanten Spannungen (kleiner als circa $0,4 f_{ck}$) gültig ist.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t=0} \cdot (\varphi_t + 1)$$

Bei größeren Spannungen als etwa $0,4 f_{ck}$ steigen die Dehnungen überproportional an, wodurch der linear angenommene Bezug verloren geht.

Für die Berechnung in BETON wird auf eine gängige, für baupraktische Zwecke sinnvolle Lösung zurückgegriffen: Die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons wird um den Faktor $(1 + \varphi)$ verzerrt.

Verzerrung der Spannungs-Dehnungs-Linie zur Berücksichtigung des Kriechens

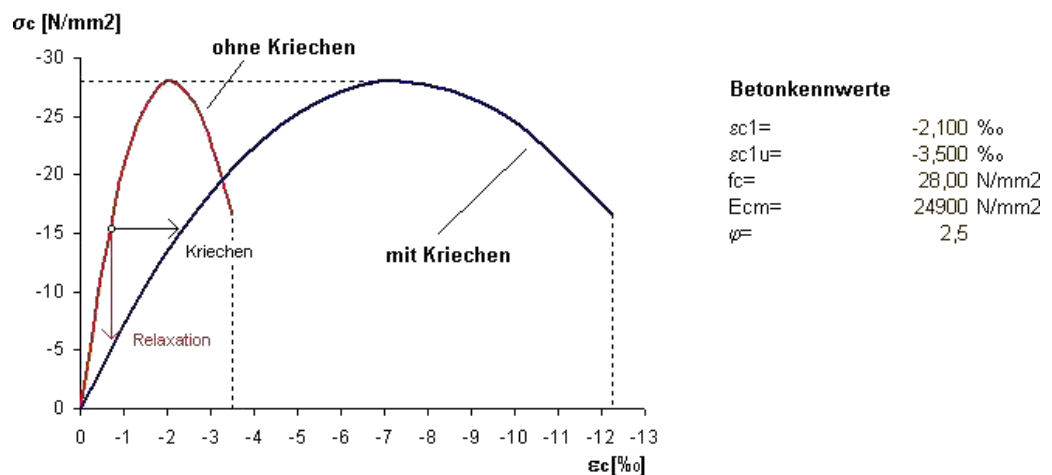


Bild 2.29: Verzerrung der Spannungs-Dehnungs-Linie zur Erfassung des Kriecheinflusses

Wie im obigen Bild gezeigt handelt es sich bei der Berücksichtigung des Kriechens um die Annahme konstanter kriecherzeugender Spannungen über die Belastungszeit. Dieser Ansatz führt infolge nicht berücksichtigter Spannungsumlagerungen zu einer geringfügigen Überschätzung der Verformung. Zudem wird mit diesem Modell der Spannungsabbau ohne eine Dehnungsänderung (Relaxation) nur bedingt erfasst: Geht man von einem linear elastischen Verhalten aus, so könnte eine Proportionalität unterstellt werden und die horizontale Verzerrung würde die Relaxation im Verhältnis $(1 + \varphi)$ ebenfalls widerspiegeln. Bei der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung geht dieser Zusammenhang allerdings verloren.

Diese Vorgehensweise stellt somit eine Näherung dar. Eine Verminderung der Spannungen infolge Relaxation sowie nichtlineares Kriechen kann nicht oder nur näherungsweise abgebildet werden.

Die in BETON angesetzte Kriechzahl φ_t ist als effektive Kriechzahl zu verstehen. Für Berechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit bedeutet dies, dass das Verhältnis von kriecherzeugender zu wirkender Last berücksichtigt werden muss. Die gemäß [Kapitel 2.2.6](#) ermittelten Kriechzahlen sind deshalb wie in folgender Gleichung dargestellt anzupassen.

$$\varphi_{t,\text{eff}} = \frac{\text{kriecherzeugende Last}}{\text{wirkende Last}} \cdot \varphi_t$$

Schwinden

Es stellt sich die Frage, wie die für die Berechnung relevanten Verkrümmungen des Bauteils entstehen. Der Grund hierfür ist die behinderte Verkürzung des Betons infolge der Bewehrung. Geht man von den Randbedingungen für übliche „schlanke“ Bauteile von einer gleichmäßigen Schwinddehnung aus, so entstehen Bauteilkrümmungen nur bei unsymmetrischer Bewehrungsverteilung.

Das Schwinden kann deshalb über eine Vordehnung des Betons bzw. Stahls abgebildet werden. Im Detail bedeutet dies, dass durch eine positive Vordehnung des Betons die „freie Dehnung“ des Stahls behindert wird. In gleicher Weise ließe sich die Modellierung über eine negative Vordehnung des Stahls realisieren, sodass der Beton die freie Dehnung des vorgedehnten Stahls behindert. Während sich bei beiden Varianten die Spannungsverteilungen unter Berücksichtigung der jeweiligen Vordehnung identisch einstellen, unterscheidet sich die Dehnungsebene deutlich: Bei einer Vordehnung des Stahls ist aus dem Dehnungszustand sofort ersichtlich, wo Zug- und Druckbereiche infolge des Schwindens auftreten. Bei einer Vordehnung des Betons sind andererseits aus dem Dehnungszustand Aussagen über die tatsächliche Verkürzung des Betons möglich.

Da bei der Berechnung die Ermittlung der Verformungen im Vordergrund steht, ist es nicht von Interesse, ob die Modellierung bei der Steifigkeitsermittlung über eine positive Vordehnung des Betons oder eine negative Vordehnung der Bewehrung erfolgt.



Im Modul BETON wird die Schwinddehnung als negative Vordehnung des Betonstahls berücksichtigt.

2.4.7 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Nichtlineare Betrachtungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit dienen dazu, den Versagenszustand (Mechanismus) in realistischer Weise zu erfassen. Damit lässt sich die große Schwierigkeit dieses Nachweises erahnen: Realistische Abschätzungen sind nur mit realistischen Eingangs- und Rechenparametern möglich.

Bei den Materialeigenschaften handelt es sich nicht um deterministische Kenngrößen. Anders als bei der diskreten Querschnittsbemessung, wo immer das Konzept der „lokalen Fehlstellen“ Anwendung findet, sind zur Ermittlung von Verformungen und Schnittgrößen mittlere Materialkennwerte zu benutzen.

Ein weiterer Aspekt, das Bauteilverhalten realistisch zu erfassen, ist die Berücksichtigung des Mitwirkens des Betons auf Zug zwischen den Rissen (*Tension Stiffening*, siehe [Kapitel 2.4.3](#)). Speziell für Druckglieder wird auch der Einfluss von Kriechen und Schwinden bedeutsam.

Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7 sind nichtlineare Verfahren zu verwenden, die zu einer realistischen Steifigkeit führen und Unsicherheiten beim Versagen berücksichtigen. Bemessungsverfahren, die in den maßgebenden Anwendungsbereichen gültig sind, dürfen verwendet werden. Ein geeignetes nichtlineares Verfahren der Schnittgrößenermittlung einschließlich Querschnittsbemessung ist das Verfahren mit den Durchschnittswerten der Materialeigenschaften und dem Ansatz eines globalen Teilsicherheitsfaktors γ_r , das im deutschen nationalen Anhang zu EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7 sowie in DIN 1045-1, Abschnitt 8.5 beschrieben ist. Dieses Verfahren wird im Folgenden *als Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7* vorgestellt.

Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7 (5) kann für Bauteile, bei denen die Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung nicht vernachlässigt werden dürfen, das Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6 angewandt werden.

In BETON stehen beide oben beschriebenen nichtlinearen Berechnungsverfahren zur Verfügung (vgl. [Bild 4.4, Seite 97](#)).

2.4.7.1 Materialkennwerte

Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7

Dem Nachweis nach EN 1992-1-1, 5.7 liegen mittlere Materialkennwerte zugrunde, die zur Realisierung eines globalen Sicherheitsbeiwerts kalibriert wurden. Hierdurch ergibt sich eine reduzierte Betondruckfestigkeit, die wegen der Verzerrung der mittleren Betonkennlinie zu Diskussionen geführt hat.

Rechnerische Mittelwerte der Baustofffestigkeiten

– Spannungs-Dehnungs-Linie **Stahl** nach EN 1992-1-1, Bild NA.3.8.1

$$f_{yR} = 1,1 \cdot f_{yk}$$

$$f_{tR} = 1,08 \cdot f_{yR} \quad \text{Betonstahl hohe Duktilität}$$

$$f_{tR} = 1,05 \cdot f_{yR} \quad \text{Betonstahl normale Duktilität}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Elastizitätsmodul Stahl}$$

– Spannungs-Dehnungs-Linie **Beton** nach EN 1992-1-1, Bild 3.2

$$f_{cR} = 0,85 \cdot \alpha \cdot f_{ck}$$

$$E_{cm} \quad \text{mittlerer Elastizitätsmodul Beton (Sekante)}$$

Es besteht folgender Zusammenhang zwischen dem globalen Sicherheitsbeiwert γ_R und den mittleren Materialfestigkeiten:

$$\text{Beton } (\gamma_c = 1,5): \quad 1,5 \cdot 0,85 = 1,275 \sim \gamma_R = 1,3$$

$$\text{Betonstahl } (\gamma_s = 1,15): \quad 1,15 \cdot 1,1 = 1,265 \sim \gamma_R = 1,3$$

Bild 2.30 zeigt, wie sich die reduzierte Betondruckspannung f_{cR} im Vergleich zur Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons mit den rechnerischen Mittelwerten auswirkt. Die starke Verzerrung der Betonkennlinie ist deutlich erkennbar. Diese führt insbesondere in höher ausgelasteten Bereichen zu einer Überschätzung der Dehnungen und somit auch der Krümmungen.

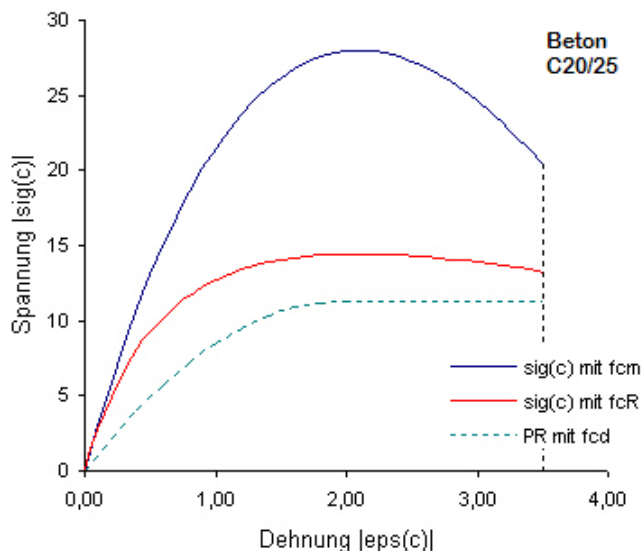


Bild 2.30: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Schnittgrößen und Verformungsberechnung

Beim Betrachten der Betonkennwerte fällt auf, dass von reduzierten Spannungen ($0,85 \cdot \alpha \cdot f_{ck}$) ausgegangen wird, der E-Modul aber nach EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.5 dem mittleren Wert entspricht.

Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6

Abschnitt 5.8.6 der Euronorm beschreibt die nichtlineare Berechnung von stabilitätsgefährdeten Bauteilen. Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6 (3) sind die Spannungs-Dehnungs-Linien auf der Grundlage von Bemessungswerten zu definieren.

Bemessungswerte der Baustofffestigkeiten zur Schnittkraft- und Verformungsbe- rechnung sowie zum Nachweis auf Querschnittsebene

– Spannungs-Dehnungs-Linie Stahl nach EN 1992-1-1, Abschnitt 3.2.7

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

$$f_{td} = k \cdot f_{yk} / \gamma_s$$

$$E_{sm} = \text{mittlerer Elastizitätsmodul Stahl (200 000 N/mm}^2\text{)}$$

– Spannungs-Dehnungs-Linie Beton nach EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.5

$$f_{cm} = f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

$$E_c = E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$$

2.4.7.2 Sicherheitsnachweis

Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7

Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7 ist die Sicherheit nichtlinearer Berechnungen über einen globalen Sicherheitsbeiwert γ_R nachzuweisen. Ermöglicht wird dieser „Kunstgriff“ durch die (nicht unumstrittene) Modifizierung der mittleren Bauteilsteifigkeiten (f_{cR} , f_{yR} etc.) Die rechnerische Stahlspannung wurde dabei erhöht und die rechnerische Betonspannung vermindert, was wiederum eine Rückführung auf den globalen Sicherheitsbeiwert $\gamma_R = 1,3$ (bzw. 1,1 für außergewöhnliche Einwirkungskombinationen) erlaubt.

Um eine ausreichende Tragfähigkeit zu gewährleisten, ist nachzuweisen, dass folgende Bedingung erfüllt ist:

$$E_d \leq R_d = \frac{R}{\gamma_R} (f_{cR}, f_{yR}, f_{tR}, \dots)$$

mit

E_d : Bemessungswert der maßgebenden Einwirkungskombination

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

γ_R : einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert auf der Traglastseite

In BETON wird mit einer γ_R -fachen Einwirkung gerechnet. Diese kann adäquat einer inkrementellen Traglastberechnung in Lastschritten aufgebracht werden.

Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die γ_R -fachen Einwirkung größer als die Traglast ist. Dies entspricht einer Umformung der obenstehenden Gleichung.

$$\gamma_R \cdot E_d \leq R_d = R (f_{cR}, f_{yR}, f_{tR}, \dots)$$

Damit wird auch der Aspekt berücksichtigt, den Abbau von Zwangsschnittgrößen zu erfassen.

Vor- und Nachteile des Verfahrens

Der maßgebliche Vorteil dieser Vorgehensweise liegt auf der Hand: Es handelt sich um die Verwendung nur eines einzigen Werkstoffgesetzes für die gesamte Berechnung. Dies führt zu einer einfacheren Handhabung sowie zu Zeitersparnissen bei der Berechnung, da Schnittkraftermittlung und Nachweis in einem Zuge erledigt werden.

Der Nachteil wird nur dann explizit sichtbar, wenn von der Kompatibilität der Ausdrücke

$$\frac{R}{\gamma_R} (f_{cR}, f_{yR}, f_{tR}, \dots) = R \left(\frac{f_{cR}}{\gamma_R}, \frac{f_{yR}}{\gamma_R}, \frac{f_{tR}}{\gamma_R}, \dots \right)$$

ausgegangen wird. Bei nichtlinearen Berechnungen ist diese selbstverständlich nicht uneingeschränkt gegeben. Ein Beispiel, bei dem eine derartige Herangehensweise stark auf der unsicheren Seite liegen kann, ist die Berücksichtigung von Zwangsschnittgrößen. Hier führt die Verwendung durch γ_R geteilter Materialkennwerte zu stark verminderten Steifigkeiten, welche wiederum zu einer starken Reduktion der Zwangsschnittgrößen führt. Zur Verdeutlichung der Problematik des verminderten Stahl E-Moduls ist diese Darstellung allerdings sehr gut geeignet.

Die direkte Abminderung der Festigkeiten wird von QUAST [11] näher erläutert und in Bezug auf schlanke Druckglieder kritisch beurteilt.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge soll vereinfacht ein horizontaler Ast der Betonstahlkennlinie ($f_{yd} = f_{td}$) angenommen werden. Damit ergibt sich der abgeminderte Tragwiderstand R_d zu:

$$R_d = \frac{R}{\gamma_R} = \frac{1}{\gamma_R} \int a \cdot \sigma_R [\varepsilon(y,z)] dA \quad \text{mit: } a = \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{Bmatrix}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \int a [-f_{cR} \leq \sigma_{cR}(\varepsilon, f_{cR}) \leq 0; -f_{yR} \leq \sigma_{sR}(\varepsilon) \leq f_{yR}] dA$$

$$R_d = \int a \left[\frac{-f_{cR}}{\gamma_R} \leq \frac{\sigma_{cR}(\varepsilon, f_{cR})}{\gamma_R} \leq 0; \frac{-f_{yR}}{\gamma_R} \leq \frac{\sigma_{sR}(\varepsilon)}{\gamma_R} \leq \frac{f_{yR}}{\gamma_R} \right] dA$$

Setzt man nun für $\sigma_{sR} = E_s \cdot \varepsilon$, so ergibt sich:

$$R_d = \int a \left[\frac{-f_{cR}}{\gamma_R} \leq \frac{\sigma_{cR}(\varepsilon, f_{cR})}{\gamma_R} \leq 0; \frac{-f_{yR}}{\gamma_R} \leq \frac{E_s \varepsilon}{\gamma_R} \leq \frac{f_{yR}}{\gamma_R} \right] dA$$

Für die praktische Ermittlung von Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung ohne Zwangsschnittgrößen ist eine Berechnung mit den abgeminderten Steifigkeiten durchaus legitim. Hier wird der Schnittkraftverlauf ohnehin vorwiegend vom Verhältnis der Steifigkeiten unterschiedlicher Bereiche zueinander geprägt.

Problematisch jedoch erweist sich dieses Konzept für den Nachweis schlanker Druckglieder nach Theorie II. Ordnung. Aufgrund der verminderten Systemsteifigkeit kommt es zu einer Überschätzung der Verformungen und somit auch der Schnittgrößen bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung.

Schlanker Druckglieder versagen im Allgemeinen bei Erreichen der Fließdehnung in der Bewehrung. Somit wird deutlich, dass aufgrund des abgeminderten Elastizitätsmoduls und der resultierenden größeren Krümmungen bei Fließbeginn die Verformungen überschätzt werden. Dies führt zu einer geringeren zulässigen Stützenlast oder die Bewehrung ist entsprechend zu erhöhen. QUAST [11] sieht hierfür keine Veranlassung.

Verfahren nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6

Der Nachweis der ausreichenden Tragsicherheit kann gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6 (3) auf der Grundlage von Bemessungswerten (f_{cd} , f_{yd} , ...) der Baustoffkenngrößen direkt geführt werden. Zur Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen sind gemäß Absatz (3) ebenfalls die auf Grundlage von Bemessungswerten definierten Spannungs-Dehnungs-Linien zu verwenden. Der dabei anzusetzende E-Modul E_{cd} ist mit dem Sicherheitsbeiwert γ_{CE} zu berechnen ($E_{cd} = E_{cm}/\gamma_{CE}$).

Hinweis zum deutschen NAD DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6

Nach dem Nationalen Anhang Deutschland EN 1992-1-1, Abschnitt 5.8.6 (NDP 5.8.6 (3)) dürfen die Schnittgrößen und Verformungen mit mittleren Baustoffkennwerten (f_{cm} , f_{ctm} , ...) bestimmt werden. Der Nachweis der Grenztragfähigkeit in den maßgebenden Schnitten ist jedoch mit den Bemessungswerten (f_{cd} , f_{yd} , ...) der Baustoffkenngrößen zu führen.

Problematisch bei diesem Ansatz ist, dass bei statisch unbestimmten Systemen teilweise keine Konvergenz der Ergebnisse erreicht werden kann: Die mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften errechneten Schnittgrößen können bei der Bemessung mit den anzusetzenden Designwerten nicht aufgenommen werden. Eine Vergrößerung der Bewehrung führt zu einer Vergrößerung der Steifigkeit der betreffenden Bereiche, wodurch im nächsten Iterationsschritt wiederum eine Erhöhung der Bewehrung erforderlich wird. Anzumerken bleibt weiterhin, dass eine Ausnutzung der plastischen Reserven im Grenzzustand der Tragfähigkeit kaum möglich ist, da das rechnerische Bemessungsmoment M_{Ed} (Designwerte für Baustofffestigkeiten) den Wert der Fließmoments M_y (mittleren Baustoffeigenschaften) nicht erreichen wird.

Im Modul BETON erfolgt der Sicherheitsnachweis gemäß Norm durch eine Gegenüberstellung von vorhandener Bewehrung und für die Bemessungswerte der Baustoffkenngrößen ermittelter erforderlicher Bewehrung. Dies ist bei einer händischen Korrektur der Bewehrung (Stichwort Steifigkeitserhöhung) immer mit zu beachten.

2.4.8 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Mit EN 1992-1-1 halten ausführlichere Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Einzug in die Ingenieurbüros.

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gliedert sich in drei Untergruppen:

- Begrenzung der **Spannungen** (EN 1992-1-1, 7.2 bzw. DIN 1045-1, 11.1)
- Begrenzung der **Rissbreiten** (EN 1992-1-1, 7.3 bzw. DIN 1045-1, 11.2)
- Begrenzung der **Verformungen** (EN 1992-1-1, 7.4 bzw. DIN 1045-1, 11.3)

Im Folgenden wird ausschließlich die Begrenzung der Verformung beschrieben. Dabei wird auch der Einfluss des Kriechens und Schwindens berücksichtigt.

Der Grund für die genauere Untersuchung der Verformungen liegt wieder am nichtlinearen Verhalten des Verbundbaustoffs Stahlbeton. Infolge der Rissbildung reduziert sich die Steifigkeit im Verhältnis zum reinen Zustand I (ungerissen) in bestimmten Bereichen erheblich. Wird somit die Rissbildung nicht berücksichtigt, führt dies zu einer Unterschätzung der auftretenden Verformungen. Unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden kann sich durchaus die drei- bis achtfache Verformung – je nach Beanspruchungszustand und Randbedingungen – einstellen.

Als Grundlage der Verformungen werden die maßgebenden Krümmungen ermittelt. Dabei darf die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen nicht vergessen werden, da sonst unrealistische Ergebnisse zu erwarten sind.

Für die richtige Interpretation der Ergebnisse nichtlinearer Berechnungen ist die Kenntnis der wichtigsten Einflussgrößen unabdingbar. Deshalb werden die wichtigsten Kenngrößen, die die Steifigkeiten im Zustand I und Zustand II beeinflussen, gegenübergestellt:

Einflussgröße	Zustand I	Zustand II
Kriechen (hier als Abminderung des Beton-E-Moduls)	Die Steifigkeit wird hauptsächlich durch den Beton gesteuert. Ein abgeminderter E-Modul führt somit zu einer deutlichen Reduktion der Steifigkeit.	Einfluss geringfügig
Bewehrungsgrad	Einfluss geringfügig (Begründung siehe <i>Kriechen</i>)	Die Steifigkeit im Zustand II wird hauptsächlich durch die Bewehrung gesteuert. Der Einfluss ist deshalb enorm.
Normalkraft	Einfluss kaum gegeben (Bei vereinfachten linear-elastischen Betrachtungen besteht gar kein Einfluss.)	Eine Zugkraft vermindert die Steifigkeit erheblich. Dies ist bei der Modellierung des Schwindens zu berücksichtigen, da diese zu Zugspannungen im Beton führt.

Tabelle 2.4: Einflussgrößen und deren Wichtung im ungerissenen und gerissenen Zustand

Materialkennwerte

Zur Berechnung der Verformung benutzt man im Allgemeinen die mittleren Baustoffeigenschaften. Das Mitwirken des Betons auf Zug zwischen den Rissen (*Tension Stiffening*) ist ebenfalls durch geeignete Ansätze (siehe [Kapitel 2.4.3](#)) zu berücksichtigen, da anderenfalls keine realistische Verformungsberechnung möglich ist.

Die mittleren Materialkennwerte nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1 zur Ermittlung der Verformungen unterscheiden sich nicht bzw. nur marginal.

Rechnerische Mittelwerte der Baustofffestigkeiten

– Spannungs-Dehnungs-Linie **Stahl** nach EN 1992-1-1, Bild NA.3.8.1

$$f_y = f_{yk}$$

$$f_t = f_{yk} \quad \text{für Gebrauchsbetrachtungen}$$

$$E_{sm} = 200\,000 \text{ N/mm}^2 \quad \text{mittlerer Elastizitätsmodul Stahl}$$

– Spannungs-Dehnungs-Linie **Beton** nach EN 1992-1-1, 3.1.5 und 5.7

$$f_{cm} \quad \text{mittlere Betondruckfestigkeit}$$

$$E_{cm} \quad \text{mittlerer Elastizitätsmodul Beton (Sekante)}$$

2.4.9 Konvergenz

Wie schnell und sicher eine nichtlineare Berechnung konvergiert, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und kann für den allgemeinen Fall nur tendenziell angegeben werden.

Hauptansatzpunkt der Konvergenzbeurteilung ist das verwendete Verfahren. So ist bekannt, dass Verfahren, die auf tangentialen Verbesserungen (tangente Steifigkeitsmatrix) basieren, meist schneller konvergieren (quadratische Konvergenz im Bereich der gesuchten Lösung) als Verfahren, die mit Sekantensteifigkeiten eine iterative Verbesserung ermitteln. Jedoch sind Sekantenverfahren im Allgemeinen numerisch stabiler, speziell im Bereich sehr flacher Gradienten nahe dem Versagenszustand (tangente Steifigkeit geht gegen null). Selbstverständlich ist keine Pauschalierung möglich, da die Konvergenz durch inkrementelle Lastaufbringung, verschiedene Iterationsverfahren (NEWTON-RAPHSON, RIKS/ WEMPNER/ WESSELS etc.) und weitere Parameter beeinflusst wird.

Im Folgenden soll das Konvergenzverhalten des verwendeten Algorithmus kurz vorgestellt werden. BETON führt die eigentliche Iteration des Dehnungszustandes auf Querschnittsebene durch. Das bedeutet, dass ausgehend von einem Schnittkraftverlauf innerhalb eines Iterationszyklus immer neue, aktuelle Dehnungs-Spannungs-Zustände berechnet werden. Die Konvergenz ist dann erreicht, wenn sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, also der Schnittgrößenverlauf in zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten innerhalb einer vorgegebenen Schranke verbleibt.

Dieses Vorgehen allein ist bei geringeren Schwankungen der Steifigkeiten in statisch unbestimmten Tragwerken sehr stabil. Probleme ergeben sich allerdings bei sprunghafter Änderung bzw. größeren Steifigkeitssprüngen. Hier kann es zu einem Oszillieren der Berechnung kommen, die auch nicht mittels adaptiver Teilung abgefangen werden kann. Um diese Inkonvergenz zu umgehen, wurde eine gedämpfte Steifigkeitsreduktion in die Berechnung implementiert. Dabei wird der Sprung zwischen den Steifigkeiten zweier Iterationsschritte entsprechend der Vorgaben des Benutzers gedämpft. Die Berechnung verlangsamt sich dadurch etwas, sie ist aber numerisch deutlich stabiler. Es bleibt anzumerken, dass eine Dämpfung bei statisch bestimmten Systemen keinen Sinn ergibt.

Damit ergeben sich die beiden steuerbaren Abbruchkriterien der nichtlinearen Berechnung:

$$\varepsilon_1 = |(1/\gamma)_i - (1/\gamma)_{i-1}| \leq \text{Toleranz 1}$$

γ ist ein Indikator für das Verhältnis von Bruchmoment zu wirkendem Moment.

Somit berücksichtigt das Abbruchkriterium ε_1 die Änderung der Schnittkräfte.

$$\varepsilon_2 = (EI_i - EI_{i-1})^2 / (EI_i)^2 \leq \text{Toleranz 2}$$

Dieses Kriterium kontrolliert den Steifigkeitsunterschied zweier aufeinander folgender Iterationsschritte an den Knoten.

Zusätzlich wird intern die Verformungsdifferenz zwischen zwei Iterationen kontrolliert:

$$\varepsilon_3 = |u_i - u_{i-1}| \leq \text{Toleranz 3 (fix)}$$

Die maximale Verformungsdifferenz ist fix auf den Wert $\leq 0,1$ mm eingestellt.



Konvergiert die nichtlineare Berechnung nicht, bestehen im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* (siehe Bild 2.31) Möglichkeiten zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens.

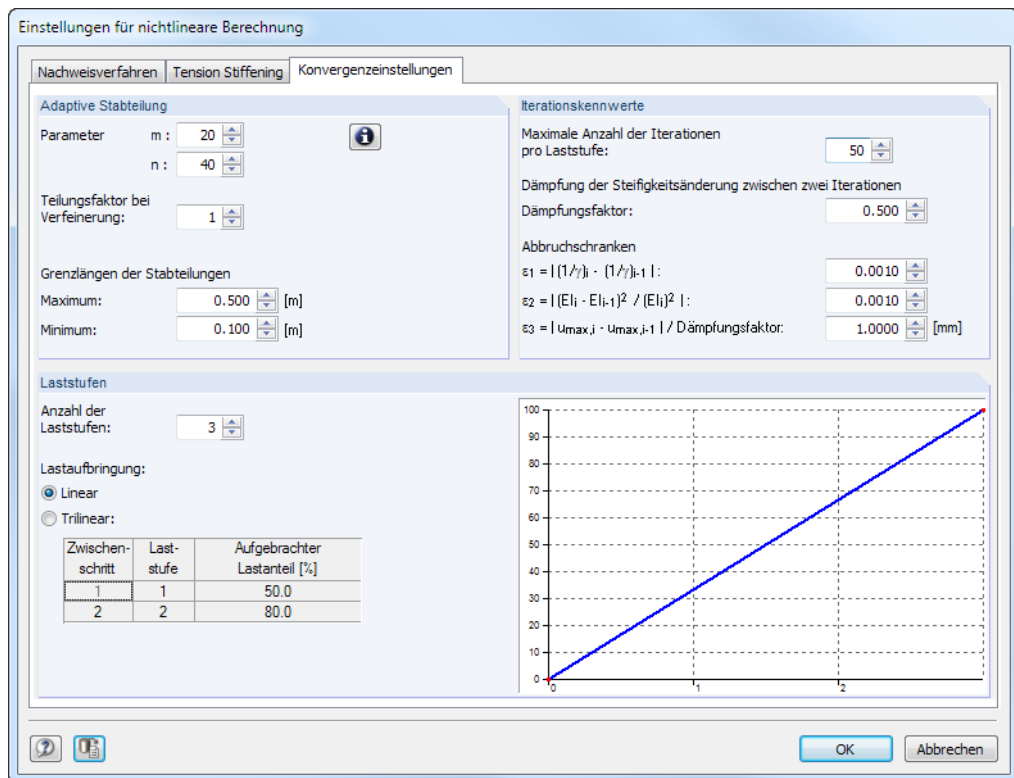


Bild 2.31: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen*

Adaptive Stabteilung

Über die *Parameter* und *Grenzlängen der Stabteilungen* kann der Steifigkeitsverlauf effizient beeinflusst werden. Da BETON mit konstanten mittleren Steifigkeiten im Verlauf eines finiten Elements rechnet, ist es zweckmäßig, im Bereich größerer Steifigkeitsänderungen eine feinere Elementierung zu wählen (siehe Bild 2.18, Seite 31). Mit einer adaptiven Teilung übernimmt BETON diese Aufgabe über eine Kontrolle der Steifigkeitsunterschiede an den Endknoten eines Elements: Beim Überschreiten der Toleranzgrenze werden zusätzliche Zwischenteilungen eingefügt.

Laststufen

Im ersten Lastschritt wird als Ausgangsgröße die linear-elastische Steifigkeit verwendet. Damit kann sich bei Berechnung mit nur einem Lastschritt im ersten Iterationszyklus eine sehr große Steifigkeitsdifferenz ergeben, welche die Konvergenz behindert. In diesem Fall kann es zweckmäßig sein, die Last schrittweise – ggf. trilinear – aufzubringen.

Iterationskennwerte

Der Iterationsprozess hängt von Querschnittsform, System und Belastung ab. Dadurch kann es zu einem unterschiedlichen Konvergenzverhalten kommen. Stark auf Druck beanspruchte Bauteile konvergieren in der Regel langsamer. Da die aktuellen Abweichungen ε_1 und ε_2 während der Berechnung ständig angezeigt werden, kann auf einfache Art und Weise entschieden werden, ob eine erhöhte Anzahl an *Iterationen* (langsame, aber stete Konvergenz) sinnvoll ist.

Durch eine gezielte Verminderung der Steifigkeitssprünge zwischen zwei Iterationsschritten kann dem Oszillieren der Berechnung entgegengewirkt werden. Bei zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten wird der Steifigkeitsunterschied an einem Knoten ermittelt. Der *Dämpfungsfaktor* charakterisiert den Anteil der Steifigkeitsdifferenz, der für die neu angesetzte Steifigkeit des nächsten Iterationsschrittes berücksichtigt wird:

$$E \cdot I_{i,\text{gedämpft}} = E \cdot I_{i-1} \cdot (1 - \text{Dämpfungsfaktor}) + E \cdot I_i \cdot \text{Dämpfungsfaktor}$$

Das bedeutet: Je größer der Dämpfungsfaktor, umso geringer ist der Einfluss der Dämpfung. Bei einem Faktor von 1 übt die Dämpfung keinen Einfluss auf die iterative Berechnung aus.

3 Eingabedaten

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls erscheint ein neues Fenster. Links wird ein Navigator angezeigt, der die verfügbaren Masken verwaltet. Darüber befindet sich eine Pulldownliste mit den Bemessungsfällen (siehe [Kapitel 8.1, Seite 155](#)).

Die bemessungsrelevanten Daten sind in mehreren Eingabemasken zu definieren. Beim ersten Aufruf von BETON werden folgende Parameter automatisch eingelesen:

- Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen
- Materialien
- Stäbe und Stabsätze
- Querschnitte
- Schnittgrößen (im Hintergrund – sofern berechnet)



Eine Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator aufrufen. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] (vorwärts) und [F3] (rückwärts) möglich.



[OK] sichert die Eingaben. BETON wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm. [Abbrechen] beendet das Zusatzmodul, ohne die Daten zu speichern.

3.1 Basisangaben

In Maske *1.1 Basisangaben* sind die Bemessungsnorm festzulegen und die Einwirkungen auszuwählen. Die Register verwalten die Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sowie des Brandschutzes.

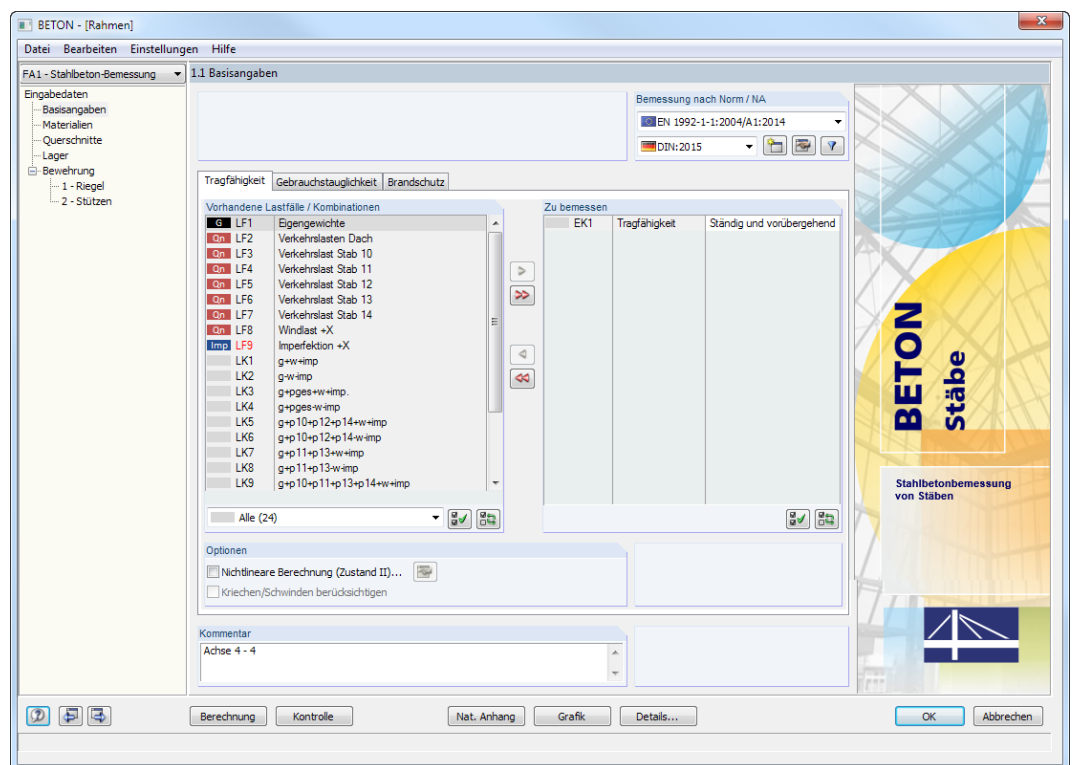


Bild 3.1: Maske 1.1 Basisangaben

Bemessung nach Norm / NA

Norm

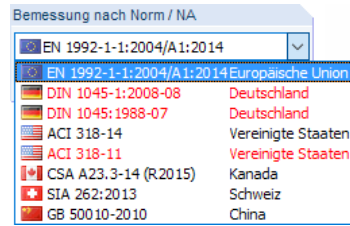


Bild 3.2: Verfügbare Normen

Es ist anzugeben, nach welcher Norm die Stahlbetonbemessung erfolgen soll. In der Liste stehen verschiedene Normen zur Auswahl. Jede Norm kann separat erworben werden.



Rot markierte Normen sind nicht mehr gültig, können aber z. B. für Bestandsnachrechnungen benutzt werden. Die „alten“ Normen lassen sich mit der [Filter]-Schaltfläche ausblenden.

Nationaler Anhang

Für die Bemessung nach Eurocode (EN 1992-1-1:2004/A1:2014) ist der Nationale Anhang festzulegen, dessen Parameter für die Nachweise gelten.

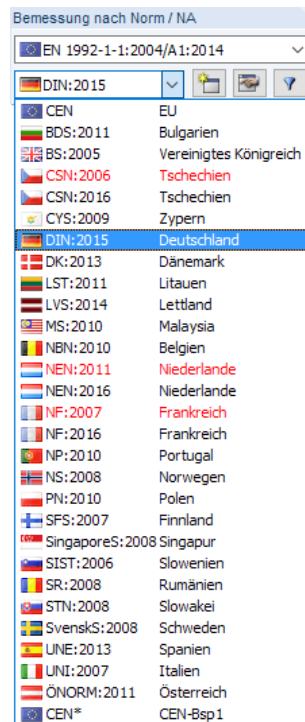


Bild 3.3: Nationale Anhänge für EN 1992-1-1

Über die Schaltfläche können die voreingestellten Werte eingesehen werden (siehe Bild 3.4).

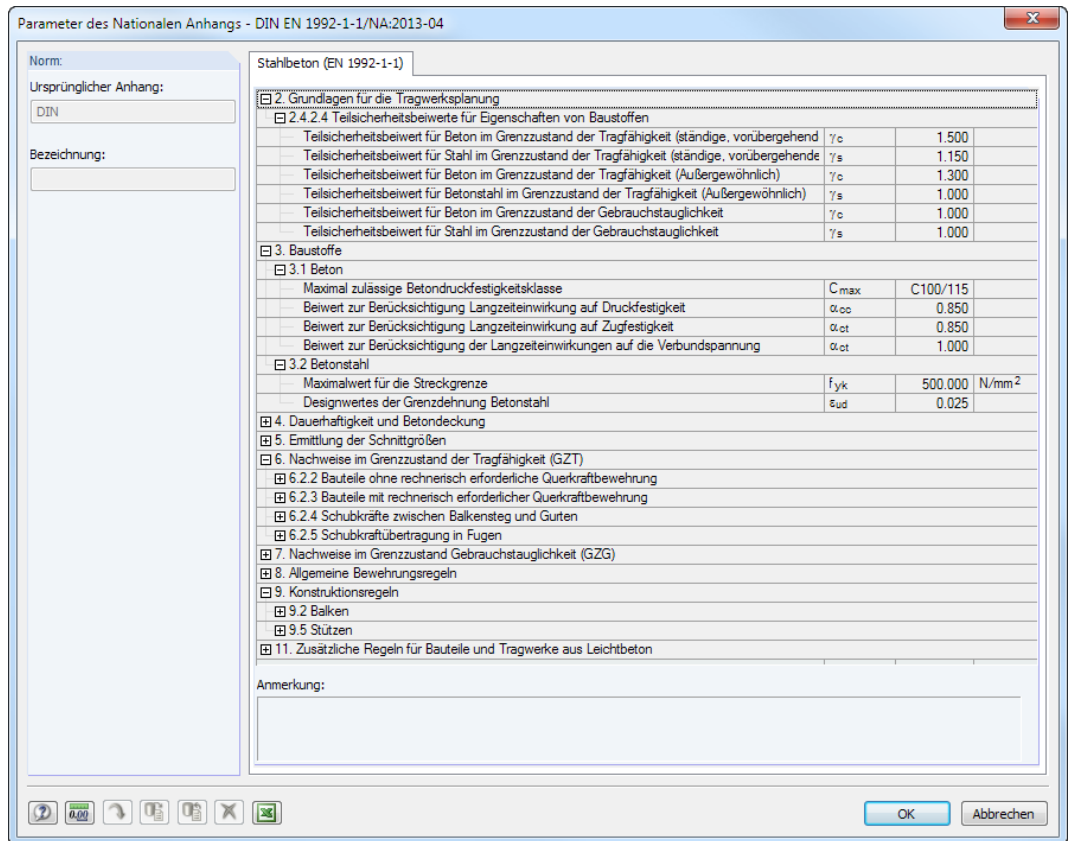


Bild 3.4: Dialog *Parameter des Nationalen Anhangs*

Hier finden sich alle bemessungsrelevanten Beiwerte, die in den Nationalen Anhängen geregelt sind. Sie sind nach den Abschnittnummern des Eurocode aufgelistet.

Falls andere Anwendungsvorgaben für Teilsicherheits- und Abminderungsbeiwerte, Druckstrebenwinkel etc. gelten, können die Parameter auch angepasst werden: Zunächst ist über die Schaltfläche eine Kopie des aktuellen Nationalen Anhangs zu erzeugen. In diesem benutzerdefinierten Anhang können dann die Parameter individuell festgelegt werden.

Kommentar

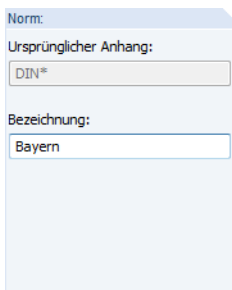


Bild 3.5: Benutzerdefinierter Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung, die z. B. den aktuellen Bemessungsfall beschreibt.

3.1.1 Tragfähigkeit

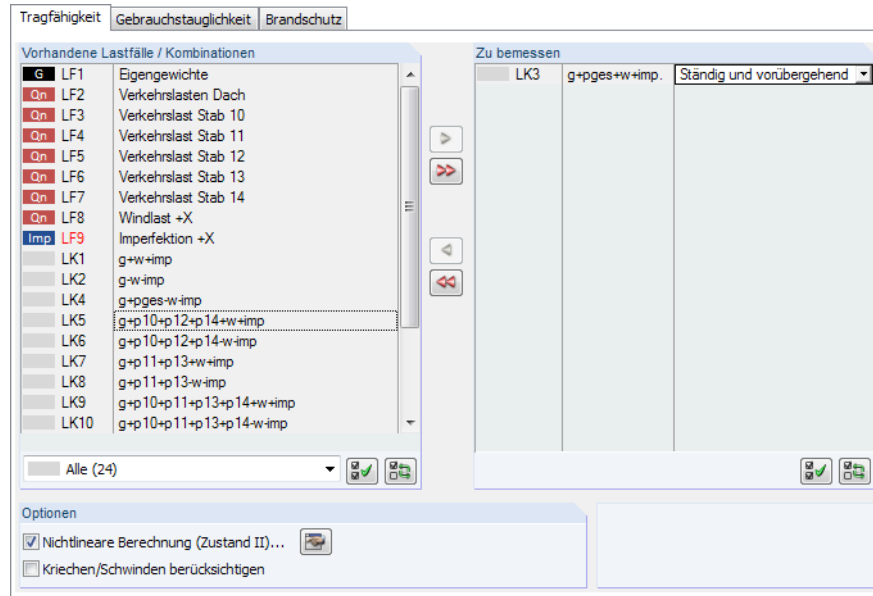


Bild 3.6: Maske 1.1 Basisangaben, Register Tragfähigkeit

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

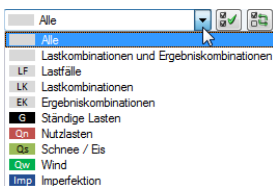
In diesem Abschnitt sind alle Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen aufgelistet, die in RSTAB angelegt wurden.

Mit der Schaltfläche lassen sich selektierte Einträge in die Liste *Zu Bemessen* nach rechts übertragen. Die Übergabe kann auch per Doppelklick erfolgen. Die Schaltfläche übergibt die ganze Liste.

Die Mehrfachauswahl von Lastfällen ist – wie in Windows üblich – mit gedrückter [Strg]-Taste möglich. So lassen sich mehrere Lastfälle gleichzeitig übertragen.

Falls die Nummer eines Lastfalls rot dargestellt ist wie z. B. LF 9 im Bild 3.6, so kann dieser nicht bemessen werden: Hier handelt es sich um einen Lastfall ohne Lastdaten oder um einen Imperfektionslastfall. Bei der Übergabe erscheint eine entsprechende Warnung.

Am Ende der Liste sind verschiedene Filteroptionen verfügbar. Sie erleichtern es, die Einträge nach Lastfällen, Kombinationen oder Einwirkungskategorien geordnet zuzuweisen. Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:



	Alle Lastfälle in der Liste werden selektiert.
	Die Auswahl der Lastfälle wird umgekehrt.

Tabelle 3.1: Schaltflächen in Spalte *Vorhandene Lastfälle / Kombinationen*


Zu bemessen

Hier sind die Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die für die Bemessung ausgewählt wurden. Mit oder per Doppelklick lassen sich selektierte Einträge wieder aus der Liste entfernen. Die Schaltfläche leert die ganze Liste.

Die Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen können folgenden Bemessungssituationen zugewiesen werden:

- *Ständig und vorübergehend*
- *Außergewöhnlich*

Diese Einteilung steuert die Teilsicherheitsbeiwerte γ_c und γ_s nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1 (siehe Bild 3.4, Seite 55 und Bild 3.35, Seite 82).

Die Bemessungssituation kann über die Liste geändert werden, die mit der Schaltfläche  am Ende des Eingabefeldes zugänglich ist.

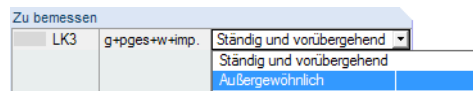


Bild 3.7: Bemessungssituation zuweisen

Auch hier ist eine Mehrfachauswahl mit gedrückter [Strg]-Taste möglich, sodass mehrere Einträge gleichzeitig geändert werden können.



Ergebniskombination

Sind für eine Bemessungssituation mehr als 16 Lastkombinationen vorhanden, so verläuft die Bemessung einer einhüllenden Max/Min-Ergebniskombination schneller als die aller enthaltenen Lastfälle und Lastkombinationen. Der Grund dafür ist, dass bei Ergebniskombinationen an jeder x-Stelle für 16 Extremwerte eine Bemessung durchgeführt wird. Liegen je Bemessungssituation weniger als 16 verschiedene Lastkombinationen zur Bemessung vor, sollten die Lastkombinationen einzeln zur Bemessung ausgewählt werden. Beim Nachweis einer Ergebniskombination ist schwer erkennbar, welchen Einfluss die enthaltenen Einwirkungen ausüben.

Optionen

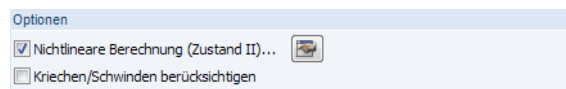



Bild 3.8: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **BETON NL** benötigt. Es wird eine physikalische und geometrische nichtlineare Berechnung durchgeführt. Die Schnittgrößen werden dabei in der Regel nach Theorie II. Ordnung ermittelt. Die nichtlineare Analyse für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist im Kapitel 2.4.7 ab Seite 45 beschrieben.



Das nichtlineare Nachweisverfahren geht von einer Interaktion zwischen Modell und Beanspruchung aus, die eine eindeutige Schnittgrößenverteilung erfordert. Deshalb können nur Lastfälle und Lastkombinationen untersucht werden, keine Ergebniskombinationen (EK): Bei einer Ergebniskombination liegen pro x-Stelle ein Maximum und Minimum für jede Schnittgröße vor.

Die Schaltfläche  ruft den Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* auf. Dieser Dialog besteht aus drei Registern. Sie sind im Kapitel 4.2 ab Seite 97 beschrieben.

Nichtlineare Untersuchungen sind sowohl für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit möglich.

Kriechen/Schwinden

Bei der nichtlinearen Berechnung kann der Einfluss aus Kriechen und Schwinden berücksichtigt werden. Nähere Informationen finden Sie im Kapitel 2.2.6 ab Seite 19.

Ist das Kontrollfeld angehakt, so können in Maske 1.3 *Querschnitte* die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und das Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$ festgelegt werden (siehe Bild 3.19, Seite 66).

3.1.2 Gebrauchstauglichkeit



Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist an die Ergebnisse der Tragfähigkeitsbemessung (Bewehrung) gebunden. Ein reiner Gebrauchstauglichkeitsnachweis ist nicht möglich.

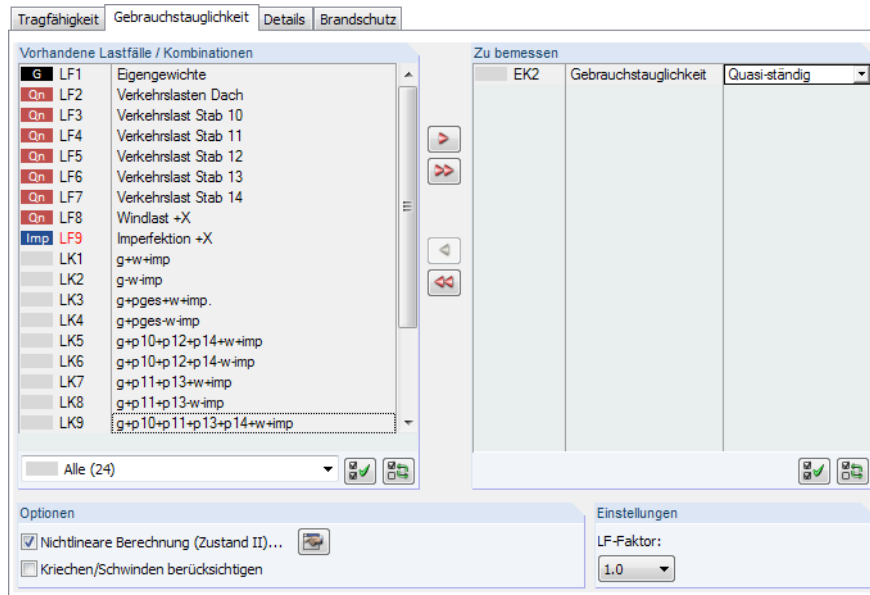


Bild 3.9: Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

Dieser Abschnitt listet alle in RSTAB definierten Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen auf.

In der Regel sind für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) andere Einwirkungen und Teilsicherheitsfaktoren relevant als für die Tragfähigkeitsbemessung. Die entsprechenden Kombinationen können in RSTAB erzeugt werden.

Zu bemessen



Lastfälle und Kombinationen lassen sich wie im [Kapitel 3.1.1](#) beschrieben hinzufügen oder wieder entfernen.

Für EN 1992-1-1 können den Lastfällen, Last- und Ergebniskombinationen unterschiedliche Grenzwerte für die Durchbiegung zugewiesen werden. Folgende Bemessungssituationen stehen zur Auswahl:

- Charakteristisch mit Direktlast
- Charakteristisch mit Zwangsverformung
- Häufig
- Quasi-ständig

Die Bemessungssituation kann über die Liste geändert werden, die mit der Schaltfläche am Ende des Eingabefeldes zugänglich ist.

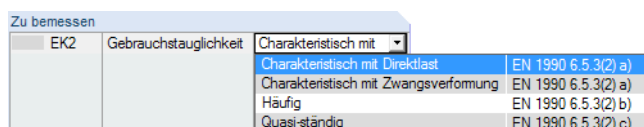


Bild 3.10: Bemessungssituation zuweisen

Details...

Über die Schaltfläche [Details] sind Einstellmöglichkeiten für die einzelnen Bemessungssituationen zugänglich (siehe [Kapitel 4.1.2, Seite 96](#)).

Optionen

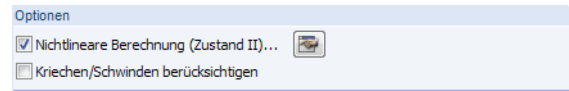



Bild 3.11: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **BETON NL** benötigt. Die nichtlineare Analyse für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist im [Kapitel 2.4.8](#) ab [Seite 49](#) beschrieben.



Nichtlineare Analysen nach DIN 1045-1 oder EN 1992-1-1 können nur für Lastfälle und Lastkombinationen erfolgen, nicht für Ergebnis- oder Superkombinationen.

Die Schaltfläche  ruft den Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* auf. Dieser Dialog besteht aus drei Registern. Sie sind im [Kapitel 4.2](#) ab [Seite 97](#) beschrieben.

Nichtlineare Untersuchungen sind sowohl für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit möglich.

Kriechen/Schwinden

Bei der nichtlinearen Berechnung kann der Einfluss aus Kriechen und Schwinden berücksichtigt werden. Nähere Informationen finden Sie im [Kapitel 2.2.6](#) ab [Seite 19](#).

Ist das Kontrollfeld angehakt, können in Maske *1.3 Querschnitte* die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und das Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$ definiert werden (siehe [Bild 3.19, Seite 66](#)).

3.1.3 Details

Dieses Register erscheint, wenn Lastfälle oder Kombinationen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis ausgewählt wurden und die Bemessung nach EN 1992-1-1 erfolgt. Für DIN 1045-1 erübrigt sich das Register, denn in Gl. (136) ist der Faktor k_t mit 0,4 festgeschrieben.

Tragfähigkeit				
Gebrauchstauglichkeit				
Details				
Brandschutz				
Details für Gebrauchstauglichkeit				
Nr.	Lastfall / Kombination Bezeichnung	Dauerlast	Faktor k_t	Faktor β
LF1	Eigengewichte	<input checked="" type="checkbox"/>	0.400	0.500
LF2	Verkehrslasten Dach	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF3	Verkehrslast Stab 10	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF4	Verkehrslast Stab 11	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF5	Verkehrslast Stab 12	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF6	Verkehrslast Stab 13	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF7	Verkehrslast Stab 14	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF8	Windlast +X	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
LF9	Imperfektion +X	<input type="checkbox"/>	0.400	1.000
EK2	Gebrauchstauglichkeit		0.400	0.500

Bild 3.12: Maske 1.1 Basisangaben, Register Details

Beim Rissbreitennachweis werden die Differenzen der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl berechnet (siehe [Kapitel 2.2.4, Seite 16](#)). Nach EN 1992-1-1, 7.3.4 (2), Gl. (7.9) ist hierzu die Angabe des Völligkeitsfaktors k_t erforderlich.

Lastfall / Kombination Bezeichnung

In dieser Spalte sind alle Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die im Register *Gebrauchstauglichkeit* für die Bemessung ausgewählt wurden. Bei Last- und Ergebniskombinationen werden auch alle enthaltenen Lastfälle angegeben.

Dauerlast

Diese Spalte regelt, welche Lastfälle als Dauerlasten anzusetzen sind. Beim Anhaken eines Eintrags wird der entsprechende Faktor k_t in Spalte C automatisch zu 0,4 gesetzt.

Faktor k_t

Über den Völligkeitsfaktor k_t wird die Belastungsdauer erfasst. Der Faktor k_t beträgt für langfristige Lasteinwirkung 0,4 und für kurzzeitige Lasteinwirkung 0,6.

Bei Last- und Ergebniskombinationen wird das Mittel aus den k_t - Werten der in der LK bzw. EK enthaltenen Lastfälle gebildet.

$$k_t = \frac{\sum_{i=1}^n (LF) \cdot k_{t,i} (LF)}{\sum_{i=1}^n \gamma_i (LF)} \quad (3.1)$$

Faktor β

Diese Spalte wird angezeigt, wenn in Maske 1.6 der Nachweis der *Verformung* $u_{1,z}$ vorgegeben ist (siehe [Bild 3.36, Seite 84](#)). Der Faktor β beträgt 1,0 bei Kurz- und 0,5 bei Langzeitbelastung.

3.1.4 Brandschutz

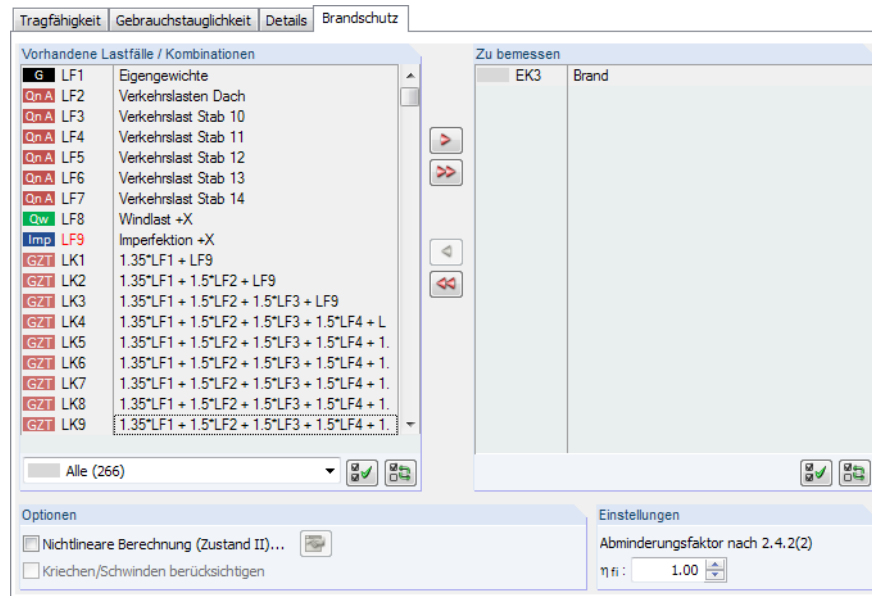


Bild 3.13: Maske 1.1 Basisangaben, Register Brandschutz

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

Dieser Abschnitt listet alle in RSTAB definierten Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen auf.

In der Regel sind für die Nachweise der Feuerwiderstandsfähigkeit andere Einwirkungen und Teilsicherheitsfaktoren relevant als für die Tragfähigkeitsbemessung. Die entsprechenden Kombinationen können in RSTAB erzeugt werden.

Zu bemessen



Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen für die sogenannte „Heißbemessung“ lassen sich wie im [Kapitel 3.1.1](#) beschrieben hinzufügen oder wieder entfernen.

Optionen

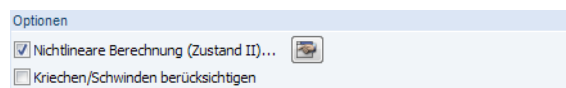


Bild 3.14: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **BETON NL** benötigt. Das nichtlineare Bemessungsverfahren ist im [Theoriekapitel 2.4](#) erläutert.



Die Schaltfläche [Einstellungen] ruft den Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* auf. Dieser Dialog besteht aus drei Registern. Sie sind im [Kapitel 4.2](#) ab [Seite 97](#) beschrieben.

Kriechen/Schwinden

Bei der nichtlinearen Berechnung kann der Einfluss aus Kriechen und Schwinden berücksichtigt werden. Nähere Informationen hierzu finden Sie im [Kapitel 2.2.6](#) ab [Seite 19](#).

Ist das Kontrollfeld angehakt, können in Maske 1.3 *Querschnitte* die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und das Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$ definiert werden (siehe [Bild 3.19](#), [Seite 66](#)).

Einstellungen

Die Option *Abminderungsfaktor nach 2.4.2 (2)* ermöglicht es, vereinfacht Beanspruchungen aus der Bemessung für Normaltemperatur zu übernehmen und diese mit dem Reduktionsfaktor η_{fi} abzumindern.

Der Reduktionsfaktor η_{fi} ermittelt sich nach den Gleichungen gemäß EN 1992-1-2, 2.4.2 (3). Als Vereinfachung kann der empfohlene Wert $\eta_{fi} = 0,7$ verwendet werden.

3.2 Materialien

Diese Maske ist zweigeteilt. Im oberen Abschnitt sind die bemessungsrelevanten Beton- und Stahlgüten aufgelistet. Alle Materialien der Kategorie ‚Beton‘ sind voreingestellt, die in RSTAB definiert wurden. Im Abschnitt *Materialkennwerte* werden die Eigenschaften des aktuellen Materials angezeigt, d. h. des Materials, dessen Zeile im oberen Abschnitt selektiert ist.

1.2 Materialien

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Betonstahl	Kommentar
1	Beton C30/37	B 500 S (A)	
2	Baustahl S 235 JR G2	B 500 S (A)	

Materialkennwerte

Beton-Festigkeitsklasse: Beton C30/37

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit	f_{ck}	30.00	N/mm ²
Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit	f_{cm}	38.00	N/mm ²
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.90	N/mm ²
5%-Quantil der zentrischen Zugfestigkeit	$f_{ctk,0.05}$	2.00	N/mm ²
95%-Quantil der zentrischen Zugfestigkeit	$f_{ctk,0.95}$	3.80	N/mm ²
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	E_{cm}	33000.00	N/mm ²

Charakteristische Dehnungen für nichtlineare Berechnungen

Grenzdehnung bei zentrischem Druck	ϵ_{c1}	-2.20	%
Bruchdehnung	ϵ_{cu1}	-3.50	%

Charakteristische Dehnungen für Parabel-Rechteck-Diagramm

Grenzdehnung bei zentrischem Druck	ϵ_{c2}	-2.00	%
Bruchdehnung	ϵ_{cu2}	-3.50	%
Exponent der Parabel	n	2.00	
Spezifisches Gewicht	γ	25.00	kN/m ³

Betonstahl: B 500 S (A)

Elastizitätsmodul	E_s	200000.00	N/mm ²
Charakteristischer Wert der Streckgrenze	f_{yk}	500.00	N/mm ²
Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit	f_{tk}	525.00	N/mm ²
Rechnerische Bruchdehnung	ϵ_{uk}	25.00	%

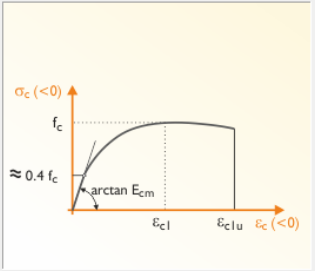
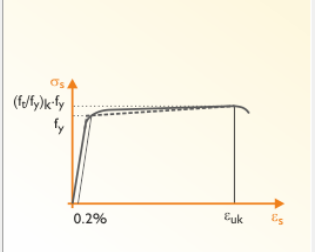



Bild 3.15: Maske 1.2 *Materialien*

Es sind die Materialien aufgelistet, die für den Nachweis der Stäbe relevant sind. Unzulässige Materialien sind in roter Schrift, geänderte Materialien in blauer Schrift dargestellt.

Das Kapitel 4.2 des RSTAB-Handbuchs beschreibt die Materialkennwerte, die zur Ermittlung der Schnittgrößen benutzt werden. In der globalen Materialbibliothek sind auch die bemessungsrelevanten Materialeigenschaften gespeichert. Die Werte sind für die *Beton-Festigkeitsklasse* und den *Betonstahl* voreingestellt.

Die Einheiten und Nachkommastellen der Kennwerte und Spannungen lassen sich über Menü **Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen** anpassen (siehe [Kapitel 8.3, Seite 158](#)).

Materialbezeichnung

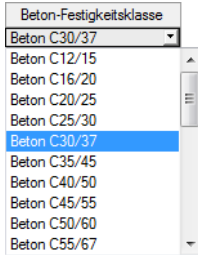
Beton-Festigkeitsklasse

Die in RSTAB verwendeten Materialien sind voreingestellt.

Die Festigkeitsklasse kann jederzeit geändert werden: Klicken Sie das Material in Spalte A an und setzen so das Feld aktiv. Dann klicken Sie auf die Schaltfläche (oder betätigen die Funktionstaste [F7]), um die Liste der Festigkeitsklassen zu öffnen. Die Liste enthält nur Festigkeitsklassen, die dem Bemessungskonzept der gewählten Norm entsprechen.

Nach der Übernahme werden die *Materialkennwerte* im Abschnitt unterhalb aktualisiert.

Die Materialeigenschaften sind im Modul BETON grundsätzlich nicht editierbar.

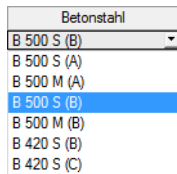


Betonstahl

In dieser Spalte ist eine Stahlgüte voreingestellt, die dem Bemessungskonzept der gewählten Norm entspricht.

Wie bei der Beton-Festigkeitsklasse ist die Auswahl eines anderen Betonstahls über die Liste möglich: Klicken Sie das Material in Spalte B an und setzen so das Feld aktiv. Dann klicken Sie auf die Schaltfläche oder betätigen die [F7]-Taste, um die Liste der Betonstähle zu öffnen. Wie bei den Betonfestigkeitsklassen enthält die Liste enthält nur normrelevante Stahlgüten.

Nach der Übernahme werden die *Materialkennwerte* im Abschnitt unterhalb aktualisiert.



Materialbibliothek

Viele Materialien sind in einer Datenbank hinterlegt. Diese wird aufgerufen über das Menü

Bearbeiten → **Materialbibliothek**



oder die links dargestellte Schaltfläche. Sie steht für die Betonfestigkeitsklassen und Betonstähle jeweils am unteren Spaltenende zur Verfügung.

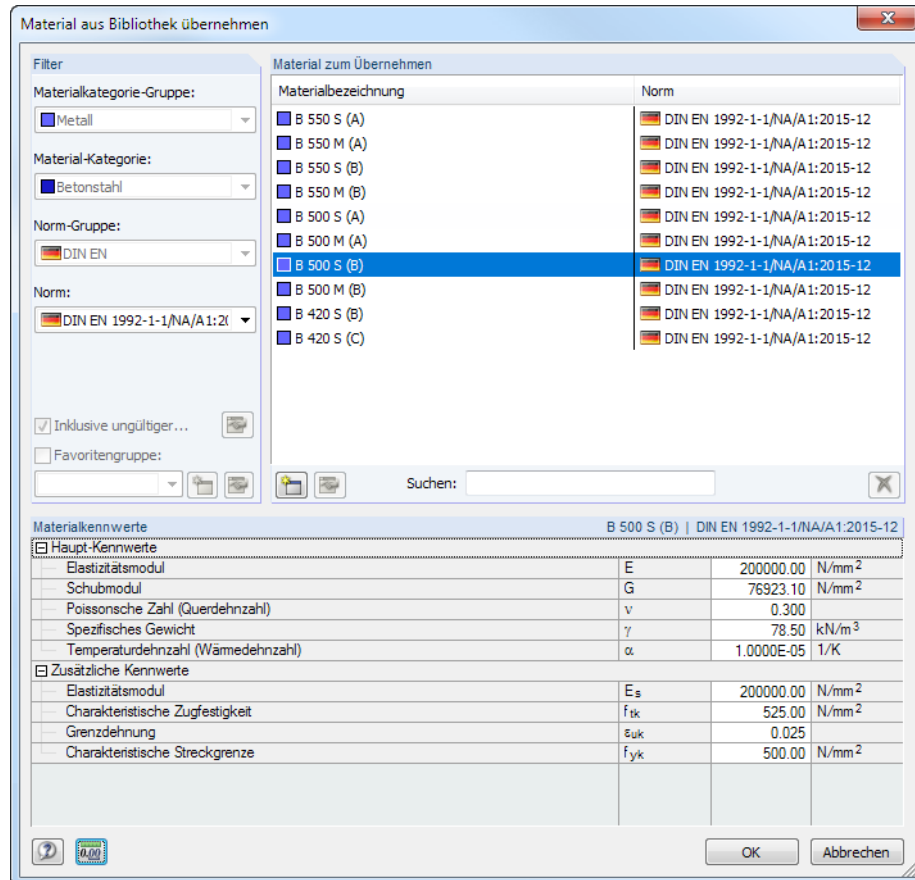
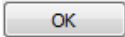


Bild 3.16: Dialog *Material aus Bibliothek übernehmen*

Im Abschnitt *Filter* sind die normrelevanten Materialien als Vorauswahl so eingestellt, dass keine anderen Kategorien oder Normen zugänglich sind. Die gewünschte Betonfestigkeitsklasse bzw. Stahlgüte kann in der Liste *Material zum Übernehmen* ausgewählt werden; die Kennwerte lassen sich im unteren Abschnitt überprüfen.



Mit [OK] oder [↵] wird das gewählte Material in die Maske 1.2 von BETON übergeben.

Das Kapitel 4.2 des RSTAB-Handbuchs beschreibt, wie Materialien gefiltert, ergänzt oder neu sortiert werden können.

3.3 Querschnitte

Diese Maske verwaltet die Querschnitte, die für die Bemessung verwendet werden. Zudem können Vorgaben für die Optimierung getroffen werden.

1.3 Querschnitte

Querchn. Nr.	A Material Nr.	B Querschnittsbezeichnung	C Optimieren	D Anmerkung	E Kriechzahl / Schwindmaß
1	1	Rechteck 900/600	<input type="checkbox"/>		2.806/-0.401
2	1	Rechteck 900/900	<input type="checkbox"/>		2.722/-0.389
3	1	Rechteck 1000/1400	<input type="checkbox"/>		2.631/-0.381
4	1	Rechteck 550/1400	<input type="checkbox"/>		2.771/-0.396
5	1	Rechteck 550/900	<input type="checkbox"/>		2.827/-0.403
6	1	Rechteck 400/500	<input type="checkbox"/>		3.008/-0.447
7	2	HE B 700 DIN 1025-2:1995	<input type="checkbox"/>	32) 35)	0.000/0.000
8	2	IS 1500/200/10/15/15	<input type="checkbox"/>	32) 35)	0.000/0.000

Rechteck 550/900

[mm]

Bild 3.17: Maske 1.3 Querschnitte

Querschnittsbezeichnung

Die in RSTAB definierten Querschnitte sind voreingestellt, ebenso die zugeordneten Materialnummern.



Um einen Querschnitt zu ändern, klicken Sie den Eintrag in Spalte B an und setzen so das Feld aktiv. Mit der Schaltfläche [Querschnittsbibliothek] oder im Feld bzw. der Taste [F7] rufen Sie dann die Profilreihe des aktuellen Eingabefeldes auf (siehe Bild 3.18).



In diesem Dialog kann ein anderer Querschnitt oder auch eine andere Reihe gewählt werden. Für die Bemessung kommen folgende *Massive Querschnitte* infrage:

- Rechteck
- Plattenbalken (symmetrisch, unsymmetrisch oder konisch)
- Überzug (symmetrisch oder unsymmetrisch)
- I-Querschnitt (symmetrisch, unsymmetrisch oder konisch)
- Kreis
- Ring
- Rechteckhohlkasten (Z-symmetrisch)
- Konus (symmetrisch)
- U-Profil (symmetrisch)

Die Auswahl von Querschnitten aus der Bibliothek ist im Kapitel 4.3 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

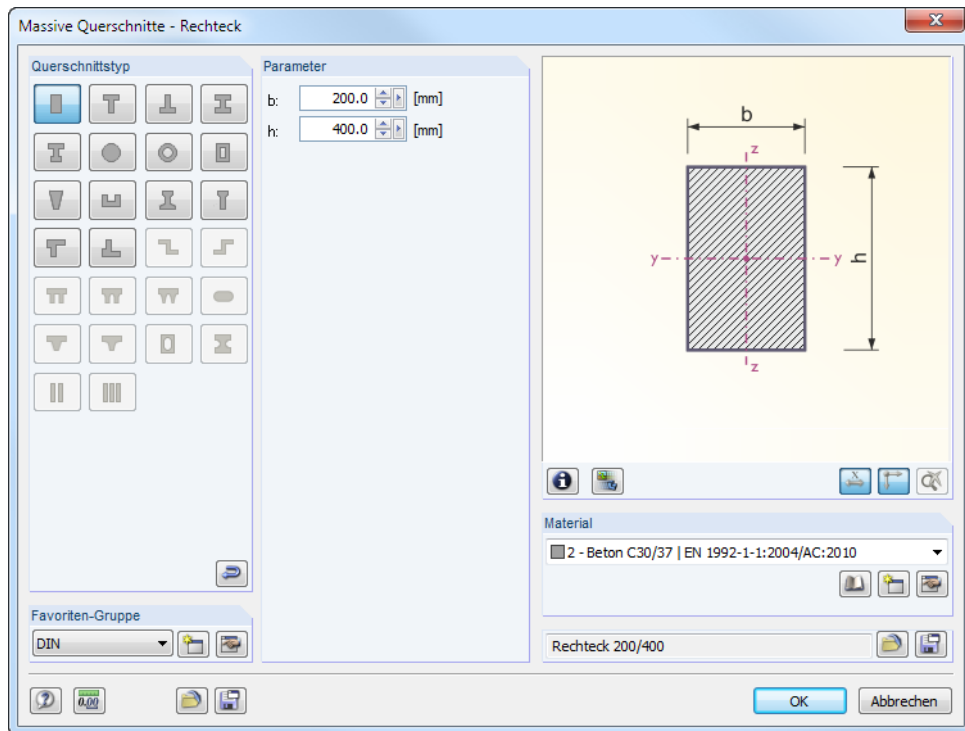
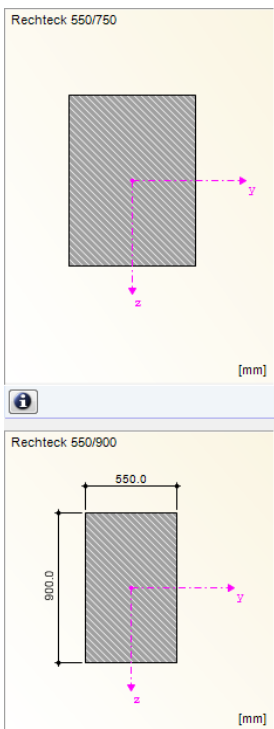


Bild 3.18: Parametrische massive Rechteckquerschnitte der Querschnittsbibliothek



Die neue Querschnittsbezeichnung kann auch direkt in das Eingabefeld eingetragen werden. Wenn der Eintrag in der Datenbank verzeichnet ist, liest BETON die Kennwerte ein.

Ein geändert Querschnitt wird mit blauer Schrift gekennzeichnet.

Liegen unterschiedliche Querschnitte in BETON und RSTAB vor, werden rechts in der Maske beide Profile dargestellt. Die Nachweise erfolgen mit den RSTAB-Schnittgrößen für das in BETON gewählte Profil.

Optimieren

Jeder zulässige Querschnitt kann einen Optimierungsprozess durchlaufen: Es wird für die RSTAB-Schnittgrößen das Profil gesucht, das die Vorgaben des Dialogs *Optimierungsparameter* mit den geringstmöglichen Abmessungen erfüllt (siehe Bild 8.5, Seite 157).

Um einen bestimmten Querschnitt zu optimieren, ist dessen Kontrollfeld in Spalte C zu aktivieren. Empfehlungen zur Profilloptimierung finden Sie im Kapitel 8.2 auf Seite 157.

Anmerkung

In dieser Spalte werden Hinweise als Fußnoten angezeigt. Sie sind in der Statusleiste erläutert.

Kriechzahl / Schwindmaß

Kriechzahl / Schwindmaß
2.806/-0.401
2.722/-0.389

In Spalte E werden die Werte der Kriechzahlen $\varphi(t, t_0)$ und Schwinddehnungen $\varepsilon(t, t_s)$ angezeigt. Die Werte werden aus voreingestellten Parametern ermittelt. Diese lassen sich über die Schaltfläche anpassen, die nach einem Klick in das Feld erscheint. Es öffnet sich ein neuer Dialog.

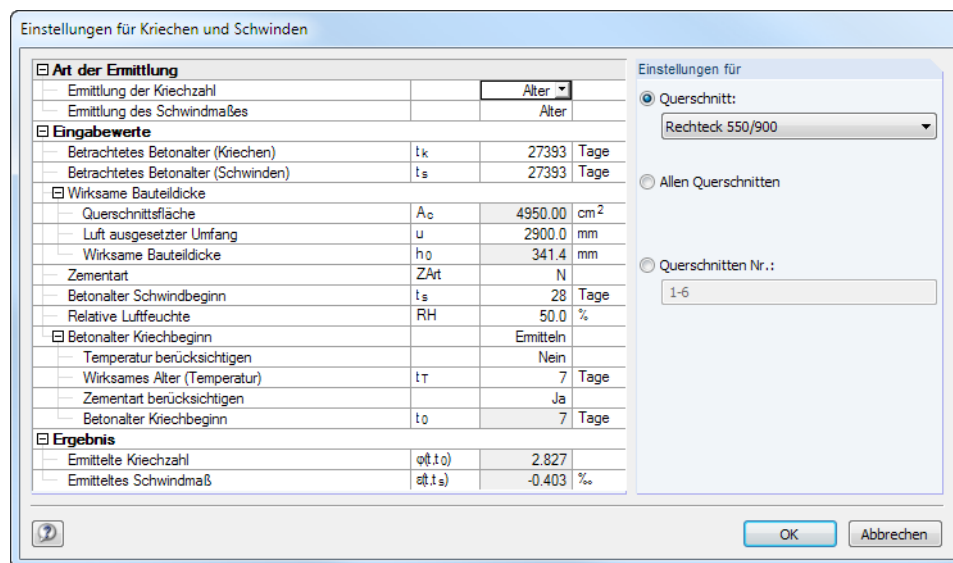


Bild 3.19: Dialog *Einstellungen für Kriechen und Schwinden*

Alter
Definieren
Alter

Die *Art der Ermittlung* von Kriechzahl und Schwindmaß ist jeweils wie folgt möglich:

- Alter Die Werte werden vom Programm über Parameter berechnet.
- Definieren Die Werte sind direkt anzugeben.

Am Tabellenende wird das aus den Parametern ermittelte *Ergebnis* für die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ und das Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$ angezeigt. Die Ermittlung von Kriechzahl und Schwindmaß ist im Kapitel 2.2.6 ab Seite 19 beschrieben.

Im Abschnitt *Einstellungen für* kann festgelegt werden, ob die Angaben für einen bestimmten Querschnitt, für alle Querschnitte oder für ausgewählte Querschnitte gelten.

Info über Querschnitt



Der Dialog *Info über Querschnitt* gibt Aufschluss über die Querschnittskennwerte.

Querschnittswert	Symbol	Wert	Einheit
Höhe	h	750.0	mm
Flanschbreite	b	800.0	mm
Flanschdicke	t	200.0	mm
Wanddicke	s	250.0	mm
Querschnittsfläche	A	2975.00	cm ²
Schubfläche	A _y	1709.64	cm ²
Schubfläche	A _z	1538.43	cm ²
Schwerpunktabstand	e _z	273.3	mm
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac)	I _y	1.440E+06	cm ⁴
Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grac)	I _z	924948.00	cm ⁴
Trägheitsradius	i _y	220.0	mm
Trägheitsradius	i _z	176.3	mm
Querschnittsgewicht	G	743.8	kg/m
Mantelfläche	A _{Mantel}	3.100	m ² /m
Schubmittelpunkt-Lage bezogen auf S	z _M	0.0	mm
Torsionsträgheitsmoment	I _t	502056.00	cm ⁴
Torsionswiderstand	W _t	9963.90	cm ³
Widerstandsmoment	W _y	30206.00	cm ³
Widerstandsmoment	W _{y,min}	-52680.70	cm ³
Widerstandsmoment	W _{y,max}	30206.00	cm ³
Widerstandsmoment	W _z	23123.70	cm ³
Plastisches Widerstandsmoment	W _{pl,y,max}	53654.30	cm ³
Plastisches Widerstandsmoment	W _{pl,z,max}	40593.80	cm ³
Plastischer Formbeiwert	α _{pl,y,max}	1.776	
Plastischer Formbeiwert	α _{pl,z,max}	1.756	

The diagram shows a T-section with a total height of 750.0 mm, a flange width of 800.0 mm, and a flange thickness of 200.0 mm. The web thickness is 250.0 mm. The center of gravity is located 273.3 mm from the bottom edge. The y and z axes are shown, with the z-axis pointing downwards.

Bild 3.20: Dialog *Info über Querschnitt*

3.4 Lager

In dieser Maske können Lagerungsbedingungen für die Stäbe festgelegt werden. Die Lagerknoten horizontaler Stäbe sind aus RSTAB voreingestellt. Das Programm erkennt, ob sich das Lager am Ende eines Stabes oder zwischen zwei Stäben (Durchlaufräger) befindet.



Lagerbreiten größer null wirken sich auf die Bemessung (Momentenumlagerung, Momentenausrundung, Querkraftabminderung) und den Bewehrungsvorschlag (Verankerungslänge) aus. Dies gilt jedoch nur für Stäbe in horizontaler oder leicht geneigter Lage, nicht für Stützen!

1.5 Lager

Lager Nr.	A Knoten Nr.	B Lagerbreite b [mm]	C Direkte Lagerung	D Monolithische Verbindung	E End-Lager	F M-Verhältnis δ [-]	G Kommentar
1	3	240.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	
2	6	300.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.00	
3	9	300.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.00	
4	12	300.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.00	
5	17	300.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.00	
6	20	240.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	
7							
8							
9							

- Berücksichtigung einer begrenzten Momentenumlagerung der Stützmomente nach 5.5
- Momentenausrundung bzw. Bemessung für das Anschnittmoment bei monolithischer Lagerung nach 5.3.2.2
- Querkraftbemessung am Auflagerend bzw. bei gleichmäßig verteilter Last im Abstand d vom Auflagerend nach 6.2.1 (8)
- Querkraftabminderung bei auflagenahen Einzellasten nach 6.2.2(6) bzw. 6.2.3(8)

Bild 3.21: Maske 1.5 Lager

Knoten Nr.

Diese Spalte verwaltet die gelagerten Knoten aller Stäbe, die sich in einer horizontalen oder bis zu 15° geneigten Lage befinden. Über die Schaltfläche in dieser Spalte lassen sich weitere Knoten grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster auswählen.

Lagerbreite b

In dieser Spalte sind die Breiten der Lager anzugeben. Damit kann z. B. die flächige Lagerung durch eine Wand erfasst werden, die im RSTAB-Modell als singuläre Stützung abgebildet ist.

Direkte Lagerung

Diese Spalte steuert die Lagerungsart des Trägers. Liegt ein Nebenträger vor, der seine Last in einen anderen Träger leitet, so besteht eine indirekte Lagerung. Das Häkchen muss in diesem Fall aus dem Kontrollfeld entfernt werden.

Die Vorgaben wirken sich auf die Verankerungslängen und die Querkraftbemessung aus.

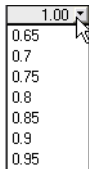
Monolithische Verbindung

Hier ist anzugeben, ob eine biegesteife Verbindung mit der Lagerung oder ein verdrehbares Lager vorliegt, das eine Ausrundung des Stützmoments zulässt.

Endlager

Für Endauflager gelten andere Geometriebedingungen als für Zwischenaufleger, um die Bemessungsmomente und Verankerungslängen zu bestimmen (siehe Grafik rechts in Maske).

M-Verhältnis δ



Für durchlaufende Bauteile ist in Spalte F das Verhältnis δ von umgelagertem Moment zu elastisch ermitteltem Ausgangsmoment festzulegen. Die Spalte ist zugänglich, wenn unterhalb der Grafik die Option *Berücksichtigung einer begrenzten Momentenumlagerung* angehakt ist.

Die δ -Werte können gemäß Norm ermittelt werden, z. B. EN 1992-1-1, 5.5 (4).

Kommentar

Hier kann ein Text eingegeben werden, der die gewählten Lagerungsbedingungen erläutert.

Momentenumlagerung / Querkraftbemessung

Unterhalb der Grafik befinden sich vier Kontrollfelder. Deren Vorgaben wirken sich auf die erforderliche Bewehrung aus. Diese Einstellungen sind global für den aktuellen Bemessungsfall (siehe [Kapitel 8.1, Seite 155](#)) wirksam.

Berücksichtigung einer begrenzten Momentenumlagerung der Stützmomente nach 5.5

Momentenausrundung bzw. Bemessung für das Anschnittmoment bei monolithischer Lagerung nach 5.3.2.2

Querkraftbemessung am Aufagerrand bzw. bei gleichmäßig verteilter Last im Abstand d vom Aufagerrand nach 6.2.1 (8)

Querkraftabminderung bei auflagenahen Einzellasten nach 6.2.2(6) bzw. 6.2.3(8)

Berücksichtigung einer begrenzten Momentenumlagerung der Stützmomente

Für Durchlaufträger können die linear-elastischen Verfahren mit begrenzter Umlagerung der Stützmomente angewandt werden. Dabei muss die resultierende Schnittgrößenverteilung mit den einwirkenden Lasten im Gleichgewicht stehen. In den Normen wie z. B. EN 1992-1-1, 5.5 (4) werden die einzuhaltenden Momentenverhältnisse δ genannt, damit die Rotationsfähigkeit in den kritischen Bereichen ohne besonderen Nachweise gewährleistet ist.

BETON ermittelt den Grenzwert und vergleicht ihn mit dem Wert, der in Spalte F festgelegt ist. Für die Umlagerung wird dann der größere der beiden Werte verwendet.

Momentenausrundung bzw. Bemessung für Anschnittmoment bei monolithischer Lagerung

Optional nimmt BETON eine Momentenausrundung gemäß z. B. EN 1992-1-1, 5.3.2.2 vor, wenn alle folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Kein Endlager
- Lagerbreite > 0
- Lager ist in Z-Richtung gehalten
- Lagerkraft wirkt positiv in Z
- Stab mit horizontaler oder maximal 15° geneigter Lage
- Negativer Momentenverlauf im gesamten Lagerbereich

Die Entscheidung, ob das Moment ausgerundet oder das Anschnittmoment angesetzt wird, hängt von der Definition des Lagers in Spalte D ab: Bei einer monolithischen Verbindung wird das Anschnittmoment verwendet, bei einer verdrehbaren Lagerung erfolgt eine Ausrundung des Stützmoments.

Querkräftbemessung am Auflagerrand

Es ist eine Querkräftbemessung für das Anschnittmoment möglich. Bei einer direkten Lagerung kann der Bemessungswert der Querkräft gemäß EN 1992-1-1, 6.2.1 (8) abgemindert werden.

Für Ergebniskombinationen erfolgt der Querkräftnachweis immer an der Lagerkante, da bei einer Einhüllenden eine „gleichmäßig verteilte Belastung“ nicht vorausgesetzt werden kann.

Querkräftabminderung bei auflagnahen Einzellasten

Das Kontrollfeld steuert, ob der Querkräftanteil lagernaher Einzellasten beim Nachweis gemäß EN 1992-1-1, 6.2.2 (6) oder 6.2.3 (8) berücksichtigt wird. Eine Abminderung erfolgt nur für Lastfälle und Lastkombinationen, nicht für Ergebniskombinationen.

3.5 Bewehrung

Diese Maske besteht aus mehreren Registern. Sie verwalten die Vorgaben für die Bewehrung. Da für die nachzuweisenden Stäbe nicht immer die gleichen Voraussetzungen gelten, können in jedem Bemessungsfall (*BETON-Fall*) sogenannte „Bewehrungssätze“ definiert werden: Jeder Bewehrungssatz verwaltet die Parameter der Bewehrung, die für bestimmte Stäbe oder Stabsätze gelten.

Bewehrungssatz

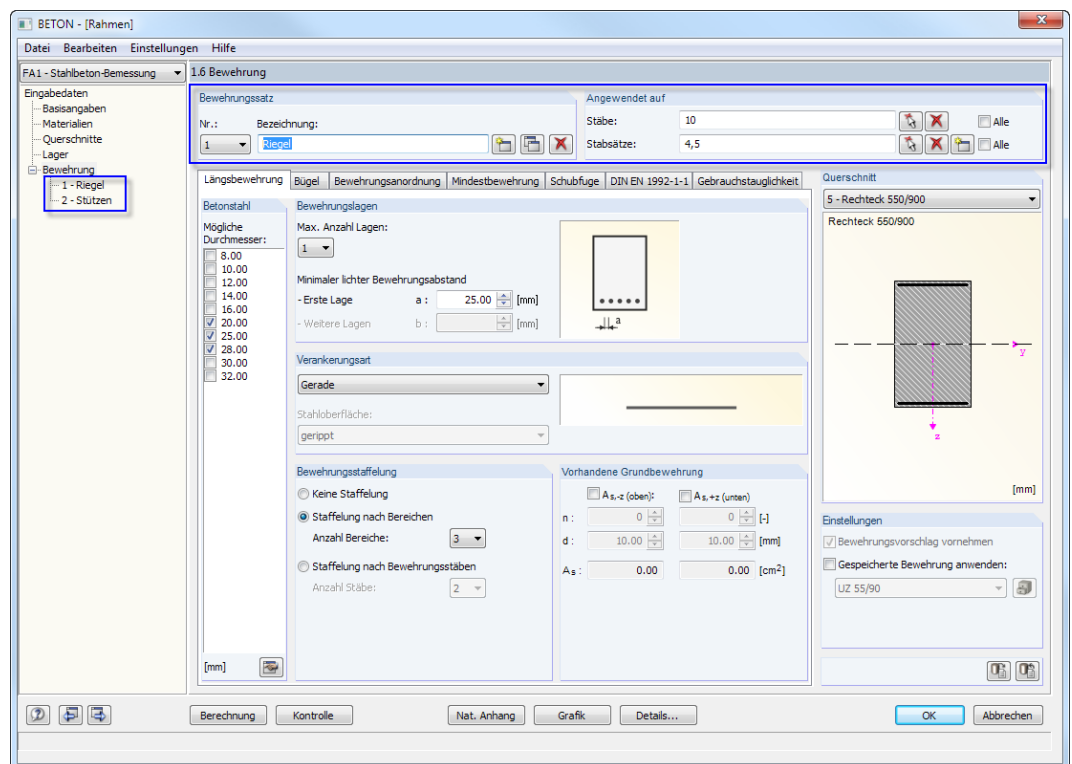


Bild 3.22: Maske 1.6 Bewehrung mit zwei Bewehrungssätzen



Mit der Schaltfläche [Neu] kann ein neuer Bewehrungssatz angelegt werden. Die Schaltfläche ist zugänglich, wenn das Kontrollfeld *Alle* im Abschnitt *Angewendet auf* deaktiviert ist, sodass eine eindeutige Zuweisung der Stäbe erfolgen kann.

Die Nummer des Bewehrungssatzes wird automatisch festgelegt; sie ist unveränderbar. Eine benutzerdefinierte *Bezeichnung* erleichtert den Überblick über die Bewehrungssätze im aktuellen Bemessungsfall.



Mit der Schaltfläche [Löschen] wird der aktuelle Bewehrungssatz ohne weitere Warnung aus dem Bemessungsfall entfernt. Für Stäbe, die in diesem Bewehrungssatz enthalten waren, findet damit keine Bemessung statt. Um sie zu bemessen, müssen sie einem neuen oder bestehenden Bewehrungssatz zugewiesen werden.


Nr.:

1
1
2

Der gewünschte Bewehrungssatz kann über die *Nr.*-Liste oder durch Anklicken im Navigator eingestellt werden.

Angewendet auf Stäbe/Stabsätze

Dieser Abschnitt steuert, für welche Stäbe und Stabsätze die Parameter des aktuellen Bewehrungssatzes gelten. Es sind *Alle* Stäbe und *Alle* Stabsätze voreingestellt. Mit dieser Vorgabe kann kein weiterer Bewehrungssatz erstellt werden, denn ein Stab lässt sich nicht nach verschiedenen Regeln bemessen (dies ist nur über „Bemessungsfälle“ möglich, siehe [Kapitel 8.1, Seite 155](#)). Um Bewehrungssätze zu nutzen, muss das Häkchen vom Kontrollfeld *Alle* entfernt werden.

In die Eingabefelder sind die Nummern der Stäbe und Stabsätze einzutragen, für die die Bewehrungsparameter der Register unterhalb gelten. Mit  kann die Auswahl auch grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster erfolgen. Die Eingabefelder dürfen nur Stab- und Stabsatznummern enthalten, die noch keinem anderen Bewehrungssatz zugeteilt sind.



Stäbe, die in Stabzügen enthalten sind, werden automatisch für die Bemessung deaktiviert.

Querschnitt

5 - Rechteck 550/900
3 - Rechteck 1000/1400
4 - Rechteck 550/1400
5 - Rechteck 550/900

Die Querschnittsgrafik zeigt an, wie sich die Eingaben in den verschiedenen Registern dieser Maske auswirken. Änderungen bei den Bewehrungsvorgaben werden dynamisch vollzogen.


In der Liste oberhalb der Grafik kann der relevante Querschnitt eingestellt werden.

Einstellungen

Einstellungen

Bewehrungsvorschlag vornehmen

Gespeicherte Bewehrung anwenden:


LUZ 55/90 

Das Kontrollfeld *Bewehrungsvorschlag vornehmen* steuert, ob BETON die Bewehrungsvorgaben in eine Stabstahlbewehrung umsetzt. Wenn dieses Feld deaktiviert wird, sind einige Eingabefelder in den Registern dieser Maske gesperrt. In diesem Fall ermittelt BETON nur die erforderlichen Bewehrungsquerschnitte.

Wenn in Maske *1.1 Basisangaben* der Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit oder den Brandschutz vorgegeben wurde, kann der Bewehrungsvorschlag nicht unterdrückt werden: Die GZG-Nachweise basieren auf einer vorhandenen Stabbewehrung, denn Rissbreiten, Rissabstände etc. lassen sich nur auf der Basis von Stabdurchmessern und Stababständen ermitteln. Gleiches gilt für die Bemessung nach dem nichtlinearen Verfahren.

Mit dem Kontrollfeld *Gespeicherte Bewehrung anwenden* kann eine in der benutzerdefinierten Bibliothek von Bewehrungsvorlagen abgelegte Bewehrung für die Berechnung als vorhandene Bewehrung angesetzt werden. Bewehrungsvorlagen lassen sich in Maske 3.1 definieren und speichern (siehe [Kapitel 5.2.1, Seite 112](#)). Dann ist auch das Kontrollfeld zugänglich.

LUZ 55/90
LUZ 30/75
LUZ 55/90

Die relevante Bewehrungsvorlage kann in der Liste ausgewählt werden. Mit der Schaltfläche  ist die Datenbank der Bewehrungsvorlagen zugänglich, die ebenfalls eine Auswahlmöglichkeit unter den abgelegten Bewehrungsvorlagen bietet (siehe [Bild 3.23](#)).

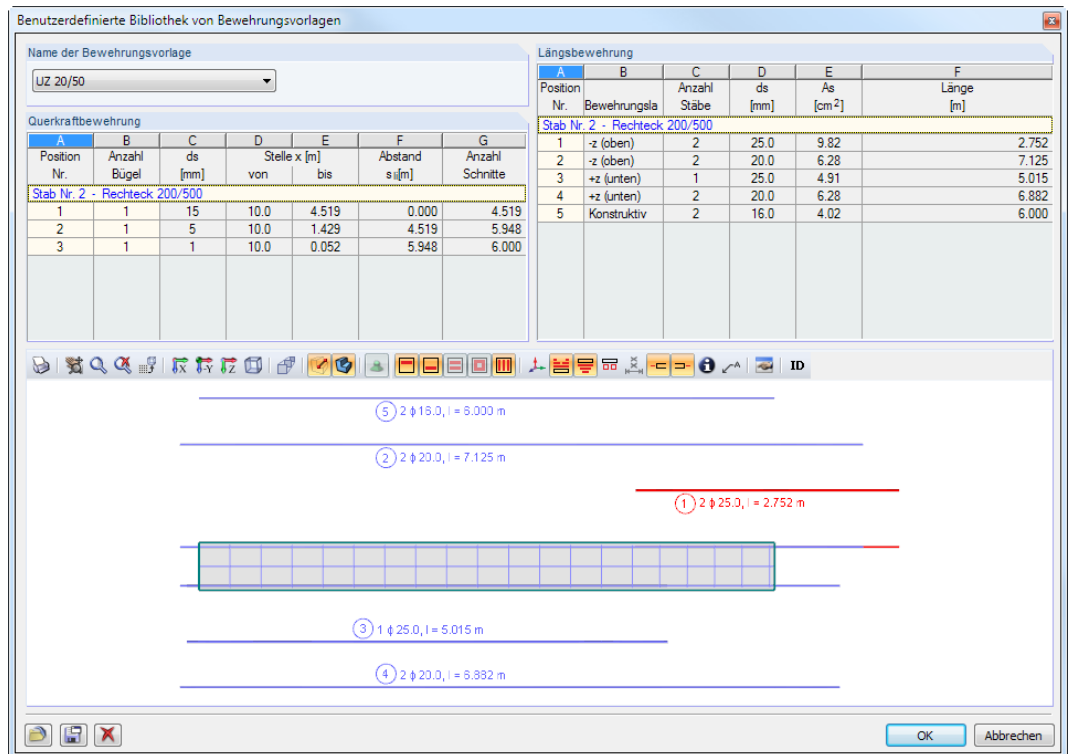


Bild 3.23: Benutzerdefinierte Bibliothek der Bewehrungsvorlagen



Benutzerdefinierte Bewehrungsvorlagen ermöglichen es, auch bei einer Änderung der Eingabedaten die Bewehrungsstäbe zu erhalten und für die Bemessung zu verwenden.

Die in der Bewehrungsvorlage abgelegte Bewehrung ist nicht dynamisch: Die Lage und Länge der Bewehrungen sind fest und einem bestimmten Stab zugeordnet. Sollte sich in RSTAB die ursprüngliche Stablänge ändern, wird dies nicht in der Bewehrungsvorlage angepasst.

3.5.1 Längsbewehrung

In diesem Register sind die Vorgaben für die Längsbewehrung zu treffen.

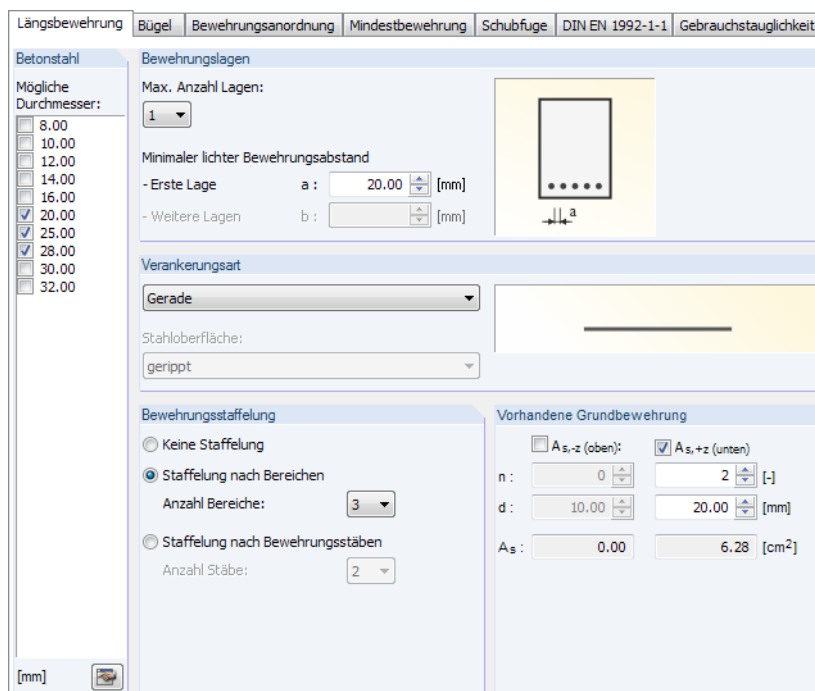


Bild 3.24: Maske 1.6 Bewehrung, Register Längsbewehrung

Betonstahl

Die Liste der möglichen Durchmesser bietet praxisübliche Auswahlmöglichkeiten für Betonstahl. Es können verschiedene Durchmesser für den Bewehrungsvorschlag vorgegeben werden.



Über die Schaltfläche [Bearbeiten] kann die Liste der verfügbaren Stabdurchmesser angepasst werden.

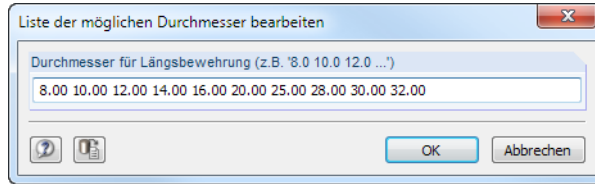


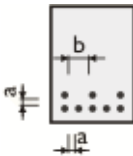
Bild 3.25: Dialog *Liste der möglichen Durchmesser bearbeiten*

In der Eingabezeile können Durchmesser geändert, gelöscht oder ergänzt werden.

Bewehrungslagen



BETON berücksichtigt beim Bewehrungsvorschlag auch eine mehrlagige Anordnung der Bewehrungsstäbe. Über die Liste lässt sich die *Maximale Anzahl* an Lagen vorgeben.



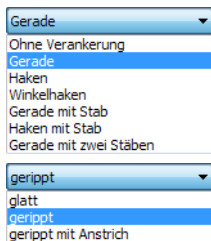
Der *Minimale lichte Bewehrungsabstand* der Bewehrungsstäbe a für die erste Lage und ggf. b für weitere Lagen kann in den beiden Eingabefeldern festgelegt werden.

Diese konstruktiven Vorgaben werden beim Bewehrungsvorschlag berücksichtigt: Sie wirken sich auf die Anzahl der möglichen Bewehrungsstäbe jeder Lage und auf den Hebelarm der inneren Kräfte aus.



Bei der Anordnung mehrerer Bewehrungslagen ist keine Staffelung der Bewehrung möglich.

Verankerungsart

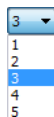


Die beiden Listen in diesem Abschnitt bieten eine große Auswahl an Verankerungsmöglichkeiten. Auch hier wirkt die Grafik rechts dynamisch, d. h. geänderte Vorgaben werden sofort grafisch angezeigt.

Die Verankerung wirkt sich wie die *Stahloberfläche* (bei ACI 318 und EN 1992 nur gerippt) auf die erforderliche Verankerungslänge aus.

Bewehrungsstaffelung

Die Voreinstellung ist *Keine Staffelung*. Wurden mehrere Bewehrungslagen vorgegeben, so sind die beiden übrigen Optionen gesperrt.



Wird eine *Staffelung nach Bereichen* gewählt, kann über die Liste festgelegt werden, wie viele Bereiche mit jeweils gleicher Bewehrung beim Bewehrungsvorschlag zulässig sind. BETON untersucht dann, wie mit den zur Verfügung stehenden Bewehrungsstäben eine optimale Abdeckung der erforderlichen Stahlquerschnittsflächen erreicht werden kann.

Bei der *Staffelung nach Bewehrungsstäben* weist das Programm erst dann einen neuen Bereich aus, wenn die benutzerdefinierte maximale Anzahl an Bewehrungsstäben erreicht ist. Diese Stabanzahl ist über die Liste festzulegen.

Vorhandene Grundbewehrung

Hier kann jeweils eine Grundbewehrung $A_{s,-z}$ für die obere Lage und $A_{s,+z}$ für die untere Lage vorgegeben werden. Nach dem Anhängen der Kontrollfelder sind die Eingabefelder zugänglich, um die Anzahl der Bewehrungsstäbe n und die Stabdurchmesser d festzulegen. Aus den Vorgaben ermittelt BETON die Bewehrungsflächen A_s der Grundbewehrung.

Beim Erstellen des Bewehrungsvorschlags wird die benutzerdefinierte Grundbewehrung berücksichtigt. Diese wird über die gesamte Stab- bzw. Stabsatzlänge eingelegt. Wenn die erforderliche Bewehrung nicht von der Grundbewehrung abgedeckt werden kann, ermittelt das Programm die zusätzlich benötigten Bewehrungsstäbe und legt sie in den Querschnitt ein.

3.5.2 Bügel

Dieses Register verwaltet die Vorgaben für die Querkraftbewehrung.

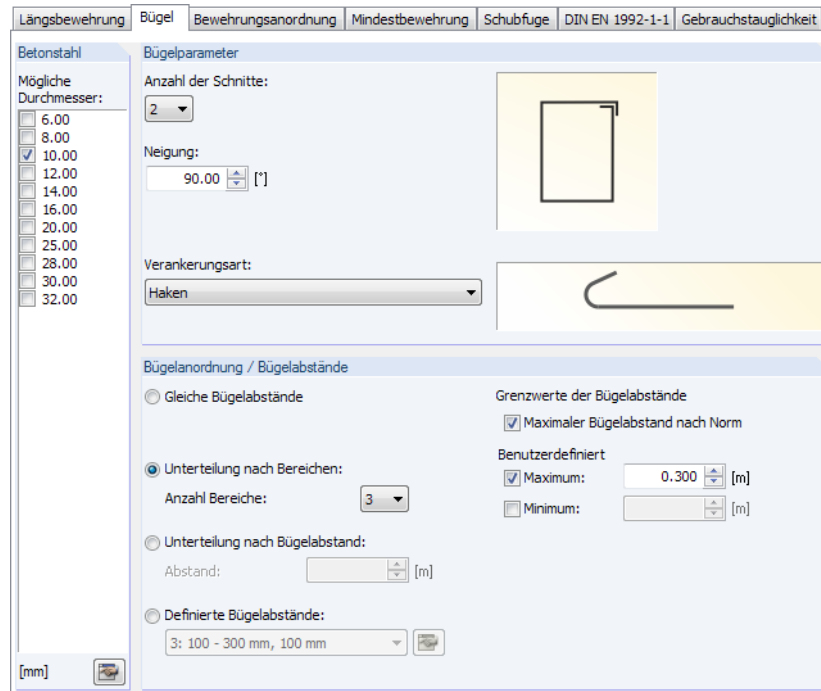


Bild 3.26: Maske 1.6 Bewehrung, Register Bügel

Betonstahl

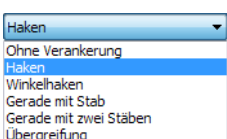
Die Liste der möglichen Durchmesser bietet praxisübliche Auswahlmöglichkeiten für Betonstahl. Über die Schaltfläche kann die Liste der verfügbaren Stabdurchmesser angepasst werden (siehe Bild 3.25).

Bügelparameter



In der Liste *Anzahl Schnitte* kann festgelegt werden, wie viele Bügelstäbe in Querkraftrichtung vorliegen. Bis zu vier Schnitte sind möglich; es sind zwei Schnitte voreingestellt. In der Grafik rechts werden die Änderungen dynamisch umgesetzt.

Die *Neigung* der Schubbewehrung wird durch den Winkel zwischen Längs- und Schubbewehrung beschrieben. Voreingestellt sind 90°, also lotrechte Bügel. Bei einer Änderung des Winkels sind die Normvorgaben zu berücksichtigen: EN 1992-1-1, 9.2.2 (1) erlaubt nur Winkel zwischen 45° und 90° und fordert in 9.2.2 (4), dass Schrägstäbe als Schubbewehrung nur gleichzeitig mit Bügeln verwendet werden dürfen. Dabei sollte mindestens 50 % der aufzunehmenden Querkraft durch Bügel abgedeckt werden.

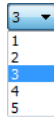


Die *Verankerungsart*-Liste enthält verschiedene Möglichkeiten der Bügelverankerung, die sich auf die Ermittlung der Verankerungslängen auswirken. In der Grafik rechts werden die Änderungen dynamisch umgesetzt.

Bügelanordnung / Bügelabstände

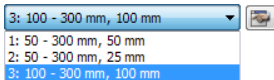
Dieser Abschnitt ist nur zugänglich, wenn ein Bewehrungsvorschlag erstellt wird.

Es sind *Gleiche Bügelabstände* für alle Stäbe und Stabzüge voreingestellt.



Wird eine *Unterteilung* nach Bereichen gewählt, so ist in der Liste die Anzahl der Bereiche mit gleicher Bügelanordnung anzugeben. Die Vorgabe von einem Bereich bewirkt, dass neben dem Bereich mit maximalem Bügelabstand (Mindestbewehrung) noch ein Bereich gebildet wird, der den Maximalwert der erforderlichen Bügelbewehrung abdeckt. Bei zwei Bereichen bestimmt BETON den Mittelwert aus erforderlicher Mindestbewehrung und Maximalbewehrung und setzt die entsprechenden x-Stellen im Stab als weitere Bereichsgrenzen an.

Bei der *Unterteilung nach Bügelabstand* ist ein Abstand für die Bügelbereiche festzulegen. Ein Wechsel der Bereiche erfolgt in den Abstandsintervallen, die ebenfalls aus erforderlicher Mindestbewehrung und Maximalbewehrung mit einem Interpolationsverfahren ermittelt werden.



Werden *Definierte Bügelabstände* vorgegeben, kann in der links dargestellten Liste ein Eintrag ausgewählt werden. Die Schaltfläche ermöglicht es, diese Einträge anzupassen oder einen neuen Eintrag mit benutzerdefinierten Bügelabständen anzulegen.

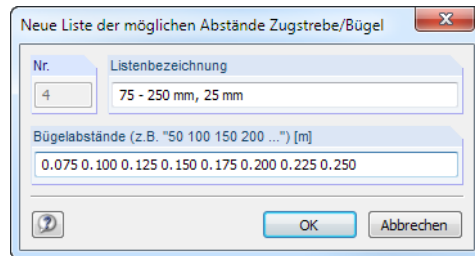


Bild 3.27: Dialog *Neue Liste der möglichen Abstände Zugstrebe/Bügel*



Ein Beispiel für benutzerdefinierte Bügelabstände finden Sie in folgendem Fachbeitrag: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000491>

Die *Grenzwerte der Bügelabstände* können auch nach Norm festgelegt oder mit benutzerdefinierten Grenzwerten vorgegeben werden.



Die im Bewehrungsvorschlag ausgewiesenen Bereiche können in Maske 3.2 *Bügelbewehrung* jederzeit geändert oder ergänzt werden (siehe [Kapitel 5.2.2, Seite 117](#)).

3.5.3 Bewehrungsanordnung

Dieses Register steuert, wie die Bewehrung eingelegt wird und welche RSTAB-Schnittgrößen bemessen werden sollen.

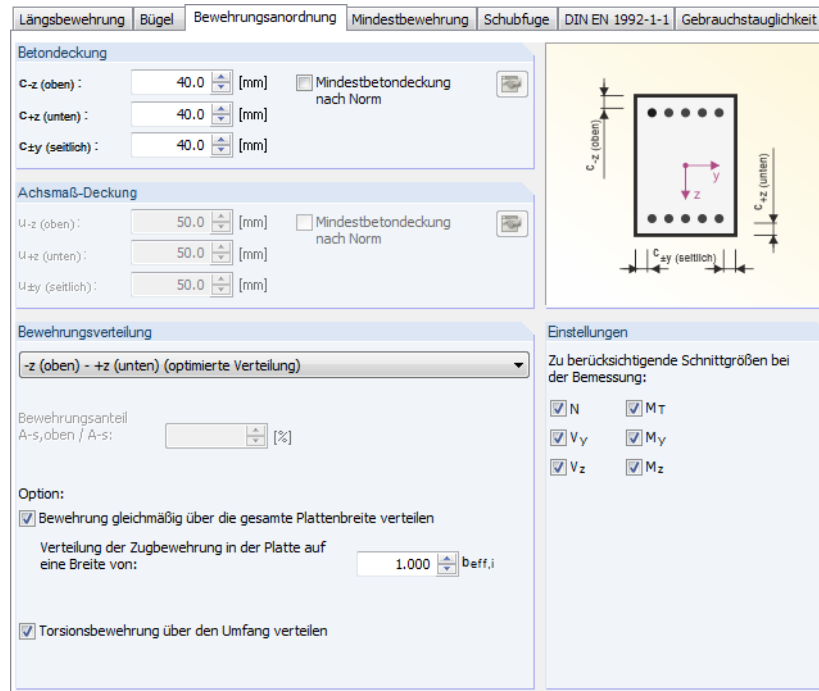


Bild 3.28: Maske 1.6 Bewehrung, Register Bewehrungsanordnung

Betondeckung / Achsmaß-Deckung

Die beiden Abschnitte sind interaktiv mit der Vorgabe, ob das Programm einen *Bewehrungsvorschlag vornehmen soll* (siehe Seite 62): Ist das Kontrollfeld angehakt, so beziehen sich die Deckungen auf die Randmaße c der Bewehrung. Diese können im Abschnitt *Betondeckung* festgelegt werden. Falls kein Bewehrungsvorschlag gewünscht ist, sind die Angaben auf die Achsmaße u der Bewehrungsstäbe bezogen. Sie können im Abschnitt *Achsmaß-Deckung* eingegeben werden.

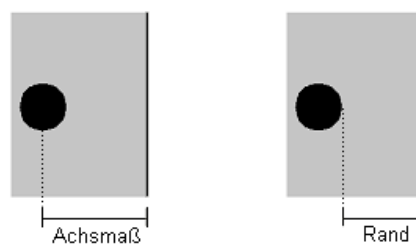
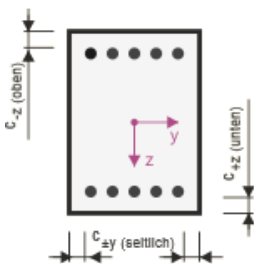


Bild 3.29: Achsmaß u und Randmaß c



Im Feld $c_{-z(\text{oben})}$ ist die Betondeckung der oberen Längsbewehrung, im Feld $c_{+z(\text{unten})}$ die der unteren Längsbewehrung anzugeben. Diese Werte stellen die Nennmaße der Betondeckung c_{nom} dar (z. B. EN 1992-11, 4.4.1.1). BETON ermittelt aus diesen Vorgaben und unter Berücksichtigung der verwendeten Stabdurchmesser den Hebel der inneren Kräfte.

„Oben“ und „unten“ ist durch die Lage der lokalen Stabachsen in RSTAB eindeutig definiert. Die Deckung $c_{\pm y(\text{seitlich})}$ wird für die Ersatzwanddicke zur Torsionsbemessung benötigt.

Die Lage der Stabachsen wird rechts in der Querschnittsgrafik dargestellt. Im RSTAB-Arbeitsfenster können die lokalen Stabachsen über das Stab-Kontextmenü oder im *Zeigen-Navigator* eingeblendet werden (siehe Bild 3.30).

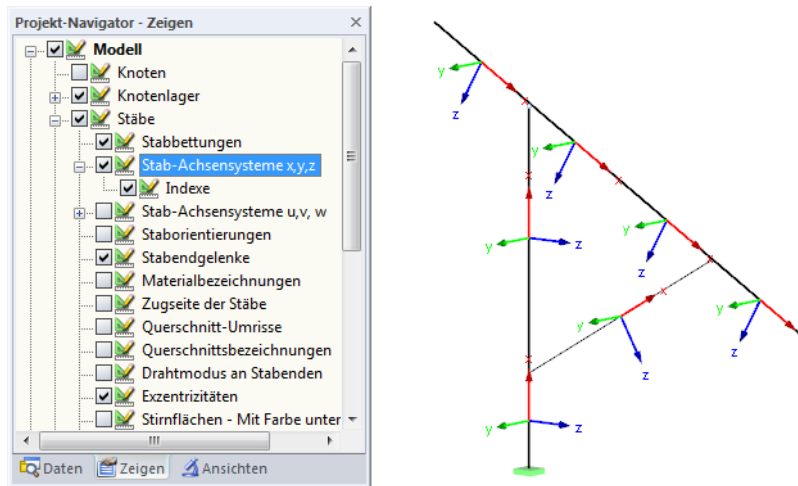
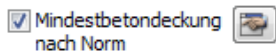


Bild 3.30: Aktivieren der Stabachsensysteme im Zeigen-Navigator von RSTAB



Bei der Eingabe der Randmaße u für mehrlagige Bewehrungen sind die Maße auf den Schwerpunkt der gesamten Lage zu beziehen!



Mit dem Kontrollfeld *Mindestbetondeckung nach Norm* werden die Standardwerte der gewählten Bemessungsnorm eingestellt. Die Parameter zur Bestimmung der Betondeckung lassen sich auch [Bearbeiten]. Ein Klick auf diese Schaltfläche öffnet einen Dialog mit drei Registern, in denen die Vorgaben für die Lagen individuell angepasst werden können.

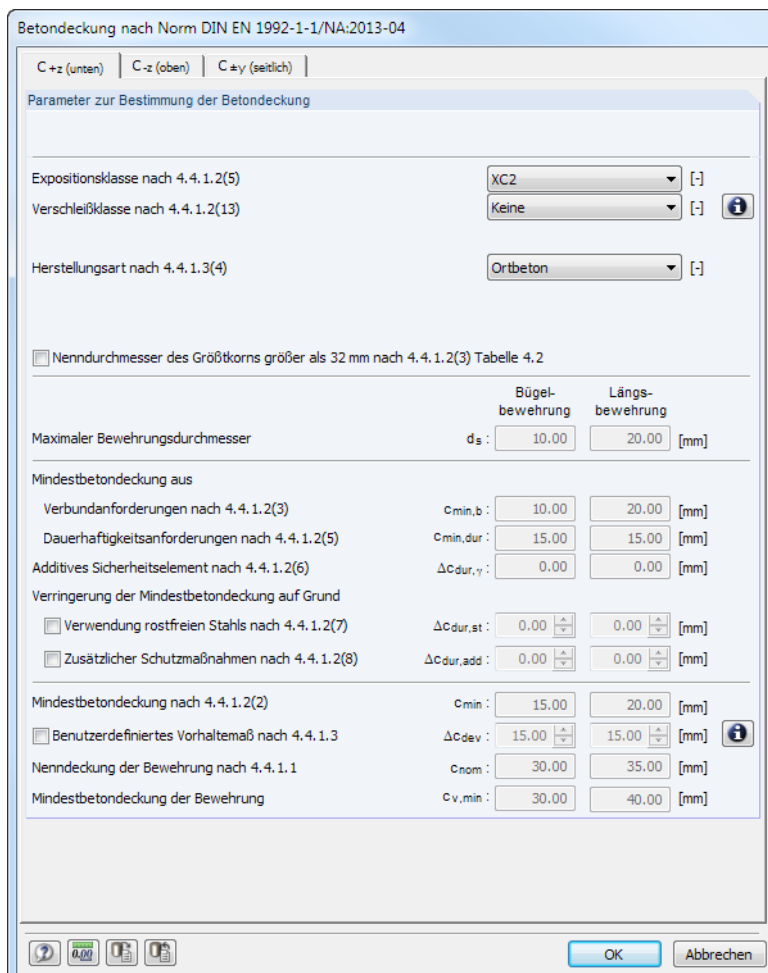


Bild 3.31: Dialog *Betondeckung nach Norm*

Bewehrungsverteilung

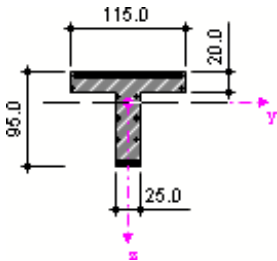
- z (oben) - +z (unten) (optimierte Verteilung)
- z (oben) - +z (unten) (symmetrische Verteilung)
- z (oben) - +z (unten) (Anteil $A_{s,oben}/A_s$ definieren)
- z (oben) - +z (unten) (Anteil $A_{s,Zug}/A_s$ definieren)
- In Ecken (symmetrische Verteilung)
- Gleichmäßig umlaufend

Die Liste enthält verschiedene Möglichkeiten, wie die Bewehrung im Querschnitt angeordnet werden kann:

- oben - unten (optimierte Verteilung)
- oben - unten (symmetrische Verteilung)
- oben - unten (Anteil $A_{s,oben}/A_s$ definieren)
- oben - unten (Anteil $A_{s,Zug}/A_s$ definieren)
- In Ecken (symmetrische Verteilung)
- Gleichmäßig umlaufend

Bei der Option *-z (oben) - +z (unten) (optimierte Verteilung)* erfolgt auch für zweiachsige Biegebeanspruchung eine Optimierung.

Die Bewehrungsverteilung lässt sich auch über einen benutzerdefinierten *Anteil* der oberen Bewehrung bzw. Zugbewehrung an der Gesamtbewehrung beschreiben. Im Eingabefeld unterhalb kann der Bewehrungsanteil festgelegt werden. Damit ist eine Untersuchung von Bestandskonstruktionen möglich.



Bei Plattenbalken und I-Querschnitten lässt sich die Bewehrung *gleichmäßig über die gesamte Plattenbreite verteilen*. Dadurch wird ein Teil der Bewehrungsstäbe ausgelagert. Die Verteilung der Zugbewehrung über die mitwirkende Breite b_{eff} kann auch individuell mit einem Faktor reduziert werden.

Falls eine *Torsionsbewehrung* erforderlich ist, wird diese per Voreinstellung über den Umfang verteilt.

Änderungen in der Bewehrungsanordnung werden in der Grafik rechts dynamisch umgesetzt.



Bei einer reinen Biegung um die schwache Achse ($M_y = 0; M_z > 0$) ergeben sich für die Bewehrungsverteilungen *oben - unten* erhöhte Bewehrungsquerschnitte: Das Bemessungsmoment wirkt nicht in die vorgegebene Verteilungsrichtung der Bewehrung. In diesem Fall ist die Bewehrungsverteilung *In Ecken* zu empfehlen.

Einstellungen

Es werden alle Schnittgrößen (Normal- und Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente) bei der Bemessung berücksichtigt. Dieser Abschnitt ermöglicht es, bestimmte Schnittgrößen für die Nachweisführung zu unterdrücken, z. B. wenn sehr kleine Torsionsmomente zu Problemen bei der Schubbemessung führen.



Die Änderung der Voreinstellungen liegt im Verantwortungsbereich des Anwenders!

3.5.4 Mindestbewehrung

Dieses Register verwaltet die Vorgaben zu Mindest- und Konstruktionsbewehrung sowie die Parameter zur Begrenzung der Rissbreite. Diese Vorgaben werden für die Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise berücksichtigt, nicht aber für die Bemessung im Brandfall.

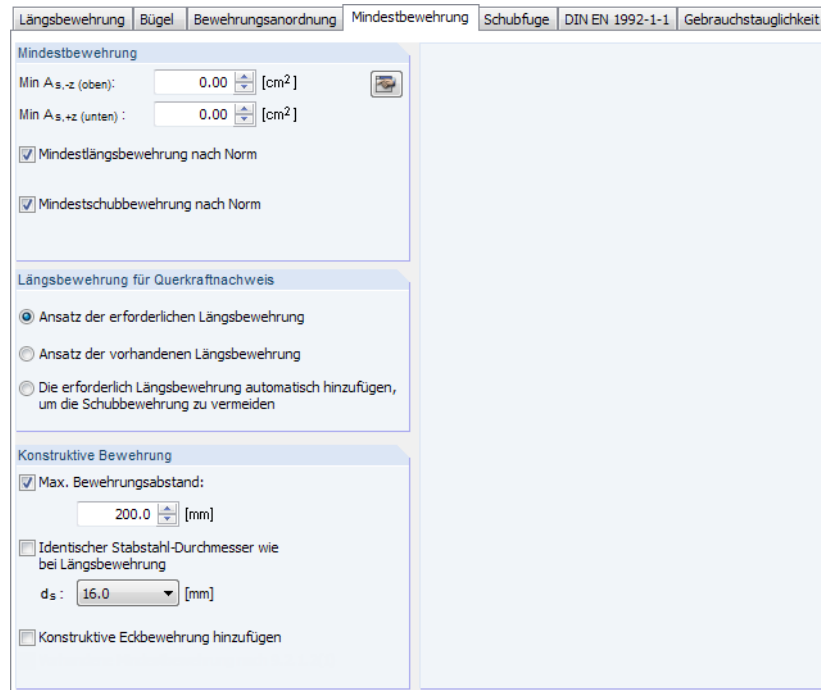


Bild 3.32: Maske 1.6 Bewehrung, Register Mindestbewehrung

Mindestbewehrung

Für die Vorgabe einer globalen Mindestbewehrung stehen zwei Eingabefelder zur Verfügung, in die die Stahlquerschnitte $Min A_{s,-z} (oben)$ und $Min A_{s,+z} (unten)$ eingetragen werden können. Die Querschnittsflächen der Bewehrung lassen sich auch über die Schaltfläche aus der Anzahl der Bewehrungsstäbe und den Stabdurchmessern in einem Dialog ermitteln.

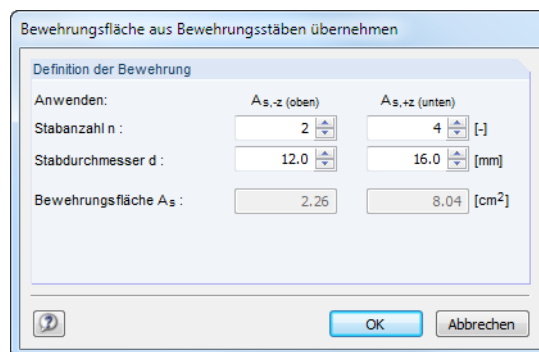


Bild 3.33: Dialog Bewehrungsfläche aus Bewehrungsstäben übernehmen

Bei der Ermittlung der erforderlichen Bewehrung kann die in der Norm geforderte *Mindestlängsbewehrung* und *Mindestschubbewehrung* – unabhängig voneinander – berücksichtigt oder unterdrückt werden.

Längsbewehrung für Querkraftnachweis

Es besteht die Auswahl unter drei Möglichkeiten, welche Längsbewehrung für den Querkraftnachweis ohne Querkraftbewehrung angesetzt wird.

- *Ansatz der erforderlichen Längsbewehrung*

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird mit der vorhandenen Zugbewehrung geführt.

- *Ansatz der vorhandenen Längsbewehrung*

Für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird die vom Programm vorgeschlagene oder benutzerdefinierte Längsbewehrung benutzt.

- *Erforderliche Längsbewehrung automatisch erhöhen, um Schubbewehrung zu vermeiden*

Ist die erforderliche Längsbewehrung nicht ausreichend für die Querkrafttragfähigkeit, wird die Längsbewehrung vergrößert (maximal bis zum Längsbewehrungsgrad 0,02), bis der Querkraftnachweis ohne Querkraftbewehrung erfüllt ist.

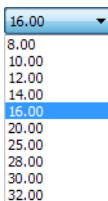
Weitere Informationen zu diesen drei Möglichkeiten finden Sie in folgendem Fachbeitrag:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000655>

Konstruktive Bewehrung

Dieser Abschnitt ist zugänglich, wenn ein Bewehrungsvorschlag vorgenommen wird.

Der *Maximale Bewehrungsabstand* der konstruktiven (statisch nicht erforderlichen) Bewehrungsstäbe im Querschnitt kann über einen Größtwert festgelegt werden. Mit dieser Vorgabe wird eine gleichmäßige Verteilung der Stäbe im Querschnitt angestrebt, die zu einer konstruktiven Bewehrung von Plattenbalkenstegen oder schlanken Rechteckquerschnitten führt.



Ist die Option *Identischer Durchmesser wie bei Längsbewehrung* angehakt, so wird für die konstruktive Bewehrung der gleiche (kleinste) Stabdurchmesser wie für die erforderliche Bewehrung verwendet. Alternativ kann nach dem Entfernen des Häkchens ein anderer Durchmesser d_s in der Liste ausgewählt werden.

Optional lässt sich eine *Konstruktive Eckbewehrung hinzufügen*, um eine konstruktive Bewehrung in allen Ecken des Querschnitts vorzusehen. Damit kann z. B. bei I-förmigen Querschnitten eine Bewehrung außerhalb des Stegs angeordnet werden.



Die konstruktive Bewehrung wird wie die Mindestbewehrung – sofern ausreichend verankert – für den Tragfähigkeitsnachweis und die Rissbreitenberechnung berücksichtigt.

3.5.5 Schubfuge

Bei der Bemessung nach EN 1992-1-1 besteht die Möglichkeit, die Schubfugen von Betonierabschnitten und die Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurt nachzuweisen.

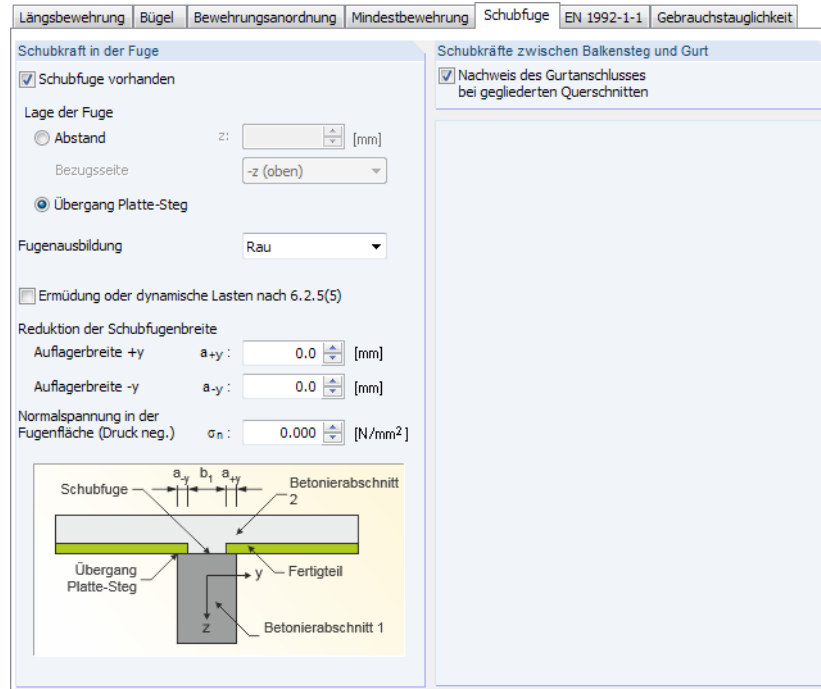


Bild 3.34: Maske 1.6 Bewehrung, Register Schubfuge

Schubkraft in der Fuge

Mit dem Anhaken des Kontrollfeldes *Schubfuge vorhanden* wird die Bemessung von Fugen aktiviert, die beispielsweise bei Betonergänzungen für Fertigteile vorliegen. Damit werden auch die übrigen Felder zur Eingabe der Parameter gemäß EN 1992-1-1, 6.2.5 zugänglich.

Die *Lage der Fuge* ist durch den Abstand von der Ober- bzw. Unterseite der Platte festzulegen. Alternativ kann sie automatisch zwischen Platte und Steg angeordnet werden.

Die *Fugenausbildung* kann in der Liste ausgewählt werden. In EN 1992-1-1, 6.2.5 (2) sind die unterschiedlichen Oberflächenkategorien beschrieben.

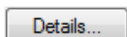
Verbindung	c	μ
Verzahnt	0.500	0.900
Rau	0.400	0.700
Glatt	0.200	0.600
Sehr glatt	0.025	0.500

Falls eine *Ermüdung oder dynamische Lasten* vorliegen, sind die Rauigkeitsbeiwerte c gemäß EN 1992-1-1, 6.2.5 (5) zu halbieren. Hierzu sind die Auflagerbreiten a_{+y} und a_{-y} der Fertigteile sowie ggf. die Spannung σ_n infolge der minimalen Normalkraft rechtwinklig zur Fuge anzugeben.

Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurt

Das Kontrollfeld bietet die Möglichkeit, den *Nachweis des Gurtanschlusses bei gegliederten Querschnitten* zu aktivieren.

Details



Die Schaltfläche [Details] ruft den Dialog *Detaileinstellungen* mit den globalen Berechnungseinstellungen auf (siehe Bild 4.1, Seite 95). Dort kann im Register *Tragfähigkeit* der Berechnungsansatz für die Ermittlung der Schubspannung in Schubfugen sowie der Längskraftdifferenz zwischen Balkensteg und Gurt festgelegt werden. Der theoretische Hintergrund ist im Kapitel 2.1.4 auf Seite 11 beschrieben.

3.5.6 Norm

Die Parameter dieses Registers sind von der Norm abhängig, die in Maske 1.1 *Basisangaben* festgelegt wurde (siehe Bild 3.2, Seite 54). Es sind normspezifische Bewehrungsvorgaben zu treffen, die im Folgenden für **EN 1992-1-1** vorgestellt sind.



Mit der Schaltfläche [Standard] unten im Register können die Ausgangswerte der gewählten Norm wiederhergestellt werden.

Bild 3.35: Maske 1.6 *Bewehrung*, Register EN 1992-1-1

Bewehrungsgrad

Dieses Eingabefeld steuert den generellen Höchstbewehrungsgrad für Balken. EN 1992-1-1, 9.2.1.1 (3) empfiehlt den Wert von $A_{s,max} = 0,04 A_c$ für Zug- oder Druckbewehrung und verweist auf eine landesspezifische Regelung. Im Nationalen Anhang für Deutschland ist der Höchstwert der Summe aus Zug- und Druckbewehrung mit $A_{s,max} = 0,08 A_c$ festgelegt, der auch im Bereich von Übergreifungstößen nicht überschritten werden darf.

Diverses

Wenn die Betondruckzone nicht mehr in der Lage ist, die Druckkräfte aufzunehmen, wird eine Druckbewehrung erforderlich. Dieser Fall tritt dann ein, wenn das Biegemoment überschritten ist, das sich bei einer Betonrandstauchung von $-3,50\%$ und der Dehnung ε_{yd} beim Erreichen der Streckgrenze des Betonstahls ergibt. Bei BSt 500 stellt sich dann eine bezogene Druckzonenhöhe von $x/d = 0,617$ ein. Bei Durchlaufträgern, Riegeln von unverschieblichen Rahmen und vorwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen sollte dieses Grenzbiegemoment zur Sicherstellung einer ausreichenden Rotationsfähigkeit nicht voll ausgenutzt werden.

Über das Kontrollfeld kann die Höhe der Druckzone gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 5.6.3 (2) begrenzt werden. In diesem Fall beträgt das maximale Verhältnis $x_d/d = 0,45$ für Beton bis zur Festigkeitsklasse C50/60 und $x_d/d = 0,35$ für Beton ab Festigkeitsklasse C55/67.

Querkraftbewehrung

Die beiden Eingabefelder legen den zulässigen Bereich der Druckstrebenneigung fest. Liegen benutzerdefinierte Winkel außerhalb der Gültigkeitsgrenzen der Norm, erscheint eine entsprechende Fehlermeldung.

EN 1992-1-1 stellt ein ganzheitliches Modell zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit zur Verfügung. Für Bauteile mit Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse ($\alpha = 90^\circ$) gilt:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad \text{EN 1992-1-1, Gl. (6.8)} \quad (3.2)$$

mit

- A_{sw} : Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
- s : Bügelabstand
- f_{ywd} : Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
- z : Hebelarm der inneren Kräfte (angenommen zu $0,9 \cdot d$)
- θ : Neigung der Betondruckstrebe

Die Neigung der Betondruckstrebe θ darf in Abhängigkeit von der Beanspruchung innerhalb bestimmten Grenzen gewählt werden. Damit soll der Tatsache Rechnung getragen werden, dass ein Teil der Querkraft über die Rissreibung abgetragen wird und damit das Fachwerk nicht belastet. Diese Grenzen sind in EN 1992-1-1, Gl. (6.7N) wie folgt empfohlen:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (3.3)$$

Die Druckstrebenneigung θ kann damit zwischen diesen Werten variieren:

	Mindestneigung	Höchstneigung
θ	21,8°	2,5
$\cot \theta$	45°	1

Tabelle 3.2: Grenzen der Druckstrebenneigung

Der Nationale Anhang für Deutschland gestattet eine flachere Druckstrebenneigung von 18,4°.

$$1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,cc}}{V_{Ed}}} \leq 3,0 \quad (3.4)$$

Eine flachere Betondruckstrebe bedeutet geringere Zugkräfte in der Querkraftbewehrung und somit einen geringeren erforderlichen Bewehrungsquerschnitt.

Beiwerte

Die oberen Eingabefelder verwalten die *Teilsicherheitsbeiwerte nach 2.4.2.4* für Beton γ_c und für Betonstahl γ_s . Es sind die Werte nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1N für Tragfähigkeit bzw. die empfohlenen Werte für Gebrauchstauglichkeit voreingestellt. Sie können bei Bedarf angepasst werden.

Die *Reduzierungsbeiwerte α* zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betonfestigkeit kann getrennt für Druck- und Zugbeanspruchungen angegeben werden. Auch hier ist eine Differenzierung nach Bemessungssituationen möglich. Die in EN 1992-1-1, 3.1.6 empfohlenen Werte sind voreingestellt.

Gemäß Nationalem Anhang für Deutschland ist sowohl der Abminderungsbeiwert der Betondruckfestigkeit mit $\alpha_{cc} = 0,85$ als auch der der Betonzugfestigkeit mit $\alpha_{ct} = 0,85$ anzusetzen. Nach EN 1992-1-1, Anmerkung zu 3.1.7 (3) ist der Wert $\eta \cdot f_{cd}$ zusätzlich um 10 % abzumindern, wenn die Breite der Druckzone zum gedrückten Querschnittsrand hin abnimmt. Liegt diese Voraussetzung vor, nimmt BETON die Abminderung automatisch vor.

3.5.7 Gebrauchstauglichkeit

Dieses Register wird angezeigt, wenn in Maske 1.1 *Basisangaben* mindestens ein Lastfall oder eine Kombination für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ausgewählt wurde.

Bild 3.36: Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Der theoretische Hintergrund zu den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen ist im [Kapitel 2.2](#) ab [Seite 14](#) beschrieben.

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit können verschiedene Kriterien für den Spannungsnachweis und Rissbreitennachweis vorgegeben werden, nach denen die Bewehrung ausgelegt wird. Folgende Tabelle bietet eine Übersicht über die relevanten Normabschnitte.

Nachweis	Normative Vorgabe in EN 1992-1-1
Begrenzung der Betonspannung σ_c	7.2 (1)
Begrenzung der Stahlspannung σ_s	7.2 (4)
Begrenzung der Rissbreite w_k	7.3.1 (5) und 7.3.4
Grenzdurchmesser $g_{renz\ d_s}$	Tabelle 7.2 (siehe Bild 2.3 , Seite 15)
Maximaler Stababstand $g_{renz\ s_1}$	Tabelle 7.3 (siehe Bild 2.4 , Seite 16)
Mindestbewehrung $min\ A_s$	7.3.2 (2)

Tabelle 3.3: Spannungs- und Rissbreitennachweise



Nicht all diese Nachweise müssen erfüllt sein. So kann z. B. auf den Nachweis der Beton- und Stahlspannungen verzichtet werden, wenn die Schnittgrößen nach der Elastizitätstheorie ermittelt und im GZT-Nachweis nicht mehr als 15 % umgelagert werden sowie die Regeln nach EN 1992-1-1, Abschnitt 9 eingehalten sind.

Durch Deaktivieren einzelner Nachweise (z. B. Spannungsnachweise) werden diese bei der Ermittlung der Längsbewehrung nicht berücksichtigt. Die vorhandenen Ergebnisse (z. B. Beton- und Stahlspannungen unter Belastung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) werden aber trotzdem in den Ergebnismasken 4.1 bis 4.4 angezeigt.

Spannungsnachweis für Beton

EN 1992-1-1, 7.2 (1) fordert die *Begrenzung der Betondruckspannung* σ_c , damit funktionsbeeinträchtigende Längsrisse, Mikrorisse oder starkes Kriechen vermieden werden.

Die Betondruckspannungen können gemäß Abschnitt 7.2 (2) und 7.2 (3) mit den Beiwerten k_1 (empfohlen 0,6) und k_2 (empfohlen 0,45) oder einem benutzerdefinierten Beiwert α abgemindert werden.

Nachweis der Rissbreitenbegrenzung



Der Grenzwert der zulässigen Rissbreiten $w_{k,max}$ kann für die obere und untere Stabseite gemäß EN 1992-1-1, 7.3.1 (5) festgelegt werden. Die [Info]-Schaltfläche gibt eine Hilfestellung zu den Umweltbedingungen.

Expositionsklasse	Werte für w_{max} (mm)			
	Bauteile aus Stahlbeton und Bauteile aus Spannbeton mit Spanngliedern ohne Verbund	Bauteile aus Stahlbeton mit Spanngliedern im nachträglichen Verbund	Vorspannung mit Verbund	
	Lastkombination			
	Quasi-ständig	Häufig	Häufig	Charakteristisch
X0, XC1	0,4	0,2	0,2	/
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2	0,2	
XD1, XD2, XD3 XS1, XS2, XS3				Dekompression

Bild 3.37: Rissbreiten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse nach EN 1992-1-1

Die zulässigen Rissbreiten können auch individuell für die obere und untere Bewehrung vorgegeben werden.

Für den Nachweis der Rissbreitenbegrenzung stehen drei verschiedene Kriterien zur Auswahl, nach denen die Bewehrung ausgelegt wird:

Nachweis	Normative Vorgabe in EN 1992-1-1
Grenzdurchmesser $g_{renz} d_s$	Tabelle 7.2 (siehe Bild 2.3, Seite 15)
Maximaler Stababstand $g_{renz} s_l$	Tabelle 7.3 (siehe Bild 2.4, Seite 16)
Direkte Berechnung der Rissbreite w_k	7.3.1 (5) und 7.3.4

Tabelle 3.4: Rissbreitennachweise

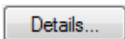
Diese Nachweiskriterien sind im Kapitel 2.2.4 auf Seite 16 beschrieben.



Grundsätzlich muss nur eines der Kriterien $g_{renz} d_s$, $g_{renz} s_l$ oder w_k für den Nachweis der Rissbreite erfüllt sein!

Die Option *Wirtschaftlichste Bewehrung für Rissbreitennachweis finden* im Abschnitt *Ermittlung der Längsbewehrung* (siehe unten) prüft, welches der drei Kriterien mit einem möglichst geringen Bewehrungsquerschnitt abgedeckt werden kann. Dabei wird so lange ein Bewehrungsstab im Bewehrungsvorschlag ergänzt, bis der Nachweis erfüllt ist.

Für die direkte Rissbreitenberechnung von w_k kann der max. Rissabstand $s_{r,max}$ mit EN 1992-1-1, Gl. (7.14) nach oben begrenzt werden (siehe Kapitel 2.2.4, Seite 16).



Die für den Rissbreitennachweis verwendete effektive Betonzugfestigkeit $f_{ct,eff,wk}$ zum Risszeitpunkt kann über einen Faktor für die mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} beeinflusst werden. Mit der effektiven Betonzugfestigkeit $f_{ct,eff,wk}$ wird im analytischen Gebrauchstauglichkeitsnachweis auch untersucht, ob der Querschnitt gerissen oder ungerissen ist. In den globalen Einstellungen des

Dialogs *Details*, Register *Gebrauchstauglichkeit* besteht die Möglichkeit, die Rissbreite auch am ungerissenen Querschnitt nachzuweisen, d. h. $f_{ct,eff,wk}$ ist nicht erreicht (siehe [Bild 4.2, Seite 96](#)).

Verformungsnachweis

Wenn das Kontrollfeld angehakt wird, steht die zusätzliche Maske *1.7 Durchbiegungsdaten* zur Eingabe der Stabparameter zur Verfügung (siehe [Kapitel 3.6, Seite 93](#)).

Spannungsnachweis für Stahl

EN 1992-1-1, 7.2 (4) fordert eine *Begrenzung der Stahlspannung* σ_s , um nichtelastische Dehnungen, unzulässige Rissbildungen und Verformungen zu vermeiden.

Die Stahlspannungen können gemäß Abschnitt 7.2 (5) mit den Beiwerten k_3 (empfohlen 0,8) und k_4 (empfohlen 1,0) oder einem benutzerdefinierten Beiwert α abgemindert werden.

Mindestbewehrung zur Aufnahme von Zwangeinwirkungen

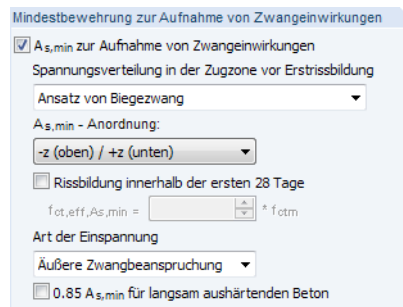


Bild 3.38: Abschnitt *Mindestbewehrung zur Aufnahme von Zwangeinwirkungen* (für NA DIN und ÖNORM)

Für die Nachweise der Rissbreitenbeschränkung ist zwischen Last- und Zwangeinwirkungen zu unterscheiden. Eine *Zwangbeanspruchung* wird durch die Rissbildung im Bauteil deutlich verringert. Eine ausreichend dimensionierte Mindestbewehrung $A_{s,min}$ sorgt für die Verteilung der gesamten Bauteilverkürzung auf mehrere Risse mit entsprechend kleinen Rissbreiten. Die Rissbreiten infolge einer Lastbeanspruchung hingegen sind von der vorhandenen Stahlspannung und der Bewehrungsanordnung abhängig.

Bei Zwangeinwirkungen muss immer das Kriterium der Mindestbewehrung $A_{s,min}$ erfüllt sein.

Die *Spannungsverteilung in der Zugzone vor Erstrissbildung* beeinflusst den Beiwert k_c gemäß EN 1992-1-1, Gl. (7.1). In der Liste stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl. Bei zentrischem Zwang mit reiner Zugbeanspruchung wird $k_c = 1,0$ angesetzt; bei Biegezwang mit reiner Biegebeanspruchung ist σ_c in der Bauteilachse gleich null und damit wird nach Gl. (7.2) $k_c = 0,4$. Alternativ kann k_c nach Gl. (7.2) oder (7.3) in Abhängigkeit von der Belastung ermittelt werden, wobei die mittlere Betonspannung σ_c aus den Lasten bestimmt wird. Der Beiwert k_c berücksichtigt neben der Spannungsverteilung auch näherungsweise die Vergrößerung des inneren Hebelarms bei Rissbildung.

Die Liste $A_{s,min}$ - *Anordnung* steuert, welcher Bewehrungslage die Mindestbewehrung zugewiesen werden soll.

Ist eine *Rissbildung innerhalb der ersten 28 Tage* zu erwarten, soll gemäß EN 1992-1-1, 7.3.2 (2) die wirksame Betonzugfestigkeit $f_{ct,eff}$ abgemindert werden. Im Eingabefeld kann der geeignete Abminderungsfaktor angegeben werden. Der deutsche Nationale Anhang empfiehlt hierfür $f_{ct,eff} = 0,50 \cdot f_{ctm}$ (28d). Kann der Zeitpunkt der Rissbildung nicht mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden, soll gemäß deutschem Nationalen Anhang mindestens eine Zugfestigkeit von 3 N/mm^2 für Normalbeton angenommen werden.

Ansatz von ...	Faktor
Ansatz von zentrischem Zwang	$k_c = 1,0$
Ansatz von Biegezwang	$k_c = 0,4$
In Abhängigkeit von definierter Belastung	$k_c = 0,0 \dots 1,0$

- z (oben) / +z (unten)
- z (oben) / +z (unten)
- z (oben)
- +z (unten)
- Zugseite

Art der Einspannung	
Äußere Zwangbeanspruchung	
Lagerungsart	Faktor
Innere Zwangbeanspruchung	k = 0,52 ... 0,8
Äußere Zwangbeanspruchung	k = 1,0

Der Nationale Anhang für Deutschland zu EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2 (2) unterscheidet für den Beiwert k zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Eigenspannungen nach der Art der Zwangsbeanspruchung. Dabei ist vorzugeben, ob die Zugspannungen infolge

- im Bauteil selbst hervorgerufenen Zwangs (z. B. aus Abfließen der Hydratationswärme) oder
- außerhalb des Bauteils hervorgerufenen Zwangs (z. B. Stützensenkung)

entstehen.

In BETON wird die Rissbreite nach EN 1992-1-1, 7.3.4 für die entsprechende Lastbeanspruchung direkt berechnet. Für Zwangsbeanspruchungen wird nach EN 1992-1-1, 7.3.2 die Mindestbewehrung zur Begrenzung der vorgegebenen Rissbreite ausgelegt.

Das Kontrollfeld $0.85 A_{s,min}$ für langsam aushärtenden Beton bietet die Möglichkeit, die Mindestbewehrung für Betone mit $r \leq 0,3$ gemäß Nationalem Anhang für Deutschland oder Österreich zu reduzieren. Weitere Informationen hierzu finden Sie in folgendem Fachbeitrag:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000889>

Ermittlung der Längsbewehrung

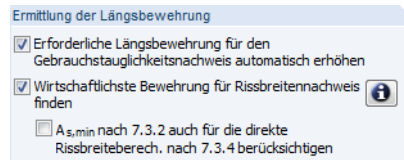


Bild 3.39: Abschnitt *Ermittlung der Längsbewehrung*

Das Kontrollfeld *Erforderliche Längsbewehrung für Gebrauchstauglichkeitsnachweis automatisch erhöhen* ermöglicht es, die Längsbewehrung so auszulegen, dass der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt wird. Ist diese Option nicht aktiviert, so wird für den GZG-Nachweis der Bewehrungsvorschlag verwendet, der sich aus der Tragfähigkeitsberechnung bzw. aus manuell definierten Vorgaben ergibt.

Das Auslegen der Bewehrung für den GZG-Nachweis erfolgt durch eine iterative Bewehrungserhöhung. Als Startwert der Iteration dient die erforderliche Tragbewehrung. Es wird untersucht, ob diese zur Aufnahme der Gebrauchslast ausreicht. Falls nicht, wird sie schrittweise erhöht. Der Auslegungsprozess endet ohne Ergebnis, wenn der Stababstand s_l der Bewehrung gleich groß ist wie der Stabdurchmesser $d_{s,l}$. In den Ergebnismasken wird für diesen Punkt eine Unbemessbarkeit ausgegeben.



Bei der Bemessung nach EN 1992-1-1 besteht die Möglichkeit, die *Wirtschaftlichste Bewehrung für Rissbreitenachweis finden* zu lassen. Über die [Info]-Schaltfläche lassen sich Erläuterungen zu diesem Verfahren anzeigen. Im Dialog *Informationen* ist beschrieben, wann der Rissbreitenachweis als erfüllt gilt.

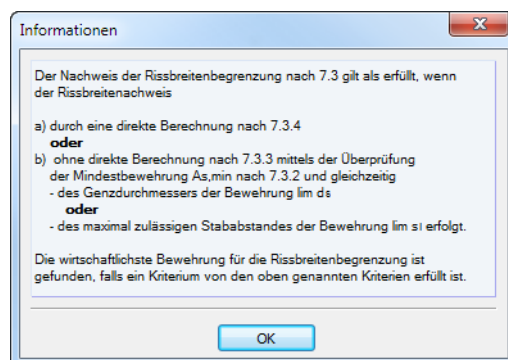


Bild 3.40: Dialog *Informationen* zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Bewehrung



In EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2 ist erläutert, unter welchen Bedingungen die Spannungen zu begrenzen sind. Dies bedeutet, dass nicht alle in Maske 4.1 ausgewiesenen Ausnutzungen kleiner als 1 sein müssen, damit der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ist!

Folgender Fachbeitrag auf unserer Website beschreibt, wie das Programm die wirtschaftlichste Bewehrung für den Rissbreitennachweis ermittelt:

<https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000506>

Ist das Kontrollfeld $A_{s,min}$ nach 7.3.2 auch für die direkte Rissbreitenberechnung nach 7.3.4 berücksichtigt angehakt, so wird $A_{s,min}$ auch berücksichtigt, wenn der Rissbreitennachweis am wirtschaftlichsten mit der direkten Berechnung nach 7.3.4 erfolgt. Falls also das Kontrollfeld nicht angehakt ist, wird die Mindestbewehrung nur berücksichtigt, wenn der Rissbreitennachweis ohne direkte Berechnung erfolgt.

Details

Details...

Die Schaltfläche [Details] ruft den Dialog *Detaileinstellungen* auf. Im Register *Gebrauchstauglichkeit* können dort weitere Vorgaben für die GZG-Nachweise getroffen werden.

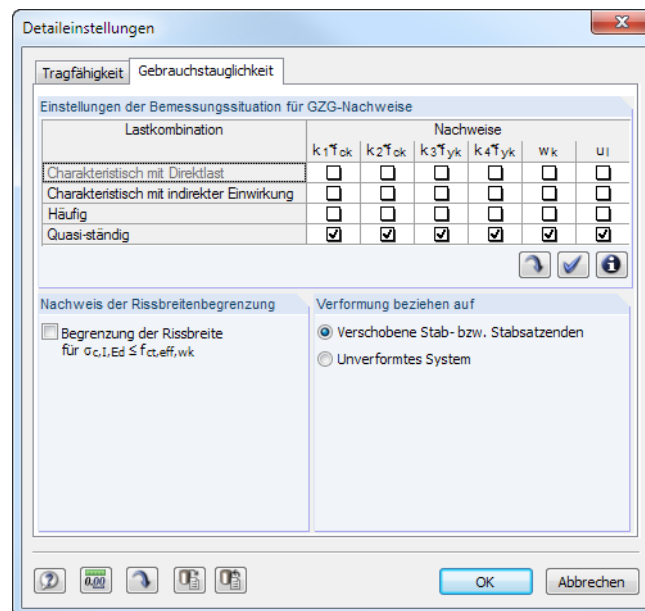


Bild 3.41: Dialog *Detaileinstellungen*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Dieses Dialogregister ist im [Kapitel 4.1.2](#) auf [Seite 96](#) beschrieben.

3.5.8 Vouten

Dieses Register erscheint nur, wenn Voutenstäbe im RSTAB-Modell existieren.

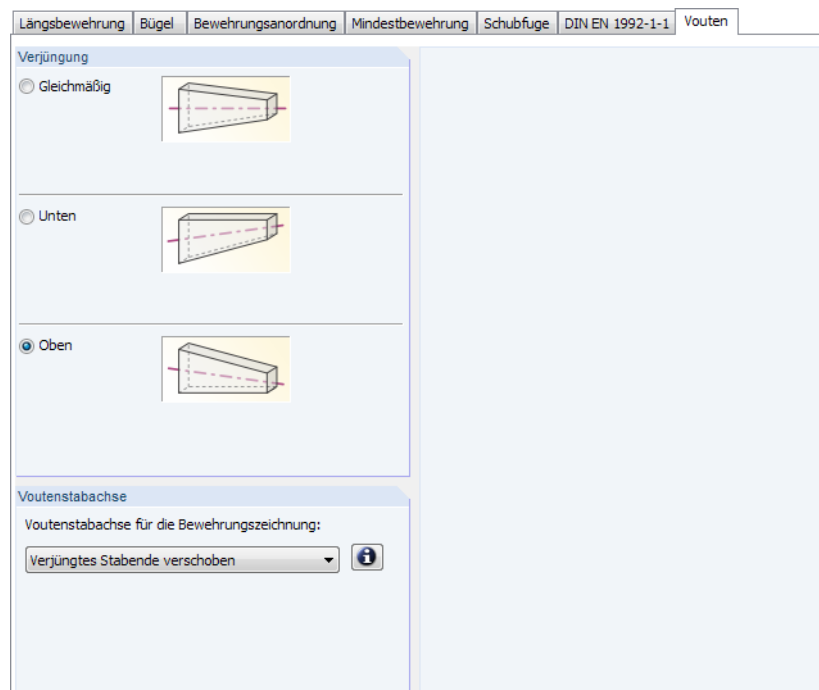


Bild 3.42: Maske 1.6 Bewehrung, Register Vouten

BETON bemisst auch Voutenstäbe, wenn der gleiche Querschnittstyp am Stabanfang und Stabende vorliegt. Ist dies nicht der Fall, können keine Zwischenwerte interpoliert werden und RSTAB gibt vor der Berechnung eine entsprechende Fehlermeldung aus.

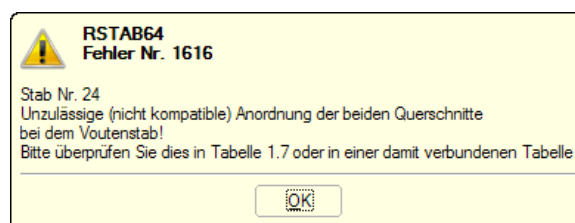


Bild 3.43: Fehlermeldung bei inkompatiblen Voutenquerschnitten



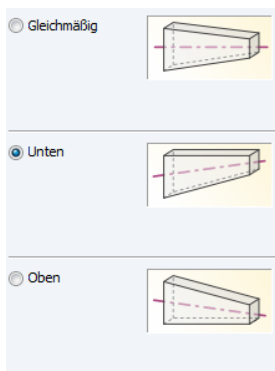
Gevoutete Stabsätze werden nur dann bemessen, wenn der gesamte Stabsatz einen linearen Querschnittsverlauf aufweist.

Verjüngung

Für die genaue Beschreibung der Voute stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Gleichmäßig
- Unten
- Oben

Diese Vorgabe wirkt sich auf die Bemessung und die Anordnung der Längsbewehrung aus (siehe Bild 3.44).



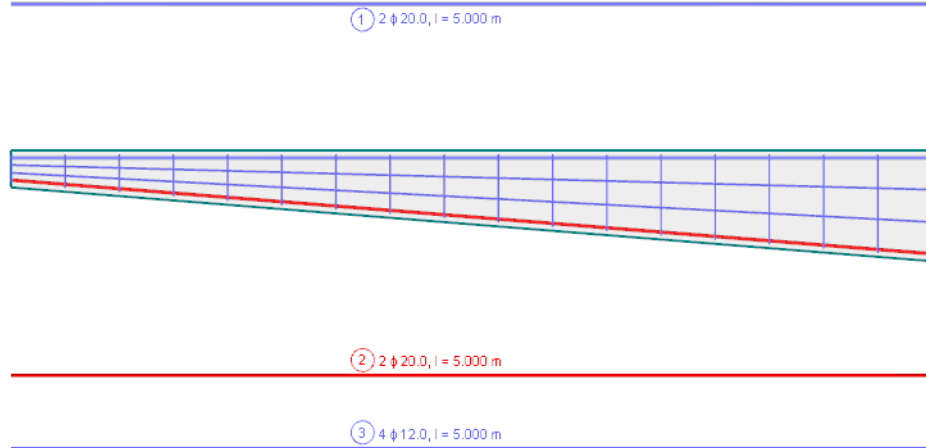


Bild 3.44: Voute mit geneigter Unterseite

Voutenstabachse

- Verjüngtes Stabende verschoben
- Verjüngtes Stabende verschoben
- Verjüngtes Stabende fest
- Stabachse wie in RFEM

Für die Darstellung der Bewehrung im 3D-Rendering von RSTAB ist es erforderlich, den Verlauf der Voutenstabachse anzugeben. In der Regel werden Vouten im statischen System in RSTAB zentrisch definiert. In BETON hingegen werden Vouten meist mit verschobenen Verjüngungen ausgeführt und berechnet. Um den Anschluss der Bewehrung an die weiterführenden Stäbe richtig im Rendering von RSTAB darzustellen, muss angegeben werden, welches Stabende des Voutenstabes in der Bauausführung verschoben wird – sofern dies nicht bereits durch Stabexzentrizitäten in RSTAB berücksichtigt wurde.



Über die [Info]-Schaltfläche sind weitere Erläuterungen einsehbar.

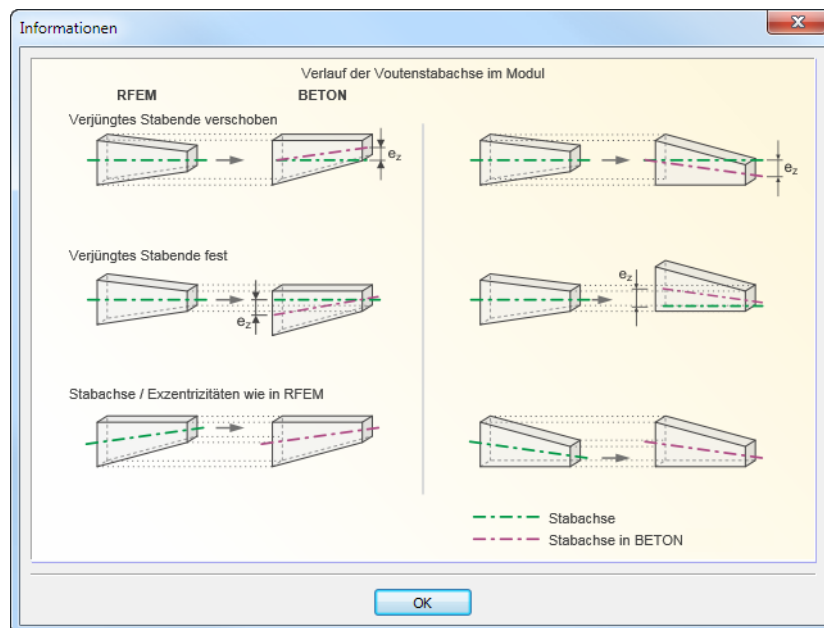


Bild 3.45: Dialog *Informationen* zur Erläuterung der Voutenstabachsen

3.5.9 Brandschutz

Das letzte Register der Maske 1.6 ist verfügbar, wenn in Maske 1.1 *Basisangaben* mindestens ein Lastfall oder eine Kombination für den Brandschutznachweis ausgewählt wurde (siehe [Kapitel 3.1.4, Seite 61](#)). Die „Heißbemessung“ erfolgt nach dem vereinfachten Rechenverfahren gemäß EN 1992-1-2, Abschnitt 4.2 (siehe [Kapitel 2.3, Seite 24](#)).

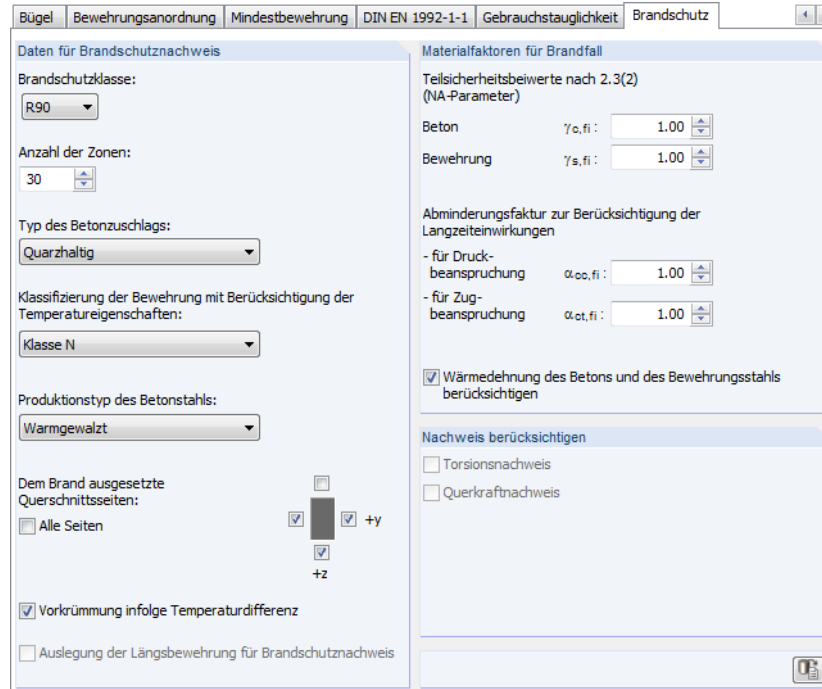


Bild 3.46: Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Brandschutz*



Im unteren Bereich des Registers wird die Schaltfläche [Standard] angeboten, mit der sich die Ausgangswerte wiederherstellen lassen.

Daten für Brandschutznachweis

Fünf Listen regeln die Parameter, die den Brandschutznachweis entscheidend beeinflussen:

- Brandschutzklasse (Feuerwiderstandsklasse gemäß EN 1992-1-2, Abschnitt 1.6.1 (1))
- Anzahl der Zonen (Zonenmethode gemäß EN 1992-1-2, Anhang B.2)
- Typ des Betonzuschlags (siehe [Bild 2.9, Seite 25](#) und [Bild 2.11, Seite 27](#))
- Klassifizierung der Bewehrung (siehe [Bild 2.14](#) und [Bild 2.15, Seite 29](#))
- Produktionstyp des Betonstahls (siehe [Bild 2.16](#) und [Bild 2.17, Seite 30](#))

Diese Parameter sind im theoretischen [Kapitel 2.3](#) ab [Seite 24](#) beschrieben.

Ferner sind die dem Brand ausgesetzten *Querschnittsseiten* festzulegen. Falls nicht *Alle Seiten* einem Abbrand unterliegen, ist das entsprechende Kontrollfeld zu deaktivieren (siehe [Bild 3.46](#)). Damit werden die Kontrollfelder rund um das Querschnittssymbol zugänglich, die gezielte Vorgaben ermöglichen. Die Richtungen beziehen sich auf die lokalen Stabachsen.

Bei unsymmetrischer Brandeinwirkung erfährt der Querschnitt eine zusätzliche thermische *Vorkrümmung* infolge der Temperaturdifferenz, die nach EN 1992-1-2, Abschnitt 2.4.2 (4) bei der Berechnung zu berücksichtigen ist. Diese thermische Verkrümmung beeinflusst die Tragsicherheit von Bauteilen wie z. B. Kragstützen, die nach Theorie II. Ordnung berechnet werden. Es wird intern eine Stablast als Vorkrümmung des Querschnitts erzeugt und dann mit den Bemessungslasten überlagert.



Das Kontrollfeld *Auslegung der Längsbewehrung für Brandschutznachweis* steuert, ob beim Bewehrungsvorschlag neben der Tragfähigkeit auch die Brandeinwirkung berücksichtigt wird.

Materialfaktoren für Brandfall

Die zwei oberen Eingabefelder legen die *Teilsicherheitsbeiwerte* für Beton γ_c und Betonstahl γ_s fest, die für den Brandschutznachweis anzusetzen sind. Dort sind die in EN 1992-1-2, Abschnitt 2.3 (2) empfohlenen Werte voreingestellt.

Der *Abminderungsfaktor* α zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Betonfestigkeit im Brandfall kann getrennt für Druck- und Zugbeanspruchungen festgelegt werden. In beiden Feldern sind die in EN 1992-1-1, 3.1.6 empfohlenen Werte mit 1,0 voreingestellt.

Die Option *Wärmedehnung des Betons und des Bewehrungsstahls berücksichtigen* ermöglicht es, die Differenz zwischen der Dehnung der „heißen“ Bewehrung und der regulären Wärmedehnung des Betonquerschnitts in Form einer Vorstauchung des Bewehrungsstabes zu erfassen. Bei Temperaturbelastung stellen sich thermische Längsdehnungen im Beton und Bewehrungsstahl ein, die wegen der ungleichen Temperaturverteilung im Querschnitt unterschiedlich sind. Die Wärmedehnungen können sich nicht überall im Querschnitt frei einstellen, da diese durch die benachbarten Bereiche beeinflusst werden. In der Regel darf von einem Ebenbleiben der Querschnitte ausgegangen werden. Da die Wärmeausdehnung der Bewehrung im Randbereich des Querschnitts behindert ist, erfährt diese eine Vorstauchung.

Das Zonenverfahren nach EN 1992-1-2 setzt nur eine Bauteilberechnung um, d. h. die thermischen Zusatzdehnungen im Schwerpunkt sind in der Norm nicht berücksichtigt. Nach HOSSER [12] jedoch dürfen für Berechnungen nach Theorie II. Ordnung diese thermischen Wärmedehnungen nicht vernachlässigt werden. Die Wärmedehnung des Betons wird dabei mit dem Mittelwert der Temperatur über den gesamten Betonquerschnitt berechnet.

Nachweis berücksichtigen

Der Anhang D zu EN 1992-1-2 beinhaltet eine Berechnungsmethode für den Querkraft- und Torsionsnachweis von brandbeanspruchten Bauteilen. Diese Methode kann separat für die beiden Schnittgrößenarten aktiviert werden.

Da in Deutschland diese Berechnungsmethode für den Schub- und Torsionsnachweis nicht zugelassen ist, sind die Auswahlmöglichkeiten für den Nachweis nach einer deutschen Norm gesperrt.

3.6 Durchbiegungsdaten

Verformungsnachweis

Verformung $u_{1,z}$

Maske 1.6, Register
Gebrauchstauglichkeit

Diese Maske steht nur zur Verfügung, wenn in Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Gebrauchstauglichkeit* links unten der Verformungsnachweis aktiviert ist.

1.7 Durchbiegungsdaten

Nr.	A	B	C		E	F	G	H
	Beziehen auf	Stabsatz Nr.	Bezugslänge Element	L [m]	Überhöhung w_0 [mm]	Grenzwert L / [-]	$u_{1,z,max}$ [mm]	Kommentar
1	Stab	23	Stab	4.002	10.0	250	16.0	
2	Stab	24	Auflagerabstand	2.350	0.0	250	9.4	
3	Stabsatz	1	Stabsatz	7.733	0.0	250	30.9	
4	Stabsatz	2	Benutzerdefiniert	5.750	0.0	250	23.0	
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								

Bild 3.47: Maske 1.7 Durchbiegungsdaten

Das Nachweiskriterium der Verformung $u_{1,z}$ betrachtet die Verschiebung in Richtung der lokalen Stabachse z. Die Auslegung der Bewehrung für die Verformungsberechnung erfolgt nach dem vereinfachten Verfahren gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3.

Beziehen auf

- Stab
- Stab**
- Stabsatz

Beziehen auf

Spalte A steuert, ob die Verformung von Einzelstäben oder Stabsätzen untersucht werden soll.

Stab/Stabsatz Nr.

Hier sind die Nummern der nachzuweisenden Stäbe bzw. Stabsätze anzugeben. Mit der Schaltfläche ist auch eine grafische Auswahl im RSTAB-Arbeitsfenster möglich. Als *Bezugslänge* wird dann in Spalte D die Länge des Stabes bzw. Stabsatzes voreingestellt.

Bezugslänge Element	L [m]
Benutzerdefiniert	5.000
Stab	
Auflagerabstand	
Benutzerdefiniert	

Bezugslänge

Die Liste für Spalte C ermöglicht es, die Referenzlängen der Durchbiegungen zu beeinflussen. Bei der Standardeinstellung *Stab* wird der Abstand zwischen Anfangs- und Endknoten benutzt, bei der Option *Auflagerabstand* die reduzierte Stützweite, die sich mit den Lagerbreiten gemäß Maske 1.5 *Lager* ergibt (siehe [Kapitel 3.4, Seite 68](#)).

Mit der Option *Benutzerdefiniert* kann die Bezugslänge in Spalte D individuell festgelegt werden. Bei Stabsätzen mit unterschiedlichen Abschnittslängen werden die *Variablen* Stützweiten automatisch ermittelt. Sie lassen sich im Tooltip darstellen.

Beziehen auf	Stabsatz Nr.	Bezugslänge Element	L [m]	Überhöhung w_0 [mm]	Grenzwert L / [-]	$u_{1,z,max}$ [mm]
Stabsatz	1	Auflagerabstand	Var.	0.0	250	Var.

Tooltip: Knoten 2 - 3: L₁= 6.000
Knoten 3 - 5: L₂= 5.000

Bild 3.48: Bezugslängen eines Stabsatzes mit unterschiedlichen Stützweiten

Überhöhung

In dieser Spalte kann eine *Überhöhung* w_0 eingetragen werden.

Die Form der Überhöhung wird wie folgt berechnet:

$$w_{c,x} = w_0 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{L}\right)$$

mit

- $w_{c,x}$: Überhöhung an Stelle x
- w_0 : in Spalte E vorgegebene Überhöhung
- x : Stelle x
- L : Stab- bzw. Stabsatzlänge

Grenzwert / $u_{z,max}$

Grenzwert L / [°]
250 ▾
500
250
200
100
Benutzerdefiniert

In Spalte F ist der relative Grenzwert der Durchbiegung anzugeben. Es ist der in EN 1992-1-1, 7.4.1 (4) empfohlene Durchhang von 1/250 der Stützweite voreingestellt. In der Liste kann ein anderer Grenzwert gewählt oder auch *Benutzerdefiniert* festgelegt werden.

Die maximal zulässige Durchbiegung wird in Spalte G angegeben. Sie ermittelt sich aus dem Grenzwert (Spalte F) und der Bezugslänge (Spalte D).

Details

Details...

Die Schaltfläche [Details] ruft den Dialog *Detaileinstellungen* auf. Dort kann im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Bezug der Verformungen geregelt werden.

Verformung beziehen auf

Verschobene Stab- bzw. Stabsatzenden

Unverformtes System

Bild 3.49: Bezug der Verformungen im Dialog *Detaileinstellungen*

Die beiden Auswahlmöglichkeiten sind im [Kapitel 4.1.2](#) auf [Seite 96](#) beschrieben.

4 Berechnung

Für die Bemessung in BETON werden die RSTAB-Schnittgrößen benutzt. Wenn in RSTAB noch keine Ergebnisse vorliegen, werden die Schnittgrößen automatisch berechnet.

4.1 Detaileinstellungen

Details...

Der Dialog *Detaileinstellungen* verwaltet globale Einstellungen zu den verwendeten Berechnungsansätzen.

4.1.1 Tragfähigkeit

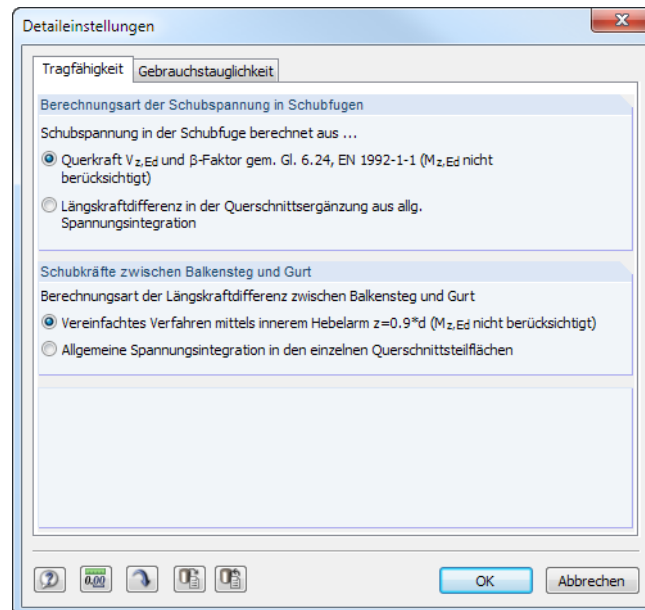


Bild 4.1: Dialog *Detaileinstellungen*, Register *Tragfähigkeit*

Berechnungsart der Schubspannungen in Schubfugen

In diesem Abschnitt kann festgelegt werden, nach welchem Rechenverfahren die Schubspannungen in der Schubfuge ermittelt werden. Die beiden Berechnungsarten sind im [Kapitel 2.1.4](#) auf [Seite 11](#) beschrieben.

Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurt

Die Platten an Plattenbalken oder Hohlkästen, die als Druck- oder Zuggurte wirken, müssen schubfest an den Steg angeschlossen werden. Dazu ist nachzuweisen, dass zum einen die Druckstrebentragfähigkeit des Betons nicht überschritten ist und zum anderen die Zugstrebenkraft von der Querbewehrung aufgenommen werden kann. Die theoretische Grundlage zur Übertragung der Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten ist in EN 1992-1-1, 6.2.4 geregelt.

Für den Nachweis ist das *Vereinfachte Verfahren* voreingestellt. Dabei werden nur Momente um die y-Achse des Bauteils mit dem inneren Hebelarm $z = 0,9 \cdot d$ berücksichtigt.

Alternativ kann die Längskraftdifferenz über eine *Allgemeine Spannungsintegration in den einzelnen Querschnittsteilflächen* ermittelt werden. Diese Option ist allerdings mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden. Dieses Verfahren ist im [Kapitel 2.1.4](#) auf [Seite 11](#) beschrieben.

4.1.2 Gebrauchstauglichkeit

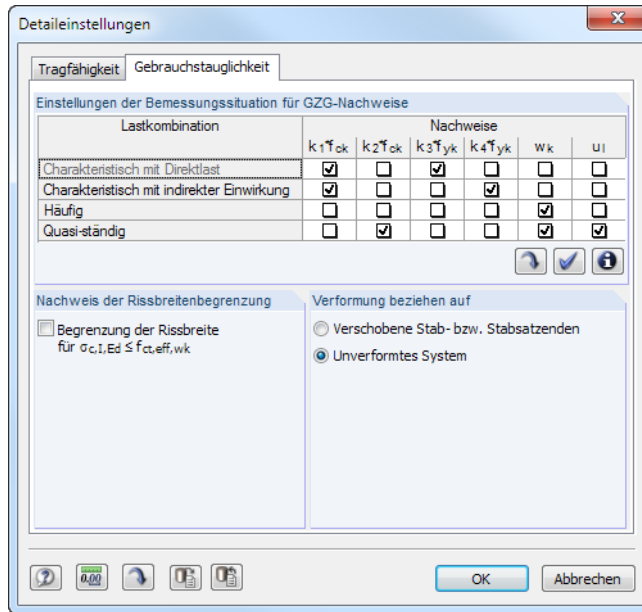


Bild 4.2: Dialog *Detailinstellungen*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Einstellungen der Bemessungssituationen für GZG-Nachweise

Die Tabelle steuert, welche Gebrauchstauglichkeitsnachweise in den einzelnen Bemessungssituationen geführt werden. So ist es möglich, unterschiedliche Grenzwerte je Bemessungssituation direkt in einem Betonfall zu berechnen. Mit den Einstellungen im Bild 4.2 werden beispielsweise die Rissbreiten w_k nur mit Lasten der Bemessungssituationen *Häufig* und *Quasi-ständig* untersucht.



Nach einem Klick auf die [Info]-Schaltfläche erscheinen Hinweise, auf welchen Anforderungen die Grenzwerte des Gebrauchstauglichkeitsnachweises beruhen.

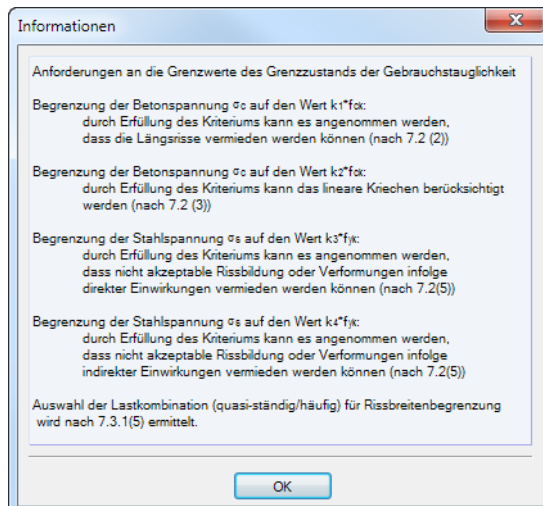


Bild 4.3: Dialog *Information*



Mit der Schaltfläche *Alle Nachweise für die selektierte Zeile selektieren/deselektieren* ist es schnell möglich, alle Nachweise für eine Bemessungssituation zu aktivieren bzw. unterdrücken.

Nachweis der Rissbreitenbegrenzung

Nach dem Anhängen des Kontrollfeldes *Begrenzung der Rissbreite* für $\sigma_{c,l,Ed} < f_{ct,eff,wk}$ wird der Rissbreitennachweis auch an den Stellen geführt, an denen die effektive Zugfestigkeit $f_{ct,eff,wk}$ des Betons nicht erreicht wird.

Verformung beziehen auf

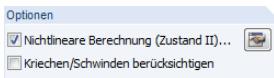
Die beiden Auswahlfelder steuern, ob die maximalen Verformungen auf die *Vershobenen Stab- bzw. Stabsatzenden* (Verbindungsline zwischen Anfangs- und Endknoten des verformten Systems) oder auf das *Unverformte System* bezogen werden. In der Regel sind die Verformungen relativ zu den Verschiebungen im Gesamtsystem nachzuweisen.



Ein Beispiel für den Bezug von Stabverformungen finden Sie in folgendem Fachbeitrag: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/001081>

4.2 Details für nichtlineare Berechnung

Die nichtlineare Berechnung lässt sich über Parameter steuern, die das Nachweisverfahren und Konvergenzverhalten betreffen. Sie werden im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* verwaltet. Dieser Dialog kann in Maske 1.1 über die Schaltfläche aufgerufen werden (siehe Bild 3.1, Seite 53 und Bild 3.9, Seite 58). Der Dialog besteht aus drei Registern.



4.2.1 Nachweisverfahren

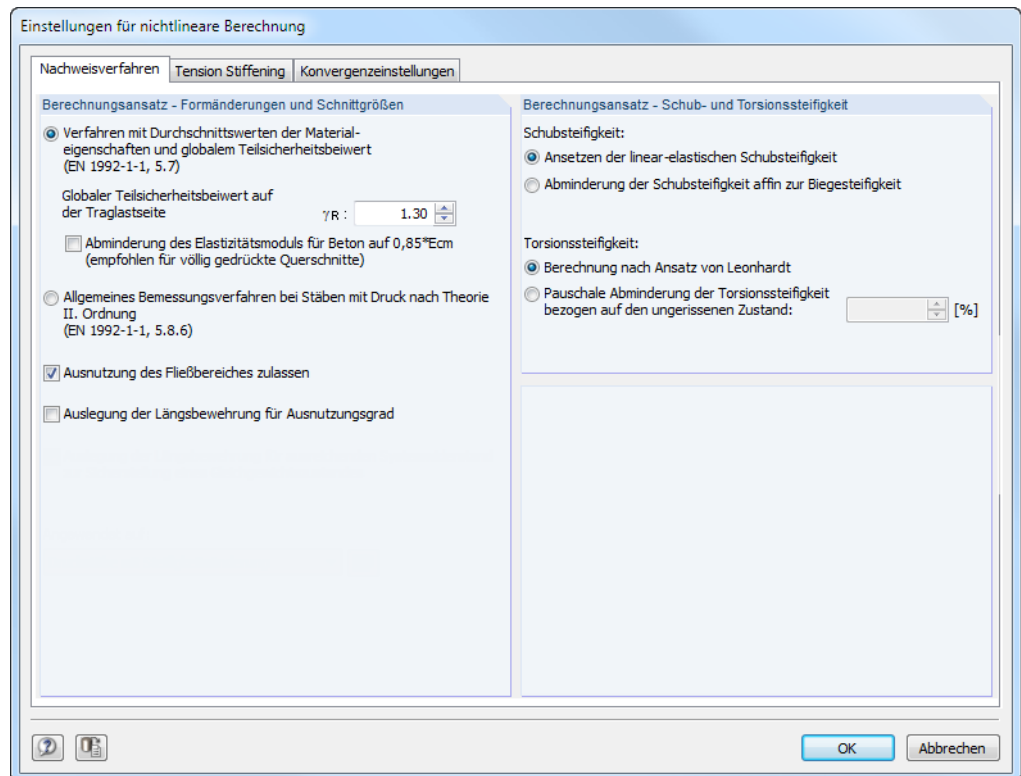


Bild 4.4: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Nachweisverfahren* für EN 1992-1-1

Die Abschnitte dieses Registers unterscheiden sich je nach Bemessungsnorm (ACI 318 sieht keine nichtlineare Berechnung vor). Die folgende Beschreibung bezieht sich auf EN 1992-1-1.

Berechnungsansatz - Formänderungen und Schnittgrößen

Verfahren mit Durchschnittswerten der Materialeigenschaften und globalem Teilsicherheitsbeiwert

Wie in [Kapitel 2.4.7](#) auf [Seite 45](#) erläutert, sind in EN 1992-1-1 zwei Verfahren zur nichtlinearen Berechnung geregelt. Das *Verfahren mit Durchschnittswerten* nach EN 1992-1-1, Abschnitt 5.7 ist voreingestellt.

Für die einheitliche Anwendung nur eines Sicherheitskonzepts wurde das Verfahren kalibriert. Nach EN 1992-1-1, 5.7 (NA.10) Deutschland ist der globale Teilsicherheitsbeiwert auf der Traglastseite wie folgt anzusetzen:

$\gamma_R = 1,3$ für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen und Nachweis gegen Ermüdung

$\gamma_R = 1,1$ für außergewöhnliche Bemessungssituationen

Der E-Modul des Betons kann für die Analyse mit dem Faktor 0,85 abgemindert werden. Dies ist für Querschnitte zu empfehlen, die vollständig überdrückt sind.

Allgemeines Bemessungsverfahren bei Stäben mit Druck nach Theorie II. Ordnung

Das *Allgemeine Bemessungsverfahren* gemäß EN 1992-1-1, 5.8.6 eignet sich hauptsächlich zur Bemessung schlanker Druckglieder. Die Verformungs- und Schnittgrößenermittlung mit abgesicherten Mittelwerten führt in den meisten Fällen zu einer wirtschaftlicheren Bemessung. Das [Kapitel 2.4.7.2](#) auf [Seite 47](#) bietet weitere Erläuterungen zu diesem Verfahren.

Ausnutzung des Fließbereichs zulassen

Das Kontrollfeld ist für beide Berechnungsverfahren (EN 1992-1-1, 5.7 oder 5.8.6) zugänglich. Hintergrund ist der Abschnitt 8.6.1 (5) in DIN 1045-1, der plastische Gelenke (Krümmungen $(1/r)_m > (1/r)_y$) für Bauteile unter Längsdruck nicht gestattet. Wegen des abrupten Steifigkeitsabfalls bei der Ausbildung plastischer Zonen bzw. Gelenke stellt sich bei schlanken Druckgliedern meist ein Stabilitätsverlust ein, sodass die Stütze versagt.

Wenn das Kontrollfeld deaktiviert ist, sind bei der Berechnung der Querschnittskrümmungen keine plastischen Krümmungen möglich.

Auslegung der Längsbewehrung für Ausnutzungsgrad

Ist diese Option aktiviert, so wird bei einer Überschreitung der Querschnittstragfähigkeit die Längsbewehrung erhöht. Die Querschnittstragfähigkeit ist dann überschritten, wenn die Ausnutzung in der Ergebnismaske der nichtlinearen Berechnung (siehe [Kapitel 5.5.1](#), [Seite 133](#)) größer als 1 ist.

Berechnungsansatz - Schub- und Torsionssteifigkeit

Schubsteifigkeit

Beim *Ansetzen der linear-elastischen Schubsteifigkeit* werden die Schubflächen linear-elastisch berechnet. Es wird keine Reduktion infolge Rissbildung berücksichtigt.

Alternativ erfolgt eine *Abminderung der Schubsteifigkeit affin zur Biegesteifigkeit*. Dabei wird der linear-elastische Schubsteifigkeitsverlauf analog zum Verlauf der Biegesteifigkeit reduziert. Die theoretischen Grundlagen sind im [Kapitel 2.4.5.2](#) auf [Seite 41](#) beschrieben.

Torsionssteifigkeit

Standardmäßig wird die Torsionssteifigkeit unter Berücksichtigung der Rissbildung nach dem Ansatz von LEONHARDT [10] berechnet (siehe Kapitel 2.4.5.2, Seite 41).

Die *Pauschale Abminderung der Torsionssteifigkeit* ermöglicht es, die Steifigkeit bei der Rissbildung auf einen benutzerdefinierten Restwert zu reduzieren. Es ist eine Reststeifigkeit von 10 % voreingestellt, die auf dem relativ starken Abfall der Torsionssteifigkeit beruht (siehe Bild 2.28, Seite 42).

4.2.2 Tension Stiffening

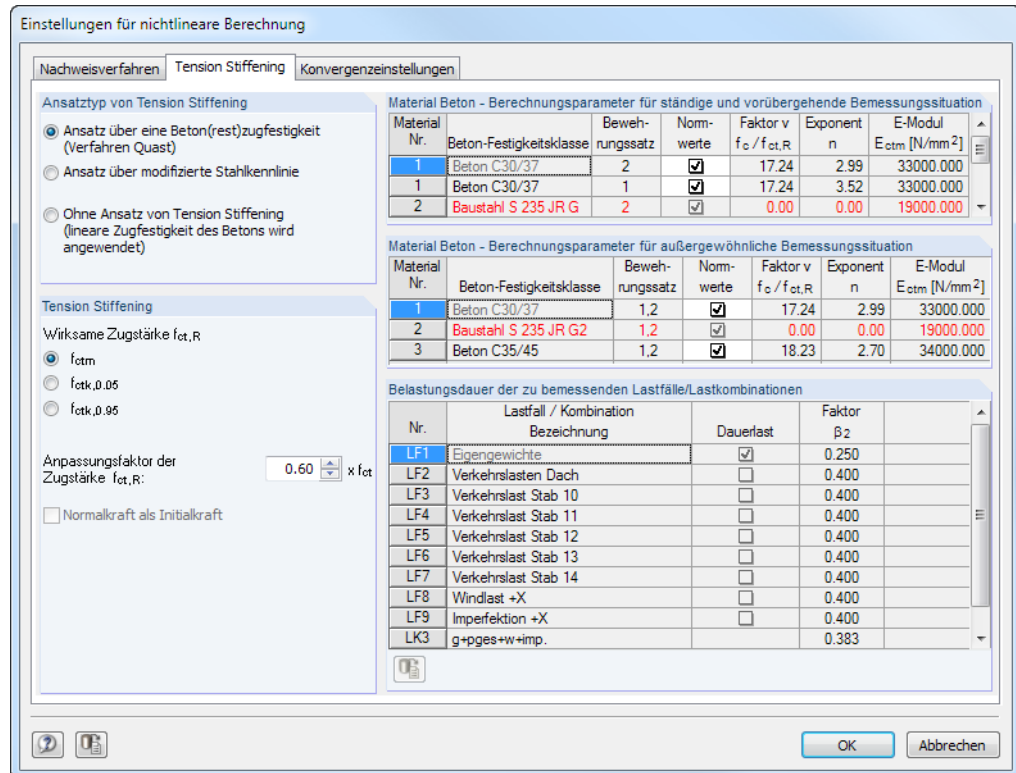


Bild 4.5: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Tension Stiffening*

Die Vorgaben zu *Tension Stiffening* (Mitwirken des Betons zwischen den Rissen) können separat für Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Brandschutz definiert werden.

Ansatztyp von Tension Stiffening

Ansatz über eine Beton(rest)zugfestigkeit

Das Verfahren basiert auf einer Restzugfestigkeit des Betons nach QUAST [8], die abhängig von der maßgebenden Dehnung der Stahlfaser in der Zugzone definiert wird. Dieser Ansatz ist im Kapitel 2.4.3.1 auf Seite 36 grafisch dargestellt.

Ansatz über modifizierte Stahlkennlinie

Wie im Kapitel 2.4.3.2 auf Seite 38 erläutert, kann der *Tension Stiffening* Effekt auch über eine modifizierte Stahlkennlinie erfasst werden. Der Rechenaufwand erhöht sich dabei etwas, da neben der reinen Berechnung im Zustand II auch eine Berechnung im ungerissenen Zustand sowie die Ermittlung der Risschnittgrößen notwendig ist.

Ohne Ansatz von Tension Stiffening

Wird *Tension Stiffening* nicht berücksichtigt, so erfolgt lediglich die Unterscheidung nach gerissenen und ungerissenen Bereichen: In den ungerissenen Bereichen wird mit der entsprechenden Steifigkeit des Betons im Zustand I (unter Berücksichtigung der vorhandenen Längsbewehrung), in den gerissenen Bereichen mit den Steifigkeiten im reinen Zustand II gerechnet.

Tension Stiffening

Die Rechenwerte der Betonzugfestigkeit bestimmen den Exponenten des Parabelbereichs in der Weise, dass sich eine Steigung affin zum Druckbereich ergibt ($E_{cm} = E_{ctm}$).

Wirksame Zugstärke $f_{ct,R}$

Zur Berücksichtigung des entsprechenden Sicherheitsniveaus kann für die anzusetzende Betonzugfestigkeit zwischen folgenden Festigkeiten gewählt werden:

- f_{ctm} Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit
- $f_{ctk; 0,05}$ Charakteristischer Wert des 5%-Quantils der zentrischen Zugfestigkeit
- $f_{ctk; 0,95}$ Charakteristischer Wert des 95%-Quantils der zentrischen Zugfestigkeit

Anpassungsfaktor der Zugstärke $f_{ct,R}$

Der rechnerisch anzusetzende Wert der Betonzugfestigkeit $f_{ct,R}$ kann über einen Anpassungsfaktor beeinflusst werden. Damit lassen sich Randbedingungen berücksichtigen wie z. B. eine vorhandene Schädigung.

PFEIFFER [9] schlägt eine Abminderung auf 60 % der Zugfestigkeiten vor (Voreinstellung).

Normalkraft als Initialkraft

Dieses Kontrollfeld ist für die Berechnung der Risschnittgrößen von Bedeutung: Ist es angehakt (nicht möglich beim Verfahren nach QUAST [8]), wird die Normalkraft für die Berechnung der Rissmomente konstant gehalten. Dieser Fall wäre beispielsweise beim Wirken einer Vorspannung zutreffend. Wenn das Kontrollfeld deaktiviert ist, wird bei der Berechnung der Risschnittgrößen der gesamte Lastvektor berücksichtigt.

Material Beton - Berechnungsparameter

Die *Normwerte* der Betonparameter sind voreingestellt (siehe [Kapitel 2.4.3.1, Seite 36](#)). Nach dem Deaktivieren dieses Kontrollfeldes (vierte Spalte) kann die Spannungs-Dehnungs-Linie des Zugbereichs direkt beeinflusst werden. Da die Werte voneinander abhängig sind, werden die zugehörigen Spalten nach einer Änderung automatisch angepasst.

Belastungsdauer der Lastfälle/Lastkombinationen

Dieser Abschnitt verwaltet die Völligkeitsbeiwerte β zum Ansatz des Abzugsterms ($\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}$), d. h. der Dehnungen der maßgebenden Stahlfasern für die Risschnittgrößen im gerissenen bzw. ungerissenen Zustand (siehe [Kapitel 2.4.3.2, Seite 38](#)). Der Beiwert β ist von der Lasteinwirkungsdauer abhängig:

- 0,25 Dauerlast oder wiederholte Belastung
- 0,4 Kurzzeitige Belastung

Beim Ansatz über eine *modifizierte Stahlkennlinie* kann mit dem Kontrollfeld gesteuert werden, ob ein Lastfall als *Dauerlast* oder *Kurzzeitlast* zu betrachten ist.

Bei Lastkombinationen repräsentiert der angesetzte Faktor β_2 das Mittel aus den jeweiligen β_2 -Werten der in der Kombination enthaltenen Lastfälle.



Für die Bemessung von **Druckgliedern** ist grundsätzlich das *Tension Stiffening*-Modell nach QUAST zu verwenden. Die verbleibende Restzugkraft kann über den *Anpassungsfaktor der Zugstärke* $f_{ct,R}$ beeinflusst werden.

Das *Tension Stiffening*-Modell mit modifizierter Stahlkennlinie basiert auf einer Unterscheidung zwischen gerissenen ($M > M_{cr}$) und ungerissenen Bereichen ($M < M_{cr}$): Im ungerissenen Bereich wird linear-elastisch mit einem konstanten E-Modul für den Beton ($E_{cm,eff}$) gerechnet. Bei überwiegendem Druck treten jedoch wegen des nichtlinearen Verlaufs der Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons deutlich vergrößerte Krümmungen bei kleinen Momentenbeanspruchungen auf. Die Ergebnisse können somit stark auf der unsicheren Seite liegen.

4.2.3 Konvergenzeinstellungen

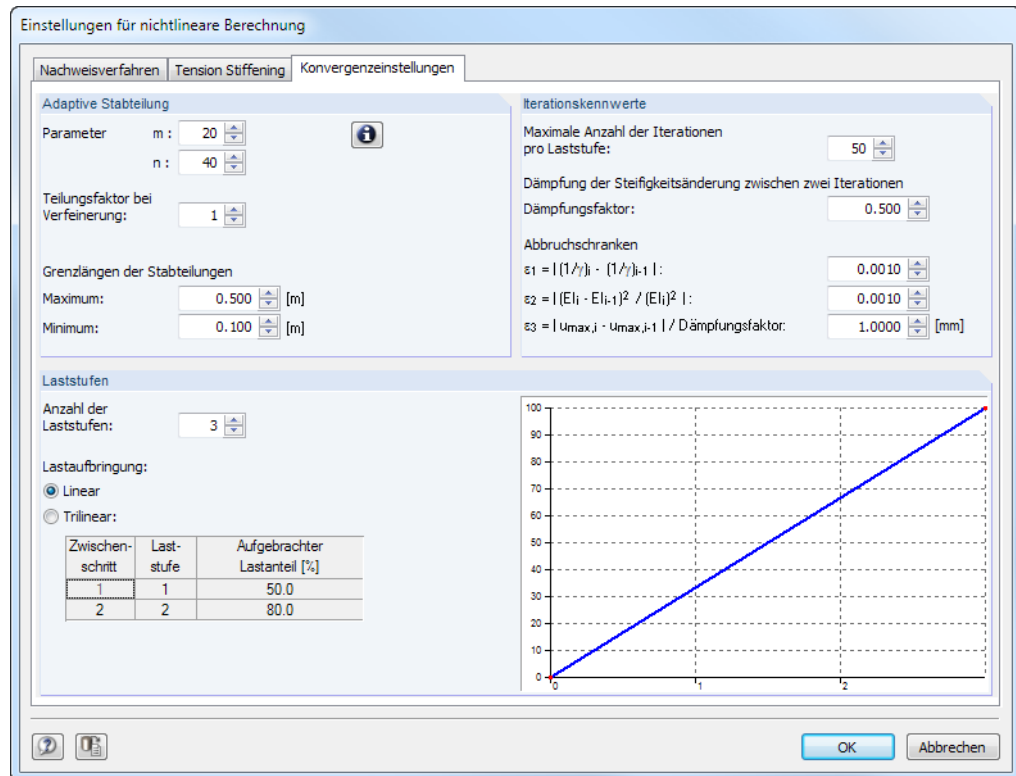


Bild 4.6: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen*

Hinweise zu diesem Register finden Sie auch im [Kapitel 2.4.9 Konvergenz](#) ab [Seite 51](#).

Adaptive Stabteilung

Die Elementierung übt einen entscheidenden Einfluss auf die nichtlineare Berechnung aus: Sind die Steifigkeitssprünge innerhalb eines Elements sehr groß, so kann dies zu ungenauen Ergebnissen oder einer nicht konvergenten Berechnung führen. Die *Adaptive Stabteilung* kontrolliert die Steifigkeitsunterschiede an den Elementknoten und legt bei zu großen Unterschieden entsprechende Zwischenteilungen an.

Parameter m / n



Da BETON mit konstanten mittleren Steifigkeiten im Verlauf eines finiten Elements rechnet, ist im Bereich größerer Steifigkeitsänderungen eine feinere Elementierung anzuraten (siehe [Bild 2.18](#), [Seite 31](#)). Nähere Angaben zum formellen Zusammenhang der Parameter m und n sind über die [Info]-Schaltfläche im Dialog zugänglich.

Nach [9] haben sich Werte für $m \cong 20$ und $n \cong 40$ bewährt. Hierbei sei jedoch erwähnt, dass PFEIFFER im Rahmen des verwendeten Übertragungsmatrizenverfahrens mit tangentialen Biegesteifigkeiten rechnet. Diese weisen im Bereich von Rissbildung und Fließbeginn eine deutlich

größere Gradienten auf. Aus diesem Grund können sich im Einzelfall auch andere Werte für m und n als sinnvoll erweisen.

Teilungsfaktor bei Verfeinerung

Dieses Eingabefeld steuert, durch wie viele Knoten das finite Stabelement geteilt wird.

Grenzlängen der Stabteilung

Die beiden Eingabefelder legen das *Maximum* und *Minimum* als größtmögliche bzw. kleinste zulässige Länge eines finiten Stabelements fest.

Die Grenzlängen stellen auch die Schranken für die adaptive Stabteilung dar. Bei Vergleichsrechnungen haben sich die voreingestellten Längen von 0,5 m und 0,1 m als sinnvolle Werte erwiesen. Weiter reduzierte Längen wirken sich nur geringfügig auf die Ergebnisse aus; sie verlangsamen jedoch die Berechnung spürbar wegen der erhöhten Anzahl an finiten Elementen. Bei sehr starken Steifigkeitssprüngen (z. B. bei unterbewehrten Querschnitten vom Zustand I zum Zustand II) kann es jedoch sinnvoll sein, die minimale Grenzlänge zu verfeinern.

Iterationskennwerte

Der Iterationsprozess kann über die Parameter dieses Abschnitts beeinflusst werden.

Maximale Anzahl der Iterationen pro Laststufe

Der Iterationsverlauf hängt sehr von Querschnittsform, System und Belastung ab. Damit ist auch die erforderliche Iterationsanzahl zum Erreichen der Abbruchschranken starken Schwankungen ausgesetzt. Der voreingestellte Wert von 50 Iterationen ist für die meisten praktischen Anwendungen ausreichend, kann aber bei Bedarf angepasst werden.

Dämpfung der Steifigkeitsänderung zwischen zwei Iterationen

Im Zuge von zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten wird der Steifigkeitsunterschied an einem Knoten ermittelt. Der *Dämpfungsfaktor* charakterisiert den Anteil der Steifigkeitsdifferenz, der für die neu angesetzte Steifigkeit des nächsten Iterationsschrittes berücksichtigt wird. Durch eine Verminderung der Steifigkeitssprünge zwischen zwei Iterationsschritten kann dem Oszillieren der Berechnung entgegengewirkt werden.



Je größer der Dämpfungsfaktor, desto geringer ist der Einfluss der Dämpfung. Bei einem Faktor gleich 1 übt die Dämpfung keinen Einfluss auf die iterative Berechnung aus.

Abbruchschranken $\varepsilon_1/\varepsilon_2/\varepsilon_3$

Die Abbruchschranken können je nach Zweck und Aufgabe angepasst werden: Führen bei Berechnungen nach Theorie I. Ordnung (z. B. Balkenverformungen im GZG) relativ grobe Abbruchschranken ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \leq 0,01$) zu ausreichend genauen Ergebnissen, so empfiehlt es sich dennoch, die Toleranzen für Stabilitätsberechnungen zu verfeinern ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \leq 0,001$). Das Beispiel 3 im [Kapitel 9.3](#) stellt diesen Effekt in anschaulicher Weise dar.

Mit der Abbruchschranke ε_3 wird zusätzlich die Verformungsänderung kontrolliert. Dieses Kriterium verfolgt, wie sich die Größe der maximalen Verformung ändert. Dabei wird auch der vorgegebene Dämpfungsfaktor berücksichtigt.

Laststufen

Die Belastung kann schrittweise aufgebracht werden, um eine abrupte Steifigkeitsänderung in den einzelnen finiten Elementen zu vermeiden oder abzumindern („Gewöhnung“ des Systems an die Belastung). Das Ziel ist es, keine zu großen Steifigkeitssprünge während einer Iteration entstehen zu lassen. Wird die Last schrittweise aufgebracht, so kann in dem Iterationsschritt einer Laststufe immer auf die entsprechende Endsteifigkeit des Elements der vorangegangenen Laststufe zurückgegriffen werden.

Anzahl der Laststufen

Dieses Eingabefeld steuert die Anzahl der einzelnen Laststufen für die nichtlineare Berechnung.

Lastaufbringung

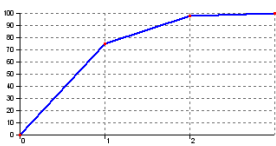
- **Linear**

Die Belastung wird in linearen Schritten aufgebracht.

- **Trilinear**

Da bei einer linearen Lastaufbringung auf die belastungsabhängige Steifigkeitsentwicklung nur mit entsprechend feiner Abstufung reagiert werden kann, ist auch eine trilineare Lastaufbringung möglich. Damit kann z. B. auf Randbedingungen wie Fließen nahe dem Bruchzustand entsprechend eingegangen werden.

Die trilineare Lastaufbringung wird über die Tabelle gesteuert: Es sind zwei Zwischenpunkte anzugeben, die den jeweils aufgebrauchten Lastanteil charakterisieren.



Trilineare

Lastaufbringung:

75 % – 98 % – 100 %



Vor der Berechnung empfiehlt es sich, die Eingabedaten auf ihre Richtigkeit hin überprüfen zu lassen. Die [Kontrolle] ist in jeder Eingabemaske von BETON zugänglich.

Es wird kontrolliert, ob alle Angaben vollständig vorliegen, die für die Bemessung erforderlich sind, und ob die Bezüge der Datensätze sinnvoll definiert sind. Wenn keine Eingabefehler entdeckt werden, erscheint folgender Hinweis.



Bild 4.7: Plausibilitätskontrolle

4.4 Start der Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske des Moduls BETON kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

BETON sucht nach den Ergebnissen der zu bemessenden Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen. Werden diese nicht gefunden, startet zunächst die RSTAB-Berechnung zur Ermittlung der bemessungsrelevanten Schnittgrößen.

Die Berechnung kann auch in der RSTAB-Oberfläche gestartet werden: Im Dialog *Zu berechnen* (Menü **Berechnung** → **Zu berechnen**) sind die Bemessungsfälle der Zusatzmodule wie Lastfälle oder Lastkombinationen aufgelistet.

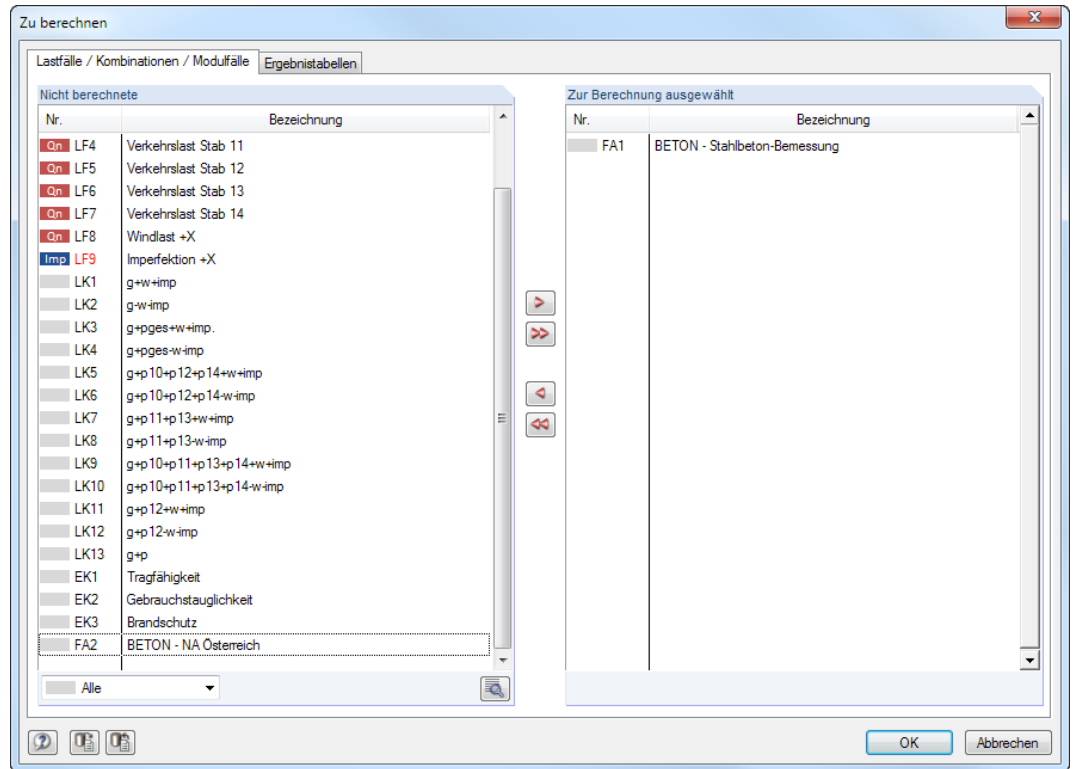
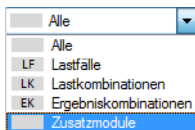


Bild 4.8: Dialog *Zu berechnen*



Falls die BETON-Fälle in der Liste *Nicht berechnete* fehlen, ist die Selektion am Ende der Liste auf *Alle* oder *Zusatzmodule* zu ändern.

Mit der Schaltfläche werden die selektierten BETON-Fälle in die rechte Liste übergeben. [OK] startet dann die Berechnung.



Ein Bemessungsfall kann auch über die Liste der Symbolleiste direkt berechnet werden: Stellen Sie den BETON-Fall ein und klicken dann die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] an.



Bild 4.9: Direkte Berechnung eines BETON-Bemessungsfalls in RSTAB

Der Ablauf der Bemessung kann anschließend in einem Dialog verfolgt werden (siehe [Bild 9.20](#), [Seite 172](#)).

5 Ergebnisse

Nach der Berechnung wird die Maske 2.1 *Erforderliche Bewehrung querschnittsweise* angezeigt.

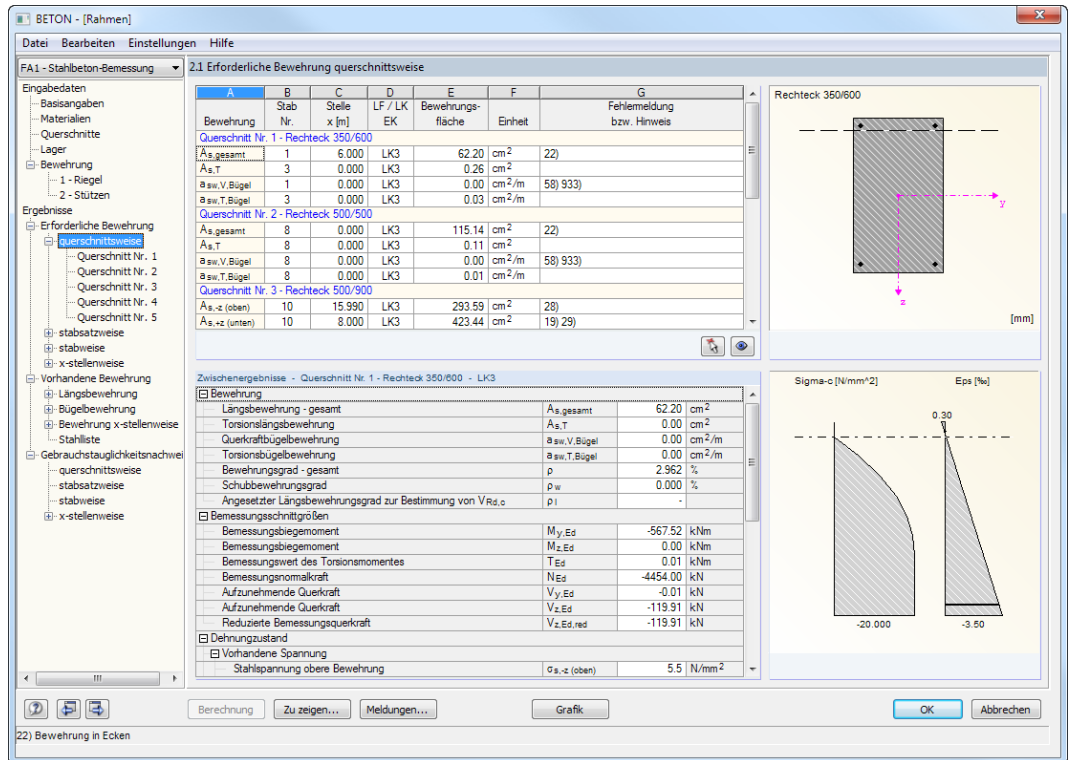


Bild 5.1: Ergebnismaske

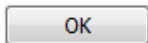
Die für den Tragfähigkeitsnachweis erforderlichen Bewehrungsquerschnitte sind in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.4 aufgelistet. Wurde ein Bewehrungsvorschlag erstellt, erscheint die vorhandene Bewehrung inklusive Stahlliste in den Ergebnismasken 3.1 bis 3.4.

Die Masken 4.1 bis 4.4 geben Aufschluss über die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. In den Masken 5.1 bis 5.4 finden sich die Ergebnisse der Brandschutznachweise.

Falls eine nichtlineare Bemessung durchgeführt wurde, werden die entsprechenden Ergebnisse in den Masken 6.1 bis 6.4 ausgegeben.



Jede Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator direkt ansteuern. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] und [F3] möglich.



[OK] sichert die Ergebnisse. BETON wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm RSTAB.

Das Kapitel 5 stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Überprüfung der Resultate ist im Kapitel 6 ab Seite 139 beschrieben.

5.1 Erforderliche Bewehrung

5.1.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

Es werden die maximalen Bewehrungsquerschnitte aller untersuchten Stäbe ausgegeben, die sich aus den Schnittgrößen der gewählten Lastfälle, Last-, Ergebnis- und Superkombinationen für den Nachweis der Tragfähigkeit ergeben.

2.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 350/550						
A _{s,z} (oben)	9	5.253	EK23	14.59	cm ²	
A _{s,z} (unten)	3	0.800	EK23	23.16	cm ²	
A _{s,T}	1	0.000	EK23	0.00	cm ²	
B _{sw,V} Bügel	3	0.125	EK23	13.14	cm ² /m	58)
B _{sw,T} Bügel	1	0.000	EK23	0.00	cm ² /m	
Querschnitt Nr. 6 - Rechteck 450/550						
A _{s,z} (oben)	93	3.485	EK23	28.31	cm ²	26) 28)
A _{s,z} (unten)	93	1.600	EK23	25.12	cm ²	
A _{s,T}	90	0.000	EK23	0.00	cm ²	
B _{sw,V} Bügel	92	0.125	EK23	20.16	cm ² /m	58)
B _{sw,T} Bügel	90	0.000	EK23	0.00	cm ² /m	

Zwischenergebnisse - Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 350/550 - EK23

Bewehrung		
Obere Längsbewehrung	A _{s,z} (oben)	14.59 cm ²
Untere Längsbewehrung	A _{s,z} (unten)	23.16 cm ²
Torsionslängsbewehrung	A _{s,T}	0.00 cm ²
Querkraftbügelbewehrung	B _{sw,V} Bügel	13.14 cm ² /m
Torsionsbügelbewehrung	B _{sw,T} Bügel	0.00 cm ² /m
Oberer Bewehrungsgrad	ρ-z (oben)	0.758 %
Unterer Bewehrungsgrad	ρ-z (unten)	0.000 %
Schubbewehrungsgrad	ρ _w	0.093 %
Angesetzter Längsbewehrungsgrad zur Bestimmung von V _{Rd,c}	ρ _l	-
Bemessungsschnittgrößen		
Bemessungsbiegemoment	M _{y,Ed}	-294.9 kNm
Bemessungsbiegemoment	M _{z,Ed}	0.0 kNm
Bemessungswert des Torsionsmomentes	T _{Ed}	0.0 kNm
Bemessungsnormalkraft	N _{Ed}	0.0 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{y,Ed}	0.0 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{z,Ed}	0.0 kN
Reduzierte Bemessungsquerkraft	V _{z,Ed,red}	0.0 kN
Dehnungszustand		

Bild 5.2: Maske 2.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

Es werden für alle bemessenen Querschnitte die maximal erforderlichen Bewehrungsflächen ausgewiesen, die sich aus den Parametern der Bewehrungssätze und den Schnittgrößen der maßgebenden Einwirkungen ergeben.

Die Bewehrungsflächen der Längs- und Bügelbewehrung sind nach Querschnitten geordnet aufgelistet. In den beiden Bereichen dieser Maske werden diejenigen Bewehrungsarten und Bemessungsdetails angezeigt, die im Dialog *Ergebnisse zu zeigen* angehakt sind (siehe Bild 5.3).

Der untere Abschnitt der Maske listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Zeile auf. Diese Bemessungsdetails ermöglichen eine gezielte Bewertung der Ergebnisse. Wenn im oberen Abschnitt eine andere Zeile ausgewählt wird, aktualisieren sich die Zwischenergebnisse im unteren Bereich automatisch.

Bewehrung

Es sind folgende Längs- und Bügelbewehrungen voreingestellt:

Bewehrung	Erläuterung
$A_{s,-z(\text{oben})}$	Bewehrungsquerschnitt der erforderlichen oberen Längsbewehrung infolge Längskraft oder Biegung mit oder ohne Längskraft
$A_{s,+z(\text{unten})}$	Bewehrungsquerschnitt der erforderlichen unteren Längsbewehrung infolge Längskraft oder Biegung mit oder ohne Längskraft
$A_{s,T}$	Bewehrungsquerschnitt einer ggf. erforderlichen Torsionslängsbewehrung
$a_{sw,V,\text{Bügel}}$	Querschnitt der erforderlichen Schubbewehrung zur Aufnahme der Querkraft, bezogen auf die Einheitslänge 1 m
$a_{sw,T,\text{Bügel}}$	Querschnitt der erforderlichen Bügelbewehrung zur Aufnahme des Torsionsmoments, bezogen auf die Einheitslänge 1 m
$a_{sf,-z(\text{oben})}$	Querschnitt der erforderlichen Schubbewehrung zur Aufnahme der Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten auf der $-z$ Seite des Querschnitts, bezogen auf die Einheitslänge 1 m
$a_{sw,T,\text{Bügel}}$	Querschnitt der erforderlichen Schubbewehrung zur Aufnahme der Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten auf der $+z$ Seite des Querschnitts, bezogen auf die Einheitslänge 1 m

Tabelle 5.1: Längs- und Bügelbewehrungen



Obere und Untere Lage

Die obere Bewehrung befindet sich auf der Stabseite in Richtung der negativen lokalen z-Stabachse ($-z$), die untere Bewehrung entsprechend in Richtung der positiven z-Achse ($+z$). In der RSTAB-Oberfläche lassen sich die Stabachsen im *Zeigen-Navigator* oder mit dem Stab-Kontextmenü darstellen (siehe [Bild 3.30, Seite 77](#)).

Zu zeigen...

Über die Schaltfläche [Zu zeigen] kann festgelegt werden, welche Bewehrungsergebnisse im oberen Abschnitt der Maske erscheinen.

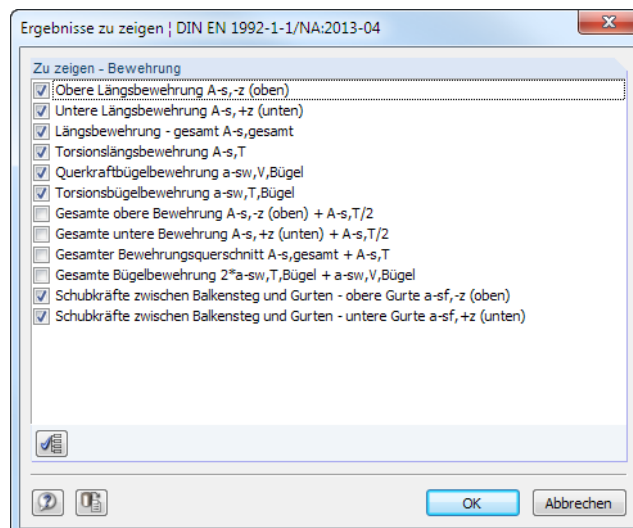


Bild 5.3: Dialog *Ergebnisse zu zeigen*



Die Vorgaben dieses Dialogs steuern auch die Ergebnisausgabe im Ausdruckprotokoll!

Stab Nr.

Für jeden Querschnitt und für jede Bewehrungsart wird die Nummer des Stabes angegeben, der die größte Bewehrungsfläche aufweist.

Stelle x

Es wird jeweils die x-Stelle im Stab angegeben, für die die Maximalbewehrung ermittelt wurde. Zur tabellarischen Ausgabe werden diese RSTAB-Stabstellen x herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß ggf. vorgegebener Stabteilung (siehe RSTAB-Tabelle 1.6)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RSTAB-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Globale Berechnungsparameter*)
- Extremwerte der Schnittgrößen

LF / LK / EK

In dieser Spalte werden die Nummern der Lastfälle, Last- oder Ergebniskombinationen angegeben, die für die jeweiligen Nachweise maßgebend sind.

Bewehrungsfläche

Die Spalte E gibt Auskunft über die maximalen Bewehrungsflächen für jede Bewehrungsart, die für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlich sind.

Die in Spalte F angegebenen *Einheiten* der Bewehrungen lassen sich anpassen über das Menü

Einstellungen → **Einheiten und Dezimalstellen**.

Es wird der im [Kapitel 8.3](#) auf [Seite 158](#) beschriebene Dialog aufgerufen.

Fehlermeldung bzw. Hinweis

Die letzte Spalte verweist auf Unbemessbarkeiten oder Besonderheiten, die während der Bemessung aufgetreten sind. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Über die links dargestellte Schaltfläche lassen sich alle [Meldungen] zum aktuellen Bemessungsfall aufrufen.

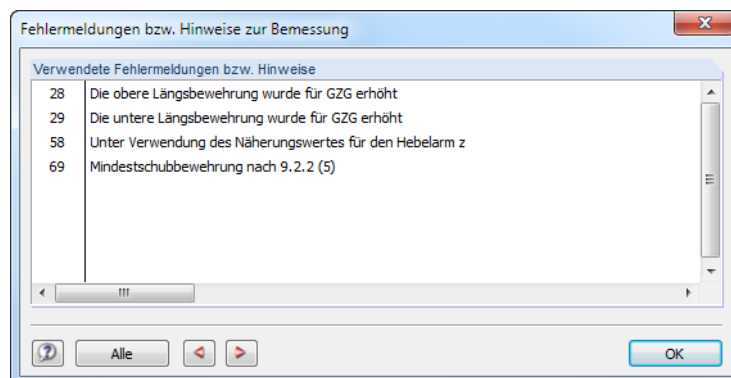


Bild 5.4: Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung*

5.1.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

2.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stabsatz Nr. 17 - Rechteck 350/550						
A _{s,-z} (oben)	1	0.800	EK23	12.48	cm ²	
A _{s,+z} (unten)	3	0.800	EK23	23.16	cm ²	
a _{sw,V} Bügel	3	0.125	EK23	13.14	cm ² /m	58)
Stabsatz Nr. 19 - Rechteck 350/550						
A _{s,-z} (oben)	9	5.253	EK23	14.59	cm ²	
A _{s,+z} (unten)	9	2.212	EK23	11.50	cm ²	
a _{sw,V} Bügel	9	5.128	EK23	8.02	cm ² /m	58)
Stabsatz Nr. 21 - Rechteck 450/550						
A _{s,-z} (oben)	93	3.485	EK23	28.31	cm ²	(26) 28)
A _{s,+z} (unten)	93	1.600	EK23	25.12	cm ²	
a _{sw,V} Bügel	92	0.125	EK23	20.16	cm ² /m	58)

Zwischenergebnisse - Stabsatz Nr. 17 - EK23

Bewehrung

Bemessungsschnittgrößen

Dehnungszustand

Vorhandene Spannung			
Stahlspannung obere Bewehrung	σ _{s,-z} (oben)	-	
Stahlspannung untere Bewehrung	σ _{s,+z} (unten)	436.9	N/mm ²
Betonspannung am oberen Querschnittsrand	σ _{c,-z} (oben)	-17.0	N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	σ _{c,+z} (unten)	0.0	N/mm ²

Vorhandene Dehnung			
Dehnung obere Bewehrung	ε _{s,-z} (oben)	-	
Dehnung untere Bewehrung	ε _{s,+z} (unten)	5.059	‰
Dehnung oberer Betonquerschnittsrand	ε _{c,-z} (oben)	-3.500	‰
Dehnung unterer Betonquerschnittsrand	ε _{c,+z} (unten)	5.658	‰
Dehnung Schwerachse	ε ₀	1.079	‰
Innerer Hebelarm z für die Schubbemessung	z	454.0	mm
Druckzonenhöhe	x	210.2	mm
Druckzonenhöhe/Nutzhöhe	x/d	0.4089	
Statische Nutzhöhe	d	514.0	mm
Krümmung	1/r	-0.0167	1/m

Bild 5.5: Maske 2.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

Diese Maske listet die maximalen Bewehrungsquerschnitte auf, die für jeden der bemessenen Stabsätze erforderlich sind. Die Spalten sind im Kapitel 5.1.1 erläutert.

5.1.3 Erforderliche Bewehrung stabweise

2.3 Erforderliche Bewehrung stabweise

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 1 - Rechteck 350/550						
A _{s,-z} (oben)	1	0.800	EK23	12.48	cm ²	
A _{s,+z} (unten)	1	0.800	EK23	5.71	cm ²	
a _{sw,V} Bügel	1	0.675	EK23	9.36	cm ² /m	58)
Stab Nr. 3 - Rechteck 350/550						
A _{s,-z} (oben)	3	0.000	EK23	12.48	cm ²	
A _{s,+z} (unten)	3	0.800	EK23	23.16	cm ²	
a _{sw,V} Bügel	3	0.125	EK23	13.14	cm ² /m	58)
Stab Nr. 4 - Rechteck 350/550						
A _{s,-z} (oben)	4	0.900	EK23	9.00	cm ²	28)
A _{s,+z} (unten)	4	0.450	EK23	2.21	cm ²	27)
a _{sw,V} Bügel	4	0.775	EK23	7.25	cm ² /m	58)
Stab Nr. 6 - Rechteck 350/550						

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1 - Rechteck 350/550 - EK23

Bewehrung

Bemessungsschnittgrößen

Größe	Wert	Einheit
Bemessungsbiegemoment	M _{y,Ed}	-257.7 kNm
Bemessungsbiegemoment	M _{z,Ed}	0.0 kNm
Bemessungswert des Torsionsmomentes	T _{Ed}	0.0 kNm
Bemessungsnormalkraft	N _{Ed}	0.0 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{y,Ed}	0.0 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{z,Ed}	0.0 kN
Reduzierte Bemessungsquerkraft	V _{z,Ed,red}	0.0 kN

Dehnungszustand

Querkraft- und Torsionstragfähigkeit

Größe	Wert	Einheit
Aufnehmbare Querkraft ohne Schubbewehrung	V _{Rd,c}	80.4 kN
Querkraft ohne Versagen der Betondruckdiagonalen	V _{Rd,max}	607.7 kN
Aufnehmbare Querkraft der Schubbewehrung	V _{Rd,s}	-
Tragfähigkeit der Betondruckstreben	T _{Rd,max}	0.0 kNm
Aufnehmbares Torsionsmoment der Bügel	T _{Rd,s}	0.0 kNm
Druckstrebenwinkel	θ	18.43 °

Bild 5.6: Maske 2.3 Erforderliche Bewehrung stabweise

Die maximalen Bewehrungsflächen sind nach Stäben geordnet aufgelistet. Bei Voutenträgern werden die Querschnittsbezeichnungen angegeben, die für Stabanfang und -ende vorliegen.

5.1.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 3 - Rechteck 350/550 - x: 0.125 m, links						
A _{s,-z} (oben)	3	0.125	EK23	11.74	cm ²	
A _{s,-z} (unten)	3	0.125	EK23	7.51	cm ²	
B _{sw,V} Bügel	3	0.125	EK23	13.14	cm ² /m	58)
Stab Nr. 3 - Rechteck 350/550 - x: 0.125 m, rechts						
A _{s,-z} (oben)	3	0.125	EK23	11.74	cm ²	
A _{s,-z} (unten)	3	0.125	EK23	7.51	cm ²	
B _{sw,V} Bügel	3	0.125	EK23	13.14	cm ² /m	58)
Stab Nr. 3 - Rechteck 350/550 - x: 0.138 m						
A _{s,-z} (oben)	3	0.138	EK23	11.67	cm ²	
A _{s,-z} (unten)	3	0.138	EK23	7.71	cm ²	
B _{sw,V} Bügel	3	0.138	EK23	13.11	cm ² /m	58)
Stab Nr. 3 - Rechteck 350/550 - x: 0.225 m						

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 3 - x: 0.125 m - EK23

Bewehrung

Bemessungsschnittgrößen

Dehnungszustand

Vorhandene Spannung

Stahlspannung obere Bewehrung	σ _{s,-z} (oben)	-
Stahlspannung untere Bewehrung	σ _{s,+z} (unten)	450.7 N/mm ²
Betonspannung am oberen Querschnittsrand	σ _{c,-z} (oben)	-17.0 N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	σ _{c,+z} (unten)	0.0 N/mm ²

Vorhandene Dehnung

Dehnung obere Bewehrung	ε _{s,-z} (oben)	-
Dehnung untere Bewehrung	ε _{s,+z} (unten)	24.165 ‰
Dehnung oberer Betonquerschnittsrand	ε _{c,-z} (oben)	-3.500 ‰
Dehnung unterer Betonquerschnittsrand	ε _{c,+z} (unten)	26.102 ‰
Dehnung Schwerachse	ε ₀	11.301 ‰
Innerer Hebelarm z für die Schubbemessung	z	454.0 mm
Druckzonenhöhe	x	65.0 mm
Druckzonenhöhe/Nutzhöhe	x/d	0.1265
Statische Nutzhöhe	d	514.0 mm
Krümmung	1/r	-0.0538 1/m

Rechteck 350/550

σ [N/mm²]

ε [‰]

Bild 5.7: Maske 2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

Für jeden Stab werden die erforderlichen Bewehrungsflächen mitsamt Zwischenergebnissen nach x-Stellen geordnet aufgelistet:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung (siehe RSTAB-Tabelle 1.6)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RSTAB-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Globale Berechnungsparameter*)
- Extremwerte der Schnittgrößen

Unstetigkeitsstellen werden gesondert dokumentiert.

Diese Maske bietet die Möglichkeit, gezielt Informationen zu den Bemessungsergebnissen abzurufen. So lässt sich z. B. die erforderliche Bügelbewehrung mit den zugehörigen Details für eine bestimmte Stabstelle (Bemessungsschnitt) überprüfen.

Die einzelnen Spalten sind im [Kapitel 5.1.1](#) erläutert.

5.1.5 Erforderliche Bewehrung unbemessbar

2.5 Erforderliche Bewehrung unbemessbar

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 3 - Rechteck 300/500 - x: 0.000 m						
A _{s,z} (oben)	3	0.000	LK3	Unbemessbar	cm ²	17)
A _{s,z} (unten)	3	0.000	LK3	Unbemessbar	cm ²	17)
Stab Nr. 10 - Rechteck 450/600 - x: 4.571 m						
A _{s,z} (oben)	10	4.571	LK3	Unbemessbar	cm ²	6) 19)
A _{s,z} (unten)	10	4.571	LK3	Unbemessbar	cm ²	
Stab Nr. 10 - Rechteck 450/600 - x: 6.857 m						
A _{s,z} (oben)	10	6.857	LK3	Unbemessbar	cm ²	6) 19)
A _{s,z} (unten)	10	6.857	LK3	Unbemessbar	cm ²	
Stab Nr. 10 - Rechteck 450/600 - x: 8.000 m						
A _{s,z} (oben)	10	8.000	LK3	Unbemessbar	cm ²	6) 19)
A _{s,z} (unten)	10	8.000	LK3	Unbemessbar	cm ²	
A _{s,z} (oben)	10	8.000	LK3	Unbemessbar	cm ²	6) 19)

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 10 - x: 4.571 m - LK3

Bewehrung		
Bemessungsschnittgrößen		
Bemessungsbiegemoment	M _{y,Ed}	2973.20 kNm
Bemessungsbiegemoment	M _{z,Ed}	0.00 kNm
Bemessungswert des Torsionsmomentes	T _{Ed}	0.09 kNm
Bemessungsnormalkraft	N _{Ed}	-167.83 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{y,Ed}	-0.01 kN
Aufzunehmende Querkraft	V _{z,Ed}	552.23 kN
Reduzierte Bemessungsquerkraft	V _{z,Ed,red}	552.23 kN
Dehnungszustand		
Vorhandene Spannung		
Stahlspannung obere Bewehrung	σ _{s,z} (oben)	-435.5 N/mm ²
Stahlspannung untere Bewehrung	σ _{s,z} (unten)	436.8 N/mm ²
Betonspannung am oberen Querschnittsrand	σ _{c,z} (oben)	-17.0 N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	σ _{c,z} (unten)	0.0 N/mm ²
Vorhandene Dehnung		
Dehnung obere Bewehrung	ε _{s,z} (oben)	-2.974 ‰
Dehnung untere Bewehrung	ε _{s,z} (unten)	4.278 ‰
Dehnung oberer Betonquerschnittsrand	ε _{c,z} (oben)	-3.500 ‰

Rechteck 450/600

Sigma-c [N/mm²] Eps [‰]

Bild 5.8: Maske 2.5 Erforderliche Bewehrung unbemessbar

Diese Maske wird nur angezeigt, wenn während der Berechnung Unbemessbarkeiten oder Probleme festgestellt wurden. Die Fehlermeldungen sind nach Stäben und x-Stellen geordnet.

Die in Spalte G angegebene Nummer der Fehlermeldung wird in der Fußzeile kommentiert.

Meldungen...

Mit der Schaltfläche [Meldungen] lassen sich sämtliche Besonderheiten anzeigen, die während der Bemessung aufgetreten sind.

Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

Verwendete Fehlermeldungen bzw. Hinweise

- 6 Obere Biegedruckbewehrung erforderlich
- 7 Untere Biegedruckbewehrung erforderlich
- 17 Max. Bewehrungsgrad überschritten nach 9.5.2(3)
- 19 Oberer Höchstbewehrungsgrad nach Abs. 9.2.1.1(3) überschritten.
- 58 Unter Verwendung des Näherungswertes für den Hebelarm z
- 71 Querschnitt auf Querkraft unbemessbar V-Ed > V-Rd,max
- 80 Querschnitt auf Torsion mit Querkraft unbemessbar nach 6.3.2 (4)

OK

Bild 5.9: Dialog Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

Alle

Ein Klick auf [Alle] im Dialog blendet sämtliche in BETON verfügbaren Meldungen ein.

5.2 Vorhandene Bewehrung

Die Ergebnismasken 3.1 bis 3.4 werden angezeigt, wenn in Maske 1.6 *Bewehrung* die Option *Bewehrungsvorschlag vornehmen* angehakt wurde (siehe Seite 62) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe Kapitel 5.1.5, Seite 111). Auch die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sowie nichtlineare Untersuchungen erfordern einen Bewehrungsvorschlag, d. h. eine vorhandene Bewehrung.

BETON ermittelt mit den Vorgaben der Maske 1.6 einen Vorschlag zur Ausbildung der Längs- und Bügelbewehrung. Es wird versucht, die erforderliche Bewehrung unter Berücksichtigung der Parameter (vorgegebene Stabdurchmesser, mögliche Anzahl an Bewehrungslagen, Staffelung, Verankerungsart) mit einem möglichst geringen Bedarf an Bewehrungsstäben bzw. -querschnitten abzudecken.

Die vorgeschlagene Bewehrung ist in den Masken *Vorhandene Bewehrung* editierbar: Durchmesser, Anzahl, Lage und Länge der Bewehrungspositionen können individuell angepasst werden.

5.2.1 Vorhandene Längsbewehrung

3.1 Vorhandene Längsbewehrung

Position Nr.	Bewehrungslage	Anzahl Stäbe	d_s [mm]	A_s [cm ²]	Länge [m]	x-Stelle [m] von	x-Stelle [m] bis	Verankerung	Masse [kg]	Anmerkung
16	+z (unten)	2	12.0	2.26	3.470	22.494	25.965	<input checked="" type="checkbox"/>	6.16	
17	Konstruktiv	2	12.0	2.26	34.469	0.000	34.469	<input type="checkbox"/>	61.20	
Stabsatz Nr. 21 - Rechteck 500/550										
1	Grundbew. -z (oben)	4	16.0	8.04	14.894	-0.160	14.734	<input checked="" type="checkbox"/>	94.03	
2	-z (oben)	4	20.0	12.57	1.041	13.721	14.762	<input checked="" type="checkbox"/>	10.27	101)
3	-z (oben)	4	20.0	12.57	4.380	-0.200	4.180	<input checked="" type="checkbox"/>	43.21	101)
4	-z (oben)	4	20.0	12.57	2.058	4.893	6.951	<input checked="" type="checkbox"/>	20.30	101)
5	-z (oben)	4	20.0	12.57	3.669	8.741	12.410	<input checked="" type="checkbox"/>	36.20	101)
6	-z (oben)	4	20.0	12.57	1.228	13.535	14.762	<input checked="" type="checkbox"/>	12.11	101)
7	Grundbew. +z (unten)	4	16.0	8.04	14.875	-0.160	14.715	<input checked="" type="checkbox"/>	93.91	
8	+z (unten)	2	20.0	6.28	2.644	11.563	14.207	<input checked="" type="checkbox"/>	13.04	
9	+z (unten)	4	20.0	12.57	8.537	2.111	10.648	<input checked="" type="checkbox"/>	84.21	
10	+z (unten)	4	20.0	12.57	3.516	11.212	14.728	<input checked="" type="checkbox"/>	34.68	
11	Konstruktiv	2	20.0	6.28	14.619	0.000	14.619	<input type="checkbox"/>	72.11	

Bild 5.10: Maske 3.1 *Vorhandene Längsbewehrung*

Die einzulegende Längsbewehrung wird stab- und stabsatzweise nach *Positionen* (Bewehrungsgruppen) geordnet angegeben.

Unterhalb der Tabelle ist die Bewehrung grafisch mit Positionsstäben dargestellt. Die aktuelle Position (die Zeile im Abschnitt oben, in der sich der Cursor befindet) ist rot gekennzeichnet. Änderungen bei den Parametern in der Tabelle werden sofort grafisch umgesetzt. Die Schaltflächen zum Steuern der Bewehrungsgrafik sind im Kapitel 6.1 auf Seite 139 beschrieben.

Der Bewehrungsvorschlag berücksichtigt auch konstruktive Vorschriften. So ist beispielsweise nach EN 1992-1-1, 9.2.1.2 eine Mindestbewehrung an gelenkig angenommenen Lagern anzuordnen, die mindestens 25 % des maximalen benachbarten Feldmoments abdeckt und die über die 0,25fache Länge des Endfeldes vorliegt (Angaben für deutschen Nationalen Anhang).

Position Nr.

Die Auflistung erfolgt nach *Positionen* geordnet, die gleiche Eigenschaften aufweisen (Durchmesser, Länge).

Die Positionen aller Stäbe und Stabsätze werden in Maske 3.4 *Stahlliste* zusammengefasst.

Bewehrungslage

Diese Spalte gibt die Lage der Bewehrung im Querschnitt an:

- Grundbewehrung $-z$ (oben)
- Grundbewehrung $+z$ (unten)
- $-z$ (oben)
- $+z$ (unten)
- In Ecken
- Umlaufend
- Konstruktiv

Für die Anordnung der Bewehrung berücksichtigt BETON die Benutzervorgaben aus Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung* (siehe [Kapitel 3.5.4, Seite 78](#)).

Anzahl Stäbe



Die Anzahl der Bewehrungsstäbe einer Position ist editierbar: Klicken Sie in die Zelle, um dann mit der Schaltfläche den Bearbeitungsdialog zu öffnen.

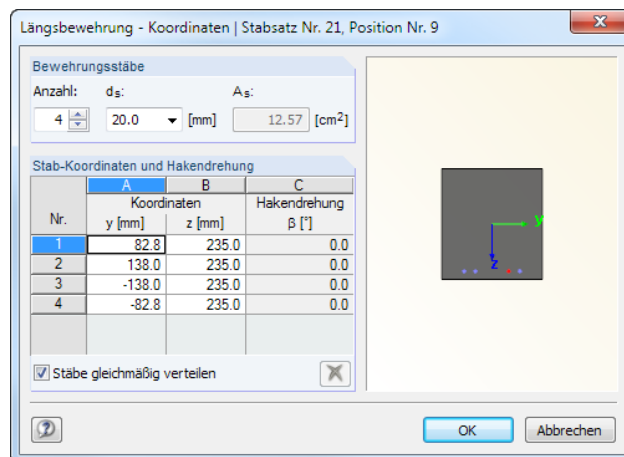


Bild 5.11: Dialog *Längsbewehrung - Koordinaten*

Die *Anzahl* der Bewehrungsstäbe kann über die Drehfelder oder eine Direkteingabe geändert werden. In den einzelnen Eingabezeilen im unteren Abschnitt kann dann die Lage der Stäbe angepasst werden.

Die Lage eines Bewehrungsstabes wird anhand seiner *Stab-Koordinaten* festgelegt: Die Koordinaten y und z geben den globalen Abstand vom Querschnittsschwerpunkt an, der Winkel β beschreibt die Neigung gegen die Stablängsachse für die Verankerungstypen „Haken“ und „Winkelhaken“. Eine *Hakendrehung* um den Winkel $\beta = 90^\circ$ beispielsweise bewirkt bei der oberen Bewehrung eine Drehung nach unten (d. h. in Richtung $+z$), der Winkel $\beta = 270^\circ$ dreht das Verankerungsende der unteren Bewehrung nach oben. Für den Verankerungstyp „Gerade“ ist die Spalte C bedeutungslos.



Um die Bewehrung einer Zeile zu löschen, ist das Häkchen vom Kontrollfeld *Stäbe gleichmäßig verteilen* zu entfernen. Damit wird die Schaltfläche [Löschen] zugänglich.

D
d_s
[mm]
20.0
8.0
10.0
12.0
14.0
16.0
20.0
25.0
28.0
30.0
32.0

d_s

Die Stabdurchmesser wirken sich auf die Berechnung des inneren Hebels der Kräfte und die Anzahl an Bewehrungsstäben je Lage aus. Über die Liste lässt sich der Stabdurchmesser für die aktuelle Positionsnummer ändern.

A_s

In Spalte E wird jeweils die Gesamtbewehrungsfläche aufgelistet, die sich aus der Anzahl der Stäbe und dem Durchmesser ergibt.

Länge

Für jede Position wird die Gesamtlänge eines repräsentativen Bewehrungsstabes angegeben. Der Wert setzt sich aus der erforderlichen Stablänge und den Verankerungslängen an beiden Stabenden zusammen. Er kann hier nicht editiert werden.

Stelle x von / bis

Diese Werte geben die rechnerischen Anfangs- und Endpositionen der Bewehrungsstäbe an. Sie sind jeweils auf den Stabanfangsknoten gemäß RSTAB ($x = 0$) bezogen. Bei der Ermittlung der Maße werden die Lagerbedingungen und Verankerungslängen l_1 und l_2 berücksichtigt.



Die Angaben können in den beiden Spalten nicht geändert werden. Dies ist nur über die Schaltfläche [Bewehrung bearbeiten] oberhalb der Grafik möglich (siehe Bild 5.10, Seite 112 und Bild 5.13, Seite 115).

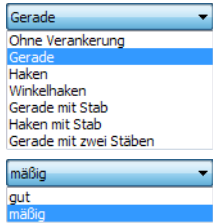
Verankerung

Verankerung
<input checked="" type="checkbox"/>
Nein
Details...

Die Verankerungslängen des Bewehrungsvorschlags können über die Liste geändert werden. Die Option *Details* ruft folgenden Bearbeitungsdialog auf.

Bild 5.12: Dialog *Verankerungen*

Dieser Dialog verwaltet die Parameter der *Verankerung am Anfang* und *am Ende* des Bewehrungsstabes.



Über die Listen lassen sich die *Verankerungsart* und der *Verbund* anpassen. Die Verankerungsart ist im [Kapitel 3.5.1](#) auf [Seite 73](#) beschrieben. BETON erkennt automatisch die Verbundbedingungen aus der Querschnittsgeometrie und der Lage des Bewehrungsstabes. Es sind jedoch benutzerdefinierte Vorgaben möglich. Das Bild 8.2 in EN 1992-1-1, 8.4.2 beschreibt gute und mäßige Verbundbedingungen.

Die *Verankerungslänge* l_1 wird mit Gleichung (8.4) nach EN 1992-1-1, 8.4.4 (1) unter Berücksichtigung der Tabelle 8.2 ermittelt. Sie kann nicht geändert werden.

Bei Haken und Winkelhaken sollte die *Verankerungslänge* l_2 nach EN 1992-1-1, 8.4.1 (2) mindestens $5 d_s$ betragen.

Der erforderliche *Biegerollendurchmesser* d_{br} wird gemäß EN 1992-1-1, Tabelle 8.1 angegeben.

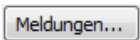
Aus den einzelnen Anteilen ergibt sich die gesamte Verankerungslänge Σ für jedes Stabende.

Masse

Hier wird für jede Position die Gesamtmasse der enthaltenen Bewehrungsstäbe angegeben.

Anmerkung

Falls eine Fußnote in der letzten Spalte angezeigt wird, liegt eine Sonderbedingung vor. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.



Alle [Meldungen] zum Bewehrungsvorschlag sind über die entsprechende Schaltfläche abrufbar. Es erscheint der Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung* (siehe [Bild 5.4, Seite 128](#)).

Bewehrungsvorschlag ändern

Im Grafikbereich der Maske wird die Längsbewehrung mit Positionsstäben dargestellt. Die aktuelle Bewehrungsposition (d. h. die Zeile, in der sich der Cursor in der Tabelle oben befindet) ist rot gekennzeichnet. Ein Klick auf die Schaltfläche [Bewehrung bearbeiten] oberhalb der Grafik ruft den Bearbeitungsdialog für diese Position auf.

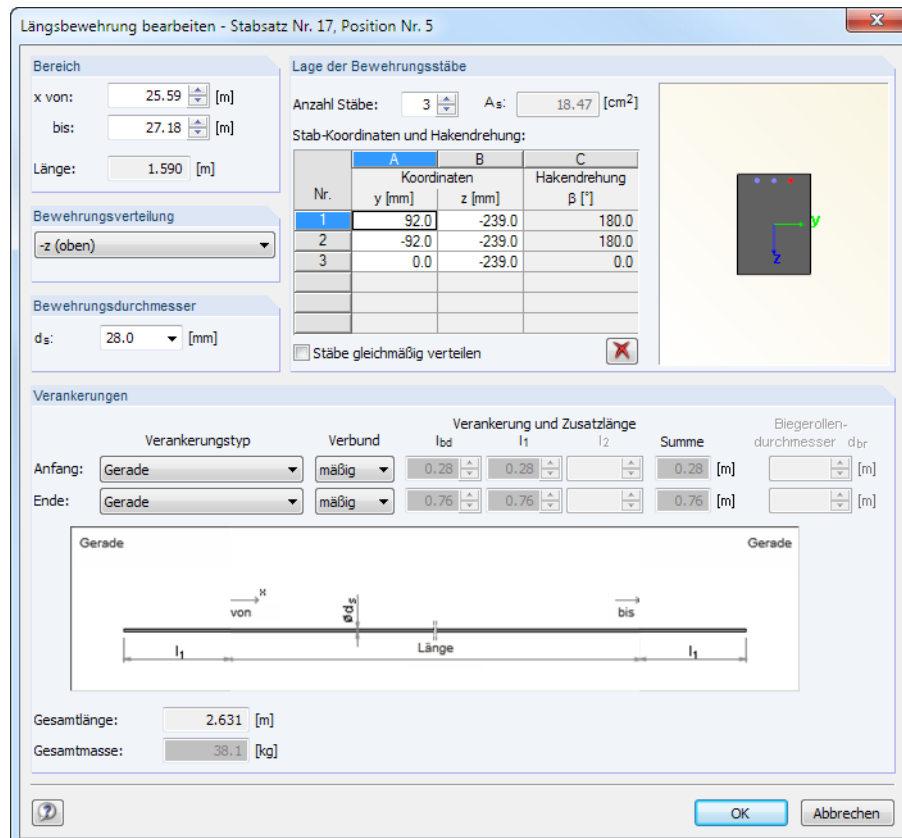
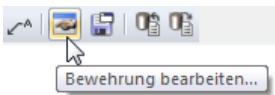


Bild 5.13: Dialog *Längsbewehrung bearbeiten*

In diesem Dialog sind die bereits beschriebenen Bewehrungsparameter zusammengefasst. Hier lassen sich die Angaben zu Bereich, Lage der Bewehrungsstäbe, Bewehrungsdurchmesser und Verankerungen kontrollieren und bei Bedarf anpassen.

Nach einer Änderung müssen die Nachweise mit der neuen Bewehrung nochmals berechnet werden. Beim Verlassen der Maske 3.1 erscheint daher eine Abfrage, ob die Sicherheit neu berechnet werden soll.

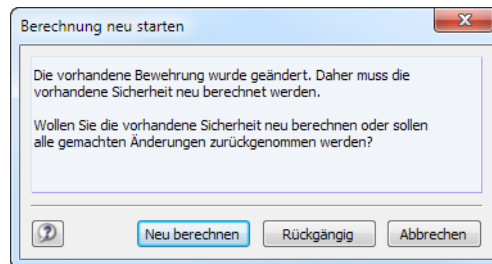


Bild 5.14: Abfrage beim Verlassen der Maske 3.1

Berechnung

Eine Ausnahme besteht für die Ergebnisse nichtlinearer Analysen: Diese werden grundsätzlich gelöscht, sodass eine manuelle [Berechnung] erforderlich ist.



Ein geänderter Bewehrungsvorschlag kann über die Schaltfläche [Speichern] als Muster abgelegt werden. Im folgenden Dialog ist der Name der Bewehrungsvorlage anzugeben.

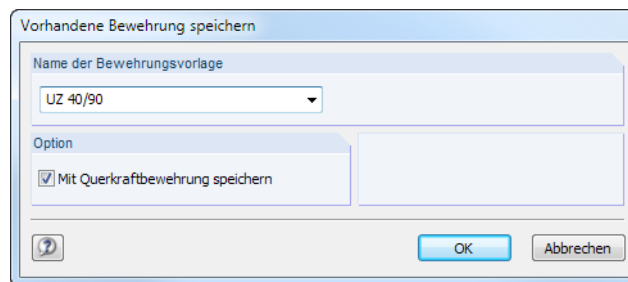


Bild 5.15: Dialog Vorhandene Bewehrung speichern

Mit diesen Vorlagen kann bei Änderungen der Bemessungsvorgaben in Maske 1.6 wieder die benutzerdefinierte Bewehrungsführung voreingestellt werden. Die Änderungen gehen nicht verloren, wenn BETON einen neuen Bewehrungsvorschlag erstellt.

Die Einlesemöglichkeit von Bewehrungsvorlagen ist im [Kapitel 3.5](#) beschrieben (siehe [Bild 3.23](#), [Seite 72](#)).

5.2.2 Vorhandene Bügelbewehrung

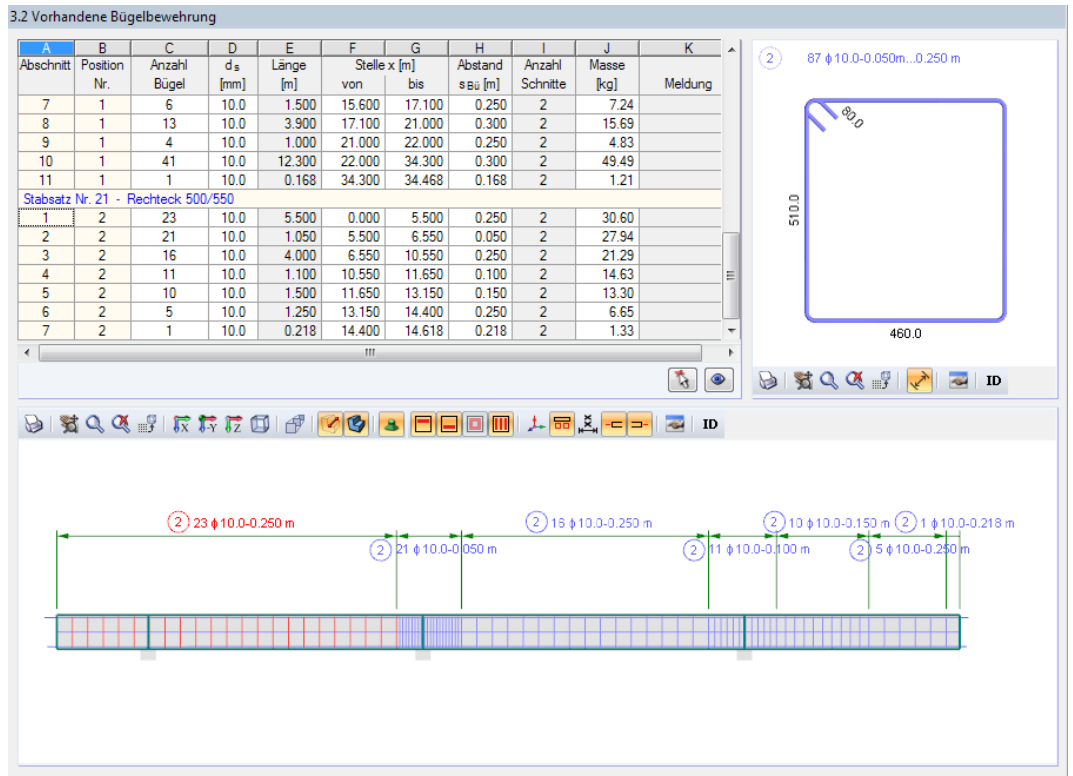


Bild 5.16: Maske 3.2 Vorhandene Bügelbewehrung

Die einzulegende Bügelbewehrung wird stab- und stabsatzweise nach *Positionen* (Bewehrungsgruppen) geordnet angegeben.

Unterhalb der Tabelle wird die Bewehrung grafisch dargestellt. Die aktuelle Position (die Zeile im Abschnitt oben, in der sich der Cursor befindet) ist rot gekennzeichnet. Die Grafik rechts zeigt den Positionsbügel einschließlich Vermaßung. Änderungen bei den Parametern in der Tabelle werden grafisch aktualisiert.

Die Schaltflächen zum Steuern der Bewehrungsgrafik sind im [Kapitel 6.1](#) auf [Seite 139](#) beschrieben.

Der Bewehrungsvorschlag berücksichtigt auch konstruktive Vorschriften. So ist beispielsweise nach EN 1992-1-1, 9.2.2 (6) als Höchstabstand $s_{1,max} = 0,75 d$ für vertikale Bügel empfohlen. Der Nationale Anhang für Deutschland gestattet in Tabelle NA9.1 auch reduzierte Längsabstände in Abhängigkeit von der Querkraftausnutzung und Betonfestigkeit.

Abschnitt

Die hier ausgewiesenen Abschnitte gliedern die Bügelbewehrung in Bereiche mit gleichen Durchmessern und Abständen (siehe auch [Kapitel 3.5.2](#), [Seite 74](#)). Die Abschnitte sind in den Spalten F bis G definiert und können dort bei Bedarf angepasst werden (siehe unten).

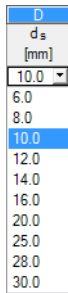
Position Nr.

Die Auflistung erfolgt nach *Positionen* geordnet, die jeweils gleiche Eigenschaften besitzen (Durchmesser, Abstand).

Die Positionen aller Stäbe und Stabsätze werden in [Maske 3.4 Stahlliste](#) zusammengefasst.

Anzahl Bügel

Bei der Ermittlung der Bügelbewehrung berücksichtigt BETON die Benutzervorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel* (siehe [Kapitel 3.5.2, Seite 74](#)).



Die Bügelanzahl lässt sich schnell ändern: Nach dem Klick in eine Zelle kann ein anderer Wert eingetragen werden. Der Bügelabstand in Spalte H wird automatisch umgerechnet.

d_s

Der Bewehrungsvorschlag benutzt die Vorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel*. Über die Liste lässt sich der Stabdurchmesser im aktuellen Abschnitt ändern.

Länge



In Spalte E wird für jeden Abschnitt die Länge des Bügelbereichs angegeben. Sie ermittelt sich aus den Anfangs- und Endstellen x und kann in dieser Spalte nicht editiert werden. Dies ist nur über die beiden folgenden Spalten oder die Schaltfläche [Bewehrung bearbeiten] möglich (siehe [Bild 5.16](#) und [Bild 5.17](#)).

Stelle x von / bis

Diese Werte geben die Anfangs- und Endpositionen des Bewehrungsabschnitts an. Sie sind auf den Stabanfangsknoten gemäß RSTAB ($x = 0$) bezogen. Die Einträge in den beiden Spalten sind editierbar, sodass die Bereichsgrenzen durch Ändern der Werte verschoben werden können.

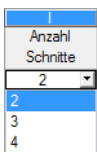


Ein Bereich lässt sich wie folgt unterteilen: Tragen Sie in Spalte F oder G eine neue Stelle x ein, die zwischen den beiden Spaltenwerten liegt. Damit wird automatisch ein neuer Bügelbereich erzeugt.

Abstand $s_{Bü}$

Bei der Ermittlung der Bügelabstände wurden die Vorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel* (siehe [Kapitel 3.5.2, Seite 74](#)) berücksichtigt. Die Werte in dieser Spalte sind editierbar. Beim manuellen Ändern eines Abstands wird die Bügelanzahl in Spalte C automatisch angepasst. Der exakte Bügelabstand wiederum errechnet sich dann auf Basis einer ganzzahligen Bügelmenge.

Anzahl Schnitte



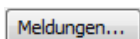
Die Schnittigkeit der Bügel basiert auf den Vorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel* (siehe [Kapitel 3.5.2, Seite 74](#)). Die Anzahl der Schnitte kann über die Liste geändert werden.

Masse

Für jeden Bügelabschnitt wird die Gesamtmasse der Bügel angegeben.

Meldung

Wird eine Fußnote in der letzten Spalte angezeigt, so liegt eine Sonderbedingung vor. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.



Alle [Meldungen] zum Bewehrungsvorschlag sind über die entsprechende Schaltfläche abrufbar. Es erscheint der Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung* (siehe [Bild 5.4, Seite 108](#)).

Bewehrungsvorschlag ändern



Im unteren Grafikbereich wird die Bügelbewehrung am Stab oder Stabzug dargestellt. Der aktuelle Bewehrungsabschnitt (d. h. die Zeile, in der sich der Cursor in der Tabelle oben befindet) ist rot gekennzeichnet. Ein Klick auf die Schaltfläche [Bewehrung bearbeiten] oberhalb der Grafik ruft den Bearbeitungsdialog für den aktuellen Bügelabschnitt auf.

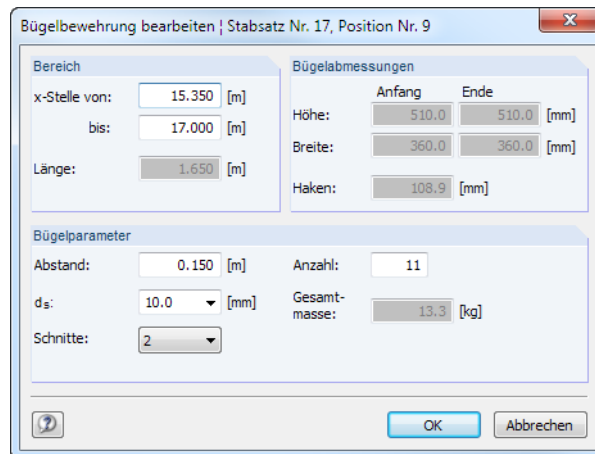


Bild 5.17: Dialog *Bügelbewehrung bearbeiten*

In diesem Dialog sind die bereits beschriebenen Bewehrungsparameter zusammengefasst. Hier lassen sich die Angaben zu *Bereich*, *Bügelabmessungen* und *Bügelparameter* kontrollieren und ggf. anpassen.

Nach einer Änderung müssen die Nachweise mit der neuen Bewehrung nochmals berechnet werden. Beim Verlassen der Maske 3.2 erscheint daher eine Abfrage, ob die Sicherheit neu berechnet werden soll (siehe [Bild 5.14, Seite 116](#)).

5.2.3 Vorhandene Bewehrung x-stellenweise

Diese Maske bietet eine x-stellenweise Auflistung der Bewehrungsquerschnitte einschließlich Anmerkungen zu den Nachweiskriterien. Bei einer Neuberechnung dem Ändern der Bewehrung in den Masken 3.1 und 3.2 werden die Ergebnisse aktualisiert.

3.3 Vorhandene Bewehrung x-stellenweise

A	B	C	D	E	F
Stelle x [m]	$A_{s,-z}$ (oben) [cm ²]	$A_{s,+z}$ (unten) [cm ²]	$A_{s,gesamt}$ [cm ²]	$a_{s,Bügel}$ [cm ² /m]	Anmerkungen
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/550					
0.000	10.30	10.30	20.61	7.85	
0.133	10.30	10.30	20.61	7.85	
0.133	12.57	10.30	22.87	7.85	
0.200	12.57	10.30	22.87	7.85	
0.200	12.57	10.30	22.87	10.47	
0.267	12.57	10.30	22.87	10.47	
0.350	12.57	10.30	22.87	10.47	
0.350	12.57	10.30	22.87	15.71	
0.400	12.57	10.30	22.87	15.71	
0.400	12.57	16.59	29.15	15.71	
0.533	12.57	16.59	29.15	15.71	
0.575	12.57	16.59	29.15	15.71	

Zwischenergebnisse - Stelle x: 0.000 m

Bewehrung			
Oberer Bewehrungsgrad	p-z (oben)	0.468	%
Unterer Bewehrungsgrad	p-z (unten)	0.366	%
Bügelbewehrungsgrad	p-w	0.196	%
Längsbewehrungssicherheit oben	$A_{s,-z}$ (oben), vor	1.47	
Längsbewehrungssicherheit unten	$A_{s,+z}$ (unten), vc	2.95	
Bügelssicherheit	$a_{s,w}$, vorh. / a_{s}	1.08	
Erforderliche Bewehrung oben	$A_{s,-z}$ (oben), erf	6.99	cm ²
Erforderliche Bewehrung unten	$A_{s,+z}$ (unten), erf	3.49	cm ²
Erforderliche Bügelbewehrung	$a_{s,Bügel}$, erf.	7.30	cm ² /m
Querbewehrung für Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten	a_{st}	-	

Dehnungszustand			
Bemessungsschnittgrößen			
Maßgebende Belastung	LF/LK/EK	EK23	
Normalkraft	N _{Ed}	0.0	kN
Moment um die y-Achse	M _{Ed,y}	4.6	kNm
Moment um die z-Achse	M _{Ed,z}	0.0	kNm
Bemessungsmoment			
Bemessungsmoment - Maximum	M _{y,Eds,max}	4.6	kNm

Bild 5.18: Maske 3.3 Vorhandene Bewehrung x-stellenweise

In der Tabelle oben werden die Längs- und Bügelbewehrungsquerschnitte an den einzelnen Stabstellen angegeben. Der untere Abschnitt der Maske listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Zeile auf.

Stelle x

Die vorhandenen Bewehrungsflächen sind für jeden Stab nach x-Stellen geordnet:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung (siehe RSTAB-Tabelle 1.6)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RSTAB-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Globale Berechnungsparameter*)
- Extremwerte der Schnittgrößen



Bei gestaffelten Bewehrungen erscheinen zwei gleiche x-Stellen mit den beiden Bewehrungswerten an der Bereichsgrenze.

$A_{s,-z}$ (oben)

Dieser Wert gibt den Bewehrungsquerschnitt der vorhandenen oberen Längsbewehrung an.

$A_{s,+z}(\text{unten})$

Dieser Wert repräsentiert den Bewehrungsquerschnitt der vorhandenen unteren Längsbewehrung.

$A_{s,\text{gesamt}}$

Die vorhandene Gesamt-Längsbewehrung ermittelt sich aus den Werten der Spalten B und C.

$a_{s,\text{Bügel}}$

In dieser Spalte wird der Querschnitt der vorhandenen Bügelbewehrung angegeben.

Anmerkungen

Die Bedeutung der Fußnoten ist in der Statusleiste näher erläutert.



Die *Zwischenergebnisse* im unteren Abschnitt ermöglichen eine gezielte Kontrolle der Nachweise. Die Bemessungsdetails beziehen sich auf die Stelle x , die in der Tabelle oben markiert ist. Beim Klick in eine andere Tabellenzeile werden sie automatisch aktualisiert.

In den Zwischenergebnissen finden sich auch die Bewehrungsgrade und Sicherheiten der gewählten Bewehrung, d. h. dem Verhältnis von vorhandener zu erforderlicher Bewehrung. Die Sicherheit der Längsbewehrung wird dabei mit einem vergrößerten Moment nachgewiesen, welches das Versatzmaß berücksichtigt.

5.2.4 Stahlliste

In Maske 3.4 sind die vorgesehenen Bewehrungsstäbe positionsweise aufgelistet. Die Tabelle ist nicht editierbar.

3.4 Stahlliste

A Position Nr.	B Bewehrungs- typ	C d_s [mm]	D Ober- fläche	E Anzahl Stäbe	F Länge [m]	G Verankerungstyp		I Biegerollen- durchmesser [m]	J Masse [kg]
						Anfang	Ende		
Material Nr. 1 - Betonstahl									
1	Längs	12.0	gerippt	2	2.606	Gerade	Gerade		4.6
2	Längs	12.0	gerippt	2	3.235	Gerade	Gerade		5.7
3	Längs	12.0	gerippt	2	3.198	Gerade	Gerade		5.7
4	Längs	12.0	gerippt	2	1.965	Gerade	Gerade		3.5
5	Längs	12.0	gerippt	2	35.700	Ohne Verankerung	Ohne Verankerung		63.4
6	Längs	12.0	gerippt	2	2.052	Gerade	Gerade		3.6
7	Längs	12.0	gerippt	2	1.902	Gerade	Gerade		3.4
8	Längs	12.0	gerippt	4	2.592	Gerade	Gerade		9.2
9	Längs	12.0	gerippt	8	2.178	Gerade	Gerade		15.5
10	Längs	12.0	gerippt	4	2.455	Gerade	Gerade		8.7
11	Längs	12.0	gerippt	4	2.197	Gerade	Gerade		7.8
12	Längs	12.0	gerippt	4	2.961	Gerade	Gerade		10.5
13	Längs	12.0	gerippt	1	3.259	Gerade	Gerade		2.9
14	Längs	12.0	gerippt	2	4.026	Gerade	Gerade		7.1
15	Längs	12.0	gerippt	2	2.767	Gerade	Gerade		4.9
16	Längs	12.0	gerippt	2	3.347	Gerade	Gerade		5.9
17	Längs	12.0	gerippt	2	3.117	Gerade	Gerade		5.5
18	Längs	12.0	gerippt	2	3.470	Gerade	Gerade		6.2
19	Längs	12.0	gerippt	2	34.469	Ohne Verankerung	Ohne Verankerung		61.2
20	Längs	16.0	gerippt	4	35.967	Gerade	Gerade		227.1
21	Längs	16.0	gerippt	4	35.956	Gerade	Gerade		227.0
22	Längs	16.0	gerippt	8	34.629	Gerade	Gerade		437.2
23	Längs	20.0	gerippt	1	2.549	Gerade	Gerade		6.3
24	Längs	20.0	gerippt	2	3.479	Gerade	Gerade		17.2
25	Längs	20.0	gerippt	2	4.338	Gerade	Gerade		21.4
26	Längs	20.0	gerippt	2	3.291	Gerade	Gerade		16.2
27	A-s, Bügel	10.0	gerippt	295	1.958	Haken	Haken	0,040	356.1
Summe				369					1544.0

Bild 5.19: Maske 3.4 Stahlliste

Position Nr.

Die Auflistung der Bewehrungsstäbe erfolgt nach *Positionen* geordnet, die gleiche Eigenschaften aufweisen (Durchmesser, Länge, Verankerungstyp etc.)



Die Positionsnummern sind nicht mit den Nummern der Masken 3.1 und 3.2 identisch.

Bewehrungstyp

Diese Spalte gibt an, ob es sich um eine *Längs*- oder eine $A_{s,Bügel}$ -Bewehrung handelt.

d_s

Spalte C benennt die verwendeten Stabdurchmesser.

Oberfläche

In Spalte D wird angegeben, ob die Oberfläche des Bewehrungsstahls *gerippt* oder *glatt* ist.

Anzahl Stäbe

Hier kann die Anzahl gleichartiger Bewehrungsstäbe in jeder Position abgelesen werden.

Länge

Für jede Position wird die Gesamtlänge eines repräsentativen Bewehrungsstabes angegeben.

Verankerungstyp Anfang / Ende

Die beiden Spalten informieren über die Verankerungstypen am Anfang und Ende der Bewehrungsstäbe (*Ohne Verankerung, Gerade, Haken* etc.)

Biegerollendurchmesser

Bei Bügeln und Haken wird der Biegerollendurchmesser d_{br} angegeben.

Masse

Hier wird für jede Position die Gesamtmasse der enthaltenen Bewehrungsstäbe ausgewiesen.

Summe

Am Ende der Stahlliste wird die Gesamtanzahl der Bewehrungsstäbe sowie die Masse des insgesamt benötigten Bewehrungsstahls angegeben. Die Summen ermitteln sich aus den Werten der Positionen oberhalb.

5.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Die Ergebnismasken 4.1 bis 4.4 werden angezeigt, wenn in Maske 1.1 die Bemessung für *Gebrauchstauglichkeit* festgelegt wurde (siehe Kapitel 3.1.2, Seite 58) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe Kapitel 5.1.5, Seite 111 und Kapitel 5.2.3, Seite 120).

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden mit der Bewehrungsanordnung geführt, die in den Masken 3.1 und 3.2 als *Vorhandene Bewehrung* vorliegt.

5.3.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis querschnittsweise

Der obere Teil der Maske bietet eine Zusammenfassung der maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise. Im unteren Abschnitt werden die *Zwischenergebnisse* des aktuellen Stabs (die Zeile, die in der Tabelle oben markiert ist) mit allen bemessungsrelevanten Parametern ausgewiesen. Die Kapitel lassen sich mit [+] öffnen und mit [-] schließen

4.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis querschnittsweise

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 400/550								
1	0.000	EK25	u _{z, lokal}	1.9	18.2	mm	0.10	
9	5.253	EK25	σ _c	-11.6	-13.5	N/mm ²	0.87	
9	5.253	EK25	σ _s	237.3	400.0	N/mm ²	0.60	
1	0.000	EK25	A _{s, min}	0.00	0.00	cm ²	0.00	
37	2.771	EK25	lim d _s	0.014	0.038	m	0.37	
1	0.000	EK25	lim s _l	0.256	0.300	m	0.86	
23	0.000	EK25	w _k	0.278	0.300	mm	0.93	
Querschnitt Nr. 6 - Rechteck 500/550								
90	0.000	EK25	u _{z, lokal}	8.9	58.5	mm	0.15	
93	1.600 - links	EK25	σ _c	-12.5	-13.5	N/mm ²	0.93	
93	1.600 - links	EK25	σ _s	200.6	400.0	N/mm ²	0.51	
90	0.000	EK25	A _{s, min}	0.00	0.00	cm ²	0.00	

Max: 0.93 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 37 - x-Stelle: 2.771 m

- Dehnungszustand
 - Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen
 - Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers
 - Berechnungsparameter

Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	w _{k, -z (oben), grenz}	0.300	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	w _{k, +z (unten), grenz}	0.300	mm
Zentrische Zugfestigkeit des Betons	f _{ct, eff, wk}	2.9	N/mm ²
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f _{ctm}	2.9	N/mm ²
Bauteilbreite	b _w	400.0	mm
Bauteilhöhe	h	275.0	mm
Maximaler Stabdurchmesser an der Oberseite (-z)	d _{s, max, -z (oben)}	0.000	m
Maximaler Stabdurchmesser an der Unterseite (+z)	d _{s, max, +z (unten)}	0.038	m
 - Vorhandener Stabdurchmesser

Stabdurchmesser an der Oberseite (-z)	d _{s, exist, -z (oben)}	0.000	m
Stabdurchmesser an der Unterseite (+z)	d _{s, exist, +z (unten)}	0.009	m
 - Nachweis

Vorhandener Stabdurchmesser auf der Oberseite (-z)	d _{s, exist, -z (oben)}	0.000	m
Maximaler Stabdurchmesser an der Oberseite (-z)	d _{s, max, -z (oben)}	0.000	m

Bild 5.20: Maske 4.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis querschnittsweise

Die Nachweise sind nach Querschnitten geordnet. Es werden jeweils die ungünstigsten Werte der Kriterien ausgegeben, die für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit infrage kommen. Diese basieren auf den Parametern der Bewehrungsätze zur Rissbreitenbegrenzung (siehe Kapitel 3.5.7, Seite 84), der vorhandenen Bewehrung und den Schnittgrößen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.



Grundsätzlich muss nur eines der Kriterien *lim d_s*, *lim s_l* oder *w_k* für den Nachweis der Rissbreite erfüllt sein. In EN 1992-1-1, 7.2 ist erläutert, unter welchen Bedingungen die Spannungen zu begrenzen sind. Es müssen also nicht alle in Maske 4.1 ausgewiesenen Ausnutzungen kleiner als 1 sein, damit der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ist!

Stab Nr.



Für jeden Querschnitt werden die Nummern der Stäbe angegeben, deren Ergebniswerte (Spalte E) bzw. Ausnutzungen (Spalte H) am größten sind. Mit der [Sortieren]-Schaltfläche kann der Bezug gesteuert werden.

Stelle x

Es wird jeweils die x-Stelle im Stab angegeben, an der die ungünstigsten Werte bzw. Ausnutzungen auftreten. Die Abstände beziehen sich auf die Anfangsknoten der Stäbe.

Lastfall

In dieser Spalte sind die Nummern der maßgebenden Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet.

Typ

Typ
$u_{z, \text{lokal}}$
σ_c
σ_s
$A_{s, \text{min}}$
lim d _s
lim s ₁
w _k

Spalte D gibt die Kriterien an, die für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit infrage kommen. Je nach Vorgabe in Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Gebrauchstauglichkeit* werden bis zu sieben Nachweistypen angezeigt.

$u_{z, \text{lokal}}$

Hier handelt es sich um den Absolutwert der Durchbiegung, der in Richtung der lokalen Stabachse z vorliegt.

Die zulässigen relativen Verformungen werden in Maske *1.7 Durchbiegungsdaten* verwaltet (siehe [Kapitel 3.6, Seite 93](#)).

σ_c

Dieser Parameter beschreibt die Betonspannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

σ_s

Die Spannungen in der Bewehrung bei gerissener Zugzone ermitteln sich als Produkt von Stahldehnung und E-Modul:

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$$

$A_{s, \text{min}}$

Die Mindestquerschnittsfläche der Betonstabstahlbewehrung beträgt gemäß EN 1992-1-1, 7.3.2, Gl. (7.1):

$$A_{s, \text{min}} = k_c \cdot k \cdot f_{ct, \text{eff}} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

mit

k_c : Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung im Querschnitt vor der Erstrissbildung

k : Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear über den Querschnitt verteilten Eigenspannungen

$f_{ct, \text{eff}}$: Mittelwert der wirksamen Betonzugfestigkeit beim Auftreten der Risse

A_{ct} : Betonzugzone im ungerissenen Zustand bei Erstrissbildung

σ_s : Zulässige Stahlspannung unmittelbar nach der Rissbildung (ggf. in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser oder Höchstwert der Stababstände)

lim d_s

Die Betonstahl-Grenzdurchmesser sind nach dem vereinfachten Nachweisverfahren gemäß EN 1992-1-1, 7.3.3 auf die in Tabelle 7.2 genannten Maße begrenzt (siehe [Bild 2.3, Seite 15](#)).

lim s_l

Nach dem vereinfachten Nachweisverfahren gemäß EN 1992-1-1, 7.3.3 sind die zulässigen Stababstände auf die in Tabelle 7.3 genannten Höchstwerte begrenzt (siehe [Bild 2.4, Seite 16](#)).

w_k

Die charakteristische Rissbreite ermittelt sich nach EN 1992-1-1, 7.3.4, Gl. (7.8) wie folgt:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

mit

$s_{r,max}$: Maximaler Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild (siehe [Kapitel 2.2.4, Seite 16](#))

ϵ_{sm} : Mittlere Dehnung der Bewehrung unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen

ϵ_{cm} : Mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen

Vorhandener Wert

In dieser Spalte werden die Werte angegeben, die für jeden Querschnitt für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend sind.

Grenzwert

Die Grenzwerte ermitteln sich aus den Normvorgaben und der Belastungssituation. Im [Kapitel 2.2](#) ab [Seite 14](#) ist die Ermittlung der Grenzwerte beschrieben.

Ausnutzung

Max: 0.59 ≤ 1

In der Spalte H wird das Verhältnis von vorhandenem Wert (Spalte E) zu Grenzwert (Spalte F) ausgegeben. Bei Ausnutzungen größer 1 ist der Nachweis nicht erfüllt. Die Länge des farbigen Balkens stellt die Ausnutzung jeweils in grafischer Form dar.

Hinweis

Die letzte Spalte verweist auf Probleme oder Bemerkungen, die sich bei der Durchführung der Nachweise ergeben haben. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Alle [Meldungen] sind über die links dargestellte Schaltfläche abrufbar. Es erscheint der Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung*.

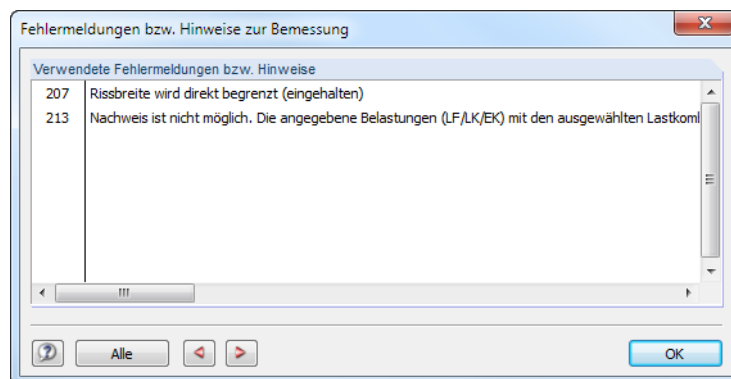


Bild 5.21: Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung*

Die Schaltflächen unterhalb der Tabelle sind mit folgenden Funktionen belegt:

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Sortierung	Ordnet die Ergebnisse nach maximalen Ausnutzungen (Spalte H) oder maximalen Werten (Spalte E)
	Überschreitung	Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzung größer als 1 ist
	Stabauswahl	Ermöglicht die grafische Auswahl eines Stabes, um dessen Ergebnisse in der Tabelle anzuzeigen
	Relationsbalken	Blendet die farbigen Bezugsskalen ein und aus
	Ansichtsmodus	Ermöglicht den Wechsel in das RSTAB-Arbeitsfenster, um die Ansicht zu ändern

Tabelle 5.2: Schaltflächen in den Ergebnismasken 4.1 bis 4.4

5.3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabsatzweise

4.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabsatzweise

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
Stabsatz Nr. 17 - Rechteck 400/550								
1	0.000	EK25	Uz_lokal	1.9	18.2	mm	0.10	
3	0.800 - rechts	EK25	σ_c	-7.8	-13.5	N/mm ²	0.58	
4	0.900	EK25	σ_s	180.3	400.0	N/mm ²	0.46	
1	0.000	EK25	$A_{s,min}$	0.00	0.00	cm ²	0.00	
23	0.000	EK25	lim d_s	0.015	0.041	m	0.36	
1	0.000	EK25	lim s_l	0.256	0.300	m	0.86	
23	0.000	EK25	w_k	0.278	0.300	mm	0.93	
Stabsatz Nr. 19 - Rechteck 400/550								
9	0.000	EK25	Uz_lokal	4.1	37.9	mm	0.11	
9	5.253	EK25	σ_c	-11.6	-13.5	N/mm ²	0.87	
9	5.253	EK25	σ_s	237.3	400.0	N/mm ²	0.60	
9	0.000	EK25	$A_{s,min}$	0.00	0.00	cm ²	0.00	

Max: 0.93 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1 - x-Stelle: 0.000 m

- Dehnungszustand
 - Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen

Zentrische Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff,wk}$	2.9	N/mm ²
Betonspannung am oberen Querschnittsrand	$\sigma_{c,l,-z}$ (oben),Ed	0.0	N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	$\sigma_{c,l,+z}$ (unten),Ed	0.1	N/mm ²

Beton wird nicht gerissen.
 - Bestimmen des maximalen Bewehrungsabstands
 - Berechnungsparameter

Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z}$ (oben),grenz	0.300	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,+z}$ (unten),grenz	0.300	mm
Maximaler Stababstand an der Oberseite (-z)	$s_{l,max,-z}$ (oben)	0.300	m
Maximaler Stababstand an der Unterseite (+z)	$s_{l,max,+z}$ (unten)	0.300	m
 - Vorhandener Stababstand

Vorhandener Stababstand an der Oberseite (-z)	$s_{l,vorh,-z}$ (oben)	0.400	m
Vorhandener Stababstand an der Unterseite (+z)	$s_{l,vorh,+z}$ (unten)	0.256	m
 - Nachweis

Vorhandener Stababstand an Unterseite (+z)	$s_{l,vorh,+z}$ (unten)	0.256	m
Maximaler Stababstand an der Unterseite (+z)	$s_{l,max,+z}$ (unten)	0.300	m

Bild 5.22: Maske 4.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabsatzweise

Diese Maske listet die maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise für jeden der untersuchten Stabsätze auf. Die Spalten sind im Kapitel 5.3.1 erläutert.

5.3.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise

4.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
Stab Nr. 19 - Rechteck 400/550								
19	0.000	EK25	Uz.lokal	1.5	14.8	mm	0.10	
19	0.900	EK25	σ_c	-6.0	-13.5	N/mm ²	0.45	
19	0.900	EK25	σ_s	158.9	400.0	N/mm ²	0.40	
19	0.000	EK25	$A_{s,min}$	0.00	0.00	cm ²	0.00	
19	0.900	EK25	lim d _s	0.015	0.041	m	0.36	
19	0.000	EK25	lim s _l	0.256	0.300	m	0.86	
19	0.900	EK25	w _k	0.278	0.300	mm	0.93	
Stab Nr. 20 - Rechteck 400/550								
20	0.000	EK25	Uz.lokal	7.2	37.9	mm	0.19	
20	5.400	EK25	σ_c	-9.8	-13.5	N/mm ²	0.73	
20	5.400	EK25	σ_s	214.2	400.0	N/mm ²	0.54	
20	0.000	EK25	$A_{s,min}$	0.00	0.00	cm ²	0.00	

Max: 0.93 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 19 - x-Stelle: 0.900 m

Dehnungszustand

Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen

Zentrische Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff,wk}$	2.9	N/mm ²
Betonspannung am oberen Querschnittsrand	$\sigma_{c,l,-z}$ (oben),Ed	2.9	N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	$\sigma_{c,l,+z}$ (unten),Ed	-2.9	N/mm ²

Beton reißt auf.

Bestimmen des maximalen Rissabstands

Maximaler Rissabstand an der Oberseite (-z)	$s_{r,max,-z}$ (oben)	0.000	m
Maximaler Rissabstand an der Unterseite (+z)	$s_{r,max,+z}$ (unten)	0.584	m

Bestimmen der Differenz der mittleren Dehnung

Bestimmen des Rechenwerts der Rissbreite

Zulässige Rissbreiten

Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$ (oben)	0.300	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,+z,grenz}$ (unten)	0.300	mm

Nachweis

Rissbreite an Unterseite (+z)	$w_{k,+z}$ (unten)	0.278	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,+z,grenz}$ (unten)	0.300	mm
Nachweiskriterium	Kriterium	0.93	

Bild 5.23: Maske 4.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise

Die Ausgabe der GZG-Nachweise (siehe Kapitel 5.3.1) erfolgt hier nach Stäben geordnet.

5.3.4 Gebrauchstauglichkeitsnachweis x-stellenweise

4.4 Gebrauchstauglichkeitsnachweis x-stellenweise

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
91	3.198	EK25	Uz.lokal	9.6	9.9	mm	0.97	
		EK25	σ_c	-0.8	-13.5	N/mm ²	0.07	
		EK25	σ_s	2.6	400.0	N/mm ²	0.01	
		EK25	lim d _s	0.020	-	m	0.00	215)
		EK25	lim s _l	0.046	-	m	0.00	215)
		EK25	w _k	0.000	0.300	mm	0.00	215)
91	3.338	EK25	Uz.lokal	9.7	9.9	mm	0.99	
		EK25	σ_c	-0.5	-13.5	N/mm ²	0.04	
		EK25	σ_s	2.3	400.0	N/mm ²	0.01	
		EK25	lim d _s	0.020	-	m	0.00	215)
		EK25	lim s _l	0.046	-	m	0.00	215)
		EK25	w _k	0.000	0.300	mm	0.00	215)
91	3.477	EK25	Uz.lokal	9.9	9.9	mm	1.00	

Max: 1.42 > 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 91 - x-Stelle: 3.198 m

Dehnungszustand

Bestimmen der Durchbiegung

Berechnungsparameter

Maximale zulässige Durchbiegung laut Benutzervorgabe	$u_{l,z,grenz}$	9.9	mm
Zentrische Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff,wk}$	2.9	N/mm ²
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.9	N/mm ²
Wirksamer Beton-Elastizitätsmodul	$E_{c,eff}$	33000.0	N/mm ²
Verteilungsbeiwert	ζ	0.57	
Durchbiegung	$u_{l,z}$	9.6	mm

Nachweis

Maximale zulässige Durchbiegung laut Benutzervorgabe	$u_{l,z,grenz}$	9.9	mm
Durchbiegung	$u_{l,z}$	9.6	mm
Nachweiskriterium	Kriterium	0.97	

Bild 5.24: Maske 4.4 Gebrauchstauglichkeitsnachweis x-stellenweise

Diese Maske listet die einzelnen Nachweise (siehe Kapitel 5.3.1) nach x-Stellen geordnet auf.

5.4 Brandschutznachweis

Die Ergebnismasken 5.1 bis 5.4 werden angezeigt, wenn in Maske 1.1 die Bemessung für den *Brandschutz* aktiviert wurde (siehe [Kapitel 3.1.4, Seite 61](#)) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe [Kapitel 111, Seite 111](#) und [Kapitel 120, Seite 120](#)).

Die Brandschutzbemessung wird mit der Bewehrungsanordnung durchgeführt, die in den Masken 3.1 und 3.2 als *Vorhandene Bewehrung* vorliegt.

5.4.1 Brandschutznachweis querschnittsweise

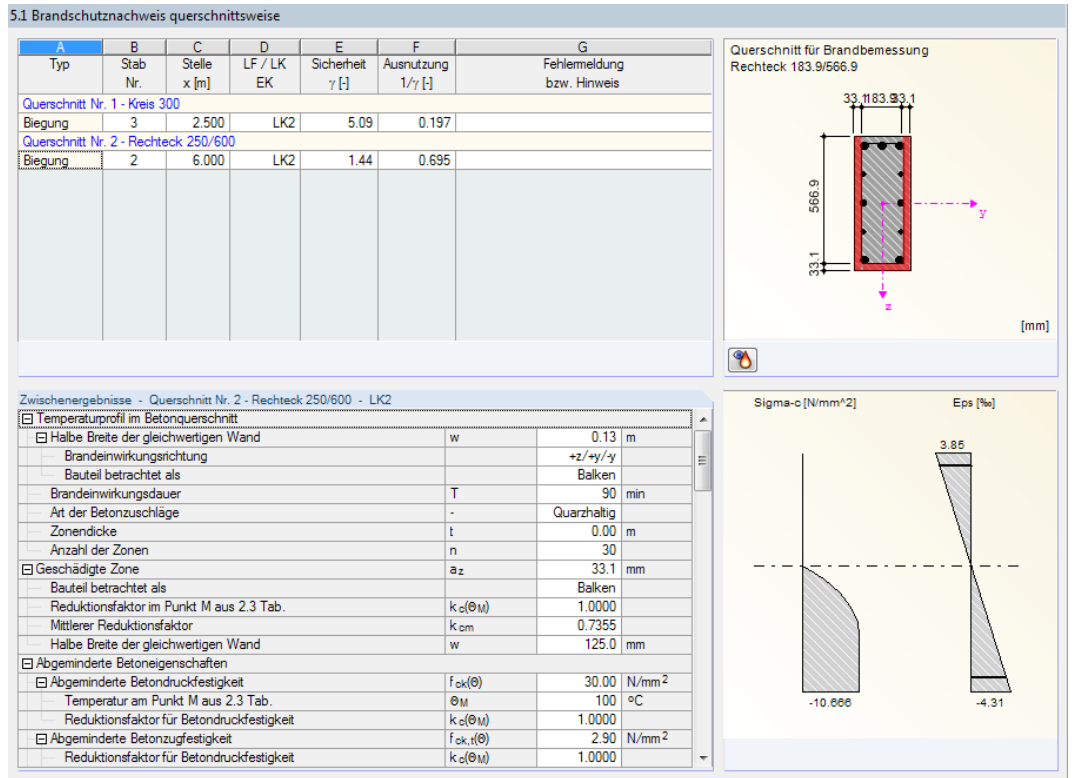


Bild 5.25: Maske 5.1 Brandschutznachweis querschnittsweise

Diese Übersicht enthält die kleinsten Sicherheiten bzw. größten Ausnutzungen der einzelnen Querschnitte im Brandfall. Sie resultieren aus den Parametern der Bewehrungsätze für die Brandnachweise (siehe [Kapitel 61, Seite 61](#)), der vorhandenen Bewehrung und den Schnittgrößen der relevanten Einwirkungen.

Der untere Abschnitt listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Tabellenzeile auf. Diese Bemessungsdetails ermöglichen eine gezielte Bewertung der Ergebnisse. Beim Klick in eine andere Tabellenzeile oben aktualisieren sich die Zwischenergebnisse.

Der theoretische Hintergrund zur „Heißbemessung“ ist im [Kapitel 24, Seite 24](#) beschrieben.

Typ

Die Sicherheiten und Ausnutzungen sind nach Querschnitten geordnet aufgelistet. Neben den Nachweisen für die *Biegung* werden auch die Sicherheiten für *Querkraft* und *Torsion* ausgewiesen, sofern diese Nachweise in Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Brandschutz* vorgegeben wurden (siehe [Bild 3.46, Seite 91](#)).

Stab Nr.

Hier werden die Nummern der Stäbe angegeben, die jeweils die größten Ausnutzungen aufweisen.

Stelle x

Es wird jeweils die x-Stelle im Stab angegeben, die für die Brandbemessung maßgebend ist. Zur tabellarischen Ausgabe werden diese RSTAB-Stabstellen x herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung (siehe RSTAB-Tabelle 1.6)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RSTAB-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Globale Berechnungsparameter*)
- Extremwerte der Schnittgrößen

LF / LK / EK

In Spalte D werden die Nummern der Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen angegeben, die für die jeweiligen Nachweise maßgebend sind.

Sicherheit γ

Spalte E gibt Auskunft über die kleinsten Sicherheitsfaktoren γ einer jeden Nachweisart. Ist die Sicherheit kleiner als 1, so ist der Brandschutznachweis nicht erfüllt. Die Ergebniszeile wird rot dargestellt.

Ausnutzung $1/\gamma$

Die Einträge in dieser Spalte stellen die Kehrwerte der Sicherheiten (Spalte E) dar. Damit lässt sich schnell abschätzen, welche Reserven bis zum Erreichen des Grenzwertes 1 im Querschnitt bestehen.

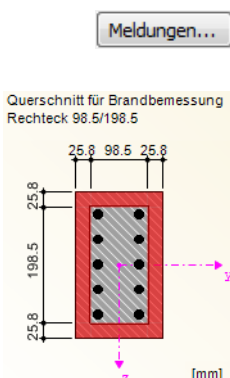
Der Abschnitt *Zwischenergebnisse* informiert, wie die vorhandenen Sicherheiten aus dem Verhältnis von Bruchschnittgröße im Brandfall zu einwirkender Schnittgröße gebildet werden.

☐ Nachweis			
☐ Ausnutzungsgrad der Biegebewehrung	$1/\gamma_{SL,fi}$	0.6949	
☐ Vorhandene Biegesicherheit	$\gamma_{SL,fi}$	1.4390	
☐ Einwirkende Schnittgrößen			
☐ Moment um die y-Achse	$M_{y,Ed,fi}$	-111.87	kNm
☐ Moment um die z-Achse	$M_{z,Ed,fi}$	0.00	kNm
☐ Normalkraft	$N_{Ed,fi}$	1.65	kN
☐ Bruchschnittgrößen			
☐ Bruchmoment um die y-Achse	$M_{y,Rd,fi}$	-160.98	kNm
☐ Bruchmoment um die z-Achse	$M_{z,Rd,fi}$	0.00	kNm
☐ Bruchnormalkraft	$N_{Rd,fi}$	2.38	kN

Bild 5.26: Abschnitt *Zwischenergebnisse* mit Bemessungsdetails

Fehlermeldung bzw. Hinweis

Die letzte Spalte verweist auf Unbemessbarkeiten oder Bemerkungen, die während der Bemessung aufgetreten sind. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert. Über die Schaltfläche [Meldungen] sind alle Hinweise zum aktuellen Bemessungsfall einsehbar.



Temperaturprofil

Rechts neben der Tabelle wird der Ersatzquerschnitt grafisch dargestellt, der für die Brandbemessung verwendet wird. Die geschädigte Zone a_z ist rot gekennzeichnet (vgl. auch Bild 2.7, Seite 24)



Über die Schaltfläche [Temperaturprofil] unterhalb der Grafik kann der Temperaturverlauf im aktuellen Querschnitt abgelesen werden. Es erscheint folgender Dialog.

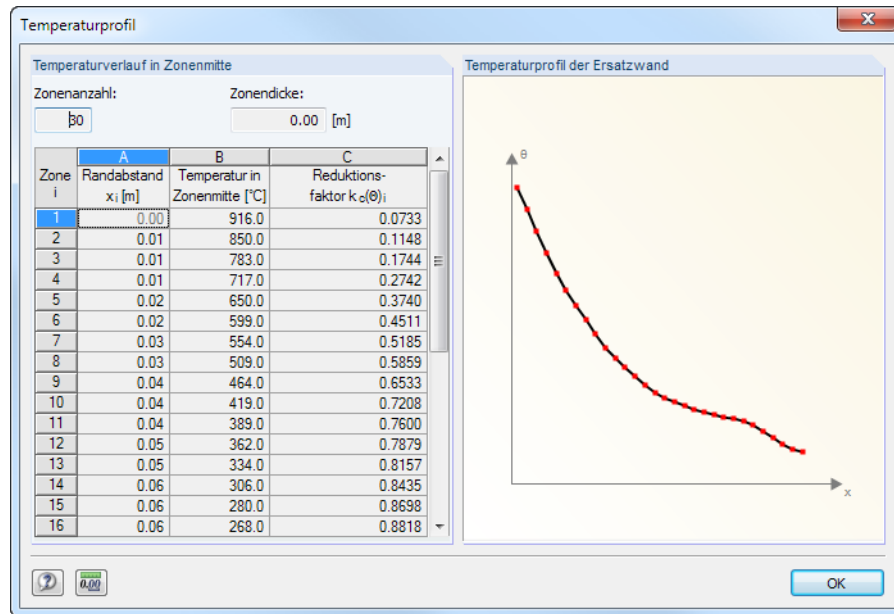


Bild 5.27: Dialog Temperaturprofil

Die Tabelle beschreibt den *Temperaturverlauf in Zonenmitte* (siehe Kapitel 2.3.2, Seite 25). Grafisch wird das *Temperaturprofil der Ersatzwand* gemäß EN 1992-1-2, Anhang A dargestellt.

5.4.2 Brandschutznachweis stabsatzweise

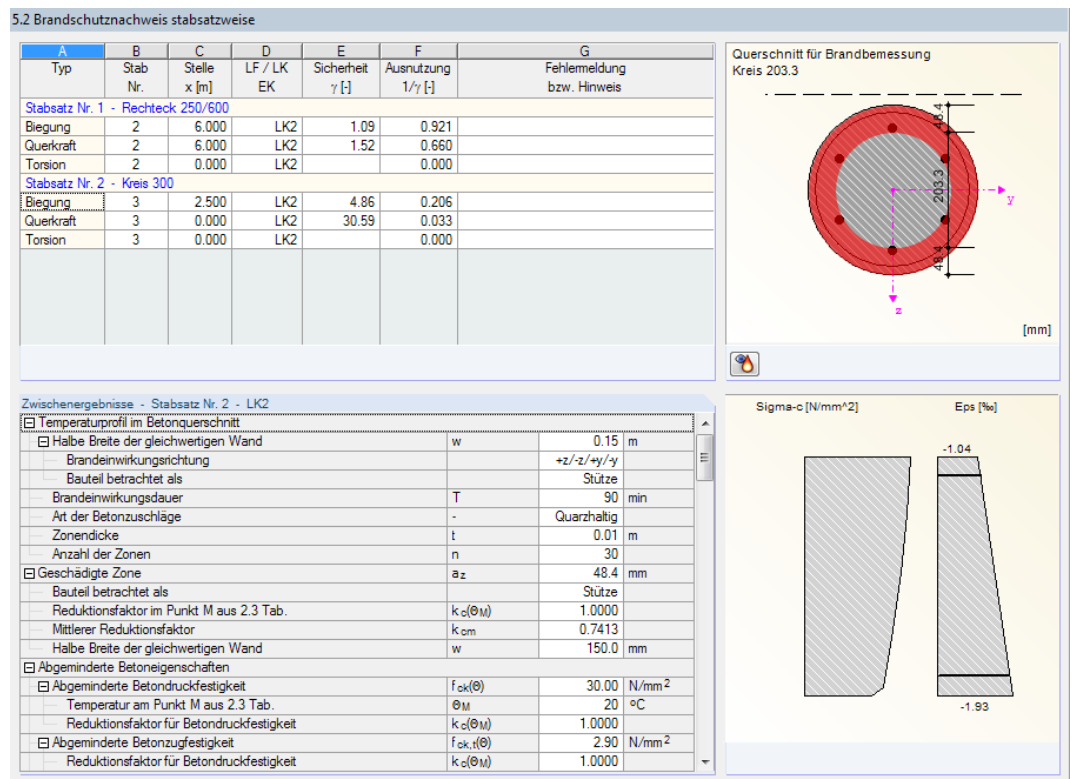


Bild 5.28: Maske 5.2 Brandschutznachweis stabsatzweise

Wurden Stabsätze für die Bemessung ausgewählt, so gibt diese Maske die Brandschutznachweise nach Stabsätzen geordnet aus. Die Spalten sind im Kapitel 5.4.1 erläutert.

5.4.3 Brandschutznachweis stabweise

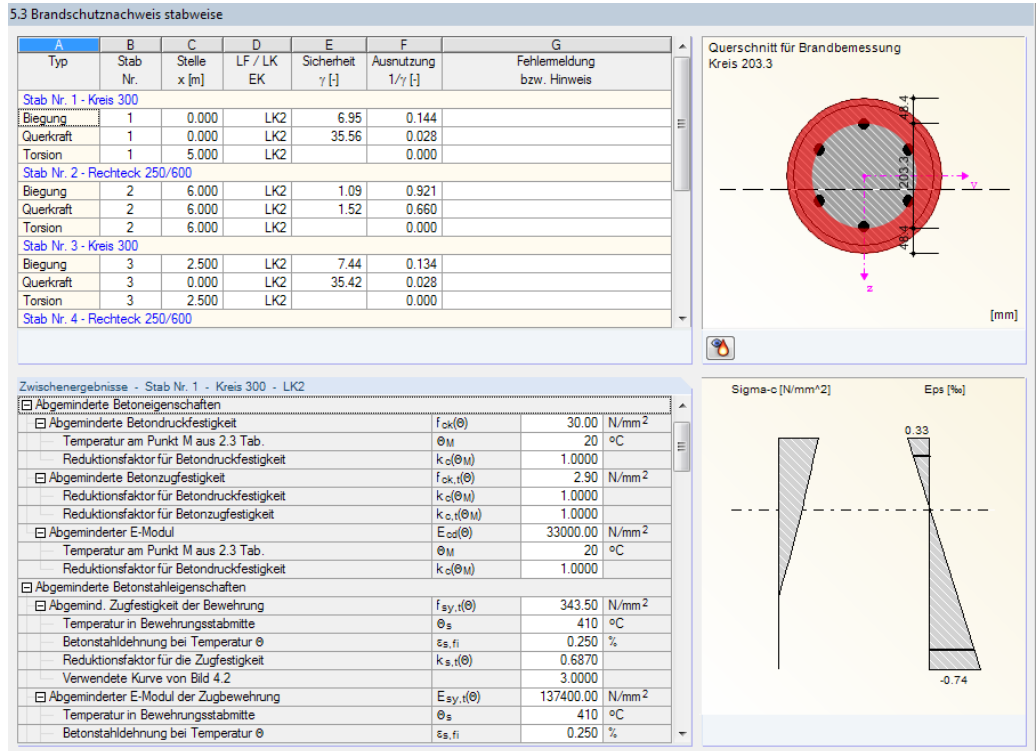


Bild 5.29: Maske 5.3 Brandschutznachweis stabweise

In dieser Maske erfolgt die Ausgabe der Brandschutznachweise nach Stäben geordnet.

5.4.4 Brandschutznachweis x-stellenweise

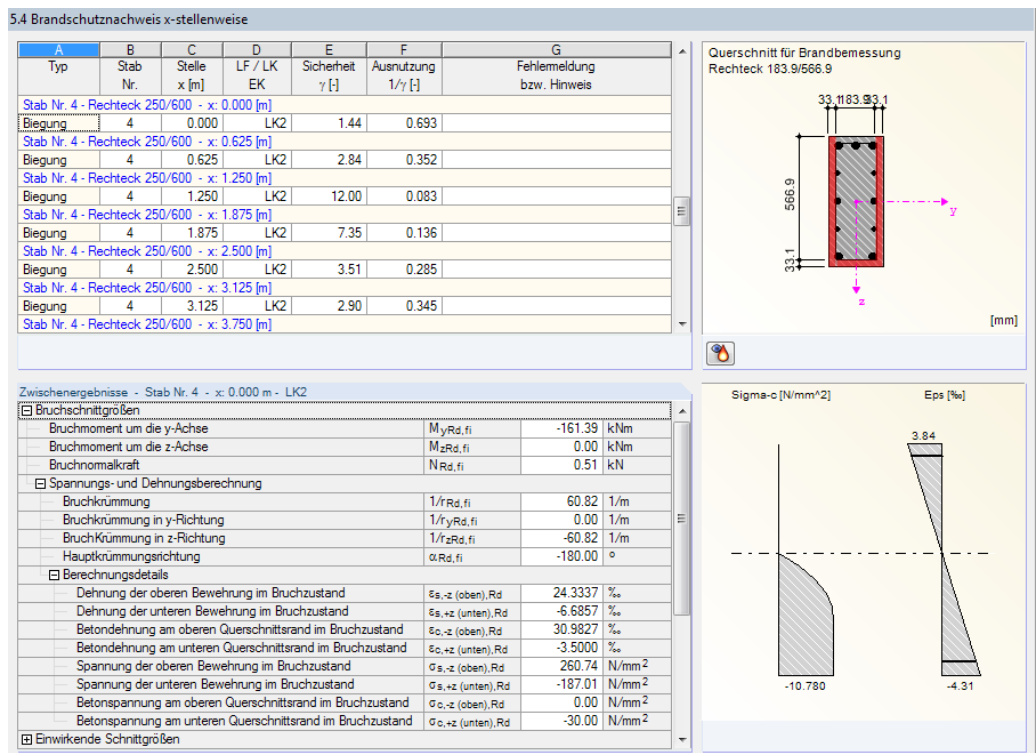


Bild 5.30: Maske 5.4 Brandschutznachweis x-stellenweise

Diese Maske gibt die Brandschutznachweise detailliert nach x-Stellen geordnet aus.

5.4.5 Brandschutznachweis unbemessbar

5.5 Brandschutznachweis unbemessbar

A	B	C	D	E	F	G
Typ	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Sicherheit γ []	Ausnutzung $1/\gamma$ []	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 2 - Rechteck 250/600 - x: 6.000 [m]						
Biegung	2	6.000	LK2	0.90	1.105	501)
Stab Nr. 4 - Rechteck 250/600 - x: 0.000 [m]						
Biegung	4	0.000	LK2	0.91	1.102	501)

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 2 - x: 6.000 m - LK2

Bruchschnittgrößen

Einwirkende Schnittgrößen

Nachweis

Ausnutzungsgrad der Biegebewehrung $1/\gamma_{SL,fi}$ 1.1053

Vorhandene Biegesicherheit $\gamma_{SL,fi}$ 0.9047

Einwirkende Schnittgrößen

Moment um die y-Achse	$M_{y,Ed,fi}$	-111.87	kNm
Moment um die z-Achse	$M_{z,Ed,fi}$	0.00	kNm
Normalkraft	$N_{Ed,fi}$	1.65	kN

Bruchschnittgrößen

Bruchmoment um die y-Achse	$M_{y,Rd,fi}$	-101.21	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	$M_{z,Rd,fi}$	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	$N_{Rd,fi}$	1.49	kN

Querschnitt für Brandbemessung
Rechteck 165.6/515.6

[mm]

Sigma-c [N/mm²]

Eps [%]

Bild 5.31: Maske 5.5 Brandschutznachweis unbemessbar

Diese Maske wird nur angezeigt, wenn während der Nachweisführung für den Brandschutz Unbemessbarkeiten oder Probleme festgestellt wurden. Die Fehlermeldungen sind nach Stäben und x-Stellen geordnet.

Die in Spalte G angegebene Nummer der *Fehlermeldung* wird in der Fußzeile kommentiert.

Meldungen...

Mit der Schaltfläche [Meldungen] lassen sich sämtliche Besonderheiten anzeigen, die während der Bemessung für den Brandfall aufgetreten sind.

Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

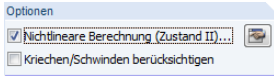
Verwendete Fehlermeldungen bzw. Hinweise

501	Keine ausreichende Sicherheit der Längsbewehrung beim Brandschutznachweis ($\gamma_{SL} < 1$)
506	Mindestschubbewehrung nach 9.2.2 (5) ist nicht eingehalten

Alle OK

Bild 5.32: Dialog Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

5.5 Nichtlineare Berechnung



Die Ergebnismasken 6.1 bis 6.4 erscheinen nur, wenn in Maske 1.1 *Basisangaben* die Option *Nichtlineare Berechnung (Zustand II)* für den Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- oder Brandschutznachweis aktiviert wurde (siehe [Kapitel 3.1, Seite 53](#)). Des Weiteren dürfen keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe [Kapitel 5.1.5, Seite 111](#)).

Die Nachweise werden mit der Bewehrung geführt, die in Maske 3.1 *Vorhandene Bewehrung* vorliegt.



Die Theorie der nichtlinearen Bemessung ist im [Kapitel 2.4 ab Seite 31](#) beschrieben.

Die Ergebnisse der nichtlinearen Bemessung werden nach Tragfähigkeits-, Gebrauchstauglichkeits- und Brandschutznachweisen geordnet ausgegeben. Für jede der genannten Kategorien wiederum sind die Ergebnisse in Masken nach Querschnitten, Stäben, Stabsätzen und x-Stellen sortiert. Das Konzept dieser Masken entspricht dem der „gewöhnlichen“ Gebrauchstauglichkeitsnachweise (siehe [Kapitel 5.3.1, Seite 123](#)).

5.5.1 Nichtlineare Berechnung - Tragfähigkeit

6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

A	B	C	D	E	F
Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK	Sicherheit γ [-]	Ausnutzung $1/\gamma$ [-]	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 2 - Rechteck 25/40					
1	1.900	LK1	1.183	0.845	
		LK2	1.165	0.858	
	5.000	LK3	1.513	0.661	
Querschnitt Nr. 3 - Rechteck 25/50					
2	0.000	LK1	1.101	0.909	
		LK2	1.128	0.887	
		LK3	1.361	0.735	

Alle Lastfälle Max: 0.91 ≤ 1

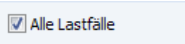
Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 1.900, LK1

Bruchschnittgrößen R_u			
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	79.44	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	0.00	kN
Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Bruchkrümmung	$1/r_{Rd}$	5.8988E-02	1/m
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/r_{yRd}$	-0.0000E+00	1/m
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/r_{zRd}$	5.8988E-02	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	0.0	°
Berechnungsdetails			
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	566.06	N/mm ²
Stahlidehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	20.000	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-28.59	N/mm ²
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-2.061	‰
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{ctRd}	0.00	N/mm ²
Maximale Betonzugdehnung	ϵ_{otRd}	21.534	‰
Einwirkende Schnittgrößen R ($\gamma_R = 1.30$)			
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	67.15	kNm

Bild 5.33: Maske 6.1.1 *Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise*

Die obere Tabelle enthält die maßgebenden Sicherheitsfaktoren und Ausnutzungen, die sich bei der nichtlinearen Tragfähigkeitsanalyse für jeden Querschnitt, Stab oder Stabsatz ergeben. Sie resultieren aus den Schnittgrößen, Bewehrungsparametern und Vorgaben des Dialogs *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* (siehe [Bild 4.4, Seite 97](#) und [Bild 4.5, Seite 99](#)).

Der untere Abschnitt listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Tabellenzeile auf. Beim Klick in eine andere Zeile aktualisieren sich die Bemessungsdetails.



Das Kontrollfeld *Alle Lastfälle* steuert, ob die Ergebnisse nur der maßgebenden Einwirkung oder (wie im [Bild 5.33](#) dargestellt) die Resultate aller untersuchten Lastfälle und -kombinationen aufgelistet werden.

Stab Nr.

Die Sicherheiten und Ausnutzungen werden nach Stäben geordnet ausgegeben.

Stelle x

Bei den x-Stellen handelt es sich um die FE-Knoten, die an den Stäben für die nichtlineare Berechnung erzeugt wurden. Sie basieren auf den Vorgaben zur adaptiven Stabteilung im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen* (siehe [Bild 2.31](#), Seite 52).

LF / LK

Es werden die Nummern der Lastfälle oder Lastkombinationen angegeben, die für die einzelnen Querschnitte, Stäbe oder Stabsätze maßgebend sind.

Wurden mehrere Lastfälle oder Lastkombinationen bemessen, so lassen sich durch Anhängen des Kontrollfeldes *Alle Lastfälle* die Ergebnisse aller untersuchten Einwirkungen darstellen.

Sicherheit γ

Diese Spalte listet die Sicherheitsfaktoren γ für jede Stelle x auf. Sie repräsentieren das Verhältnis von Bruchschnittgrößen zu einwirkenden Schnittgrößen.

$$\gamma = \frac{R_d}{E_d} \geq 1,0$$

mit

$$R_d = \begin{pmatrix} N_{Rd} \\ M_{y,Rd} \\ M_{z,Rd} \end{pmatrix} \quad \text{Bemessungswert des Tragwiderstandes}$$

$$E_d = \begin{pmatrix} N_{Ed} \\ M_{y,Ed} \\ M_{z,Ed} \end{pmatrix} \quad \text{Bemessungswert der Einwirkung}$$

Ist der Sicherheitsfaktor an einer x-Stelle kleiner als 1 oder wird keine Konvergenz erreicht, so ist der Tragfähigkeitsnachweis nicht erfüllt. Die ganze Tabelle wird rot dargestellt.

Ausnutzung $1/\gamma$

Die Einträge in dieser Spalte stellen die Kehrwerte der Sicherheitsfaktoren γ dar. Damit lassen sich schnell die Reserven im Querschnitt abschätzen.

Die *Zwischenergebnisse* im unteren Abschnitt der Maske geben Auskunft über sämtliche Nachweisdetails. Sie sind in einer Baumstruktur organisiert.

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 1.500, LK1

☐ Spannungs- und Dehnungsberechnung				
— Mittlere Hauptkrümmung	1/r _m	2.9629E-02	1/m	
— Mittlere Krümmung in y-Richtung	1/r _{ym}	-2.1899E-05	1/m	
— Mittlere Krümmung in z-Richtung	1/r _{zm}	2.9629E-02	1/m	
— Hauptkrümmungsrichtung	α _m	0.0	°	
☐ Berechnungsdetails				
— Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ _{sm}	525.76	N/mm ²	
— Stahldehnung in der maßgebenden Faser	ε _{sm}	2.629	‰	
— Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ _{cm}	-8.31	N/mm ²	
— Betondehnung in der maßgebenden Faser	ε _{cm}	-1.401	‰	
— Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ _{ctm}	0.00	N/mm ²	
— Maximale Betonzugdehnung	ε _{ctm}	3.340	‰	
☐ Querschnitteigenschaften				
☐ Querschnittseigenschaften (Sekantenwerte)				
— Dehnsteifigkeit	A _m * E	5598.27	MN	
— Mittlere Biegesteifigkeit um die y-Achse	I _{ym} * E	0.74	MNm ²	
— Mittlere Biegesteifigkeit um Achse z	I _{zm} * E	85.77	MNm ²	
— Schubsteifigkeit in y-Richtung	A _{ym} * G	1960.00	MN	

Bild 5.34: Abschnitt *Zwischenergebnisse* mit Details zur Spannungs- und Dehnungsberechnung

Die Zwischenergebnisse sind an den gewählten *Ansatztyp von Tension Stiffening* (siehe Bild 4.5, Seite 99) angepasst.

Fehlermeldung bzw. Hinweis

Die letzte Spalte verweist auf Unbemessbarkeiten oder Besonderheiten, die sich im Zuge der Bemessung ergeben haben (z. B. wenn im letzten Lastschritt der Berechnung die maximale Anzahl an Iterationen erreicht wurde, ohne das Abbruchkriterium zu erfüllen). Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Mit der Schaltfläche [Meldungen] lassen sich alle Hinweise anzeigen, die während der nichtlinearen Berechnung aufgetreten sind.

5.5.2 Nichtlineare Berechnung - Gebrauchstauglichkeit

6.2.3 Gebrauchstauglichkeit für nichtlineare Berechnung stabweise

A	B	C	D	E	F	G
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh Wert	Einheit	Hinweis
Stab Nr. 1 - Rechteck 25/40						
1	2.100	LK1	u _g	7.09	mm	
		LK2	u _g	7.36	mm	
		LK3	u _g	3.67	mm	
	1.900	LK1	w _k	0.18	mm	
		LK2	w _k	0.18	mm	
		LK3	w _k	0.14	mm	
Stab Nr. 2 - Rechteck 25/50						
2	2.700	LK1	u _g	0.20	mm	
	0.700	LK2	u _g	0.28	mm	
	2.400	LK3	u _g	0.41	mm	
	0.000	LK1	w _k	0.16	mm	
		LK2	w _k	0.16	mm	

Alle Lastfälle

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 2.100, LK1

Spannungs- und Dehnungsberechnung

Hauptmomente				M	51.82	kNm
Biegemoment um die y-Achse				M _{yEd}	51.82	kNm
Biegemoment um die z-Achse				M _{zEd}	0.00	kNm
Normalkraft				N _{Ed}	0.00	kN
Mittlere Hauptkrümmung				1/r _m	4.2941E-03	1/m
Mittlere Krümmung in y-Richtung				1/r _{ym}	0.0000E+00	1/m
Mittlere Krümmung in z-Richtung				1/r _{zm}	4.2941E-03	1/m
Hauptkrümmungsrichtung				α _m	0.0	°
Berechnungsdetails						
Stahlspannung in der maßgebenden Faser				σ _{sm}	245.97	N/mm ²
Stahldehnung in der maßgebenden Faser				ε _{sm}	1.230	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser				σ _{cm}	-13.05	N/mm ²
Betondehnung in der maßgebenden Faser				ε _{cm}	-0.376	‰
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit				σ _{ctm}	1.11	N/mm ²
Maximale Betonzugdehnung				ε _{ctm}	1.341	‰
Querschnitseigenschaften						
Mittleres Trägheitsmoment um die Achse y				I _{ym}	3.44802E+08	mm ⁴

Bild 5.35: Maske 6.2.3 Gebrauchstauglichkeit für nichtlineare Berechnung stabweise

In der oberen Tabelle werden die Verformungen und Rissbreiten ausgegeben, die bei der nichtlinearen Gebrauchstauglichkeitsanalyse als maßgebend ermittelt wurden.

Der untere Abschnitt listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Tabellenzeile auf.

Alle Lastfälle

Das Kontrollfeld *Alle Lastfälle* steuert, ob die Verformungen und Rissbreiten nur der maßgebenden Einwirkung oder (wie im Bild 5.35 dargestellt) die Ergebnisse aller untersuchten Lastfälle und Lastkombinationen aufgelistet werden.

Stab Nr.

Die Verformungen und Rissbreiten werden nach Stäben geordnet ausgegeben.

Stelle x

Bei den x-Stellen handelt es sich um die FE-Knoten, die an den Stäben für die nichtlineare Berechnung erzeugt wurden. Sie basieren auf den Vorgaben zur adaptiven Stabteilung im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* (siehe [Bild 2.31](#), [Seite 52](#)).

Lastfall

Es werden die Nummern der Lastfälle oder Lastkombinationen angegeben, die für die einzelnen Querschnitte, Stäbe oder Stabsätze maßgebend sind.

Wurden mehrere Lastfälle oder -kombinationen bemessen, so lassen sich durch Anhaken des Kontrollfeldes *Alle Lastfälle* die Ergebnisse aller untersuchten Einwirkungen darstellen.

Typ

u_g

Diese Spalte listet die resultierenden Verschiebungen u_g an den einzelnen Stabstellen auf. Die Gesamtverschiebung ist auf das globale XYZ-Koordinatensystem bezogen.

Die Verformungsanteile in Richtung der globalen Achsen X, Y und Z können bei den Zwischenergebnissen in der Kategorie *Globale Knotenverformungen* abgelesen werden. Die Anteile in Richtung der lokalen Stabachsen x, y und z sind in der Kategorie *Lokale Knotenverformungen* zu finden.

w_k

In dieser Spalte werden die charakteristischen Rissbreiten gemäß EN 1992-1-1, 7.3.4, Gl. (7.8) ausgegeben (siehe [Kapitel 2.2.4](#), [Seite 16](#)). Für die Ermittlung des Rissabstandes und der Dehnungen werden die Schnittgrößen der nichtlinearen Berechnung verwendet.

Vorhandener Wert

In dieser Spalte werden die Werte angegeben, die jeweils für die Verformungs- und Rissbreitenachweise maßgebend sind.

Die *Zwischenergebnisse* im unteren Abschnitt der Maske geben Auskunft über sämtliche Nachweisdetails. Sie sind in einer Baumstruktur organisiert.

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 1.700, LK2

[-] Querschnitseigenschaften			
[-] Mittleres Trägheitsmoment um die Achse y	I_{ym}	4592.79	cm ⁴
[-] Mittleres Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zm}	3499.17	cm ⁴
[-] mittlere Fläche	A_m	56.09	cm ²
[-] Querschnittsteifigkeiten (Sekantenwerte)			
[-] Dehnsteifigkeit	$A_m \cdot E$	168.26	MN
[-] Mittlere Biegesteifigkeit um die y-Achse	$I_{ym} \cdot E$	1.38	MNm ²
[-] Mittlere Biegesteifigkeit um Achse z	$I_{zm} \cdot E$	49.39	MNm ²
[-] Schubsteifigkeit in y-Richtung	$A_{ym} \cdot G$	1680.00	MN
[-] Schubsteifigkeit in Richtung z	$A_{zm} \cdot G$	1680.00	MN
[-] Torsionssteifigkeit	$I_t \cdot G$	4.52	MNm ²
[-] Globale Knotenverformungen			
[-] Verschiebung x	$u_{g,x}$	0.00	mm
[-] Verschiebung y	$u_{g,y}$	0.00	mm
[-] Verschiebung z	$u_{g,z}$	32.46	mm
[-] Resultierende Verschiebung	u_g	32.46	mm
[-] Verdrehung um die x-Achse	$\varphi_{g,x}$	0.0000	mrاد
[-] Verdrehung um die y-Achse	$\varphi_{g,y}$	8.8598	mrاد

Bild 5.36: Abschnitt *Zwischenergebnisse* mit Details zu Querschnittsteifigkeiten und Verformungen

5.5.3 Nichtlineare Berechnung - Brandschutz

6.3.4 Brandschutz für nichtlineare Berechnung x-stellenweise

A	B	C	D	E	F
Stab Nr.	Stelle x [m]	LF / LK EK	Sicherheit γ []	Ausnutzung $1/\gamma$ []	Fehlermeldung bzw. Hinweis
1	4.800	LK4	1.705	0.586	
	4.850	LK4	1.598	0.626	
	4.900	LK4	1.502	0.666	
	4.950	LK4	1.415	0.707	
	5.000	LK4	1.336	0.748	
Stab Nr. 2 - Rechteck 25/50					
2	0.000	LK4	1.336	0.748	
	0.050	LK4	1.405	0.712	
	0.100	LK4	1.479	0.676	
	0.150	LK4	1.560	0.641	
	0.200	LK4	1.649	0.606	
	0.300	LK4	1.853	0.540	
	0.400	LK4	2.103	0.475	

Alle Lastfälle Max: 0.75 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 2, x: 0.000, LK4

Bruchschnittgrößen R_d				
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	-43.84	kNm	
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm	
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	-0.14	kN	
Spannungs- und Dehnungsberechnung				
Bruchkrümmung	$1/r_{Rd}$	5.1764E-02	1/m	
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/\gamma_{yRd}$	-0.0000E+00	1/m	
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/\gamma_{zRd}$	-5.1764E-02	1/m	
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	-180.0	°	
Berechnungsdetails				
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	269.51	N/mm ²	
Stahldehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	16.246	‰	
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-23.62	N/mm ²	
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-1.790	‰	
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{ctRd}	0.00	N/mm ²	
Maximale Betonzugdehnung	ϵ_{ctRd}	22.381	‰	
Einwirkende Schnittgrößen R ($\gamma_R = 1.10$)				
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	-32.80	kNm	

Bild 5.37: Maske 6.3.4 Brandschutz für nichtlineare Berechnung x-stellenweise

Diese Maske weist die maßgebenden Sicherheitsfaktoren und Ausnutzungen der nichtlinearen Brandschutzanalyse aus. Sie resultieren aus den Schnittgrößen für den Brandfall, den Bewehrungsparametern und den Vorgaben des Dialogs *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* (siehe Bild 4.4, Seite 97 und Bild 4.5, Seite 99).

Der untere Abschnitt listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Zeile auf.

Die Tabellenspalten entsprechen denen der Maske 6.1.1. Sie sind im Kapitel 5.5.1 beschrieben.

5.5.4 Nichtlineare Berechnung - Berechnungsdetails

6.4 Nichtlineare Berechnung - Berechnungsdetails		
☐ Konvergenzeinstellungen		
Maximale Anzahl Iterationen pro Laststufe	50	
☐ Abbruchschranken		
Abbruchkriterium ε_1	0.0010	
Abbruchkriterium ε_2	0.0010	
Abbruchkriterium ε_3	1.0000	[mm]
Dämpfungsfaktor	0.500	
Anzahl der Laststufen:	3	
☐ Konvergenzverhalten		
☐ Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit		
Ereichte Gesamtanzahl der Iterationen	10	
Iteration der letzten Laststufe erfolgreich beendet		
☐ Abbruchkriterien		
☐ Laststufe Nr. 1		
Lastfaktor der Laststufe	0.333	
☐ Abbruchkriterien der einzelnen Iterationen		
☐ Iteration Nr. 0		
Abbruchkriterium ε_1	0.12224	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_2	0.95351	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_3	0.00795	< 1.0000 [mm]
☐ Iteration Nr. 1		
Abbruchkriterium ε_1	0.00181	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_2	0.00835	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_3	0.39529	< 1.0000 [mm]
☐ Iteration Nr. 2		
Abbruchkriterium ε_1	0.00016	< 0.0010
Abbruchkriterium ε_2	0.00021	< 0.0010
Abbruchkriterium ε_3	0.00154	< 1.0000 [mm]
Iteration der Laststufe erfolgreich beendet		
☐ Laststufe Nr. 2		
Lastfaktor der Laststufe	0.667	
☐ Abbruchkriterien der einzelnen Iterationen		
☐ Iteration Nr. 0		
Abbruchkriterium ε_1	0.16435	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_2	0.33877	> 0.0010
Abbruchkriterium ε_3	0.38900	< 1.0000 [mm]
☐ Iteration Nr. 1		

Bild 5.38: Maske 6.4 Nichtlineare Berechnung - Berechnungsdetails

In der letzten Maske kann der Verlauf der nichtlinearen Berechnung überprüft werden. Die Ausgabe ist in zwei Hauptpunkte untergliedert.

Konvergenzeinstellungen

Unter diesem Punkt sind die globalen Vorgaben für die nichtlineare Berechnung aufgelistet (siehe Erläuterungen zu [Bild 2.31](#), [Seite 52](#)).

Konvergenzverhalten

Das Konvergenzverhalten ist ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der Ergebnisse. Der Ablauf der Iterationen ermöglicht Rückschlüsse auf die Qualität der nichtlinearen Berechnung. In der Tabelle sind die Abbruchkriterien der Iterationsschritte für jede Laststufe ablesbar. Die Ausgabe erfolgt separat für den *Grenzzustand der Tragfähigkeit*, den *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit* und den *Brandschutznachweis*.

In den meisten Fällen konvergiert eine nichtlineare Berechnung, da die Differenzen hinsichtlich der Schnittgrößen, Steifigkeiten und Verformungen stetig abnehmen. Dieser Effekt kann anhand der ε_1 und ε_2 Werte in aufeinander folgenden Iterationen überprüft werden: Sprünge oder ein Anwachsen der Differenzen (z. B. bei Stabilitätsuntersuchungen) sind somit gut nachvollziehbar.

Aus dem Konvergenzverhalten lässt sich auch ableiten, wie die Parameter zur Steuerung der Berechnung beeinflusst werden können (siehe [Kapitel 2.4.9](#), [Seite 51](#)).

6 Ergebnisauswertung

Die Ergebnisse der Bemessung lassen sich auf verschiedene Weise auswerten und anpassen. Im [Kapitel 5](#) wurden die Ergebnistabellen vorgestellt. Das [Kapitel 6](#) beschreibt die grafische Auswertung der Ergebnisse und die Änderungsmöglichkeiten im Bewehrungsvorschlag.

6.1 Bewehrungsvorschlag

Die Ergebnismasken 3.1 und 3.2 stellen dar, wie die erforderlichen Bewehrungsflächen mit Bewehrungsstäben abgedeckt werden können, damit z. B. der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ist. Dieser Bewehrungsvorschlag wird im unteren Bereich der Masken 3.1 *Längsbewehrung* und 3.2 *Bügelbewehrung* als 3D-Bewehrungsskizze grafisch dargestellt (siehe [Bild 5.10, Seite 112](#) und [Bild 5.16, Seite 117](#)).

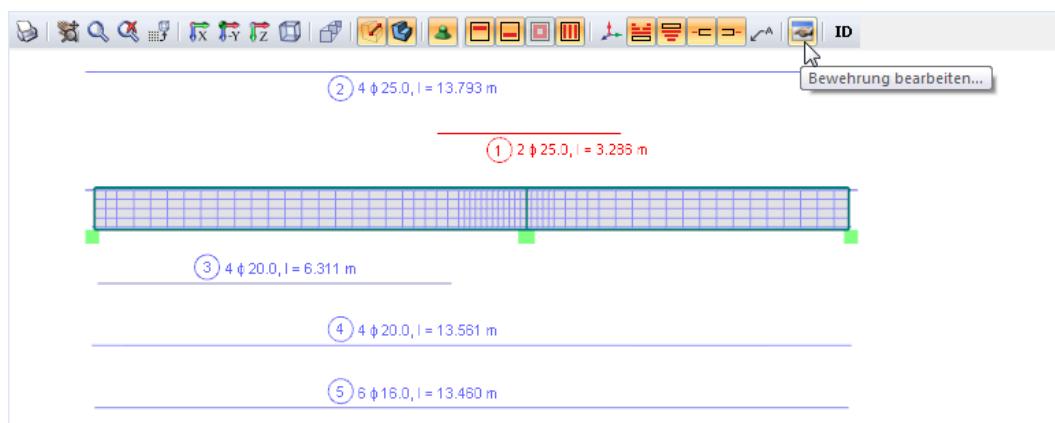


Bild 6.1: Bewehrungsskizze in Maske 3.1 *Vorhandene Bewehrung*

Die aktuelle Position (die Zeile in der Tabelle oberhalb, in der sich der Cursor befindet) ist rot gekennzeichnet. Diese Grafik ermöglicht es, die Lage und Anordnung der einzelnen Positionsstäbe abzulesen und ggf. anzupassen.



Im Grafikfenster stehen die aus RSTAB bekannten Mausfunktionen zum Zoomen, Rotieren und Verschieben der Darstellung zur Verfügung. Durch Drehen des Scrollrades kann die Darstellung vergrößert oder verkleinert werden. Mit gedrücktem Scrollrad lässt sich die Bewehrungsgrafik verschieben. Bei zusätzlich gedrückter [Strg]-Taste kann die Grafik gedreht werden (ebenfalls möglich mit dem Scrollrad und gedrückter rechter Maustaste). Die Mauszeiger-Symbole verdeutlichen die jeweilige Funktion.

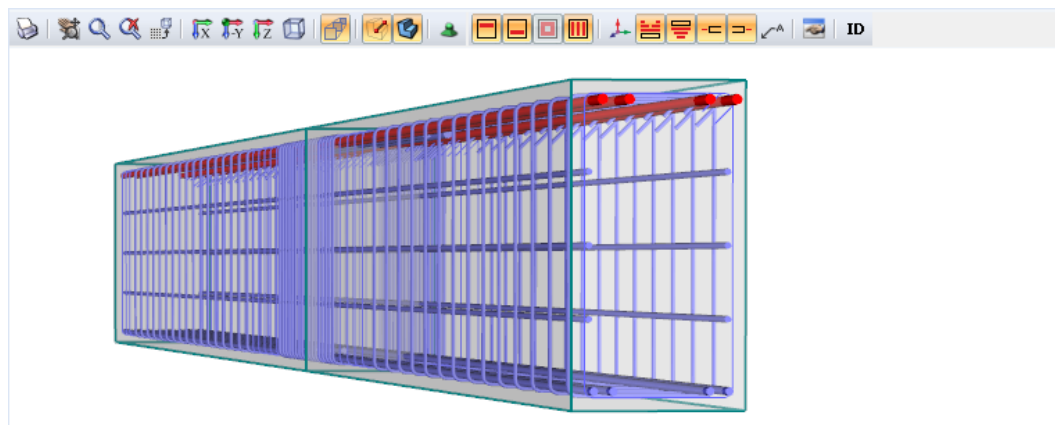
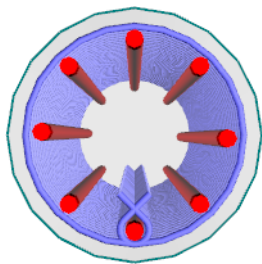


Bild 6.2: 3D-Darstellung des Bewehrungskorbes

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:



Stützenbewehrung in perspektivischer Ansicht

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Drucken	Ruft den Dialog <i>Grafikausdruck</i> auf → Bild 7.5, Seite 153
	Verschieben, zoomen, drehen	Ermöglicht das Verschieben, Zoomen und Rotieren der Bewehrungsgrafik mit der Maus
	Zoom / Gesamtansicht	Ermöglicht das Zoomen über ein Fenster bzw. das Wiederherstellen der Gesamtansicht
	Letzte Ansicht	Stellt die vorherige Ansicht dar
	Ansicht in X / -Y / Z	Stellt die Ansicht in Richtung der Achsen X und Z bzw. entgegen der Achse Y dar
	Isometrie	Stellt die räumliche Ansicht dar
	Perspektive	Stellt die Bewehrungsgrafik in perspektivischer Ansicht dar (mit allen Ansichtstypen kombinierbar)
	Drahtmodell	Blendet die Querschnittskonturen im Drahtmodell ein und aus
	Vollmodell	Blendet die Darstellung des Betons im Querschnitt ein und aus
	Lager	Blendet die Auflager ein und aus
	Obere Bewehrung	Blendet die obere Längsbewehrung ein und aus
	Untere Bewehrung	Blendet die untere Längsbewehrung ein und aus
	Umlaufende Bewehrung	Blendet die umlaufende und die konstruktive Bewehrung ein und aus
	Bügelbewehrung	Blendet die Bügelbewehrung ein und aus
	Stabachsensystem	Steuert die Anzeige der lokalen Stabachsen x,y,z
	Obere Längsbewehrung	Blendet die Positionsstäbe der oberen Bewehrung ein und aus
	Untere Längsbewehrung	Blendet die Positionsstäbe der unteren Bewehrung ein und aus
	Schubbewehrung	Blendet die Positionsbügel und die Bezeichnungen der Bügelbereiche ein und aus
	Bügelbezeichnung	Stellt die Bügelbezeichnungen parallel oder rechtwinklig zum Stab dar
	Verankerungsanfang	Blendet die Verankerungslängen am Stabanfang ein und aus
	Verankerungsende	Blendet die Verankerungslängen am Stabende ein und aus
	Bezeichnung	Blendet die Positionsbeschreibungen in X-Ansicht ein und aus (in Vorbereitung)
	Bewehrung bearbeiten	Ruft den Dialog <i>Längsbewehrung bearbeiten</i> (Bild 5.13) bzw. <i>Bügelbewehrung bearbeiten</i> (Bild 5.17) auf
	Nummerierung	Blendet die Nummerierung der Stäbe und Stabsätze ein und aus

14 φ 10.0-0.300 m

Positionsbügel rechtwinklig

Tabelle 6.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken 3.1 und 3.2

Bewehrung bearbeiten



Die im Bild 6.1 markierte Schaltfläche [Bewehrung bearbeiten] ruft den Bearbeitungsdialog der aktuellen Bewehrungsposition auf. Dieser Dialog ist im Bild 5.13 auf Seite 115 und Bild 5.17 auf Seite 119 dargestellt. Dort lassen sich die Parameter der Längs- oder Bügelbewehrung (z. B. Bewehrungslage, Stabdurchmesser, Verankerungen) überprüfen und bei Bedarf ändern.



Die Bearbeitungsdialoge sind auch über das Kontextmenü der markierten Positionsstäbe oder Bewehrungen zugänglich.

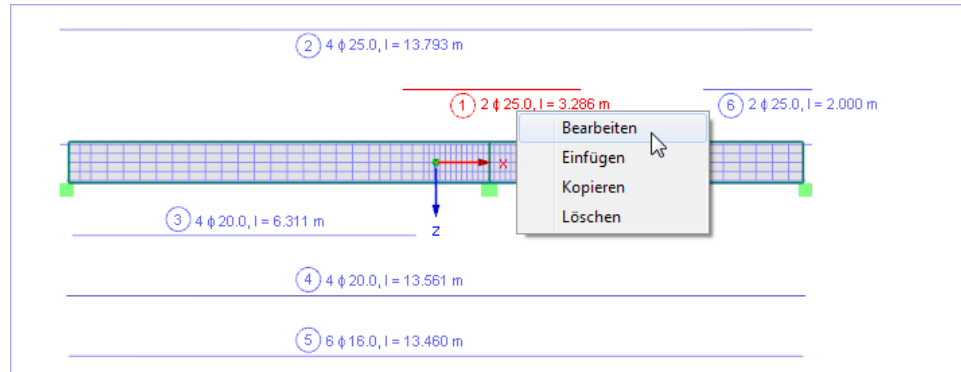
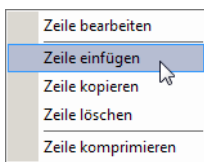


Bild 6.3: Kontextmenü der Bewehrung

Folgender Fachbeitrag beschreibt, wie ein Bewehrungsvorschlag bearbeitet werden kann: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000651>

Bewehrung ergänzen



Tabellen-Kontextmenü

Über das im Bild 6.3 dargestellte Kontextmenü lässt sich auch eine neue Bewehrungsposition *Einfügen*. Diese Möglichkeit besteht auch in der Tabelle 3.1 (siehe Kontextmenü links).

Es erscheint der Dialog *Längsbewehrung bearbeiten*. Die nächste *Position Nr.* ist voreingestellt. Im Dialog können nun die Anzahl und Lage der Bewehrungsstäbe sowie der Durchmesser und die Verankerungslängen der Bewehrung festgelegt werden. Nach [OK] wird dann die neue Bewehrungsposition in der Tabelle und der Grafik ergänzt.

Im folgenden Kapitel sind weitere Bearbeitungsmöglichkeiten vorgestellt.

Bewehrung speichern



Eine geänderte Bewehrung kann über die Tabellen-Schaltfläche [Speichern] als Muster abgelegt werden. Im Dialog *Vorhandene Bewehrung speichern* (siehe Bild 5.15, Seite 116) ist der *Name der Bewehrungsvorlage* anzugeben.

Mit dieser Vorlage kann bei Änderungen der Bemessungsvorgaben in Maske 1.6 wieder die benutzerdefinierte Bewehrungsführung voreingestellt werden. Die Änderungen gehen nicht verloren, wenn BETON einen neuen Bewehrungsvorschlag erstellt.

Das Einlesen von Bewehrungsvorlagen ist im Kapitel 3.5 beschrieben (siehe Bild 3.23, Seite 72).

6.2 3D-Rendering der Bewehrung

3D-Rendering

In den beiden Masken 3.1 *Vorhandene Längsbewehrung* und 3.2 *Vorhandene Bügelbewehrung* steht die Schaltfläche [3D-Rendering] zur Verfügung. Sie bietet die Möglichkeit, die Bewehrung des selektierten Stabes in einem neuen Fenster fotorealistisch zu betrachten und bei Bedarf zu ändern.



Das 3D-Rendering lässt sich auch durch Doppelklicken der Bewehrung im Grafikbereich der Masken 3.1 und 3.2 aufrufen.

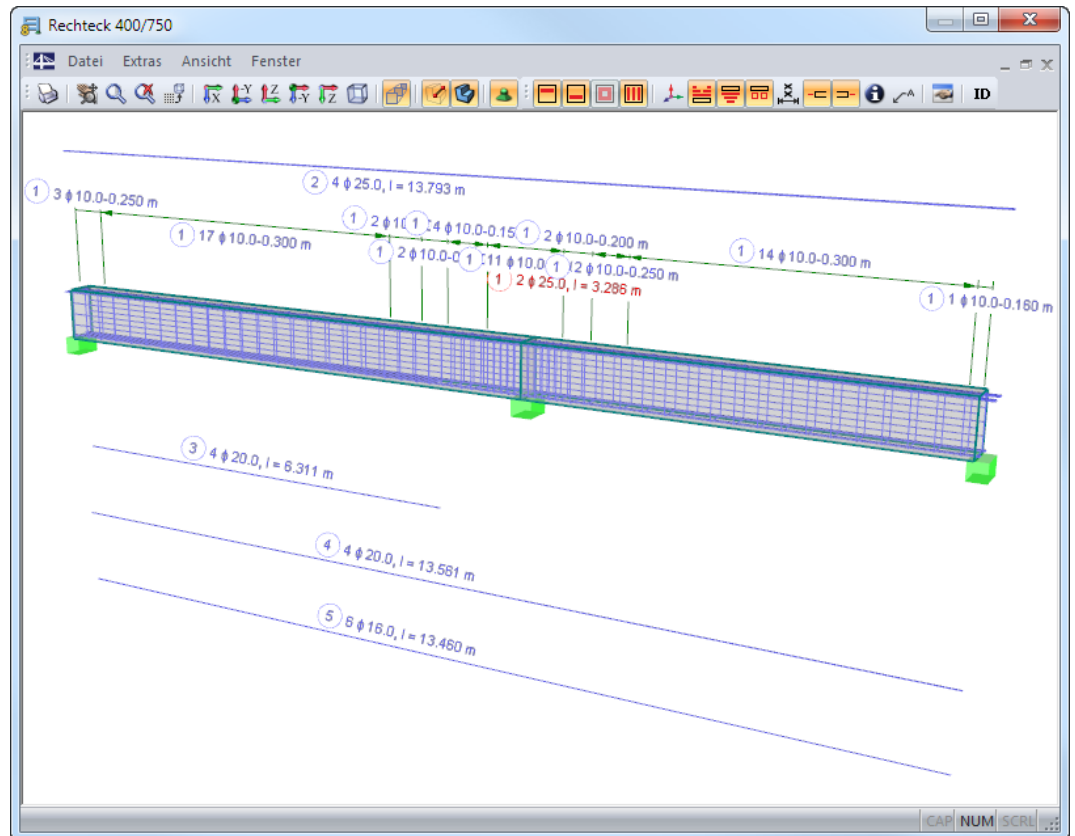


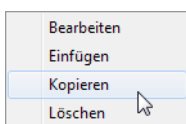
Bild 6.4: 3D-Rendering der vorhandenen Längs- und Bügelbewehrung



Die Grafik kann über das Menü *Ansicht* oder die zugeordneten Schaltflächen gesteuert werden (siehe [Tabelle 6.1](#), [Seite 140](#)). Zudem lassen sich die im [Kapitel 6.1](#) auf [Seite 139](#) beschriebenen Mausfunktionen nutzen.

Bewehrung kopieren

Das Grafikfenster bietet die Möglichkeit, Bewehrungen positionsweise zu kopieren. Damit lassen sich beispielsweise schnell neue Bewehrungslagen aus bestehenden Stäben erstellen oder konstruktive Bewehrungen erzeugen.



Bewehrungs-Kontextmenü

Zunächst ist die Bewehrung oder Positionsbezeichnung zu selektieren, die kopiert werden soll. Ein Rechtsklick auf das rot dargestellte Objekt öffnet dann das Kontextmenü der Bewehrung (siehe [Bild links](#)). Mit der Option *Kopieren* wird der Dialog *Verschieben bzw. Kopieren* aufgerufen (siehe [Bild 6.5](#)).

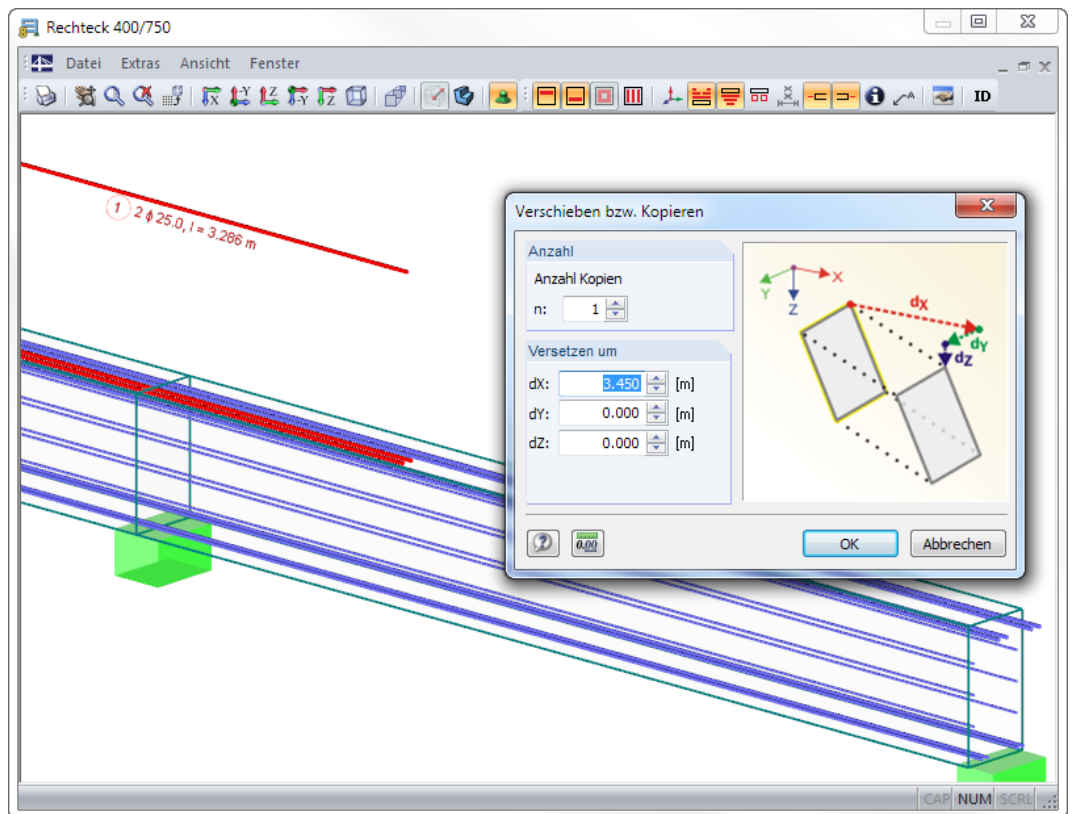


Bild 6.5: Bewehrungsposition über Kontextmenü *Kopieren*

Im Dialog kann die *Anzahl* der Kopien und der Verschiebungsvektor in Richtung der globalen Achsen X, Y und Z angegeben werden.

Nach [OK] wird eine neue Bewehrungsposition (oder ggf. mehrere) erzeugt.

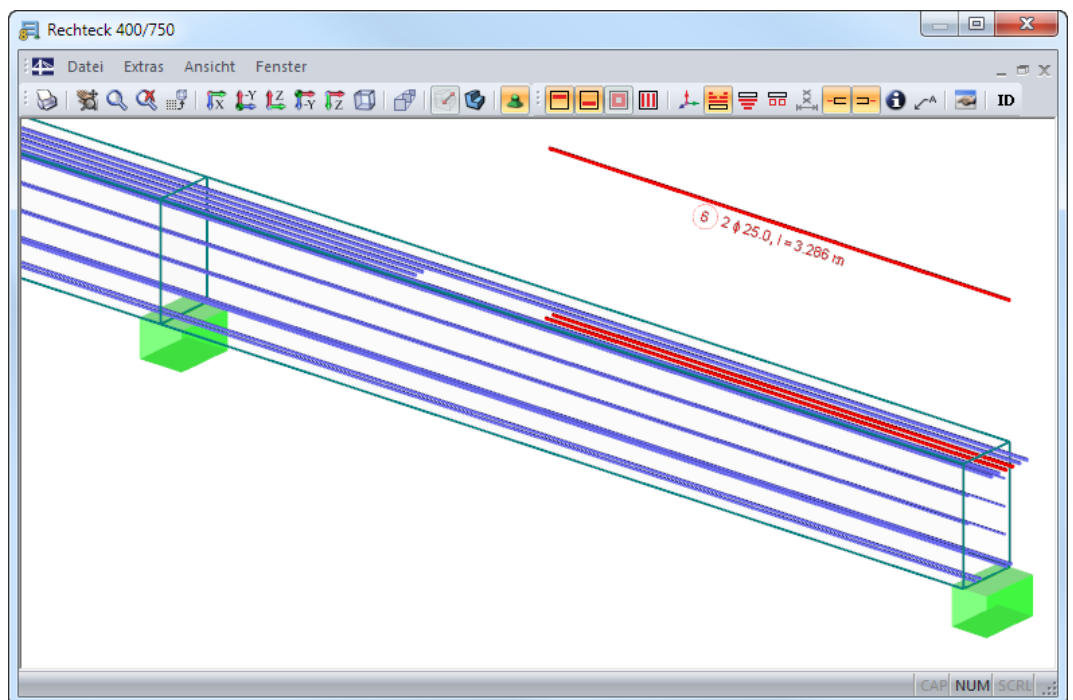


Bild 6.6: Kopierte Bewehrungsposition

Fensterdarstellung

Das Menü *Fenster* bietet verschiedene Möglichkeiten, die Bewehrung in mehreren Fenstern anzuzeigen. Hilfreich für die räumliche Kontrolle ist die Funktion

Fenster → Isometrie und 3 Ansichten.

Das 3D-Rendering-Fenster erhält folgende Unterteilung.

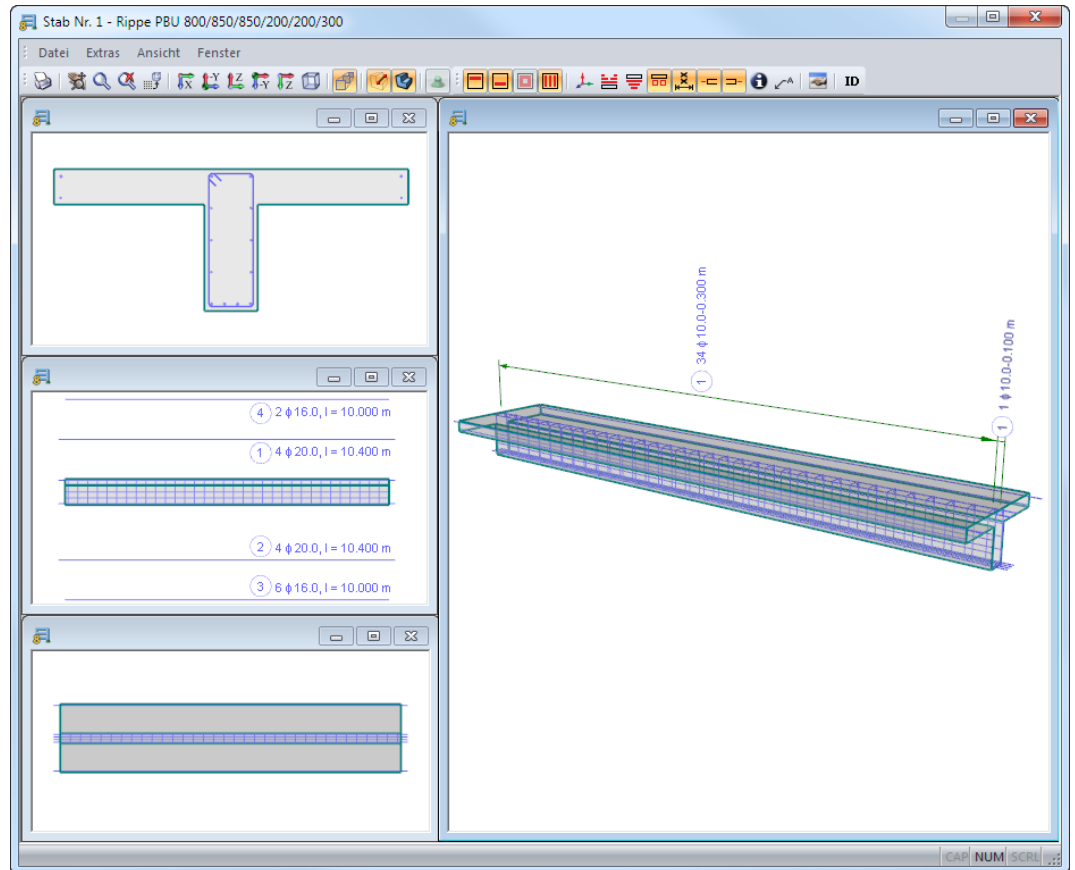


Bild 6.7: Fensterdarstellung *Isometrie und 3 Ansichten*

Neben der isometrischen Ansicht im Hauptfenster werden die Ansichten in Längsrichtung X, die Seitenansicht in -Y und die Draufsicht in Z dargestellt.

Werden Änderungen in einem Fenster vorgenommen, so aktualisieren sich die Ansichten in den übrigen Fenstern automatisch.



Mit der Schaltfläche [Drucken] kann die aktuelle Grafik direkt auf den Drucker ausgegeben bzw. in das Ausdruckprotokoll oder in die Zwischenablage übergeben werden. Der Ausdruck mehrerer Fenster ist nicht möglich.

6.3 Ergebnisse am RSTAB-Modell

Für die Auswertung kann auch das RSTAB-Arbeitsfenster genutzt werden.

6.3.1 Hintergrundgrafik und Ansichtsmodus

Das RSTAB-Arbeitsfenster im Hintergrund ist hilfreich, um die Lage eines Stabes im Modell ausfindig zu machen: Der in der Ergebnismaske von BETON selektierte Stab wird in der Hintergrundgrafik mit einem Pfeil gekennzeichnet; die x-Stelle ist in der Selektionsfarbe hervorgehoben.

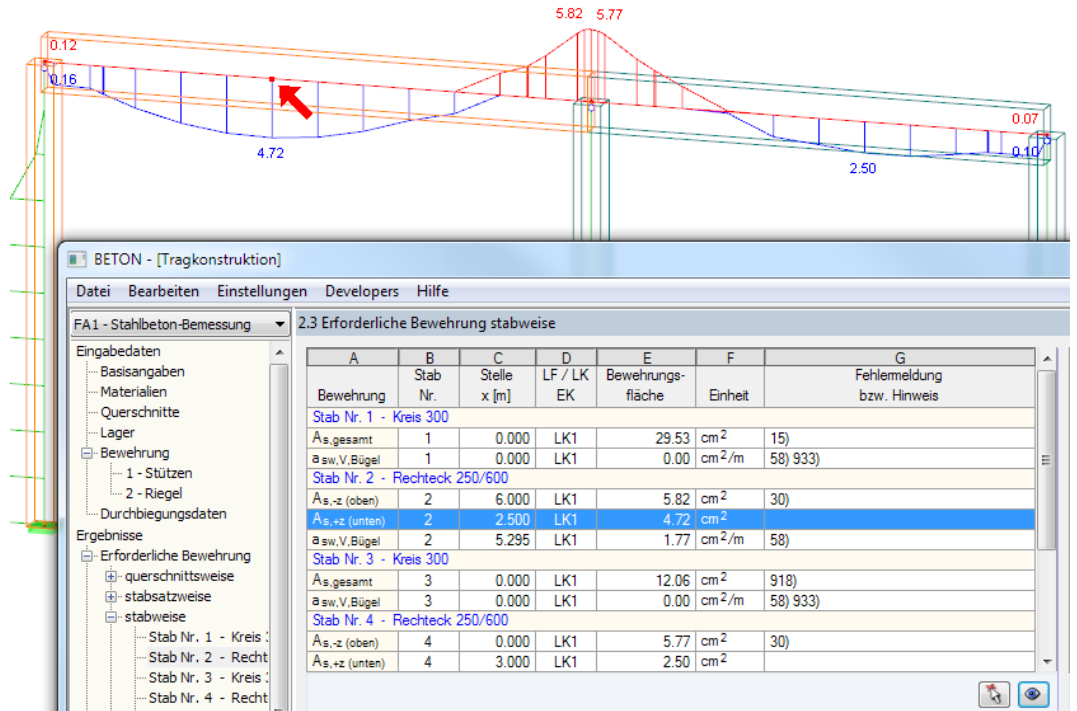


Bild 6.8: Kennzeichnung des Stabes und der aktuellen x-Stelle im RSTAB-Modell



BETON FA1 - Stahlbe

Wenn die Hintergrundgrafik keine Ergebnisse des Moduls BETON anzeigt, kann die Schaltfläche [Ansicht ändern] benutzt werden, um den *Ansichtsmodus* zu aktivieren: Das Fenster wird ausgeblendet, sodass in der RSTAB-Symbolleiste der Bemessungsfall eingestellt und mit der Schaltfläche die Ergebnisse aktiviert werden können.

Information

Sie befinden sich im Ansichtsmodus.

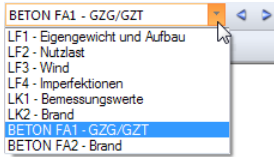
Im Ansichtsmodus stehen alle Funktionen des Menüs *Ansicht* zur Verfügung, z. B. Zoomen, Verschieben oder Drehen der Ansicht, sodass auch die Darstellung entsprechend angepasst werden kann.

Mit [Zurück] erfolgt die Rückkehr in das Modul BETON.

6.3.2 RSTAB-Arbeitsfenster

Grafik

Die Bewehrungen und Zwischenergebnisse lassen sich auch grafisch am RSTAB-Modell überprüfen: Klicken Sie die Schaltfläche [Grafik] an, um das Bemessungsmodul zu verlassen. Im Arbeitsfenster von RSTAB werden dann sämtliche Bemessungsergebnisse wie die Schnittgrößen eines Lastfalls dargestellt.



Die Bemessungsfälle lassen sich in der Liste der RSTAB-Menüleiste einstellen.

Ergebnisse-Navigator

Der *Ergebnisse*-Navigator ist auf die Nachweise des Moduls BETON abgestimmt: Es stehen die Bemessungsergebnisse für die Nachweise der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, des Brandschutzes und der nichtlinearen Berechnung mit allen Zwischenergebnissen zur Auswahl.

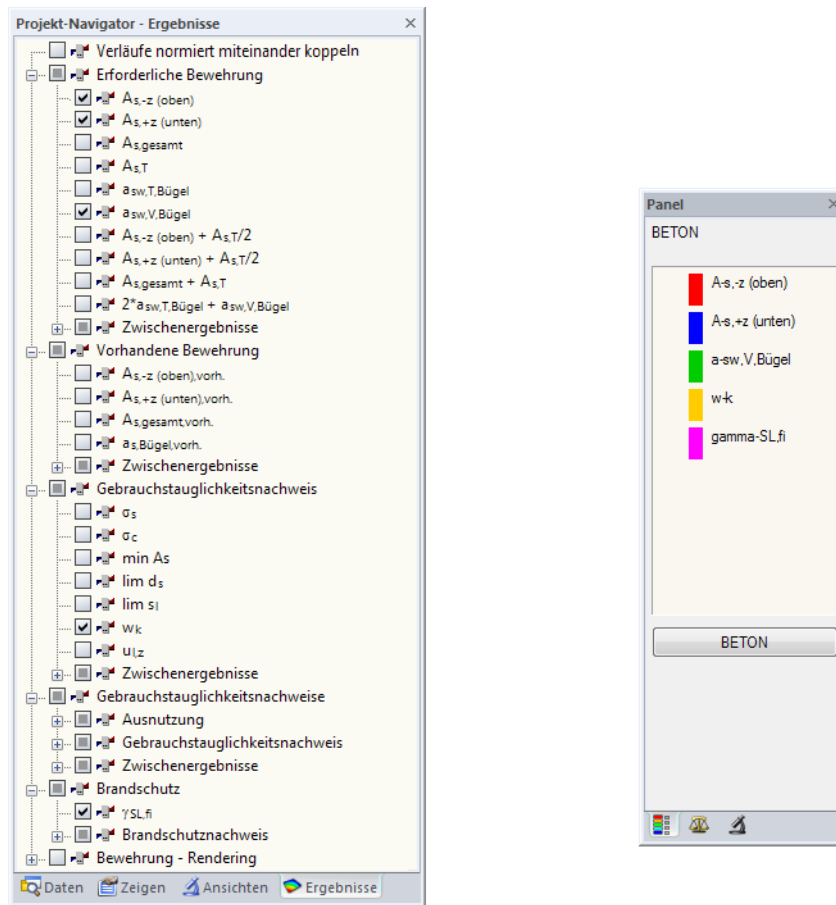


Bild 6.9: *Ergebnisse*-Navigator und Panel für BETON

Der *Ergebnisse*-Navigator ermöglicht es, mehrere Bewehrungsarten oder Nachweise gleichzeitig darzustellen. Damit lässt sich z. B. grafisch die erforderliche Längsbewehrung mit der vorhandenen Längsbewehrung vergleichen. Das Panel wird dabei mit den gewählten Ergebnisarten synchronisiert.

Ein Beispiel zur grafischen Dokumentation der Schubbemessung ist in folgendem Fachbeitrag zu finden: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/000715>

Dieser Beitrag zeigt, wie die Zugkraft- bzw. Bewehrungsdeckungslineie grafisch dargestellt werden kann: <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/001482>



Wegen der Mehrfachauswahl und automatischen Farbuweisung sind die Darstellungsoptionen für Stabergebnisse im *Zeigen*-Navigator wirkungslos.

Über den *Ergebnisse*-Navigator können auch die Bemessungsdetails nichtlinearer Analysen grafisch ausgewertet werden.

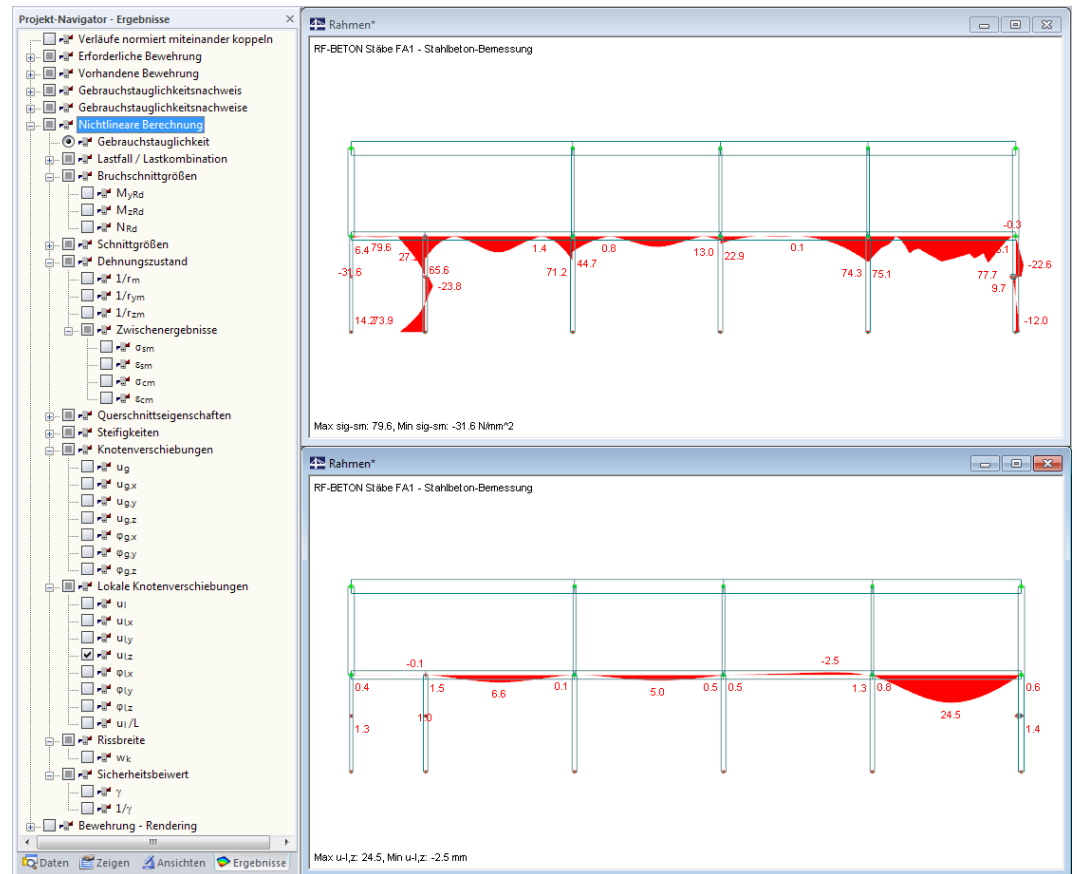


Bild 6.10: Grafische Ausgabe nichtlinearer Bemessungsergebnisse



Die Navigator-Option *Bewehrung - Rendering* ermöglicht es, die Bewehrungsstäbe und Bügel im RSTAB-Arbeitsfenster darzustellen.

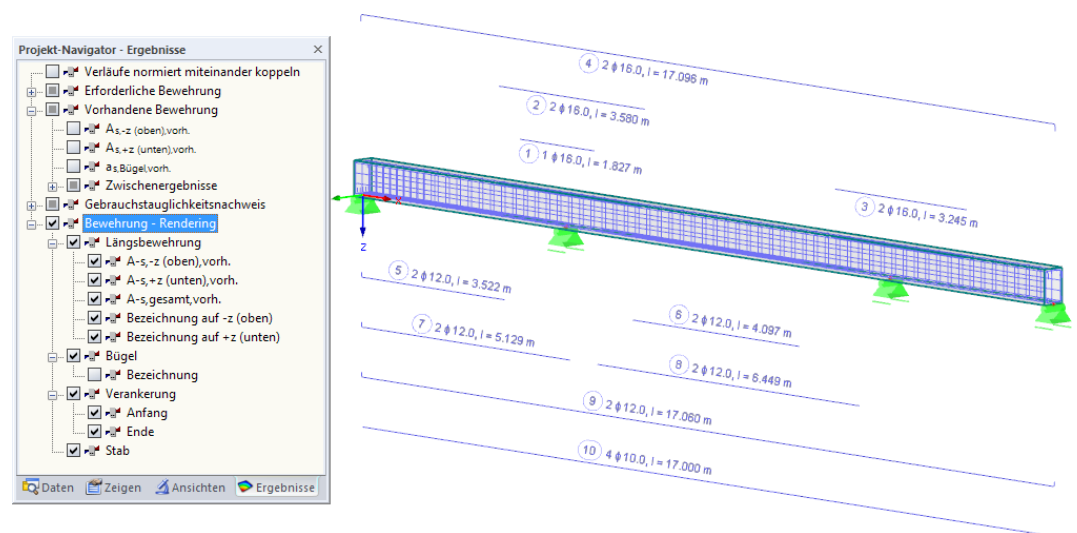


Bild 6.11: 3D-Rendering der Bewehrung in RSTAB



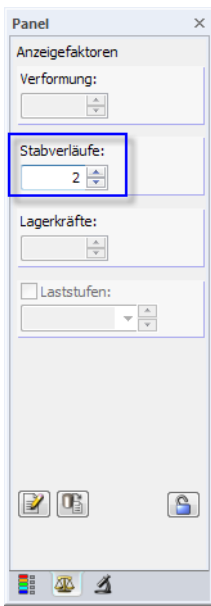
Wie in RSTAB üblich, können die Grafiken mit der Schaltfläche [Drucken] auf den Drucker geleitet oder in das Ausdruckprotokoll übergeben werden (siehe [Kapitel 7.2, Seite 152](#)).

Panel

Für die Auswertung steht das Farbpanel mit den üblichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Funktionen sind im Kapitel 3.4.6 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

Im zweiten Register des Panels können die *Anzeigefaktoren* für die Bewehrungen, Spannungen, Dehnungen oder Tragfähigkeiten eingestellt werden.

Das Panel-Register *Filter* ermöglicht es, die Ergebnisse bestimmter Stäbe für die Anzeige auszuwählen. Diese Funktion ist im Kapitel 9.7.3 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.



Register *Faktoren*

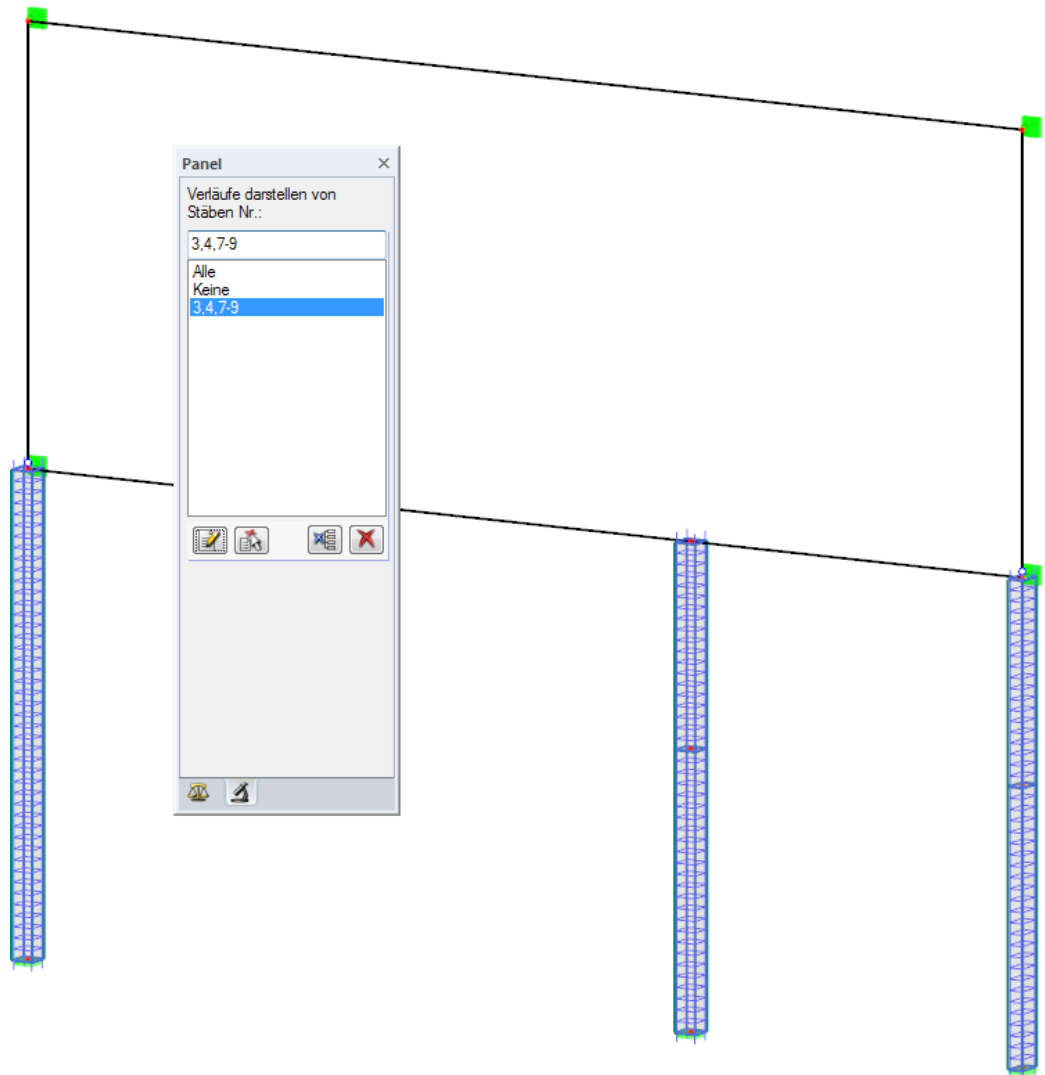
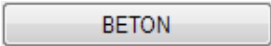


Bild 6.12: Anzeige ausgewählter Stäbe über Register *Filter*

Das Bild oben zeigt die Bewehrung der Betonstützen eines Gebäudes. Die übrigen Stäbe werden im Modell dargestellt, sind in der Anzeige jedoch ohne Bewehrungen.

Die Rückkehr zum Zusatzmodul ist über die Panel-Schaltfläche [BETON] möglich.



6.4 Ergebnisverläufe

Im RSTAB-Arbeitsfenster sind die Ergebnisverläufe zugänglich über das Menü

Ergebnisse → **Ergebnisverläufe an selektierten Stäben**



oder die entsprechende Schaltfläche in der RSTAB-Symbolleiste.

Es öffnet sich ein Fenster, das den Verlauf der Bewehrungsflächen und Zwischenergebnisse am gewählten Stab oder Stabsatz zeigt.

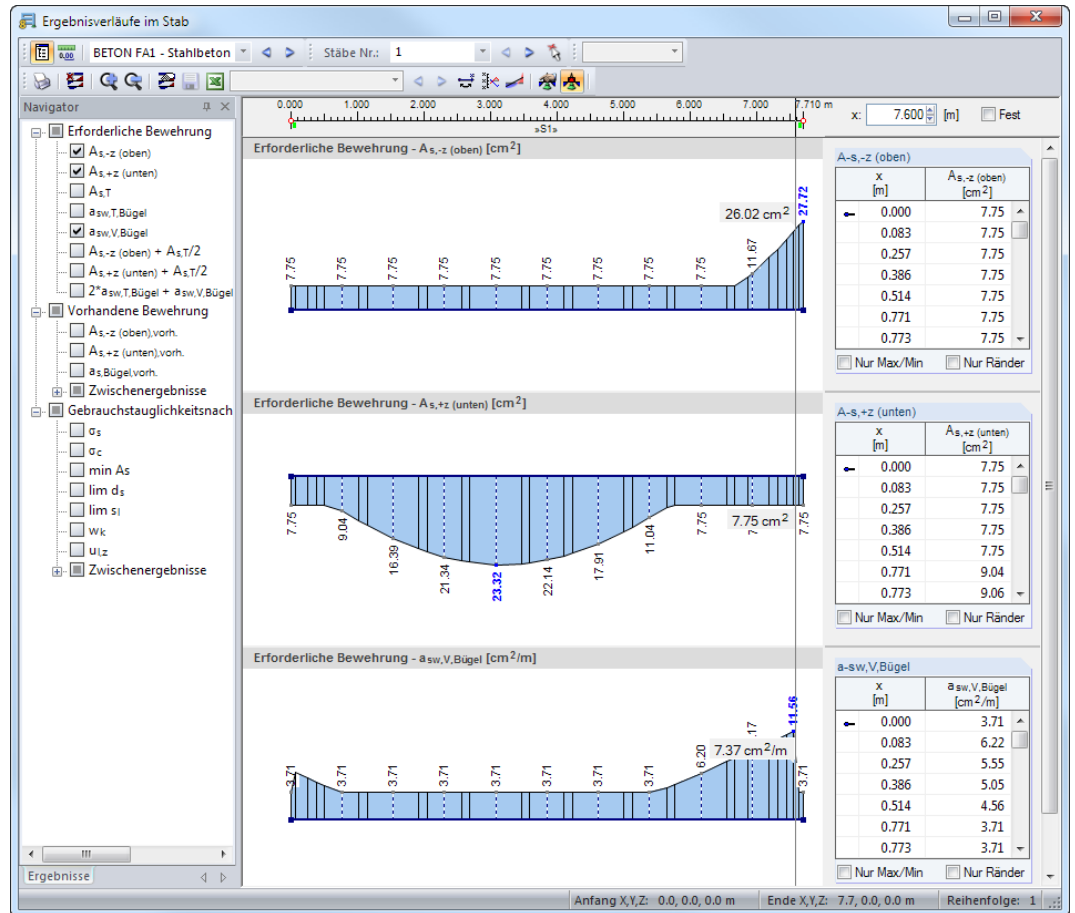


Bild 6.13: Dialog *Ergebnisverläufe im Stab*

Links im Navigator können die Bewehrungen und Zwischenergebnisse ausgewählt werden. Über die Listen in der Symbolleiste kann zwischen den Bemessungsfällen von BETON und den Stäben bzw. Stabsätzen gewechselt werden.

Eine ausführliche Beschreibung des Dialogs *Ergebnisverläufe* (u. a. mit den Glättungsoptionen) finden Sie im Kapitel 9.5 des RSTAB-Handbuchs.

7 Ausdruck

7.1 Ausdruckprotokoll

RSTAB erzeugt für die Daten von BETON ein Ausdruckprotokoll, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Über die Selektionsmöglichkeiten im Ausdruckprotokoll lässt sich steuern, welche Daten des Bemessungsmoduls im Ausdruck erscheinen.

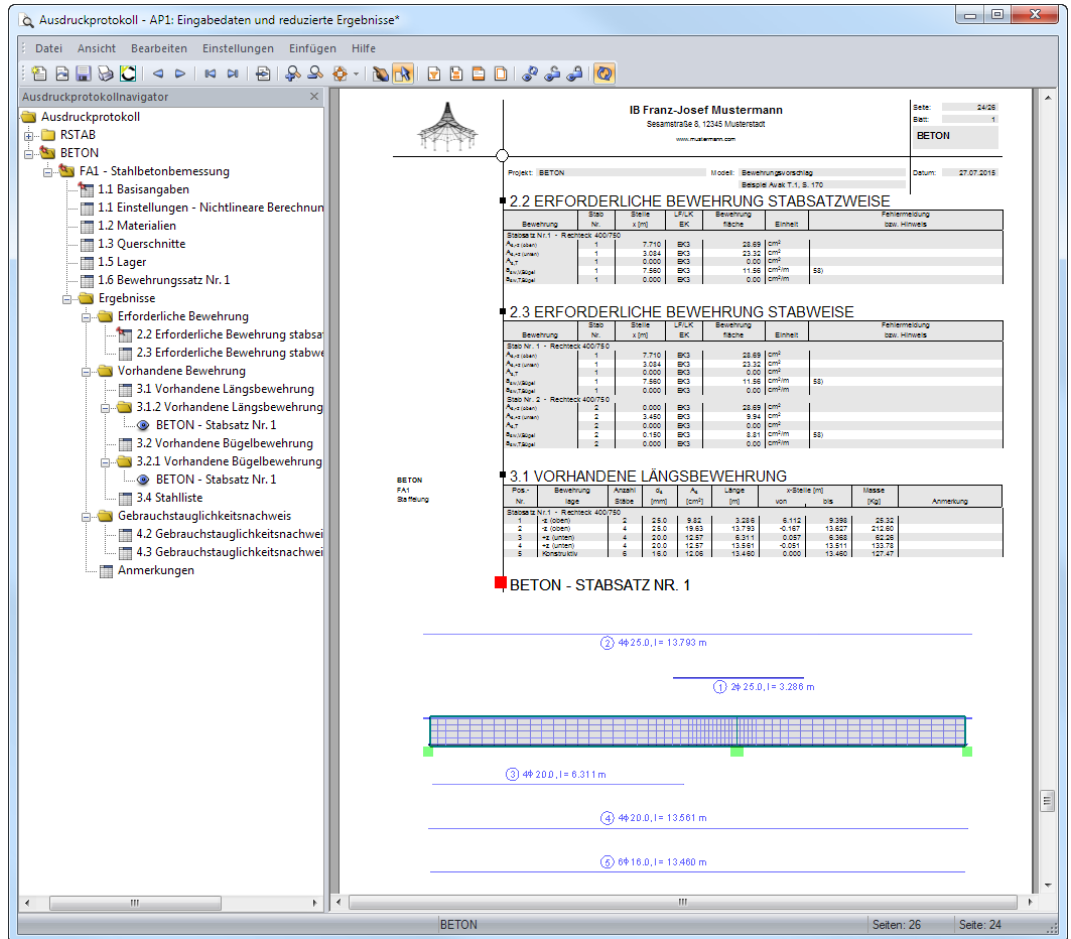


Bild 7.1: Bemessungsergebnisse im Ausdruckprotokoll

Im Ausdruckprotokoll sind auch die Bewehrungsgrafiken der Masken 3.1 und 3.2 voreingestellt (siehe Bild 7.1).



Das Ausdruckprotokoll ist im RSTAB-Handbuch beschrieben. Das Kapitel 10.1.3.5 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* erläutert, wie die Ein- und Ausgabedaten der Zusatzmodule für den Ausdruck aufbereitet werden können.

Im Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion* bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl der Ein- und Ausgabedaten (siehe Bild 7.2). Damit können die Bewehrungen, Stab- und Zwischenergebnisse individuell für die Dokumentation aufbereitet werden.

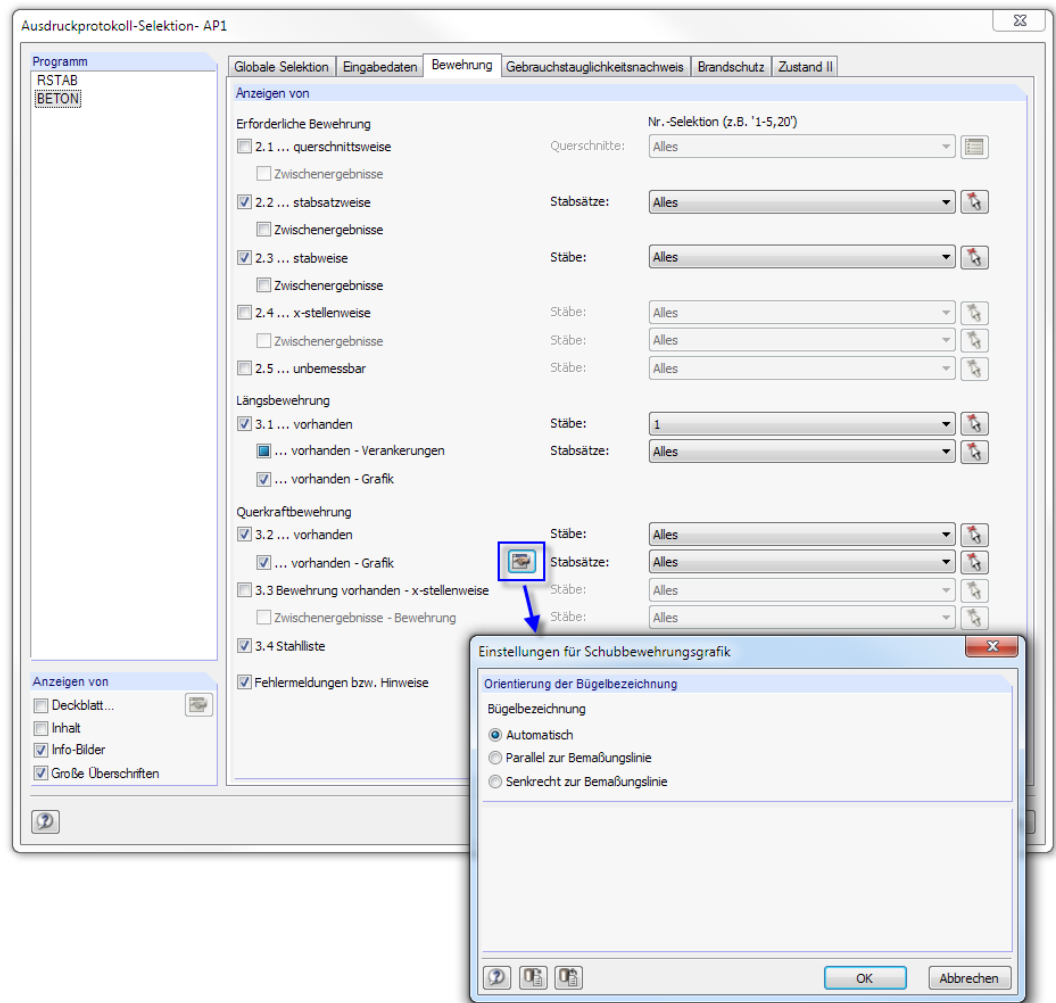


Bild 7.2: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Bewehrung*

Bei großen Systemen mit vielen Bemessungsfällen trägt die Aufteilung der Daten in mehrere Ausdruckprotokolle zur Übersichtlichkeit bei.

7.2 Grafikausdruck

In RSTAB kann jedes Bild, das im Arbeitsfenster angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übergeben oder direkt zum Drucker geleitet werden. Somit lassen sich auch die am RSTAB-Modell gezeigten Bewehrungen und Nachweiskriterien für den Ausdruck aufbereiten.



Das Drucken von Grafiken ist im Kapitel 10.2 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

Die aktuelle Bewehrungsgrafik kann gedruckt werden über das Menü

Datei → **Grafik drucken**



oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

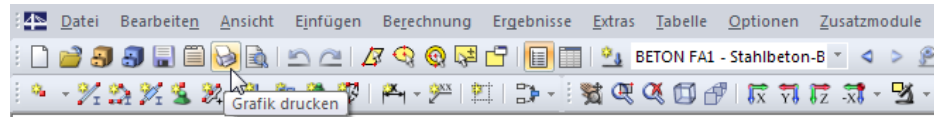



Bild 7.3: Schaltfläche *Drucken* in RSTAB-Symbolleiste

Die Schaltfläche  steht auch in den Masken 3.1 und 3.2 von BETON sowie im Fenster des 3D-Renderings zur Verfügung (siehe Bild 6.4, Seite 142).

3.1 Vorhandene Längsbewehrung

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Position Nr.	Bewehrungslage	Anzahl Stäbe	d_s [mm]	A_s [cm ²]	Länge [m]	x-Stelle [m]		Verankerung	Masse [kg]	Anmerkung g
						von	bis			
Stabsatz Nr. 1 - Rechteck 400/750										
1	-z (oben)	2	25.0	9.82	3.286	6.112	9.398	<input checked="" type="checkbox"/>	25.32	
2	-z (oben)	4	25.0	19.63	13.793	-0.167	13.627	<input checked="" type="checkbox"/>	212.60	
3	+z (unten)	4	20.0	12.57	6.311	0.057	6.368	<input checked="" type="checkbox"/>	62.26	
4	+z (unten)	4	20.0	12.57	13.561	-0.051	13.511	<input checked="" type="checkbox"/>	133.78	
5	Konstruktiv	6	16.0	12.06	13.460	0.000	13.460	<input type="checkbox"/>	127.47	

Bild 7.4: Schaltfläche [Drucken] in Maske 3.1 von BETON

Es erscheint der im Bild 7.5 dargestellte Dialog *Grafikausdruck*.

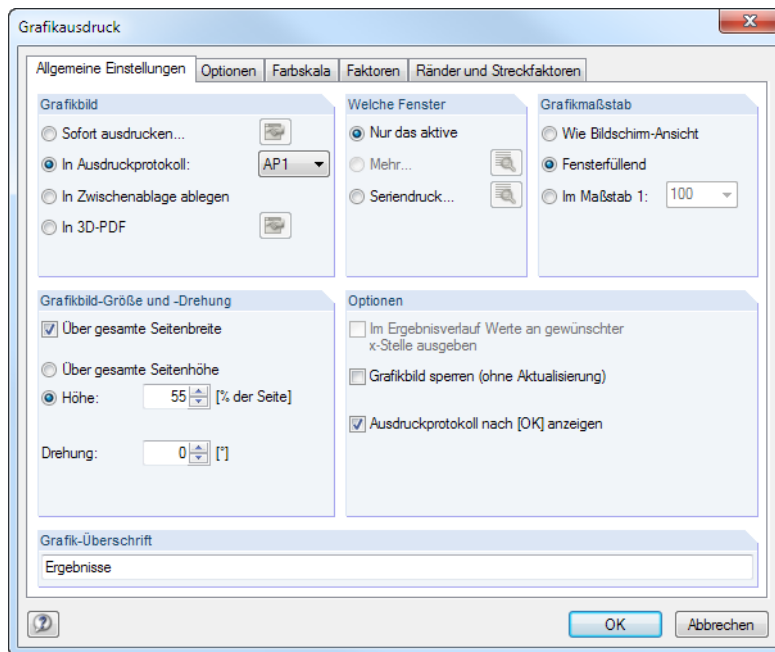


Bild 7.5: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

Eine Grafik kann im Ausdruckprotokoll per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.

Um eine Grafik nachträglich im Ausdruckprotokoll anzupassen, klicken Sie diese mit der rechten Maustaste an. Die Option *Eigenschaften* im Kontextmenü ruft wieder den Dialog *Grafikausdruck* auf, in dem Sie die Änderungen vornehmen können.

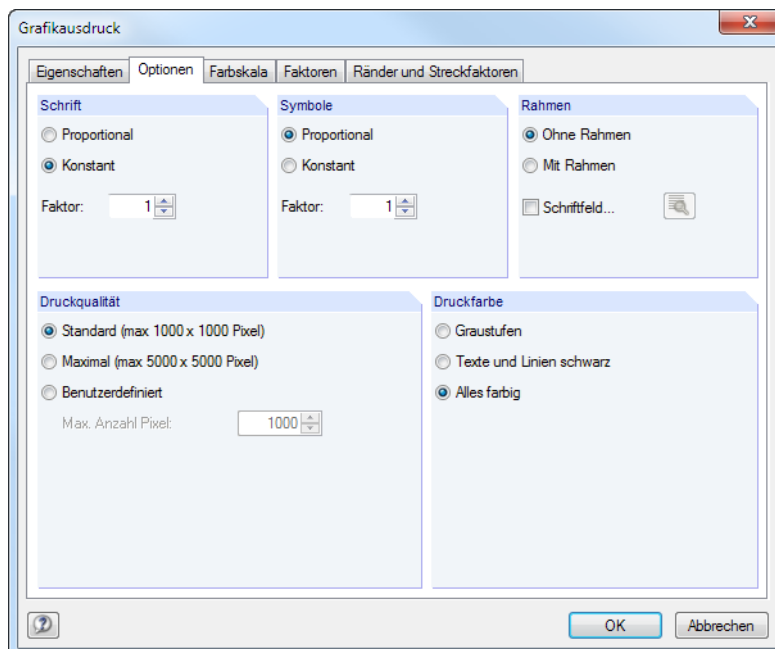
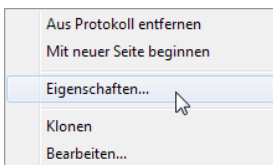


Bild 7.6: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*



Über die Kontextmenü-Option *Bearbeiten* kann die Ansicht (Blickwinkel, Objekt- und Werteanzeige etc.) im RSTAB-Arbeitsfenster geändert werden.

Das Register *Basis* des *Grafikausdruck*-Dialogs bietet die Möglichkeit, die Grafik als *3D-PDF* abzuliegen (siehe [Bild 7.5](#)). Damit können die Bewehrungsdarstellungen und Ergebnisgrafiken auch ohne RSTAB interaktiv betrachtet werden.

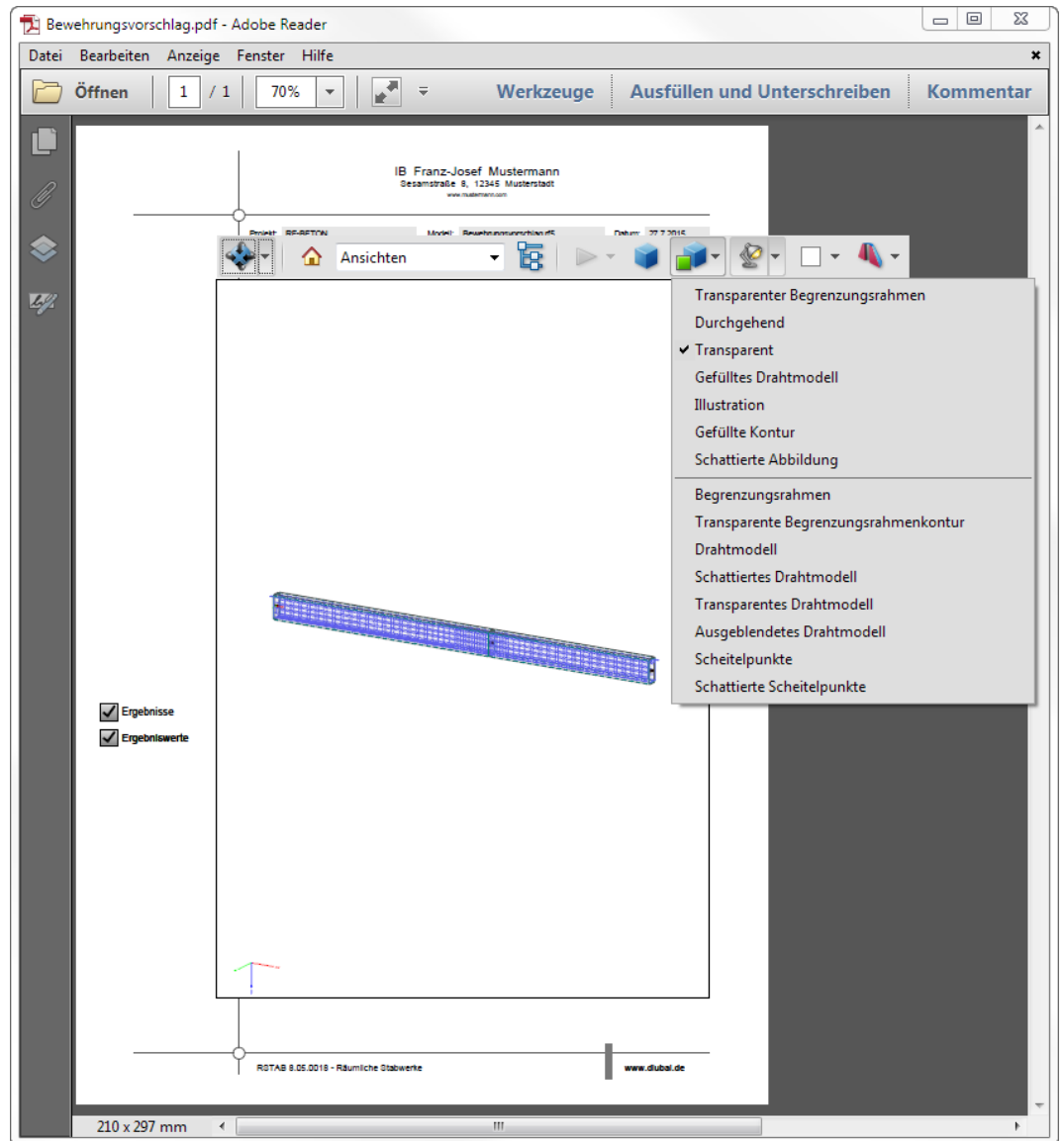


Bild 7.7: 3D-PDF aus BETON

8 Allgemeine Funktionen

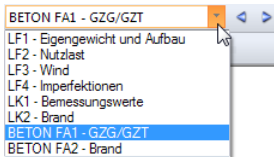
Dieses Kapitel stellt einige Menüfunktionen und Exportmöglichkeiten für die Bemessungsergebnisse vor.

8.1 Bemessungsfälle

Bemessungsfälle ermöglichen es, Stäbe und Stabsätze für die Nachweise zu gruppieren oder in Bemessungsvarianten (z. B. geänderte Materialien oder Bewehrungsvorgaben, nichtlineare Analyse) zu behandeln.

Es bereitet kein Problem, einen Stab in verschiedenen Bemessungsfällen zu untersuchen.

Die Bemessungsfälle von BETON sind in RSTAB über die Lastfall-Liste der Symbolleiste zugänglich.



Neuen Bemessungsfall anlegen

Ein Bemessungsfall wird angelegt über das BETON-Menü

Datei → **Neuer Fall**.

Es erscheint folgender Dialog.

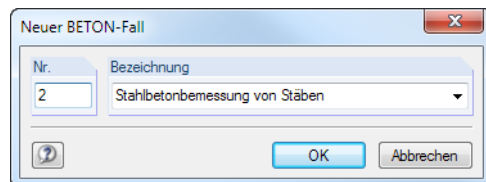


Bild 8.1: Dialog *Neuer BETON-Fall*

In diesem Dialog ist eine (noch freie) *Nummer* für den neuen Bemessungsfall anzugeben. Die *Bezeichnung* erleichtert die Auswahl in der Lastfall-Liste.

Nach [OK] erscheint die BETON-Maske *1.1 Basisangaben* zur Eingabe der Bemessungsdaten.

Bemessungsfall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalls wird geändert über das BETON-Menü

Datei → **Fall umbenennen**.

Es erscheint folgender Dialog.

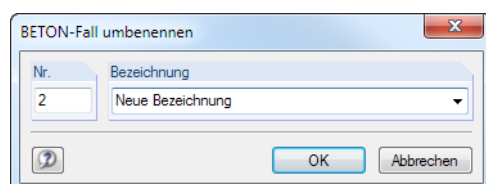


Bild 8.2: Dialog *BETON-Fall umbenennen*

Hier kann nicht nur eine andere *Bezeichnung*, sondern auch eine andere *Nummer* für den Bemessungsfall festgelegt werden.

Bemessungsfall kopieren

Die Eingabedaten des aktuellen Bemessungsfalls werden kopiert über das BETON-Menü

Datei → **Fall kopieren**.

Es erscheint folgender Dialog.

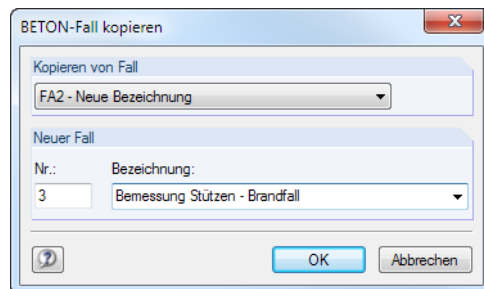


Bild 8.3: Dialog *BETON-Fall kopieren*

Es ist die *Nummer* und ggf. eine *Bezeichnung* für den neuen Fall festzulegen.

Bemessungsfall löschen

Bemessungsfälle lassen sich wieder löschen über das BETON-Menü

Datei → **Fall löschen**.

Es erscheint folgender Dialog.

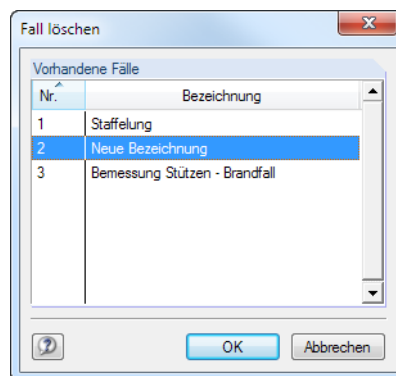


Bild 8.4: Dialog *Fall löschen*

Der Bemessungsfall kann in der Liste *Vorhandene Fälle* ausgewählt werden. Mit [OK] erfolgt der Löschvorgang.

8.2 Querschnittsoptimierung

Wie im [Kapitel 3.3](#) erwähnt, bietet BETON die Möglichkeit einer querschnittswise Optimierung an. Hierzu ist in Spalte C der Maske [1.3 Querschnitte](#) (siehe [Bild 3.17, Seite 64](#)) der relevante Querschnitt durch Anhaken festzulegen. Dies erfolgt am einfachsten über einen Klick in das Kästchen. Es erscheint folgender Dialog.

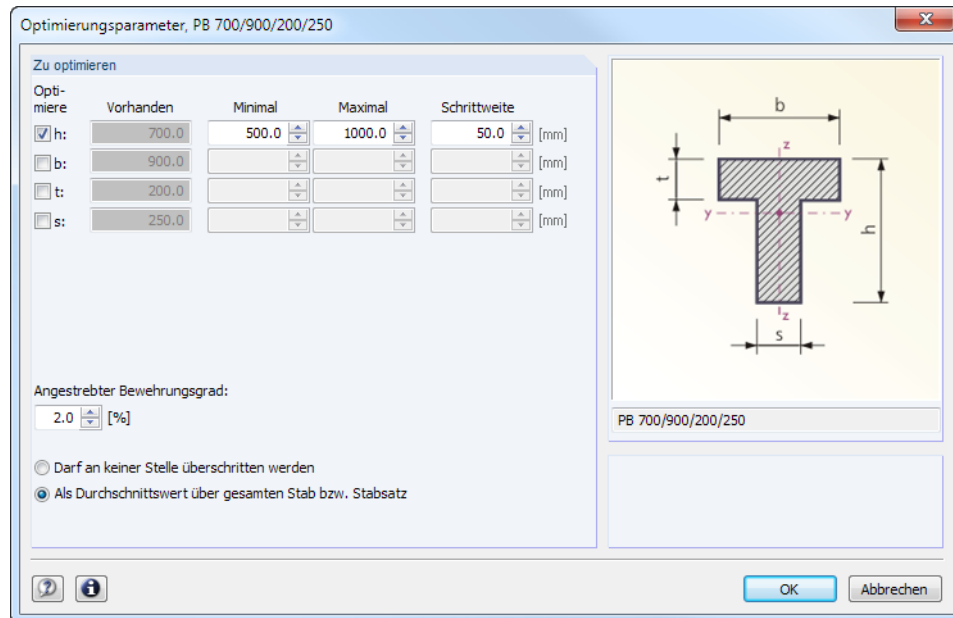


Bild 8.5: Dialog *Optimierungsparameter* eines Plattenbalkens

In der Spalte *Optimiere* ist durch Anhaken anzugeben, welcher (oder welche) Parameter geändert werden soll. Damit werden die Spalten *Minimal* und *Maximal* zugänglich, in denen die Unter- und Obergrenzen des Parameters definiert werden können. Die Spalte *Schrittweite* steuert das Intervall, in dem die Abmessungen des Parameters beim Optimierungsprozess variieren.

Als Optimierungskriterium gilt, dass ein *Angestrebter Bewehrungsgrad* entweder an keiner Stelle überschritten werden darf oder als Durchschnittswert im ganzen Stab oder Stabsatz vorliegen soll. Der gewünschte Bewehrungsgrad kann angegeben werden.



Bei der Optimierung untersucht BETON, mit welchen Abmessungen der Nachweis noch erfüllt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Schnittgrößen nicht automatisch neu mit den geänderten Querschnitten berechnet werden (wegen der geänderten Steifigkeiten im System können die Schnittgrößen erheblich abweichen). Vielmehr entscheidet der Anwender, wann die optimierten Querschnitte zur Neuberechnung nach RSTAB übergeben werden. Es ist daher zu empfehlen, nach der ersten Optimierung die Schnittgrößen mit den geänderten Querschnitten neu zu berechnen und dann die Querschnitte nochmals optimieren zu lassen.

Die geänderten Querschnitte können nach RSTAB exportiert werden: Stellen Sie die Maske [1.3 Querschnitte](#) ein und wählen dann das Menü

Bearbeiten → **Querschnitt an RSTAB übergeben.**

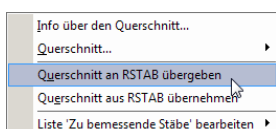
Über das Kontextmenü der Tabellenzeile in Maske [1.3](#) lässt sich der geänderte Querschnitt ebenfalls exportieren.

Vor der Übergabe erfolgt eine Abfrage, ob die Ergebnisse von RSTAB gelöscht werden sollen.

Berechnung

Nach dem Start der [Berechnung] in BETON werden die RSTAB-Schnittgrößen und die Nachweise in einem Rechenlauf ermittelt.

Wurde der Querschnitt noch nicht nach RSTAB exportiert, so lässt sich mit der Kontextmenü-Option wieder der ursprüngliche *Querschnitt aus RSTAB übernehmen*.



8.3 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RSTAB und für die Zusatzmodule gemeinsam verwaltet. In BETON ist der Dialog zum Anpassen der Einheiten zugänglich über das Menü

Einstellungen → **Einheiten und Dezimalstellen**.

Es erscheint der aus RSTAB bekannte Dialog. In der Liste *Programm / Modul* ist BETON voreingestellt.

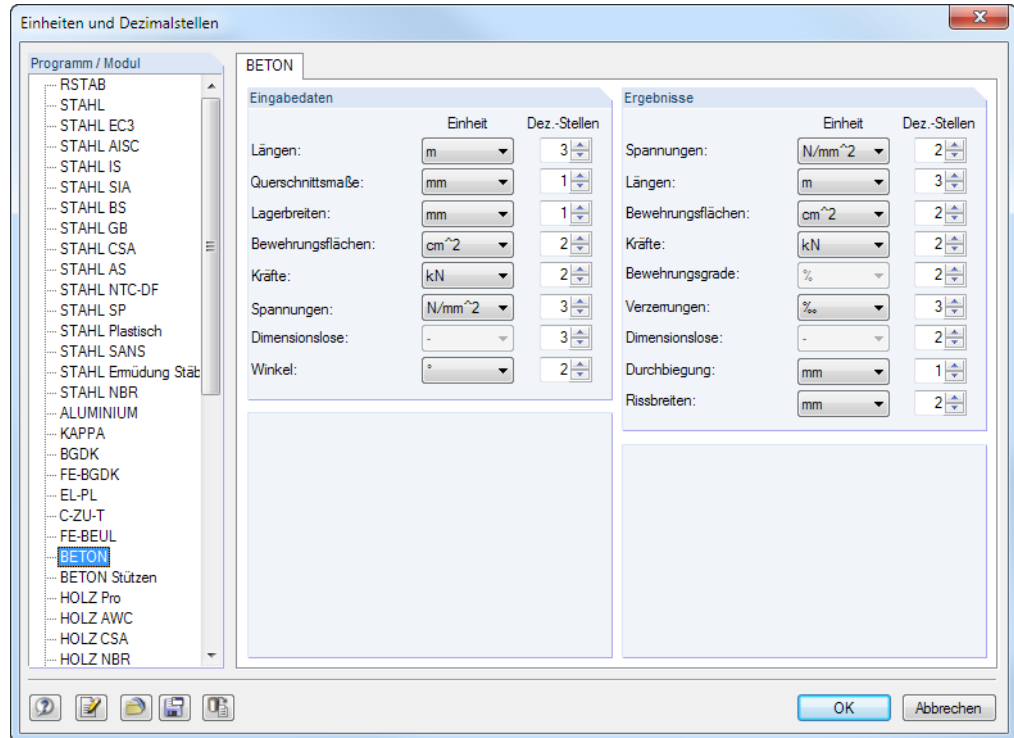


Bild 8.6: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Diese Funktionen sind im Kapitel 11.1.3 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

8.4 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von BETON lassen sich auch in anderen Programmen verwenden.

Zwischenablage

Markierte Zellen der Ergebnismasken können mit [Strg]+[C] in die Zwischenablage kopiert und dann mit [Strg]+[V] z. B. in ein Textverarbeitungsprogramm eingefügt werden. Die Überschriften der Tabellenspalten bleiben unberücksichtigt.

Ausdruckprotokoll

Die Daten von BETON können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe [Kapitel 7.1, Seite 150](#)) und dort exportiert werden über das Menü

Datei → **Export in RTF**.

Diese Funktion ist im Kapitel 10.1.11 des RSTAB-Handbuchs beschrieben.

MS Excel

BETON ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über das Menü

Datei → **Tabellen exportieren**.

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

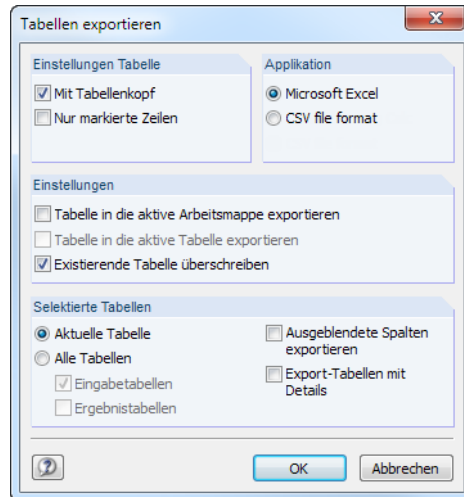


Bild 8.7: Dialog Tabellen exportieren

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden.

Excel wird automatisch aufgerufen, d. h. das Programm braucht vorher nicht geöffnet werden.

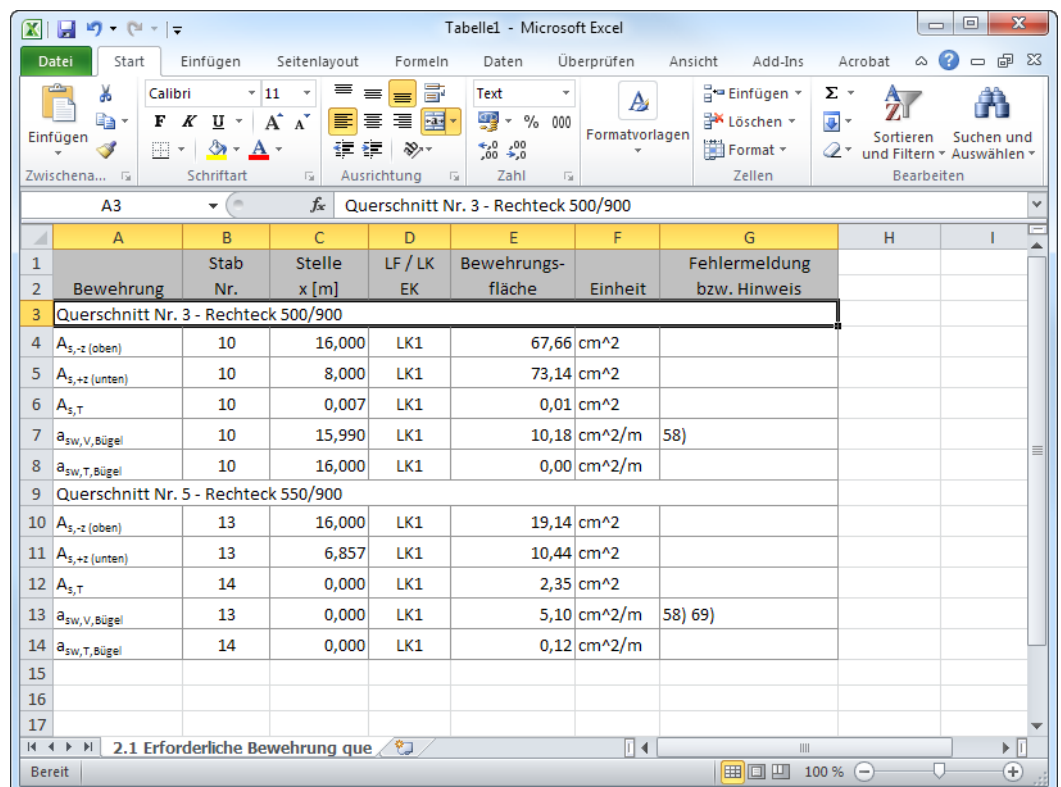


Bild 8.8: Ergebnis in Excel

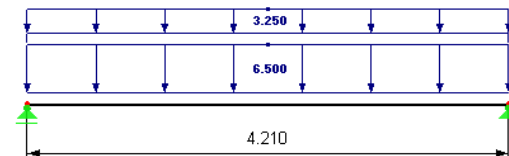
9 Beispiele

9.1 Direkte Verformungsberechnung

Das folgende Beispiel beschreibt den *Nachweis der Begrenzung der Verformungen mit direkter Berechnung* gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3.

9.1.1 Eingabedaten

System



Querschnitt

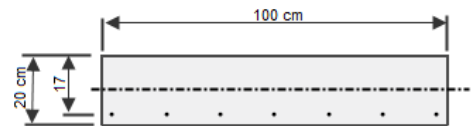


Bild 9.1: System, Belastung und Querschnitt

Plattendicke	20 cm
Material	Beton C20/25 BSt 500
Bewehrung	$A_{s,vorh} = 4,45 \text{ cm}^2$ $d = 17 \text{ cm}$

Einwirkungen

Eigengewicht	$0,20 \cdot 25,0 = 5,00 \text{ kN/m}$
Belag und Putz	1,50 kN/m
	$\Rightarrow g_k = 6,50 \text{ kN/m}$
Nutzlast Büro	2,00 kN/m
Trennwandzuschlag	1,25 kN/m
	$\Rightarrow q_k = 3,25 \text{ kN/m}$

Maximalmoment für quasi-ständige Belastung

Kombinationsbeiwert	$\psi_2 = 0,3$ (Nutzlast Büro)
Kombinationsbeiwert	$\psi_2 = 1,0$ (Trennwandzuschlag)
Quasi-ständige Belastung	$6,50 + 0,30 \cdot 2,00 + 1,0 \cdot 1,25 = 8,35 \text{ kN/m}$
Maximalmoment	$M_{\text{quasi-ständig}} = 8,35 \cdot 4,21^2 / 8 = 18,50 \text{ kNm}$

9.1.2 Vorwerte der Verformungsberechnung

Parameter

Mittlerer E-Modul	$E_{cm} = 30\,000 \text{ MN/m}^2$
Mittlere Zugfestigkeit	$f_{ctm} = 2,2 \text{ MN/m}^2$
Endkriechzahl	$\varphi = 1,8 \text{ (Innenraum)}$
Schwindmaß	$\varepsilon_s = -0,5 \text{ ‰}$

Längsbewehrungsgrad

$$\rho_e = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{4,45 \text{ cm}^2}{100 \cdot 20 \text{ cm}^2} = 0,002\,225$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200\,000}{10\,000} = 20,0$$

Wirksamer Beton-Elastizitätsmodul

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi} = \frac{30\,000}{1 + 2,0} = 10\,000 \text{ MN/m}^2$$

Der Einfluss des Kriechens ist mit der Endkriechzahl φ berücksichtigt.

9.1.3 Krümmung im Zustand I

Querschnittswerte

Höhe der Betondruckzone x_1

$$x_1 = \frac{b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + \alpha_e \cdot A_s \cdot d - A_s \cdot d}{\alpha_e \cdot A_s - A_s + b \cdot h} = \frac{100 \cdot 20 \cdot \frac{20}{2} + 20,0 \cdot 4,45 \cdot 17 - 4,45 \cdot 17}{20 \cdot 4,45 - 4,45 + 100 \cdot 20} = 10,28 \text{ cm}$$

$$\xi = x_1/h = 10,28/20 = 0,514$$

$$\begin{aligned} \kappa &= 1 + 12 \cdot (0,5 - \xi)^2 + 12 \cdot (\alpha - 1) \cdot \rho \cdot \left(\frac{d}{h} - \xi\right)^2 = \\ &= 1 + 12 \cdot (0,5 - 0,514)^2 + 12 \cdot (20 - 1) \cdot 0,002\,225 \cdot \left(\frac{17}{20} - 0,514\right)^2 = 1,06 \end{aligned}$$

$$I_{c,I} = \kappa \cdot b \cdot \frac{h^3}{12} = 1,06 \cdot 100 \cdot \frac{20^3}{12} = 70\,667 \text{ cm}^4 = 0,0007\,067 \text{ m}^4$$

$$W_{c,I} = \frac{I_{c,I}}{h - x_1} = \frac{70\,667}{20 - 10,28} = 7\,270,2 \text{ cm}^3$$

$$S_I = A_s \cdot (d - x_1) = 4,45 \cdot (17 - 10,28) = 29,904 \text{ cm}^3 = 0,000299 \text{ m}^3$$

Krümmung infolge Belastung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_M = \frac{M_{Ed}}{E_{c,eff} \cdot I_c} = \frac{0,01\,850 \text{ MNm}}{10\,000 \text{ MN/m}^2 \cdot 0,0007\,067 \text{ m}^4} = 0,00262 \text{ m}^{-1}$$

Krümmung infolge Schwindens

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cs} = \varepsilon_{cs\infty} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_I}{I_c} = 0,0005 \cdot 20,0 \cdot \frac{0,000299 \text{ m}^3}{0,0007\,067 \text{ m}^4} = 0,00042 \text{ m}^{-1}$$

Gesamtkrümmung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{tot,I}} = \left(\frac{1}{r}\right)_M + \left(\frac{1}{r}\right)_{\text{cs}} = 0,00262 + 0,00042 = 0,00304 \text{ m}^{-1}$$

9.1.4 Krümmung im Zustand II
Krümmung infolge Belastung

Unter Gebrauchslasten zeigt Beton ein linear elastisches Verhalten. Die Verteilung der Betonspannung über die Druckzone wird dreieckförmig angenommen.

Die Höhe der Betondruckzone kann bestimmt werden zu:

$$x = \rho \cdot \alpha_e \cdot d \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\rho \cdot \alpha_e}} \right] = 0,0026 \cdot 20,0 \cdot 17 \text{ cm} \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{0,0026 \cdot 20,0}} \right] = 4,68 \text{ cm}$$

Die Zugspannung in der Bewehrung ermittelt sich mit $M_{\text{Ed}} = 18,5 \text{ kNm}$ wie folgt:

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right)} = \frac{18,5 \cdot 10^{-3}}{4,45 \cdot 10^{-4} \cdot \left(0,17 - \frac{0,0468}{3}\right)} = 269,60 \text{ N/mm}^2$$

Die Krümmung nach abgeschlossener Rissbildung ermittelt sich zu:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{M,\text{II}} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{1,346 \cdot 10^{-3}}{170 - 46,8} = 0,010931 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{mit } \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{269,26}{200\,000} = 1,346 \cdot 10^{-3}$$

Krümmung infolge Schwindens

Die Krümmung im Zustand II wird in der Handrechnung mit einer Tabelle aus [13] ermittelt (siehe Bild 9.2).

$$\omega_1 = \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} = 20,0 \cdot \frac{4,45 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm} \cdot 17 \text{ cm}} = 0,052 \quad \rightarrow \beta = 1,10$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{cs,II}} = \varepsilon_{\text{cs}\infty} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_{\text{II}}}{I_{\text{II}}} = \varepsilon_{\text{cs}\infty} \cdot \beta \cdot \frac{1}{d} = 0,0005 \cdot 1,10 \cdot \frac{1}{0,17 \text{ m}} = 0,00324 \text{ m}^{-1}$$

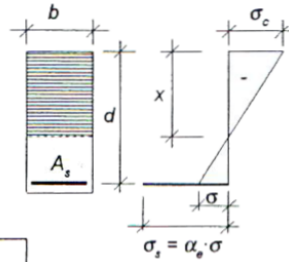
Gesamtkrümmung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{tot,II}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{M,\text{II}} + \left(\frac{1}{r}\right)_{\text{cs,II}} = 0,01093 + 0,00324 = 0,01417 \text{ m}^{-1}$$

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Berechnungstafel für Spannungen, Krümmung und Flächenwerte im reinen Zustand II eines Rechteckquerschnitts

EC2, 4.4.1.2 : $\alpha_s = E_s / E_c = 15$
 Betonstahl S 500 : $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MN/m}^2$



ω_1	$\xi = k_s$	$\zeta = k_t$	$2/(\xi \cdot \zeta)$	$2/(\xi^2 \cdot \zeta)$	β
0,001	0,044	0,985	46,41	1061	1,01
0,002	0,061	0,980	33,32	544	1,02
0,003	0,075	0,975	27,52	369	1,03
0,004	0,086	0,971	24,07	281	1,03
0,005	0,095	0,968	21,71	228	1,03
0,006	0,104	0,965	19,98	193	1,04
0,007	0,112	0,963	18,63	167	1,04
0,008	0,119	0,960	17,54	148	1,04
0,009	0,125	0,958	16,64	133	1,04
0,010	0,132	0,956	15,87	120	1,05
0,012	0,143	0,952	14,65	102	1,05
0,014	0,154	0,949	13,70	89,0	1,05
0,016	0,164	0,945	12,93	79,0	1,06
0,018	0,173	0,942	12,30	71,2	1,06
0,020	0,181	0,940	11,76	65,0	1,06
0,022	0,189	0,937	11,30	59,8	1,07
0,024	0,196	0,935	10,90	55,5	1,07
0,026	0,204	0,932	10,54	51,8	1,07
0,028	0,210	0,930	10,23	48,6	1,08
0,030	0,217	0,928	9,94	45,9	1,08
0,040	0,246	0,918	8,87	36,1	1,09
0,050	0,270	0,910	8,14	30,1	1,10
0,060	0,292	0,903	7,60	26,1	1,11
0,070	0,311	0,896	7,18	23,1	1,12
0,080	0,328	0,891	6,85	20,9	1,12
0,090	0,344	0,885	6,57	19,1	1,13
0,100	0,358	0,881	6,34	17,7	1,14

Tafeleingangswert :

$$\omega_1 = \alpha_s \cdot \frac{A_s}{b \cdot d}$$

E-Modul-Verhältnis :

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$$

Stahlspannung :

$$\sigma_s = \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{M}{A_s \cdot d}$$

Betonspannung :

$$\sigma_c = \frac{2}{\xi \cdot \zeta} \cdot \frac{-M}{b \cdot d^2}$$

Krümmung :

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{2}{\xi^2 \cdot \zeta} \cdot \frac{\alpha_s \cdot M}{E_s \cdot b \cdot d^3}$$

Formel A 4.4 aus dem EC2 :

$$\alpha_s \cdot \left(\frac{S}{J} \right)_n = \beta \cdot \frac{1}{d}$$

Bild 9.2: Berechnungstafel für reinen Zustand II aus [13]

9.1.5 Ermittlung der Durchbiegung

Wie im Kapitel 2.2.5 auf Seite 18 beschrieben kann der wahrscheinliche Wert der Verformung nach Gleichung (7.18) der EN 1992-1-1 ermittelt werden.

Verteilungsbeiwert

Der Verteilungsbeiwert ζ zwischen Zustand I und II bestimmt sich zu:

$$\zeta = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - 1,0 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{232,87}{269,26} \right)^2 = 0,63$$

mit

$$\beta_1 = 1,0 : \text{Rippenstahl}$$

$$\beta_2 = 0,5 : \text{Dauerlast}$$

Das Erstrissmoment M_{cr} beträgt:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot W_I = 2,2 \cdot 0,007270 \cdot 10^3 = 16,0 \text{ kNm}$$

Die Spannung $\sigma_{s,cr}$ unmittelbar nach Rissbildung wird mit M_{cr} wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{s,cr} = \frac{M_{cr}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = \frac{16,0 \cdot 10^{-3}}{4,45 \cdot 10^{-4} \cdot \left(0,17 - \frac{0,0468}{3} \right)} = 232,87 \text{ N/mm}^2$$

Mittlere Krümmung

Mit dem Verteilungsbeiwert ζ ermittelt sich die mittlere Krümmung zu:

$$\frac{1}{r_m} = \zeta \cdot \frac{1}{r_{II}} + (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_I} = 0,63 \cdot 0,01417 + (1 - 0,63) \cdot 0,00304 = 0,01005 \text{ m}^{-1}$$

Verformung

Die Durchbiegung f in Balkenmitte bestimmt sich somit zu:

$$f = k \cdot l_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{r_m} = \frac{5}{48} \cdot 4,21^2 \text{m}^2 \cdot 0,01005 \text{ m}^{-1} = 18,6 \text{ mm}$$

9.1.6 Ergebnis in BETON

Für die Vergleichsrechnung mit BETON müssen einige Parameter festgelegt werden.

In Maske *1.1 Basisangaben* ist der maßgebende Lastfall sowohl im Register *Tragfähigkeit* als auch im Register *Gebrauchstauglichkeit* für die Bemessung auszuwählen. Für den GZG-Nachweis ist zusätzlich das Kontrollfeld **Kriechen/Schwinden berücksichtigen** anzuhaken.

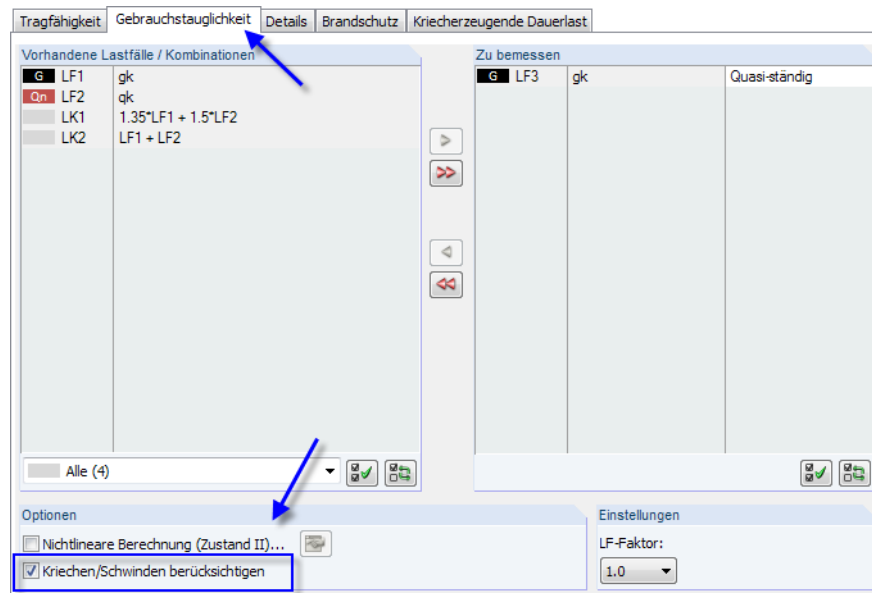


Bild 9.3: Vorgaben für Gebrauchstauglichkeitsnachweis in Maske *1.1 Basisangaben*

Kriechzahl und Schwindmaß können dann in Maske *1.3 Querschnitte* direkt definiert werden.

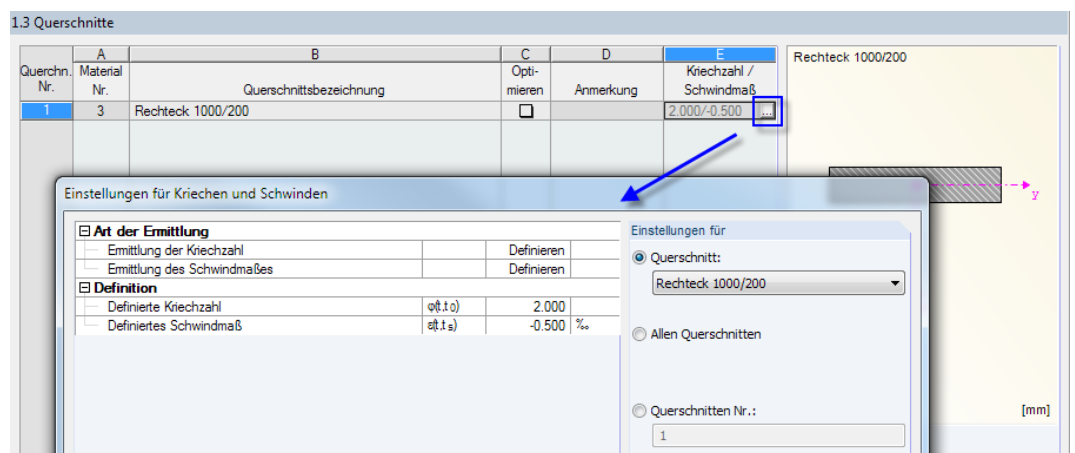


Bild 9.4: Definieren von Kriechzahl und Schwindmaß in Maske *1.3 Querschnitte*

In Maske 1.6 *Bewehrung* sind die Stabdurchmesser und Betondeckung wie folgt anzugeben.



Bild 9.5: Definieren von Bewehrungsdurchmesser und Betondeckung in Maske 1.6 *Bewehrung*

Verformungsnachweis

Verformung $u_{l,z}$

Maske 1.6, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Wenn im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske 1.6 *Bewehrung* der **Verformungsnachweis** angehakt wird (siehe Bild links), erscheint die Zusatzmaske 1.7 *Durchbiegungsdaten*.

1.7 Durchbiegungsdaten							
Nr.	Beziehen auf	Stab Nr.	Bezugslänge Element	L [m]	Überhöhung w_0 [mm]	Grenzwert L / [·]	$u_{z,max}$ [mm]
1	Stab	1	Auflagerabstand	4.210	0.0	250	16.8
2							
3							

Bild 9.6: Definieren der Verformungsparameter in Maske 1.7 *Durchbiegungsdaten*

Als Grenzwert ist die empfohlene Durchbiegung von $l/250$ voreingestellt.

Berechnung

Die [Berechnung] liefert den maximalen Verformungswert von **18,9 mm** in Stabmitte, der die Handrechnung bestätigt. Der Grenzwert von $l/250$ ist unterschritten.

4.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise							
A	B	C	D	E	F	G	H
Stab Nr.	Stelle x [m]	Lastfall	Typ	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung
Stab Nr. 1 - Rechteck 1000/200							
1	2.105	LF3	$u_{z, lokal}$	18.9	16.8	mm	1.13

Bild 9.7: Maske 4.3 *Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise*

Im folgenden Bild sind die Verformungen nach Zustand I und Zustand II gegenübergestellt. Die Rissbildung führt zu einem deutlichen Zuwachs der Durchbiegung.

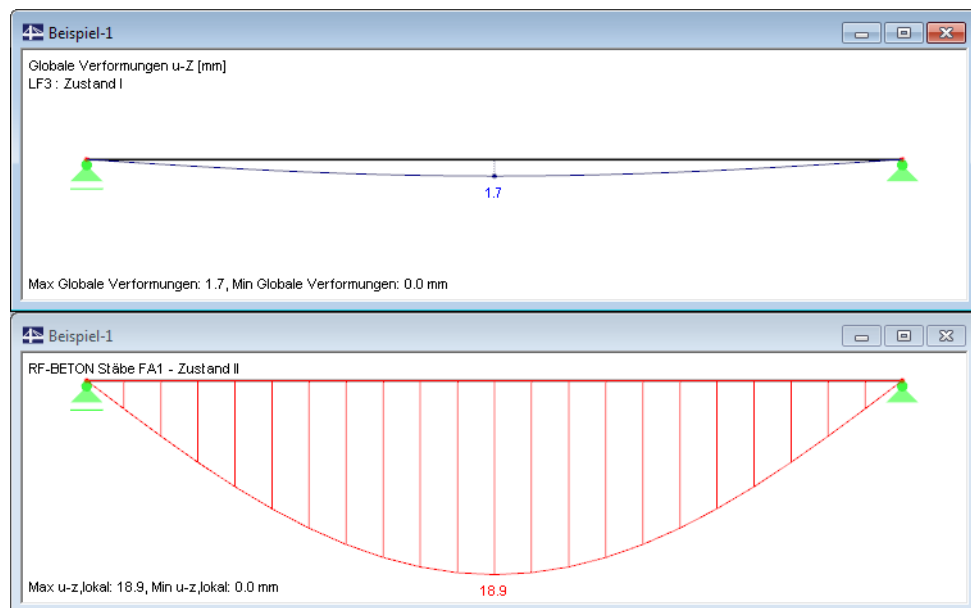


Bild 9.8: Verformungen im Zustand I und Zustand II

9.2 Nichtlineare Verformungsberechnung

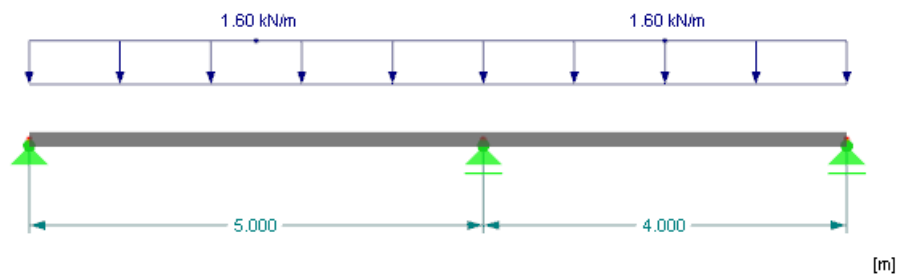
Das zweite Beispiel stellt die Grundprinzipien einer nichtlinearen Berechnung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit vor.

Es wird eine Vergleichsrechnung für ein Zweifeldsystem durchgeführt. Dabei werden der verwendete Ansatz zur Begrenzung der Biegeschlankheit und die angesetzte Zugfestigkeit genauer betrachtet.

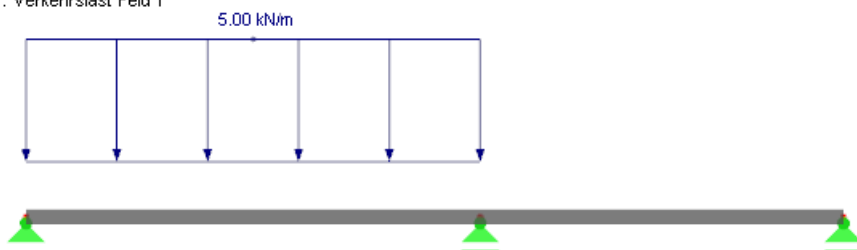
9.2.1 Eingabedaten

System und Belastung

LF1 : Ständige Belastung



LF2 : Verkehrslast Feld 1



LF3 : Verkehrslast Feld 2

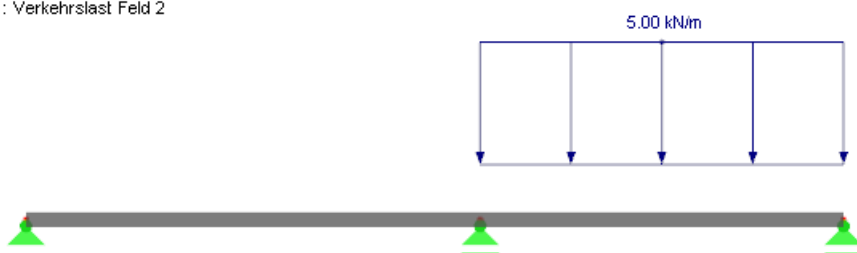


Bild 9.9: System und Belastung

Plattendicke	16 cm
Material	Beton C20/25 BSt 500 S (A)
Expositionsklasse	XC1
Betondeckung	$c_{nom} = 22 \text{ mm}$

Kombination für Grenzzustand der Tragfähigkeit

Mit dem Anhängen der entsprechenden *Basisangaben*-Option erzeugt RSTAB automatisch eine Ergebniskombination, die für die Nachweise der Tragfähigkeit verwendet wird. Diese Ergebniskombination bildet die Umhüllende folgender Lastkombinationen:

- LK1: $1,35 \cdot LF1 + 1,5 \cdot LF2 + 1,5 \cdot LF3$
- LK2: $1,35 \cdot LF1 + 1,5 \cdot LF2$
- LK3: $1,35 \cdot LF1 + 1,5 \cdot LF3$

Kombination für Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Der Kombinationsbeiwert $\psi_{2,1}$ für die quasi-ständige Einwirkungskombination wird mit 0,6 angesetzt. Da eine Überlagerung von Lastfallergebnissen (EK) bei nichtlinearen Berechnungen ausgeschlossen ist, werden für die Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit drei Lastkombinationen mit folgenden Kombinationsbeiwerten verwendet:

- LK4: $LF1 + 0,6 \cdot LF2 + 0,6 \cdot LF3$
- LK5: $LF1 + 0,6 \cdot LF2$
- LK6: $LF1 + 0,6 \cdot LF3$

9.2.2 Eingaben in BETON

Für die Bestimmung der Bewehrung wird nur der Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet. Hierzu wird in Maske 1.1 *Basisangaben* die EK1 zur Bemessung ausgewählt.

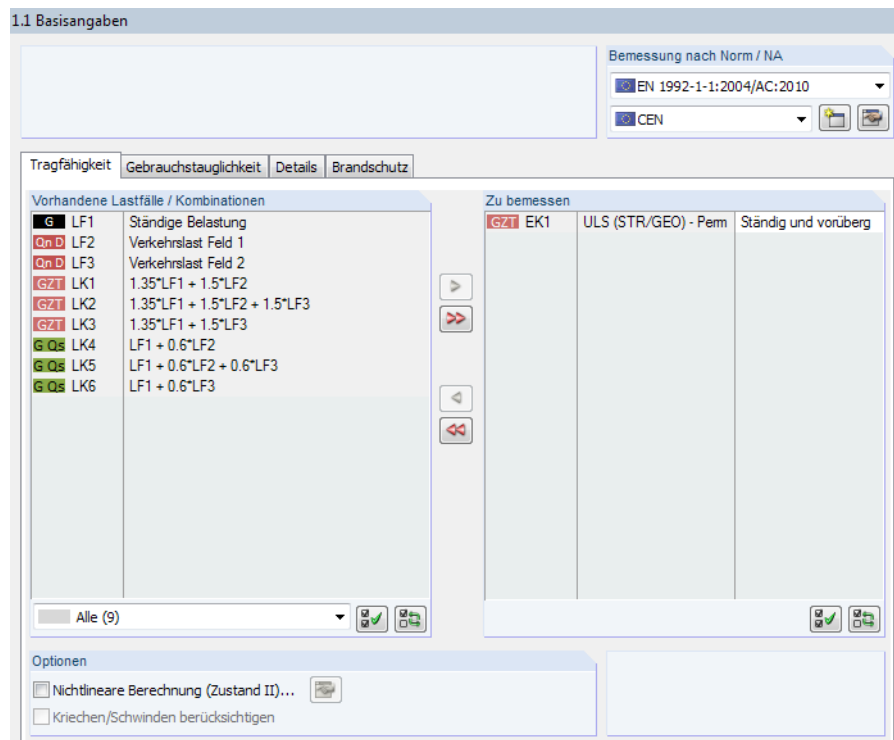


Bild 9.10: Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Tragfähigkeit*

In Maske 1.2 *Materialien* sind die Werkstoffe *Beton C20/25* und *BSt 500 S (A)* voreingestellt.

Die Maske 1.3 *Querschnitte* wird bei der Berücksichtigung des Kriechens an anderer Stelle noch näher vorgestellt (siehe Bild 9.18, Seite 171).

Da die Berechnung unter Berücksichtigung von Momentenumlagerung und -ausrundung erfolgt, sind in Maske 1.5 *Lager* einige Einstellungen zu treffen.

1.5 Lager

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerbreite b [mm]	Direkte Lagerung	Monolithische Verbindung	End-Lager	M-Verhältnis δ [-]	G Kommentar
1	1	180.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	
2	2	240.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.85	
3	3	180.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	
4							
5							
6							
7							
8							
9							

- Berücksichtigung einer begrenzten Momentenumlagerung der Stützmomente nach 5.5
- Momentenausrundung bzw. Bemessung für das Anschnittmoment bei monolithischer Lagerung nach 5.3.2.2
- Querkraftbemessung am Auflagerend bzw. bei gleichmäßig verteilter Last im Abstand d vom Auflagerend nach 6.2.1 (8)
- Querkraftabminderung bei auflagenahen Einzellasten nach 6.2.2(6) bzw. 6.2.3(8)

Bild 9.11: Maske 1.5 Lager

In Spalte B sind die im Bild dargestellten Lagerbreiten einzutragen. Anschließend wird in Spalte F für das Zwischenlager das maximale Stützenmoment auf **85 %** des linear elastischen Werts abgemindert. Damit das Eingabefeld zugänglich ist und die Vorgaben auch für die Bemessung berücksichtigt werden, sind die Kontrollfelder unterhalb der Grafik anzuhaken.

Bei der nichtlinearen Berechnung ist die Abbildung der vorhandenen Bewehrung bedeutsam. Sie ist eine maßgebende Einflussgröße bei der Ermittlung der Krümmungen im gerissenen Zustand. In Maske 1.6 wird ein zusätzlicher Bewehrungsdurchmesser von **6 mm** angelegt.

1.6 Bewehrung

Bewehrungssatz
Nr.: 1 Bezeichnung: []
Angewendet auf
Stäbe: 1,2
Stabsätze: []

Längsbewehrung | Bügel | Bewehrungsanordnung | Mindestbewehrung | Schubfuge | EN 1992-1-1

Betonstahl
Mögliche Durchmesser:
 6.0
 8.0
 10.0
 12.0
 14.0
 16.0
 20.0
 25.0
 28.0
 30.0
 32.0

Bewehrungslagen
Max. Anzahl Lagen: 1
Minimaler lichter Bewehrungsabstand
- Erste Lage a: 20.0 [mm]
- Weitere Lagen b: [] [mm]

Verankerungsart
Gerade

Stahlgerade
Bewehrungsart
Kegel
Stufen

Anzahl berechnete: 3
Anzahl Stäbe: 2
As: 0.00 0.00 [cm²]

Querschnitt
1 - Rechteck 100/16
Rechteck 100/16
[cm]

Einstellungen
 Bewehrungsvorschlag vornehmen

Liste der möglichen Durchmesser bearbeiten
Durchmesser für Längsbewehrung (z.B. 8.0 10.0 12.0 ...)
6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 20.0 25.0 28.0 30.0 32.0

Bild 9.12: Maske 1.6 Bewehrung, Register Längsbewehrung

Im Register *Bewehrungsanordnung* der Maske *1.6 Bewehrung* werden die Betondeckungen mit **22 mm** festgelegt. Das für die Bemessung angesetzte Achsmaß beträgt somit 25 mm.

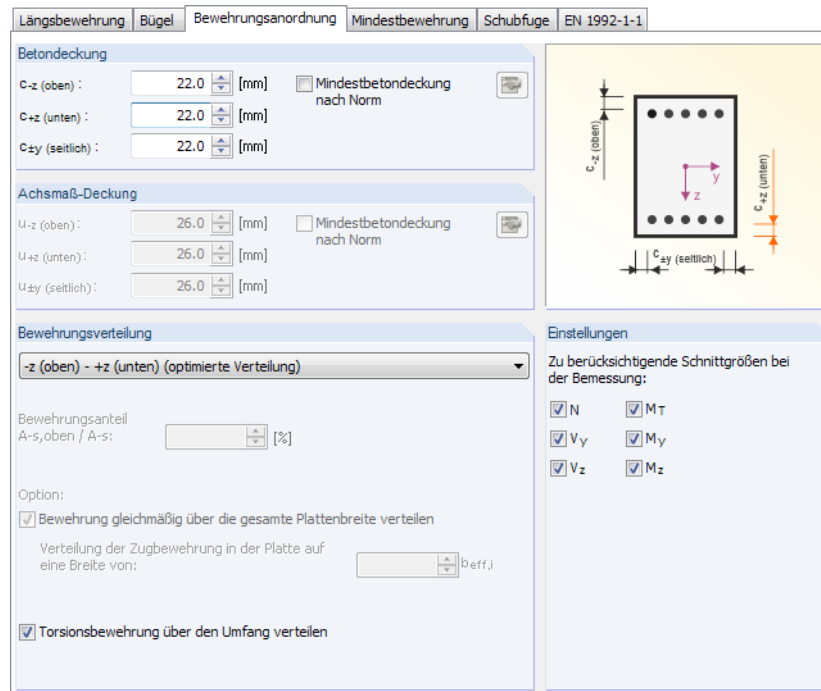


Bild 9.13: Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung*

Berechnung

Damit ist die Eingabe abgeschlossen und die [Berechnung] kann gestartet werden.

9.2.3 Kontrolle der Bewehrung

Die in der Ergebnismaske 3.1 ausgegebene Längsbewehrung bildet die Grundlage für die nicht-lineare Berechnung.

3.1 Vorhandene Längsbewehrung

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Position Nr.	Bewehrungslage	Anzahl Stäbe	d_s [mm]	A_s [cm ²]	Länge [cm]	x-Stelle [cm] von	bis	Verankerung	Masse [kg]	Anmerkung
Stab Nr. 1 - Rechteck 100/16										
1	-z (oben)	20	6.0	5.65	504.000	-4.000	500.000	<input checked="" type="checkbox"/>	22.37	
2	+z (unten)	22	6.0	6.22	504.000	-4.000	500.000	<input checked="" type="checkbox"/>	24.61	
Stab Nr. 2 - Rechteck 100/16										
1	-z (oben)	20	6.0	5.65	404.000	0.000	404.000	<input checked="" type="checkbox"/>	17.93	
2	+z (unten)	13	6.0	3.68	404.000	0.000	404.000	<input checked="" type="checkbox"/>	11.66	

Bild 9.14: Maske *3.1 Vorhandene Längsbewehrung*

9.2.4 Vorgaben für nichtlineare Berechnung

Die nichtlineare Berechnung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske *1.1 Basisangaben* vorbereitet.

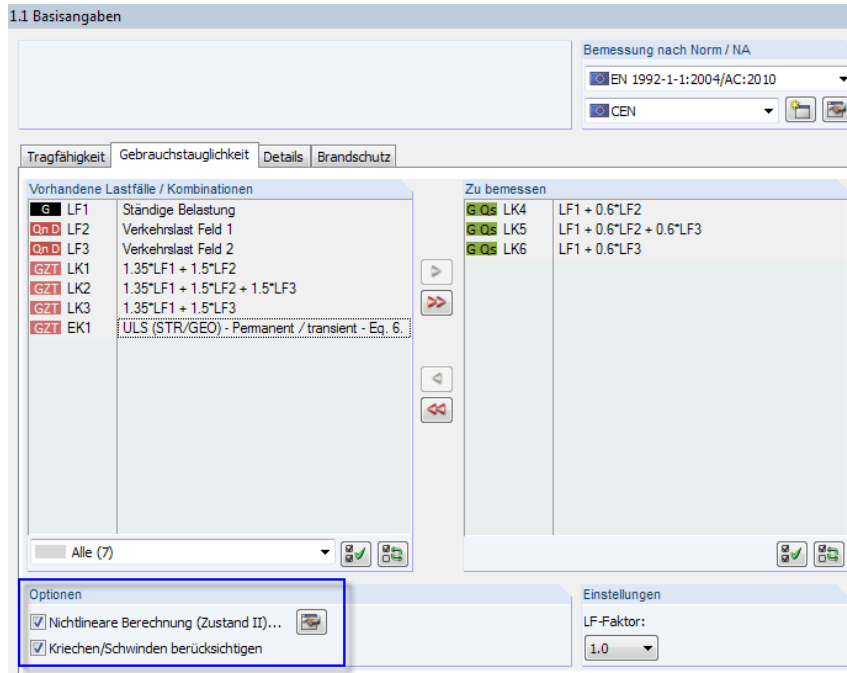


Bild 9.15: Maske *1.1 Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Es werden die für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit definierten Lastkombinationen **LK4 bis LK6** zur Bemessung ausgewählt. Zusätzlich werden die Kontrollfelder *Nichtlineare Berechnung* und *Kriechen/Schwinden berücksichtigen* angehakt.



Die Schaltfläche [Einstellungen zur nichtlinearen Berechnung] öffnet den gleichnamigen Dialog. Die Voreinstellungen des Registers *Nachweisverfahren* bleiben unverändert. Im Register *Tension Stiffening* werden folgende Einstellungen getroffen.

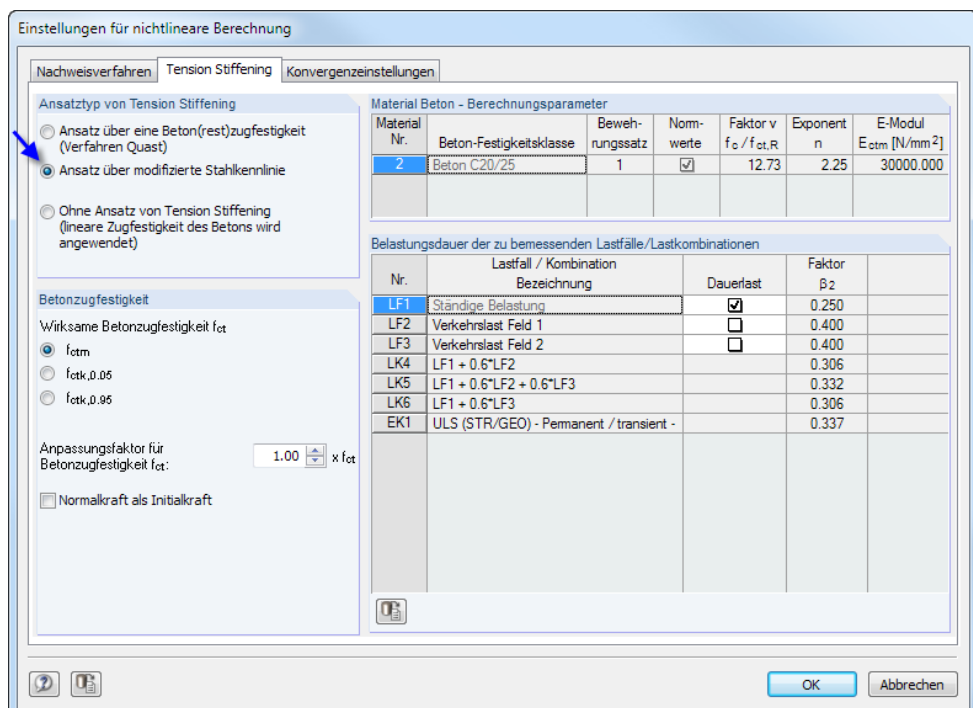


Bild 9.16: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Tension Stiffening*

Es wird der Ansatz über die *modifizierte Stahlkennlinie* gewählt. Der Anpassungsfaktor der Zugfestigkeit wird vorerst auf $1,00 \cdot f_{ct}$ belassen. Damit wird mit der in EN 1992-1-1, Tabelle 3.1 angegebenen mittleren zentrischen Betonzugfestigkeit gerechnet.

Der Völligkeitsbeiwert β_t wird gewichtet an den Lastfällen der jeweiligen Lastkombinationen intern zwischen den Grenzwerten 0,25 und 0,4 berechnet. Vorgaben für die Normalkraft sind für reine Biegung bedeutungslos.

Die Standardwerte des Registers *Konvergenzeinstellungen* können beibehalten werden. Es sind lediglich die Stabteilungs-Grenzlängen auf Werte zwischen **0,05 m** und **0,10 m** zu begrenzen.

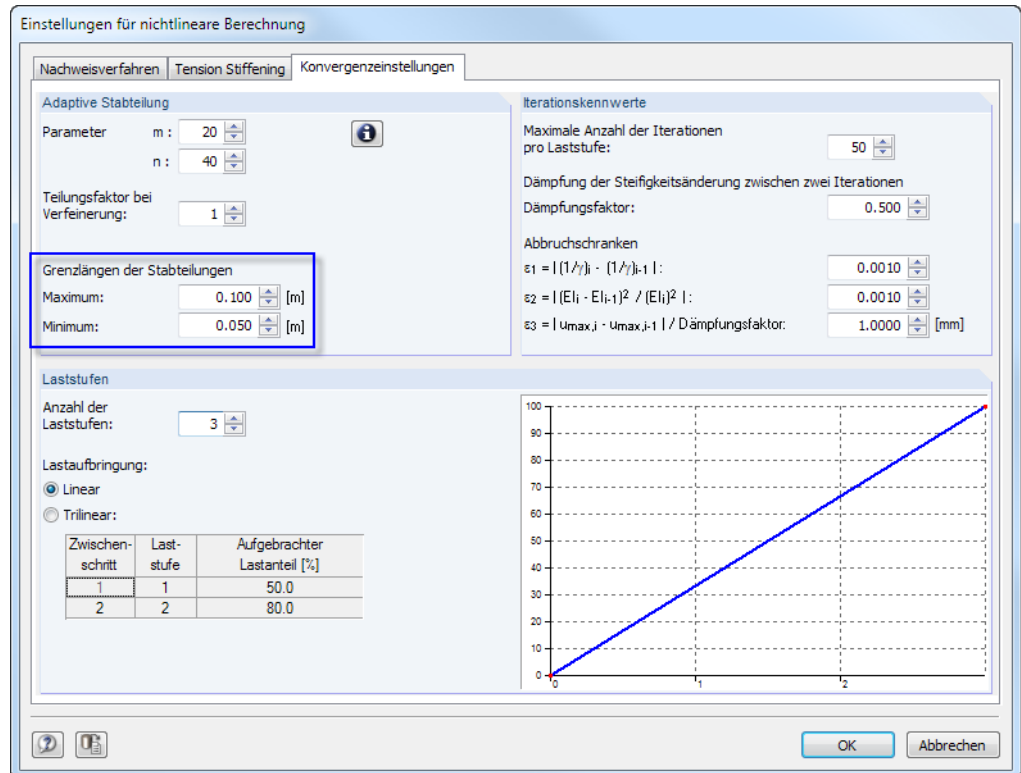


Bild 9.17: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen*

In Maske *1.3 Querschnitte* erfolgen abschließend die Vorgaben zu Kriechen und Schwinden.

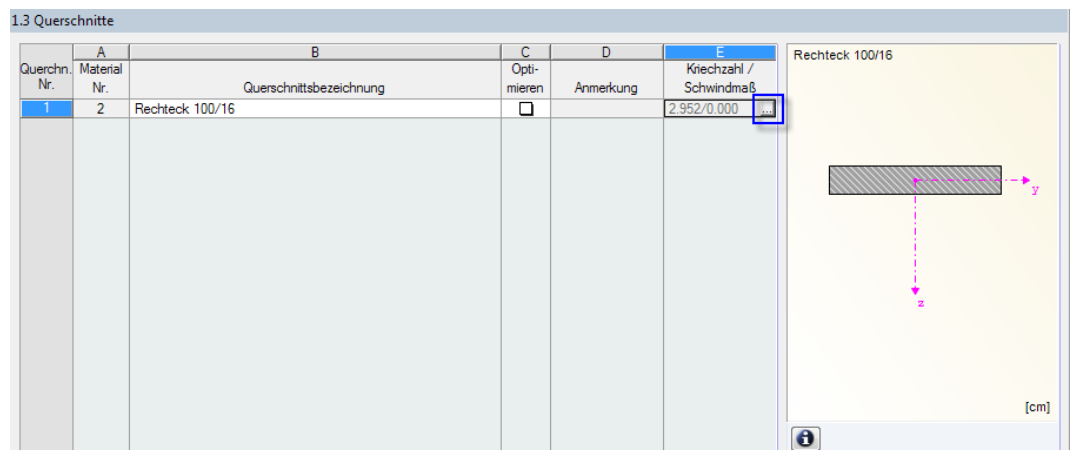


Bild 9.18: Maske *1.3 Querschnitte*

Die Zellschaltfläche in Spalte E ruft den Dialog zur Eingabe der Kriech- und Schwindparameter auf (siehe Bild 9.19).

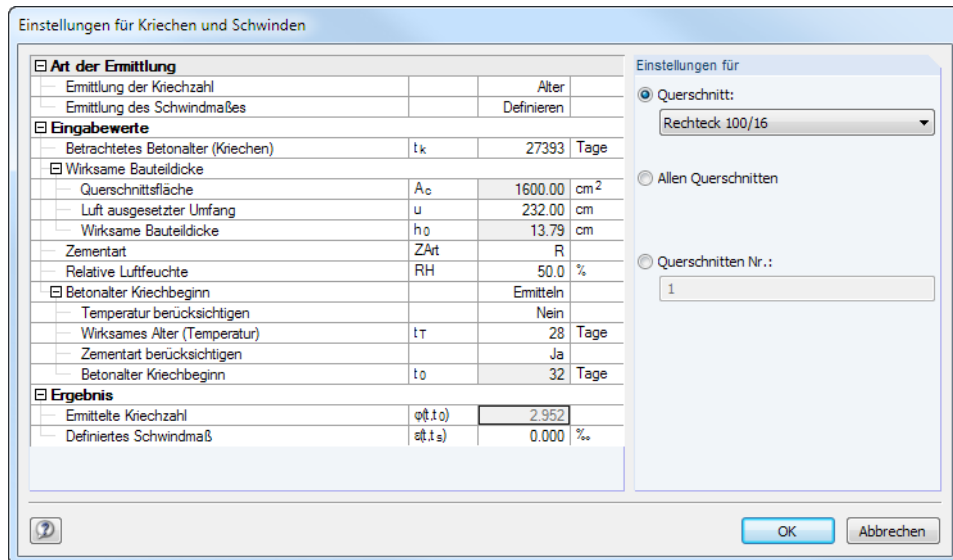


Bild 9.19: Dialog *Einstellungen für Kriechen und Schwinden*

Wir ändern die *Zementart* auf **R** und setzen das *Wirksame Alter* auf **28 Tage**. Die Kriechzahl nach EN 1992-1-1 ist als reine Endkriechzahl zu verstehen. Sie ist i. Allg. noch nach dem Verhältnis der kriecherzeugenden zur wirkenden Last in eine effektive Kriechzahl umzurechnen.

Das Schwinden wird nicht näher untersucht: Wegen der nahezu symmetrischen Bewehrung im Feld 1 und der nur kleinen Bewehrungsdifferenz im Feld 2 tragen die Schwindkrümmungen nur unwesentlichen zur Gesamtverformung bei. Wir *Definieren* daher das Schwindmaß zu **0**.

Berechnung

Damit ist die Eingabe für die nichtlineare Berechnung abgeschlossen. Die [Berechnung] kann erneut gestartet werden.

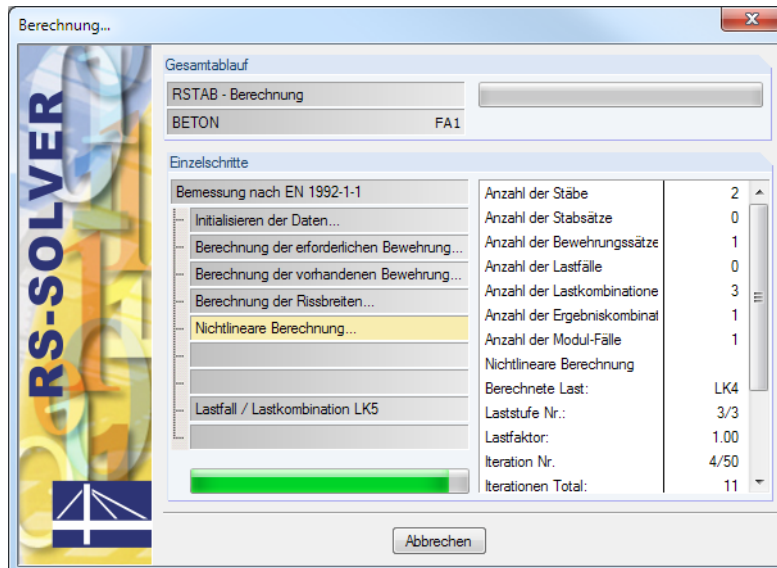


Bild 9.20: Nichtlineare Berechnung

9.2.5 Ergebnisse von BETON

In Maske 6.2 Gebrauchstauglichkeit für nichtlineare Berechnung können die Verformungen für jede x-Stelle abgelesen werden.

A	B	C	D	E	F	G
Stab Nr.	Stelle x [m]	Maßgeb. LF/LK	Globale Verschiebungen u _g [mm]	Lokale Verschiebungen u _l [mm]	Rissbreite w _k [mm]	
1	2.070	LK4	22.73	22.73	0.13	
		LK5	20.43	20.43	0.12	
		LK6	6.41	6.41	0.06	
	2.140	LK4	22.83	22.83	0.13	
		LK5	20.49	20.49	0.12	
		LK6	6.42	6.42	0.06	
2.210	LK4	22.87	22.87	0.13		
	LK5	20.50	20.50	0.12		
	LK6	6.42	6.42	0.06		
2.310	LK4	22.82	22.82	0.13		
	LK5	20.41	20.41	0.12		
	LK6	6.39	6.39	0.06		
2.400	LK4	22.68	22.68	0.12		

Bild 9.21: Maske 6.2 Gebrauchstauglichkeit für nichtlineare Berechnung

Die Maximalverformung liegt für die LK 4 (Verkehrslast im Feld 1) an der Stelle $x = 2,210 \text{ m}$ vor. Die Verschiebung $u = 22,87 \text{ mm}$ entspricht einem Wert von $1/220 \cdot \ell$ und liegt somit über dem empfohlenen Wert von $1/250 \cdot \ell$.

Spannungs- und Dehnungsberechnung			
— Hauptmomente	M	17.62	kNm
— Biegemoment um die y-Achse	M _{yEd}	17.62	kNm
— Biegemoment um die z-Achse	M _{zEd}	0.00	kNm
— Normalkraft	N _{Ed}	0.00	kN
— Querschnittszustand		abgeschlossene Rissbildung	
— Mittlere Hauptkrümmung	1/r _m	1.1815E-02	1/m
— Mittlere Krümmung in y-Richtung	1/r _{ym}	6.8042E-16	1/m
— Mittlere Krümmung in z-Richtung	1/r _{zm}	1.2844E-02	1/m
— Mittlere Stahldehnung	ε _{sm}	0.958	‰
Berechnungsdetails			
— Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften	β ₁	0.306	
— Beiwert zur Berücksichtigung der Art und Dauer der Belastung	β ₂	0.600	
— Rissmoment	M _{cr}	12.01	kNm
— Rissmomente bezüglich der y-Achse	M _{cry}	12.01	kNm
— Rissmomente bezüglich der z-Achse	M _{crz}	0.00	kNm
— Rissnormalkraft	N _{cr}		kN
Zustand I			
Querschnittseigenschaften			
— Trägheitsmoment um die y-Achse	I _{yI}	1.10503E+08	mm ⁴
— Trägheitsmoment um die z-Achse	I _{zI}	4.03092E+09	mm ⁴
— Fläche	A _I	48463.20	mm ²
Spannungs- und Dehnungsberechnung			
— Hauptkrümmung	1/r _I	5.3160E-03	1/m
— Krümmung in y-Richtung	1/r _{yI}	6.8042E-16	1/m
— Krümmung in z-Richtung	1/r _{zI}	5.3160E-03	1/m
— Hauptkrümmungsrichtung	α _I	0.0	°
— Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ _{sI}	58.48	N/mm ²
— Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ _{cI}	-3.23	N/mm ²
— Stahlspannung für Rissmoment	σ _{srI}	0.00	N/mm ²
— Stahldehnung für Rissmoment	ε _{srI}	0.000	‰
Zustand II			
Querschnittseigenschaften			
— Trägheitsmoment um die y-Achse	I _{yII}	42926600.00	mm ⁴
— Trägheitsmoment um die z-Achse	I _{zII}	1.33333E+10	mm ⁴
— Fläche	A _{II}	20121.90	mm ²
Spannungs- und Dehnungsberechnung			
— Hauptkrümmung	1/r _{II}	1.3685E-02	1/m
— Krümmung in y-Richtung	1/r _{yII}	5.2745E-21	1/m
— Krümmung in z-Richtung	1/r _{zII}	1.3685E-02	1/m
— Hauptkrümmungsrichtung	α _{II}	0.0	°
— Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ _{sII}	242.03	N/mm ²
— Stahldehnung	ε _{sII}	1.210	‰
— Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ _{cII}	-4.80	N/mm ²
— Betondehnung in der maßgebenden Faser	ε _{cII}	-0.637	‰
— Stahlspannung für Rissmoment	σ _{srII}	164.80	N/mm ²
— Stahldehnung für Rissmoment	ε _{srII}	0.824	‰
Querschnittseigenschaften			
Querschnittstefigkeiten (Sekantenwerte)			
Globale Knotenverformungen			
Lokale Knotenverformungen			
Rissbreite			
Sicherheitsnachweis			
— Sicherheitsfaktor	γ	2.445	
— Ausnutzungsgrad	1/γ	0.409	

Bild 9.22: Zwischenergebnisse für Stab 1 an Stelle x = 2,210 m, LK 4

9.2.6 Handrechnung

Die Ergebnisse werden für die Stelle $x = 2,21$ m schrittweise überprüft. Primär geht es dabei um die Berechnung der Spannungs- und Dehnungsebene, die als Basis für die Steifigkeitskennwerte entscheidend für die nichtlineare Ermittlung von Verformung und Schnittgröße ist.

Für die Handrechnung werden teilweise vereinfachte Ansätze verwendet, die zu kleineren Unterschieden führen.

9.2.6.1 Materialkennwerte für Verformungsberechnung

Beton C 20/25

$$f_c = f_{cm} = 20 + 8 = 28 \text{ N/mm}^2$$

$$E_c = E_{cm} = 30\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{c1} = -2,0 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{c1u} = -3,5 \text{ ‰}$$

Verzerrt für Kriechen mit $(1 + \varphi) = 3,95$:

$$E_c = E_{cm} = 7\,594,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{c1} = -7,9 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{c1u} = -13,8 \text{ ‰}$$

Betonstahl BSt 500 S (A)

$$f_{ym} = f_{yk} = 500 = 500,00 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{tm} = f_{tk} = 550 = 550 \text{ N/mm}^2$$

$$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{su} = 25 \text{ ‰}$$

$$\alpha_e = 200\,000 / 30\,000 = 6,67$$

Verzerrt für Kriechen mit $(1 + \varphi) = 3,95$:

$$\alpha_e = 200\,000 / 7\,594,9 = 26,33$$

9.2.6.2 Zustand I

Bei der Ermittlung der Querschnittswerte wird die vorhandene Stahlfläche berücksichtigt. Die Fehlfläche des Betons im Bereich der Bewehrungsstäbe wird vernachlässigt. Eine Neuberechnung des Schwerpunkts des ideellen Querschnitts ist nicht notwendig, da eine symmetrische Bewehrung mit gleichem Randabstand an Ober- und Unterseite vorliegt.

Es ergeben sich folgende Abstände für den Steineranteil direkt:

$$a_c = 0 \text{ cm}$$

$$a_{s1} = 8 - 2,5 = 5,5 \text{ cm}$$

$$a_{s2} = 5,5 \text{ cm}$$

Trägheitsmoment

$$I_{y,I} = \frac{b \cdot h^3}{12} + 2 \cdot (A_{s1/s2} \cdot a_2^2 \cdot \alpha_e) = \frac{100 \cdot 16^3}{12} + 2 \cdot (6,22 \cdot 5,5^2 \cdot 26,33) = 44\,041 \text{ cm}^4$$

Ideelle Querschnittsfläche

$$A_I = A_c + A_s \cdot \alpha_e = 16 \cdot 100 + 12,44 \cdot 26,33 = 1\,927,5 \text{ cm}^2$$

Rissmoment M_{cr}

Es wird davon ausgegangen, dass bei Erreichen der Zugspannung f_{ctm} in der äußersten Faser der Querschnitt reißt.

$$\sigma = \frac{M_{cr}}{I} \cdot z_{ct} = f_{ctm}$$

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I}{z_{ct}} = \frac{0,22 \cdot 44\,041}{8} = 1\,211 \text{ kNcm} = 12,1 \text{ kNm}$$

Stahlspannung $\sigma_{sr,I}$ und Stahldehnung $\varepsilon_{sr,I}$ für Rissmoment

$$\sigma_{sr,I} = f_{ctm} \cdot \frac{5,5}{8} \cdot \alpha_e = 2,2 \cdot \frac{5,5}{8} \cdot 26,33 = 39,82 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{sr,I} = \frac{\sigma_{sr}}{E_s} = \frac{39,82}{200\,000} = 1,991 = 0,199 \text{ ‰}$$

Fiktive Stahl- und Betonspannung für tatsächliches Moment $M = 17,62 \text{ kNm}$

$$\sigma_{s1} = \frac{M}{I} \cdot z_{s1} \cdot \alpha_e = \frac{1\,762}{44\,041} \cdot 5,5 \cdot 26,33 = 5,79 \text{ kN/cm}^2 = 57,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = -\frac{M}{I} \cdot z_{cc} = -\frac{1\,762}{44\,041} \cdot 8 = -0,32 \text{ kN/cm}^2 = -3,2 \text{ N/mm}^2$$

Krümmung im Zustand I $(1/r)_{z,I} = (1/r)_I$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{z,I} = \frac{M}{E \cdot I} = \frac{0,01\,762}{7\,594,9 \cdot 44\,041 \times 10^{-4}} = 5,268 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Ergebnisse von BETON

☐ Berechnungsdetails			
—	Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften	β_1	0.306
—	Beiwert zur Berücksichtigung der Art und Dauer der Belastung	β_2	0.600
—	Rissmoment	M_{cr}	12.01 kNm
—	Rissmomente bezüglich der y-Achse	M_{cry}	12.01 kNm
—	Rissmoment bezüglich der z-Achse	M_{crz}	0.00 kNm
—	Rissnormalkraft	N_{cr}	kN
☐ Zustand I			
☐ Querschnitseigenschaften			
—	Trägheitsmoment um die y-Achse	I_{yI}	1.10503E+08 mm ⁴
—	Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zI}	4.03092E+09 mm ⁴
—	Fläche	A_I	48463.20 mm ²
☐ Spannungs- und Dehnungsberechnung			
—	Hauptkrümmung	$1/r_I$	5.3160E-03 1/m
—	Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yI}$	6.8042E-16 1/m
—	Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zI}$	5.3160E-03 1/m
—	Hauptkrümmungsrichtung	α_I	0.0 °
—	Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_sI	58.48 N/mm ²
—	Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_cI	-3.23 N/mm ²
—	Stahlspannung für Rissmoment	σ_{srI}	0.00 N/mm ²
—	Stahldehnung für Rissmoment	ε_{srI}	0.000 ‰

Bild 9.23: Detailergebnisse für Zustand I

9.2.6.3 Zustand II

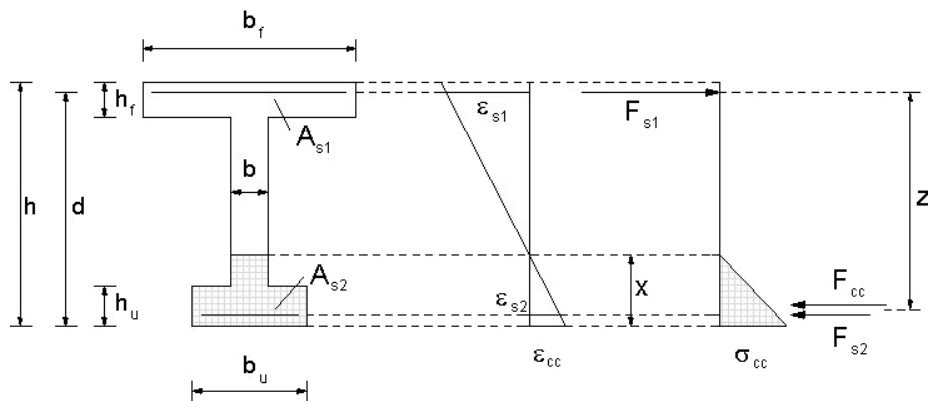
Querschnittswerte im Zustand II

Die Querschnittswerte im Zustand II lassen sich im Gegensatz zu den Querschnittswerten im ungerissenen Zustand nur mühsam per Hand berechnen. Es bereitet bereits ein Problem, die Dehnungsverteilung (allgemeiner Fall: $\varepsilon_0 + (1/r)_y \cdot y + (1/r)_z \cdot z$) für eine bestimmte Einwirkungskonstellation mit den in den Normen festgelegten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für nichtlineare Verfahren zu ermitteln. Für weitere Studien wird auf entsprechende Literatur [8] verwiesen.

Stahlspannung $\sigma_{sr,II}$ und Stahldehnung $\varepsilon_{sr,II}$ für Rissmoment

Um die Spannungen und Dehnungen bei Rissbildung zu ermitteln, kann im Regelfall von vereinfachten Annahmen (linear elastischem Werkstoffgesetz) ausgegangen werden. Zu begründen ist dies damit, dass sich das Verhältnis von Spannung zu Dehnung beim Beton bis zu einer Spannung $\sigma_c \cong 0,4 \cdot f_c$ näherungsweise linear verhält. Für den Betonstahl kann dies ohnehin bis zum Erreichen der Fließgrenze annähernd vorausgesetzt werden. Liegt also ein Bauteil mit einem Rissmoment im Gebrauchslastniveau vor, können Spannungen und Dehnungen ausreichend genau mit diesen vereinfachten Ansätzen berechnet werden.

Ohne Wirken einer Normalkraft führt die Lösung bei dreieckförmiger Druckzone auf eine quadratische Gleichung (mit Normalkraft: kubische Gleichung) zur Berechnung der Druckzonenhöhe x . Durch die angenommene Linearität der Spannungen und Dehnungen ergibt sich eine Entkopplung der Druckzonenhöhe von dem angreifenden Moment.



Spannungs-Dehnungsbeziehungen

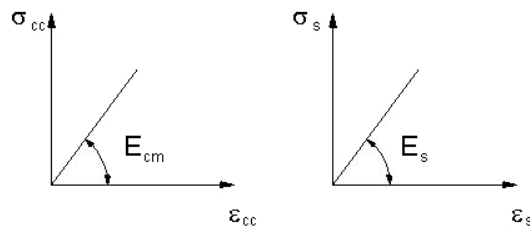


Bild 9.24: Beziehungen zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen für Gebrauchslasten

Berechnung der Druckzonenhöhe x_{II}

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} = \frac{6,22 \text{ cm}^2}{100 \cdot 13,5 \text{ cm}^2} = 0,004607$$

$$\xi = -\alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right) + \sqrt{\alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right)'' + 2 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2} \cdot d_2}{A_{s1} \cdot d}\right)} =$$

$$= -26,33 \cdot 0,004607 \cdot (1 + 1) +$$

$$+ \sqrt{\left[26,33 \cdot 0,004607 \cdot (1 + 1)\right]'' + 2 \cdot 26,33 \cdot 0,004607 \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot 2,5}{1 \cdot 13,5}\right)} =$$

$$= 0,3459$$

$$x_{II} = \xi \cdot d = 0,346 \cdot 13,5 = 4,67 \text{ cm}^4$$

Trägheitsmoment

$$\kappa = 4 \cdot \xi^3 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot (1 - \xi)^2 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \cdot \left(\xi - \frac{d_2}{2}\right)^2 =$$

$$= 4 \cdot 0,346^3 + 12 \cdot 26,33 \cdot 0,004607 \cdot (1 - 0,346)^2 +$$

$$+ 12 \cdot 26,33 \cdot 0,004607 \cdot 1 \cdot \left(0,346 - \frac{2,5}{13,5}\right)^2 =$$

$$= 0,826$$

$$I_{c,II} = \kappa \cdot b \cdot \frac{d^3}{12} = 0,826 \cdot 100 \cdot \frac{13,5^3}{12} = 16935 \text{ cm}^4$$

Spannungen für Risschnittgrößen

$$\sigma_{cr,II} = \frac{M}{I_{y,II}} \cdot x = \frac{1210}{16935} \cdot 4,67 \cdot 10 = 3,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sr1,II} = \alpha_e \cdot \frac{M}{I_{y,II}} \cdot (d - x) = 26,33 \cdot \frac{1210}{16935} \cdot (13,5 - 4,67) \cdot 10 = 166,12 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sr2,II} = \sigma_{sr1,II} \cdot \frac{x - d_2}{d - x} = 166,12 \cdot \frac{4,67 - 2,5}{13,5 - 4,67} = 40,82 \text{ N/mm}^2$$

Stahldehnung für Risschnittgrößen

$$\varepsilon_{sr1,II} = \frac{\sigma_{sr1,II}}{E_s} = \frac{166,012}{200000} \cdot 1000 = 0,8306 \text{ ‰}$$

Stahlspannung und Betonspannung für vorhandenes Moment

Eine vereinfachte Berechnung der Spannungen und Dehnungen wie für das Rissmoment kann nicht bedenkenlos angewandt werden. Die Ermittlung der Spannungen und Dehnungen für das tatsächliche Moment $M = 17,64 \text{ kNm}$, mit denen dann die Krümmungen und Steifigkeiten berechnet werden können, erfolgt in der Vergleichsrechnung mit den genauen Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Betonstahl nach EN 1992-1, Bild 3.2 bzw. 3.3.

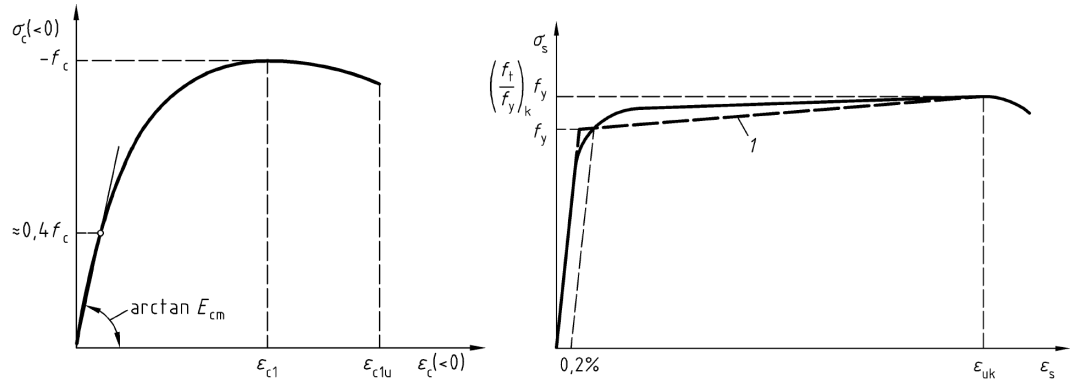


Bild 9.25: Beziehungen zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen für Gebrauchslasten nach [2]

Die genaue Berechnung der Spannungen im Zustand II erfolgt mithilfe einer Drittanwendung zur genauen Spannungsintegration. Für $M = 17,62 \text{ kNm}$ liefert sie folgende Ergebnisse:

$$\begin{aligned} \sigma_{s1, II} &= 242,27 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{s2, II} &= -59,07 \text{ N/mm}^2 \\ \epsilon_{s1, II} &= 1,211 \text{ ‰} \\ \epsilon_{s2, II} &= -0,638 \text{ ‰} \\ \epsilon_{c, II} &= -0,6378 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Ergebnisse von BETON

☐ Zustand II			
☐ Querschnittseigenschaften			
Trägheitsmoment um die y-Achse	I_{yII}	42926600.00	mm^4
Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zII}	1.33333E+10	mm^4
Fläche	A_{II}	20121.90	mm^2
☐ Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Hauptkrümmung	$1/r_{II}$	1.3685E-02	1/m
Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yII}$	5.2745E-21	1/m
Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zII}$	1.3685E-02	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{II}	0.0	°
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sII}	242.03	N/mm^2
Stahldehnung	ϵ_{sII}	1.210	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cII}	-4.80	N/mm^2
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cII}	-0.637	‰
Stahlspannung für Rissmoment	σ_{srII}	164.80	N/mm^2
Stahldehnung für Rissmoment	ϵ_{srII}	0.824	‰
☐ Querschnittseigenschaften			
☐ Querschnittsteifigkeiten (Sekantenwerte)			
☐ Globale Knotenverformungen			
☐ Lokale Knotenverformungen			
☐ Rissbreite			
☐ Sicherheitsnachweis			
☐ Bruchschnittgrößen R_{Rd}			
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	43.09	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	0.00	kN
☐ Einwirkende Schnittgrößen R			
Moment	M	17.62	kNm

Bild 9.26: Detailergebnisse für Zustand II

9.2.6.4 Mittlere Krümmungen

Aus den Berechnungen für den reinen Zustand I und Zustand II werden die mittleren Krümmungen ermittelt, die sich mit dem gewählten Tension Stiffening Ansatz ergeben.

Das zu Grunde gelegte Tension Stiffening Modell aus Heft 525 [7] berücksichtigt die zugversteifende Wirkung des Betons zwischen den Rissen durch eine Reduzierung der Stahldehnung. Die erforderlichen Kennwerte werden wie folgt ermittelt.

Maßgebender Zustand der Rissbildung

Stahlspannung im Zustand II bei Rissbildung: $\sigma_{sr,II} = 166,12 \text{ N/mm}^2$

Stahlspannung im Zustand II: $\sigma_{s1,II} = 242,27 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{s1,II} = 242,27 \text{ N/mm}^2 \geq 1,3 \cdot \sigma_{sr,II} = 215,96 \text{ N/mm}^2$$

Die Betrachtungen sind somit für die abgeschlossene Rissbildung durchzuführen.

Mittlere Stahldehnung

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2,II} - \beta_t \cdot (\varepsilon_{sr,II} - \varepsilon_{sr,I})$$

$$\varepsilon_{sm} = 1,211 - 0,306 \cdot (0,8306 - 0,199) = 1,0177 \text{ ‰}$$

mit

$$\varepsilon_{s2,II} = 1,211 \text{ ‰} \quad : \text{ Stahldehnung im Zustand II}$$

$$\varepsilon_{sr,II} = 0,8306 \text{ ‰} \quad : \text{ Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand II}$$

$$\varepsilon_{sr,I} = 0,199 \text{ ‰} \quad : \text{ Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand I}$$

$$\beta_t = 0,306 \quad : \text{ Völligkeit der vorhandenen Einwirkung}$$

Mittlere Krümmung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{z,m} = \frac{(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_c)}{d} = \frac{(1,0177 + 0,6378)}{0,135} = 12,26 \frac{\text{mm}}{\text{m}} = 1,226 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

Mittlere Biegesteifigkeit

Aus der mittleren Krümmung $(1/r)_{z,m}$ ergibt sich mit der Beziehung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{z,m} = \frac{M}{I_{y,m} \cdot E}$$

die Sekantensteifigkeit in dem entsprechenden Knoten.

$$I_{y,m} \cdot E = \frac{M_y}{(1/r)_{z,m}} = \frac{0,01762}{1,226 \times 10^{-2}} = 1,4372 \text{ MNm}^2 = 1437,2 \text{ kNm}^2$$

mit

$$M_y = 17,62 \text{ kNm} \quad : \text{ Vorhandenes Moment}$$

$$(1/r)_{z,m} = 1,226 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1} \quad : \text{ Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand II}$$

Ergebnisse von BETON

☑ Spannungs- und Dehnungsberechnung			
☐ Hauptmomente	M	17.64	kNm
☐ Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	17.64	kNm
☐ Biegemoment um die z-Achse	M_{zEd}	0.00	kNm
☐ Normalkraft	N_{Ed}	0.00	kN
☐ Querschnittszustand			abgeschlossene Rissbildung
☐ Mittlere Hauptkrümmung	$1/r_m$	1.1831E-02	1/m
☐ Mittlere Krümmung in y-Richtung	$1/r_{ym}$	3.3255E-16	1/m
☐ Mittlere Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zm}$	1.2859E-02	1/m
☐ Mittlere Stahldehnung	ϵ_{sm}	0.959	‰
☑ Berechnungsdetails			
☑ Querschnittseigenschaften			
☑ Querschnittsteifigkeiten (Sekantenwerte)			
☐ Dehnsteifigkeit	$A_m \cdot E$	654.01	MN
☐ Mittlere Biegesteifigkeit um die y-Achse	$I_{ym} \cdot E$	1.49	MNm^2
☐ Mittlere Biegesteifigkeit um Achse z	$I_{zm} \cdot E$	120.93	MNm^2
☐ Schubsteifigkeit in y-Richtung	$A_{ym} \cdot G$	1680.00	MN
☐ Schubsteifigkeit in Richtung z	$A_{zm} \cdot G$	1680.00	MN
☐ Torsionssteifigkeit	$I_t \cdot G$	5.01	MNm^2

Bild 9.27: Detaillerggebnisse der mittleren Krümmungen

9.2.7 Ergebnisbewertung

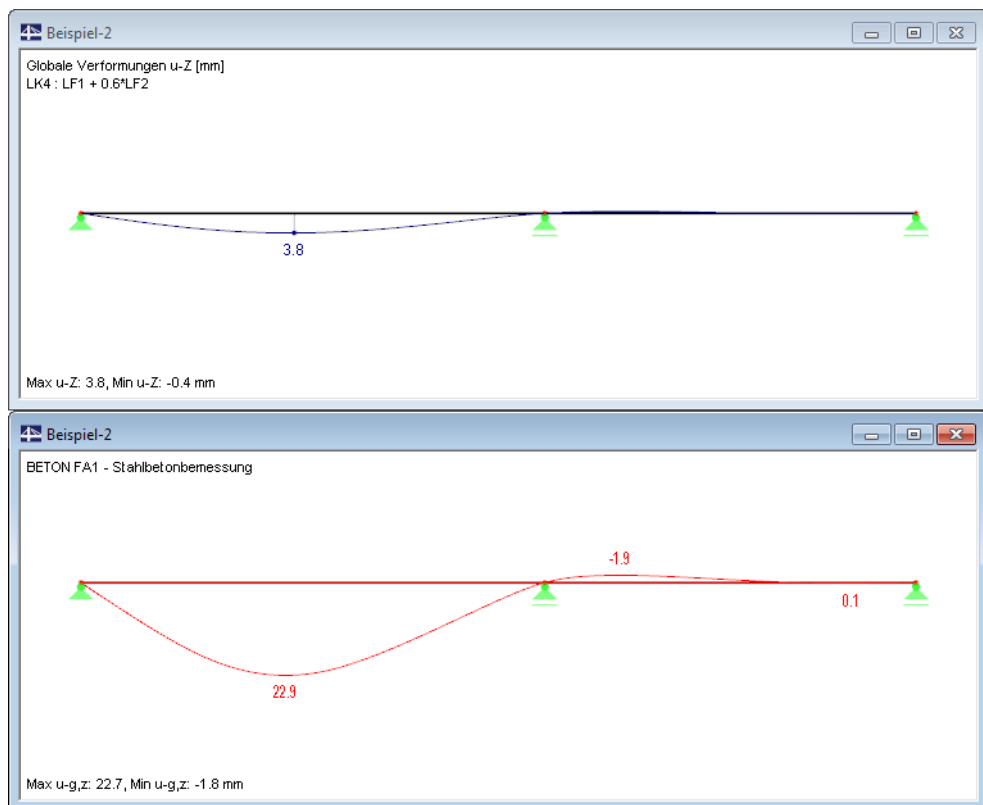


Bild 9.28: Verformungen nach linear elastischer Berechnung (oben) und nichtlinearer Berechnung mit Kriechen (unten)

Die Verformung aus der nichtlinearen Berechnung mit Berücksichtigung des Kriecheinflusses fällt deutlich größer aus als die der rein linear elastischen Berechnung ohne Kriecheinfluss. Wie auf Seite 174 erläutert, unterschreitet die errechnete Verformung den empfohlenen Grenzwert von $l/250$.

Die Verformungen im Zustand II werden durch drei Faktoren maßgeblich beeinflusst:

Deckenstärke

Im vorliegenden Beispiel wurde die Deckenstärke durch eine Begrenzung der Biegeschlankheit gemäß DIN 1045-1, 11.3.2 ermittelt, damit der Berechnungsablauf erläutert werden konnte. Mit den gleichen Randbedingungen ergibt sich nach EN 1992-1-1 eine Deckenstärke von $h \geq 18$ cm. Mit einer Erhöhung der Dicke auf 18 cm lassen sich die Verformungen deutlich reduzieren.

Kriechen

Die angenommene Kriechzahl erscheint mit $\varphi_\infty = 2,95$ relativ hoch, entspricht aber bei den angenommenen Umweltbedingungen und der Querschnittsgeometrie den Forderungen nach EN 1992-1-1.

Über den ψ -Beiwert ($\psi_{2,1} = 0,6$) zur Berechnung der quasi-ständigen Einwirkungskombination könnte eine gewisse Reduktion von kriecherzeugender zur wirkenden Last erfolgen.

Betonzugfestigkeit

Der im folgenden Bild dargestellte Verlauf der Steifigkeiten zeigt, dass ein großer Bereich des Feldes 1 im Gebrauchszustand gerissen ist.



Max I-ym * E: 3,32, Min I-ym * E: 1,41 MNm²

Bild 9.29: Steifigkeitsverlauf $I_{y,m} \cdot E$ über die Trägerlänge

Alternativberechnung mit erhöhter Betonzugfestigkeit

Für die Berechnung wurde die Betonzugfestigkeit mit dem Wert f_{ctm} (zentrische Zugfestigkeit) nach EN 1992-1-1 angenommen. Parameter wie die Gradiente der Spannungen haben einen großen Einfluss auf die tatsächliche Zugfestigkeit des Betons: So erhöht eine große Spannungsgradient die Zugfestigkeit, da die entsprechend hohen Spannungen nur in wenigen Fasern wirken. Nähere Angaben zu den verschiedenen Einflussfaktoren auf die Zugfestigkeit finden sich u. a. in [14].

Für das Beispiel wird die Zugfestigkeit nochmals nach [14], Kapitel 2.1.1 berechnet:

$$f_{ctm} = 0,45 \cdot 0,818 \cdot 1 \cdot 25^{2/3} = 3,14 \text{ N/mm}^2$$

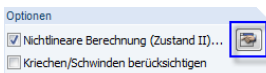
mit

$$f_{cm} = 20 + 5 = 25 \text{ N/mm}^2 \quad : \text{ Der Mittelwert wird abweichend zur DIN 1045-1 über den Summanden } 5 \text{ N/mm}^2 \text{ berücksichtigt.}$$

$$C_V = 0,85 - 0,2 \cdot 0,16 = 0,818 \geq 0,65 \quad : \text{ Berücksichtigung der Vorschädigung des Bauteils}$$

$$C_h = \frac{2,6 + 24 \cdot 0,16}{1,0 + 40 \cdot 0,16} = 0,870 \quad : \text{ Einfluss der Bauteildicke}$$

$$C_\eta = 1 \quad : \text{ Einfluss der Ausmitte } \eta = M/(N \cdot h) \rightarrow \infty \text{ für } N \rightarrow 0$$



Um den Einfluss einer erhöhten Zugfestigkeit zu berücksichtigen, wird das Modell in einem zweiten Bemessungsfall mit dem Anpassungsfaktor $3,14/2,2 = 1,42$ berechnet (siehe Bild 9.30).

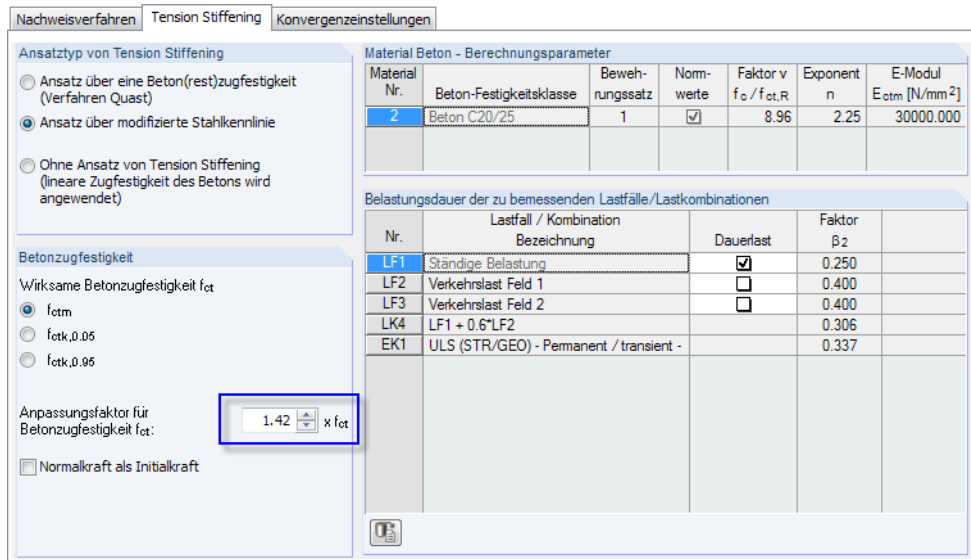


Bild 9.30: Anpassen der Betonzugfestigkeit im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*

Die Berechnung zeigt eine starke Reduzierung der gerissenen Bereiche, die auch zu einer Verringerung der Verformung auf $u_1 = 12,8 \text{ mm}$ führt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Anhaltswert von $\ell/250 = 5\,000/250 = 20 \text{ mm}$.

Folgende Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Verformung und Steifigkeitsabminderung. Im Feld 1 ist der Beginn der Rissbildung erkennbar; lediglich im Stützenbereich erfolgt ein lokaler Übergang des Querschnitts in den gerissenen Zustand.

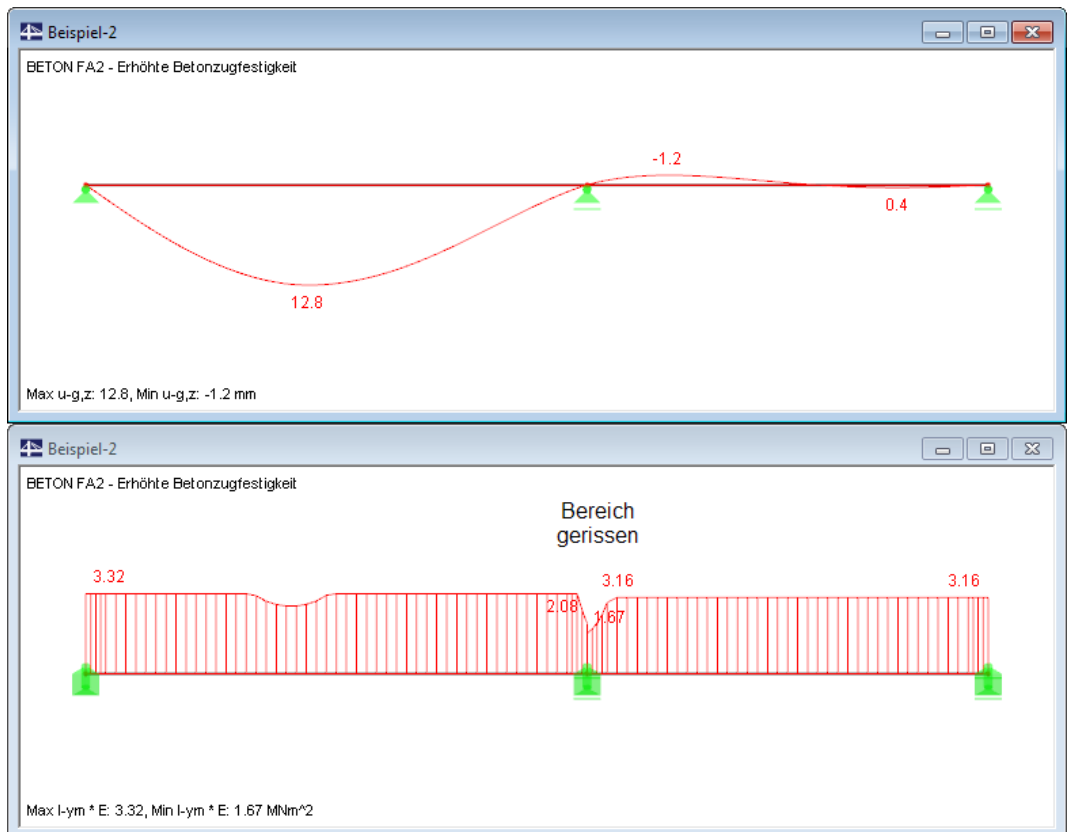


Bild 9.31: Verformung und Biegesteifigkeit bei erhöhter Betonzugfestigkeit (Spannungsgradiente)

Es zeigt sich, wie empfindlich die nichtlineare Berechnung auf veränderte Berechnungsparameter reagiert. Der Unterschied ist bei Bauteilen mit großen Steifigkeitssprüngen zwischen gerissenem und ungerissenem Zustand besonders ausgeprägt.

9.3 Stabilitätsuntersuchung Kragstütze

9.3.1 Modell in RSTAB

Anhand der Stabilitätsuntersuchung einer schlanken eingespannten Stütze werden die Unterschiede der beiden Konzepte zur nichtlinearen Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.7 und 5.8.6 aufgezeigt.

Dieses Modell ist in [15] als Beispiel 1 vorgestellt.

System und Belastung

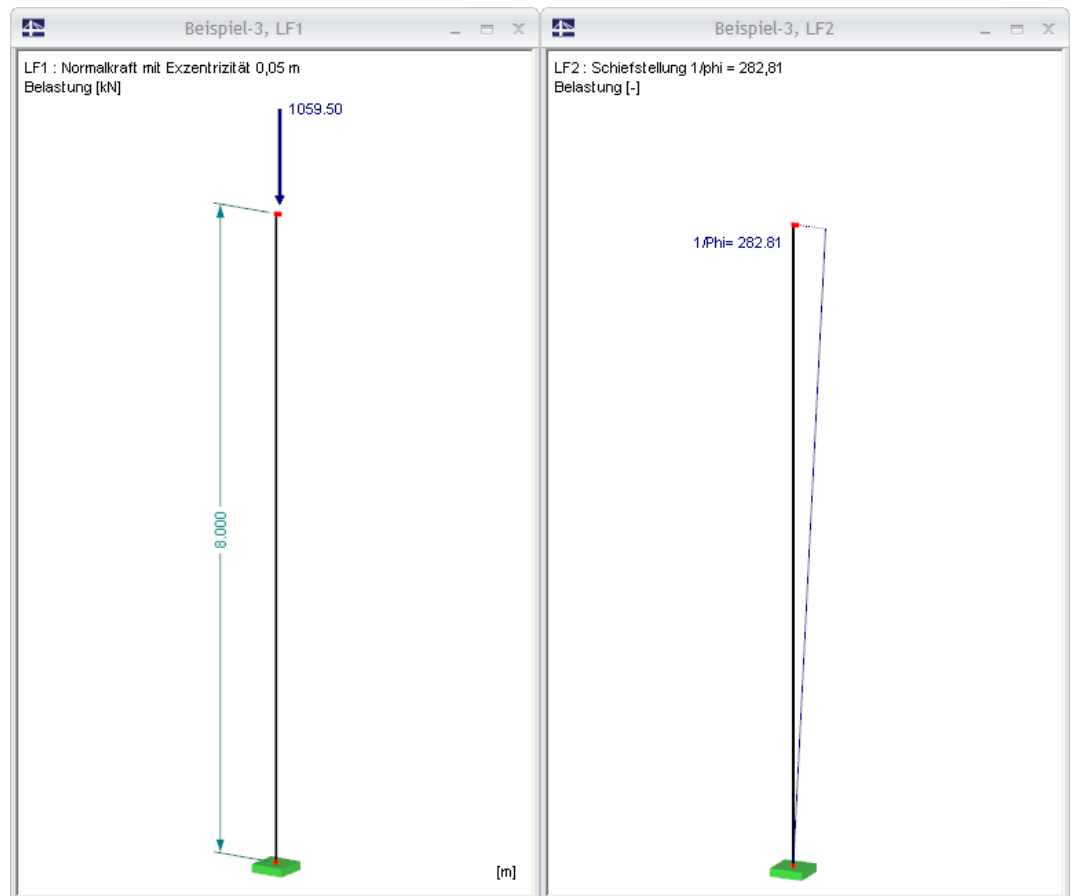


Bild 9.32: System und Belastung

Die Belastung entspricht den Angaben aus [15]. Im Lastfall 1 ist der Designwert $N_{Ed} = 1\,059,5$ kN berücksichtigt.

Wie im Bild oben dargestellt, wird die Belastung exzentrisch eingetragen. Die Ausmitte kann durch ein Zusatzmoment $M_{sd} = 1\,059,5 \cdot 0,05 = 52,98$ kNm oder geometrisch erfasst werden. Im Beispiel wird die Last exzentrisch über einen kurzen Stab eingeleitet.

Die Schiefstellung der Stütze wird im Lastfall 2 als Imperfektion berücksichtigt. Der Wert der Schiefstellung berechnet sich zu $1/\varphi = 1/0,003536 = 282,81$.

Der E-Modul des Betons wird gemäß Vorgabe in [15] mit $26\,230$ N/mm² definiert.

Lastkombinationen

Für die Analyse des Last-Verformungsverhaltens werden folgende Lastkombinationen definiert:

- Bemessungsrelevante Kombination:

$$\text{LK 1} \quad \text{LF1} + \text{LF2}$$

- Alternativen:

$$\text{LK 2} \quad 0,20 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 3} \quad 0,50 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 4} \quad 0,70 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 5} \quad 0,80 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 6} \quad 0,90 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 7} \quad 0,92 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 8} \quad 0,94 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 9} \quad 0,96 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 10} \quad 0,97 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 11} \quad 0,98 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 12} \quad 0,99 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 13} \quad 1,05 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

$$\text{LK 14} \quad 1,10 \cdot \text{LF1} + \text{LF2}$$

Für die Berechnung wird keine Steifigkeitsreduzierung durch den Teilsicherheitsfaktor γ_M vorgenommen (RSTAB-Voreinstellung).

Ergebnisse

Die Berechnung mit RSTAB liefert folgende Schnittgrößen und Verformungen:

Lastkombination	Normalkraft N [kNm]	Moment I. Ordnung M_I [kNm]	Moment II. Ordnung M_{II} [kNm]	Kopfverschiebung u [mm]
LK 1	-1 059,50	82,59	170,58	82,71
LK 2	-211,90		18,55	9,27
LK 3	-529,75		56,18	27,77
LK 4	-741,65		91,27	44,77
LK 5	-847,60		113,28	55,36
LK 6	-953,55		139,33	67,83
LK 7	-974,74		145,12	70,59
LK 8	-995,93		151,12	73,45
LK 9	-1 017,12		157,36	76,42
LK 10	-1 027,71		160,57	77,95
LK 11	-1 038,31		163,84	79,51
LK 12	-1 048,91		167,18	81,09
LK 13	-1 112,47		186,66	91,29
LK 14	-1 165,45		208,71	100,80

Tabelle 9.1: RSTAB-Ergebnisse

9.3.2 Nichtlineare Berechnung

Die Stütze wird mit den beiden Verfahren nach EN 1992-1-1, **5.7** und **5.8.6** nachgewiesen.

9.3.2.1 EN 1992-1-1, 5.7

Der erste Bemessungsfall führt den Nachweis nach dem ganzheitlichen Konzept des EC 2.

Eingabe in BETON

Die wesentlichen Eingaben sind in den folgenden Bildern dargestellt.

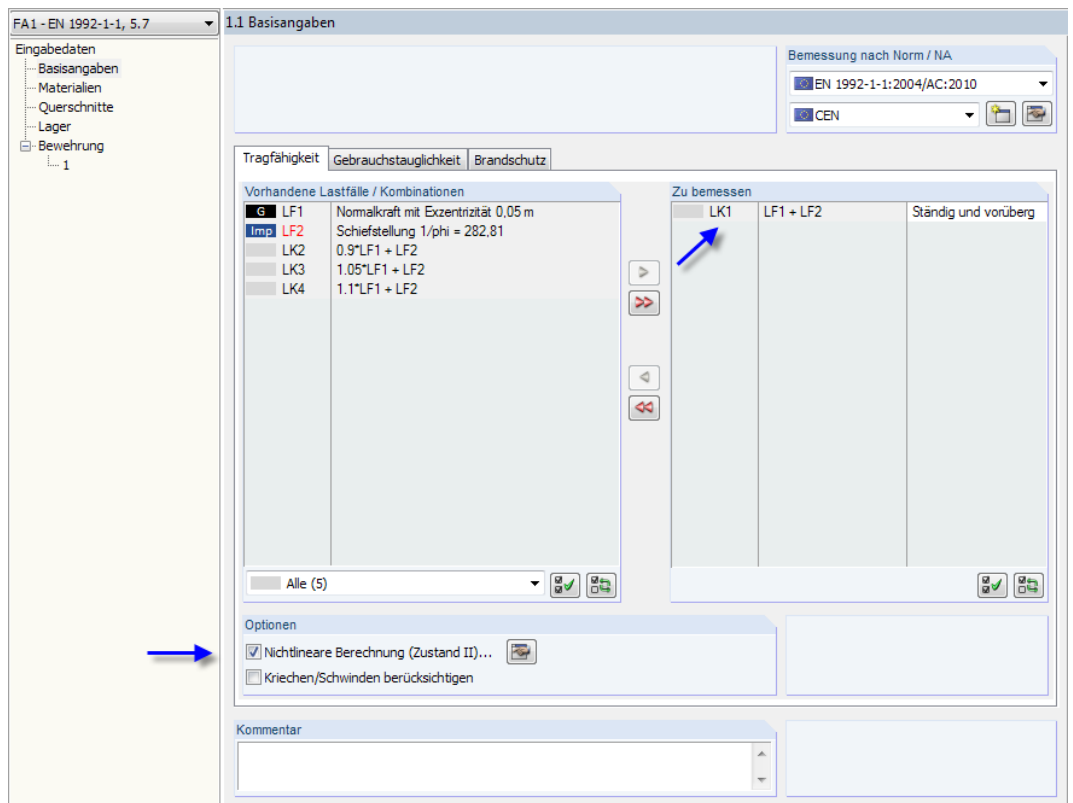
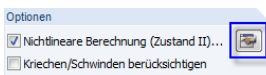


Bild 9.33: Basisangaben zur nichtlinearen Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.7



Die [Einstellungen] für die nichtlineare Berechnung sind wie in den folgenden Bildern dargestellt vorzunehmen.

Es wird das Verfahren mit Durchschnittswerten der Materialeigenschaften und globalem Teilsicherheitsbeiwert gewählt. Fließgelenke (plastische Krümmungen) sind ausgeschlossen.

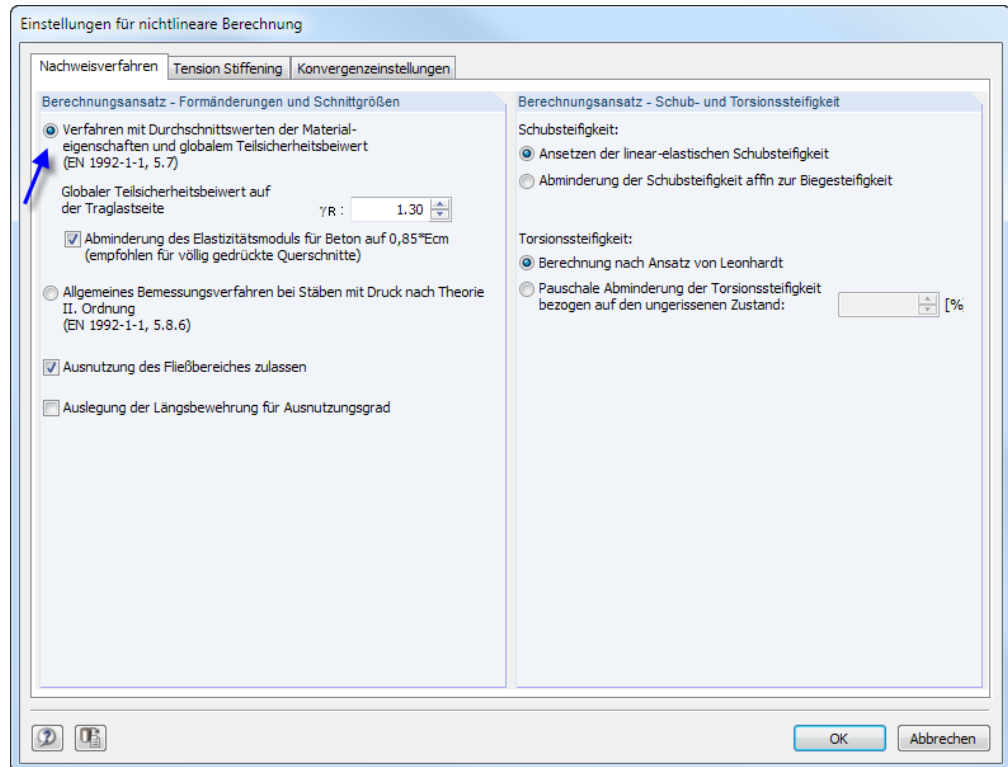


Bild 9.34: Nachweisverfahren nach EN 1992-1-1, 5.7

Um vergleichbare Ergebnisse zur Berechnung in [15] zu erhalten, ist das *Tension Stiffening* Modell nach QAST abzuändern: Da bei der Berechnung der zulässigen Druckspannung f_{CR} von einem unteren Quantilwert ausgegangen wird, wird auch zur Ermittlung der zulässigen Betonzugspannung $f_{ctk,0,05}$ verwendet.

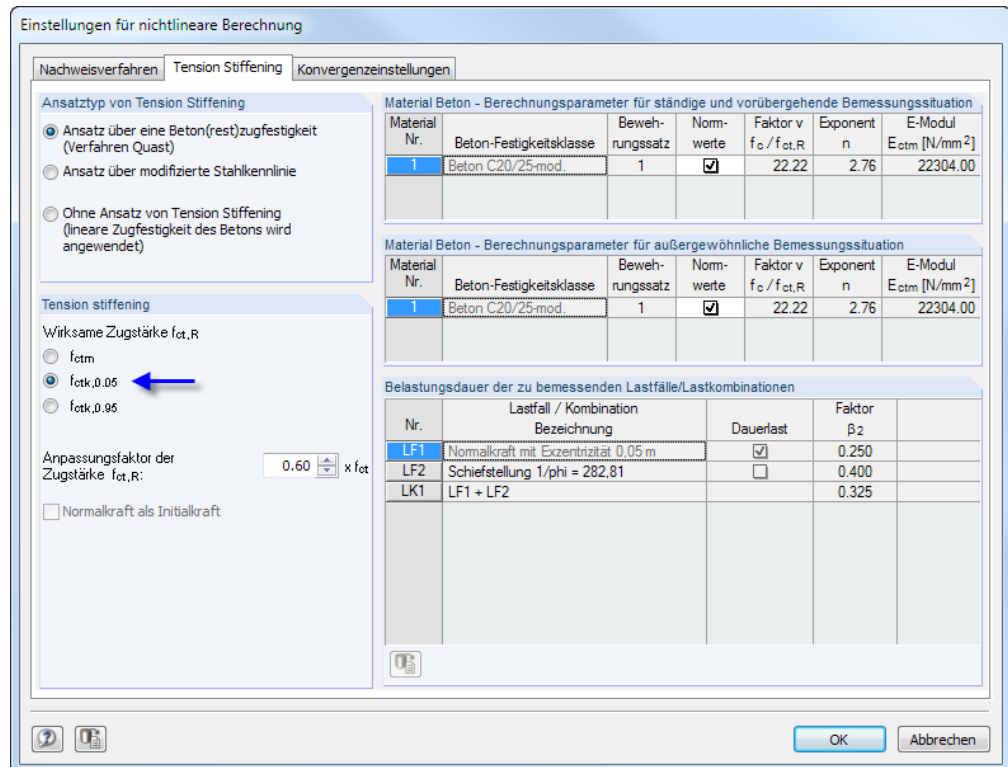


Bild 9.35: Wirksame Betonzugspannung für Tension Stiffening

Um den Verlauf der Steifigkeiten entsprechend genau abbilden zu können, wird die maximale Stablänge auf 200 mm begrenzt.

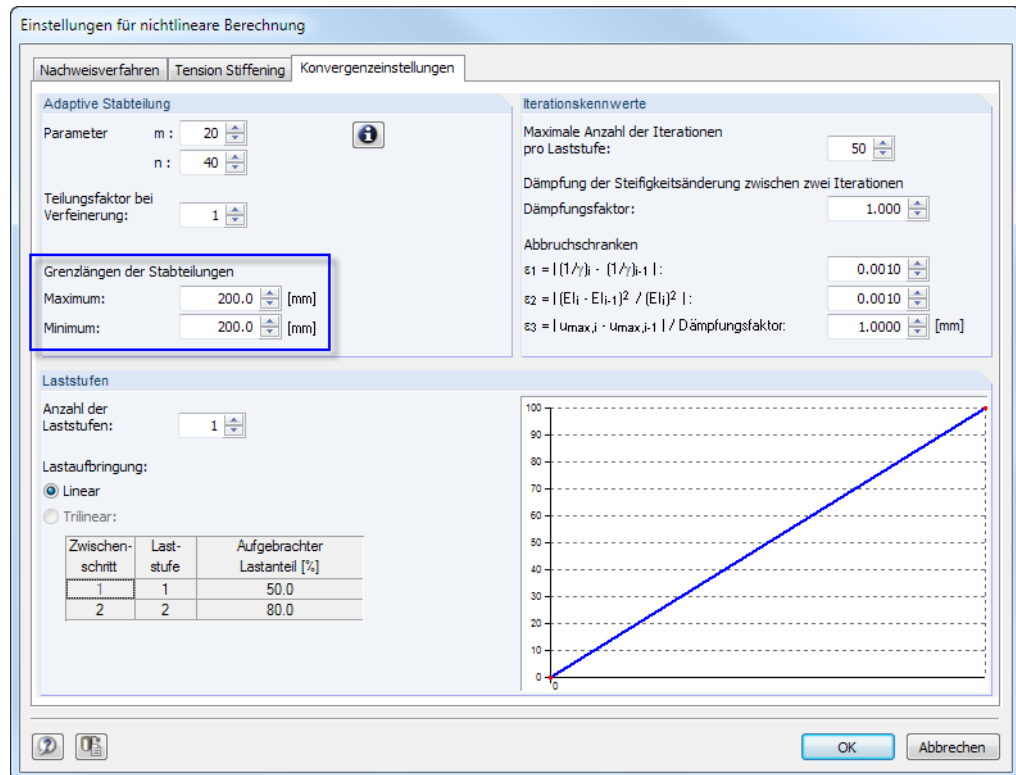


Bild 9.36: Konvergenzeinstellungen

Wegen des statisch bestimmten Systems kann der Dämpfungsfaktor auf 1,0 belassen werden.

Für die nichtlineare Berechnung stabilitätsgefährdeter Modelle sind die Abbruchschranken ε_1 und ε_2 wichtig: Konvergiert eine Berechnung nach Theorie I. Ordnung stetig, kann es bei Druckgliedern zu einem „Wendepunkt“ kommen, ab dem die Abweichungen ε wieder zunehmen. Dieser Effekt tritt auf, wenn die Vergrößerung der Schnittkräfte durch Zunahme der Verformung nach Theorie II. Ordnung vom System durch die abfallenden Steifigkeiten nicht mehr kompensiert bzw. aufgenommen werden kann. Im Beispiel wird $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,001$ unverändert belassen.

In [15] wird mit dem ähnlichen Nachweisverfahren nach DIN 1045-1, 8.5 eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 66,10 \text{ cm}^2$ ermittelt. Um diese Ergebnisse mit der BETON-Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.7 vergleichen zu können, sind noch weitere Einstellungen zu treffen.

Der Nachweis wird mit einer tatsächlich vorhandenen Bewehrung geführt. Somit sind in Maske 1.6 *Bewehrung* noch einige Vorgaben zu Durchmesser, Betondeckung und Bewehrungsmenge erforderlich. Im Register *Längsbewehrung* wird der Durchmesser mit 25 mm festgelegt (siehe Bild 9.37).

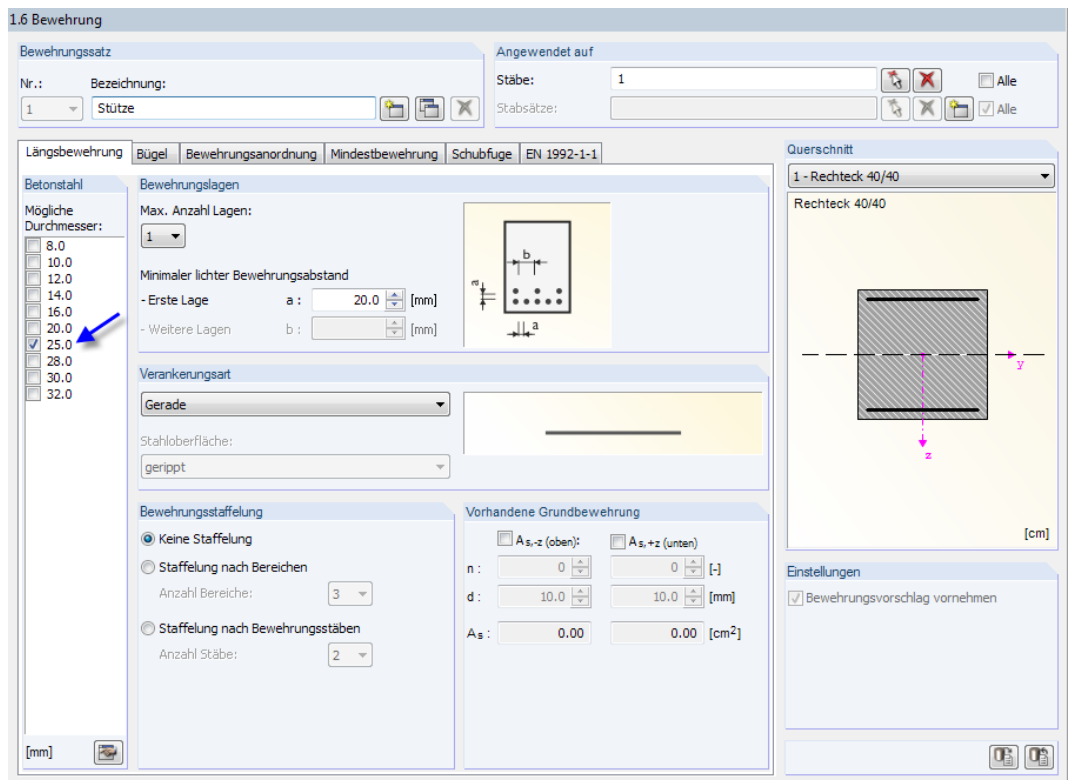


Bild 9.37: Vorgabe des Stabstahldurchmessers

Die Betondeckung wird mit $c_{nom} = 27,5$ mm gewählt, sodass sich ein Achsabstand von 40 mm ergibt.

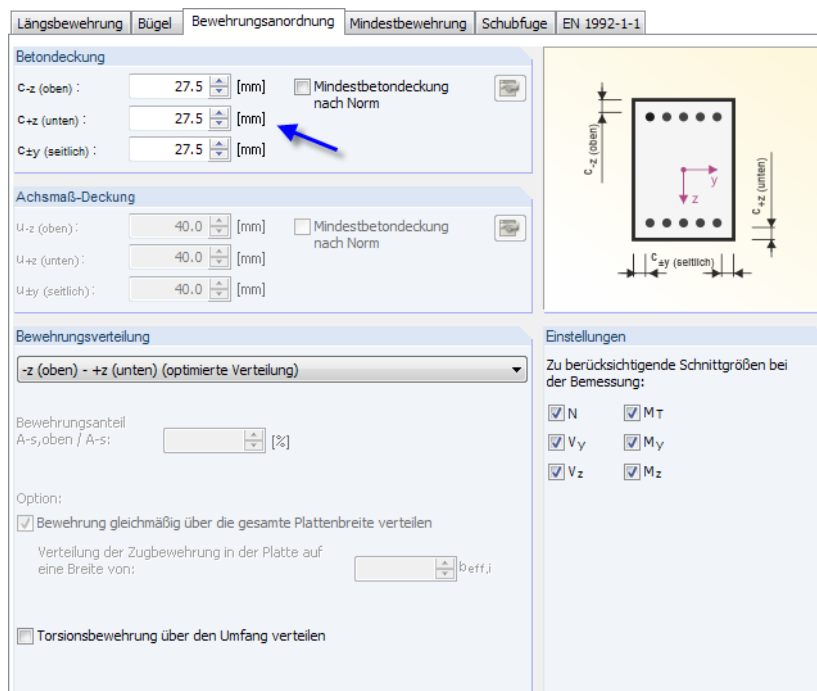


Bild 9.38: Vorgabe der Betondeckung

Um den Nachweis mit der vorgegebenen Bewehrung aus [15] führen zu können, wird eine Mindestbewehrung von $A_{s,oben} = A_{s,unten} = 32 \text{ cm}^2$ definiert.

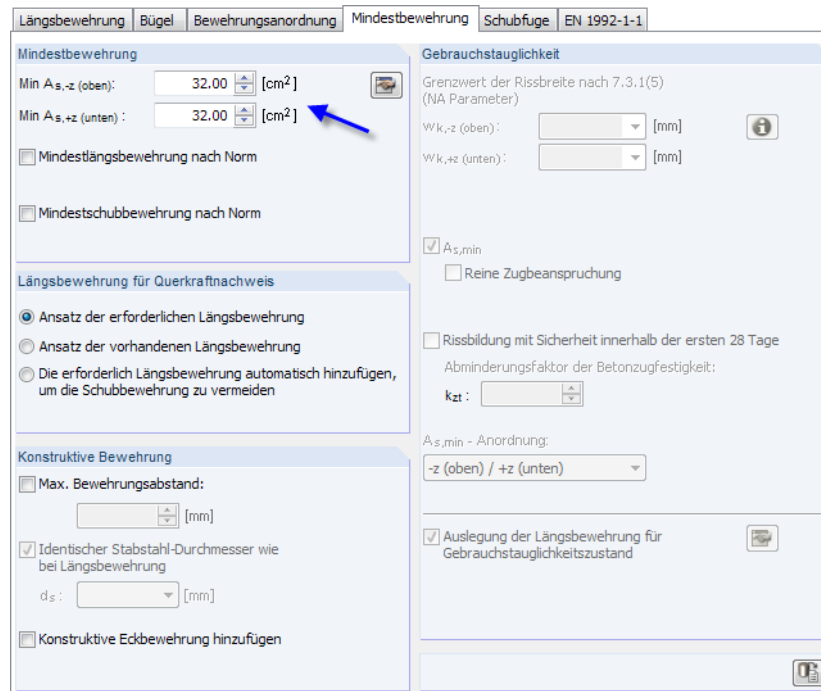


Bild 9.39: Vorgabe der Mindestbewehrung

Berechnung

Damit ist die Eingabe abgeschlossen und die [Berechnung] kann gestartet werden.

Ergebnis der nichtlinearen Berechnung

6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

A	B	C	D	E	F
Stab Nr.	Stelle x [mm]	Belastung	Sicherheit γ []	Ausnutzung $1/\gamma$ []	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 40/40					
1	0.0	LK1	1.980	0.505	

Max: 0.51 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 0.0, LK1

Bruchschnittgrößen R_u					
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	-543.77	kNm		
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm		
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	-2726.76	kN		
Spannungs- und Dehnungsberechnung					
Bruchkrümmung	$1/r_{Rd}$	6.3427E-03	1/m		
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/r_{yRd}$	7.7320E-21	1/m		
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/r_{zRd}$	-6.3427E-03	1/m		
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	180.0	°		
Berechnungsdetails					
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	203.54	N/mm ²		
Stahldéhnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	1.018	‰		
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-17.00	N/mm ²		
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-3.500	‰		
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{ctRd}	0.00	N/mm ²		
Maximale Betonzugdehnung	ϵ_{ctRd}	1.520	‰		
Einwirkende Schnittgrößen R ($\gamma_R = 1.30$)					
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	-274.65	kNm		

Bild 9.40: Maske 6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

Die Interpretation der Ergebnisse ist im vorherigen Beispiel (Kapitel 9.2) beschrieben.

Mit dem Sicherheitsfaktor $\gamma = 1,98$ weist das System scheinbar ausreichende Reserven auf. Es soll jedoch gezeigt werden, dass eine geringe Lasterhöhung zu einer Systeminstabilität führt. In Maske 1.1 Basisangaben wird die LK 14 zur Bemessung ausgewählt, sodass die Belastung um 10 % erhöht wird. Nach physikalisch linearer Theorie II. Ordnung besteht für diese Lastkombination kein Stabilitätsproblem.

Berechnung

Die nichtlineare [Berechnung] wird nun mit der Meldung abgebrochen, dass mit der vorhandenen Bewehrung kein ausreichender Systemwiderstand nachgewiesen werden kann.

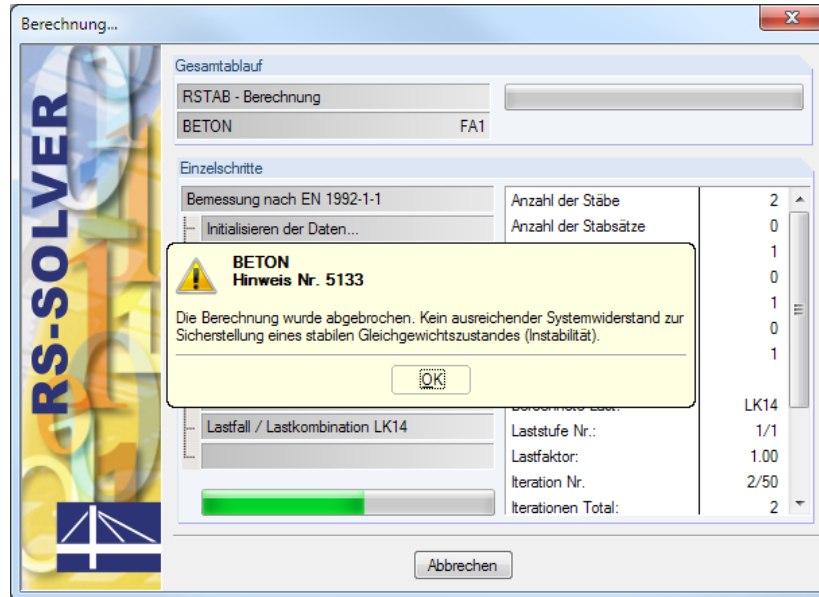


Bild 9.41: Abbruch der Berechnung für LK 14 wegen Instabilität

Die Analyse des Modells nach EN 1992-1-1, 5.8.6 im folgenden Kapitel zeigt, dass die Stütze vor dem Erreichen der Querschnittstragfähigkeit versagt.

9.3.2.2 EN 1992-1-1, 5.8.6

Der zweite Bemessungsfall führt den Nachweis nach dem allgemeinen Bemessungsverfahren des EC 2 für Druckstäbe nach Theorie II. Ordnung.

Eingabe in BETON

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wird ein neuer Betonfall für EN 1992-1-1, 5.8.6 angelegt. Da nur wenige Eingabedaten geändert werden brauchen, wird der erste Bemessungsfall einfach kopiert über das BETON-Menü

Datei → Fall kopieren.

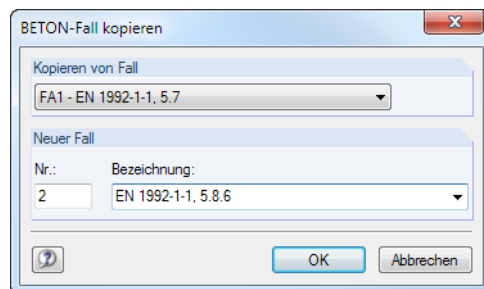


Bild 9.42: Kopieren des ersten Bemessungsfalls

- Optionen
- Nichtlineare Berechnung (Zustand II)...
 - Kriechen/Schwinden berücksichtigen

In Maske 1.1 *Basisangaben* sind die [Einstellungen] für die Berechnung anzupassen. Es wird das allgemeine Verfahren für Stäbe mit Druck nach Theorie II. Ordnung vorgegeben.

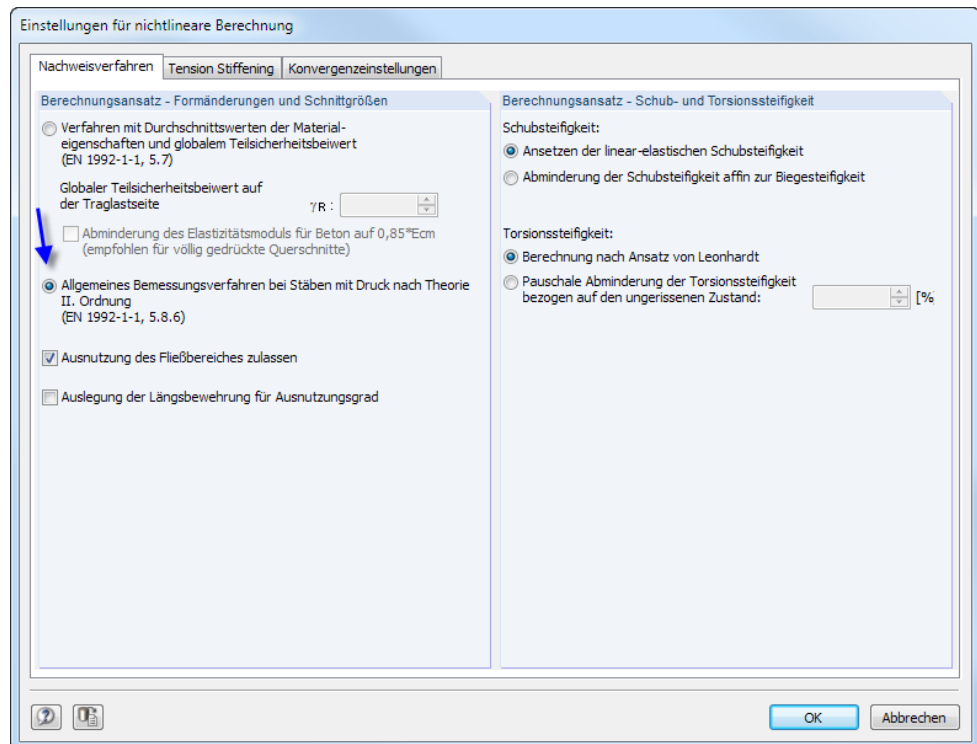


Bild 9.43: Nachweisverfahren nach EN 1992-1-1, 5.8.6

Der nichtlineare Nachweis der Tragfähigkeit für Druckglieder nach EN 1992-1-1, 5.8.6 basiert auf einem geteilten Sicherheitskonzept (siehe [Kapitel 2.4.7.2, Seite 47](#)). Deshalb ist also auch für den Ansatz des *Tension Stiffening* mit den Mittelwerten der Materialparameter zu rechnen. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_c fließt direkt in die angesetzten Zugfestigkeit ein: $f_{ct,R} = \alpha \cdot f_{ct} / \gamma_c$. Dies gilt auch für den E-Modul des Betons.

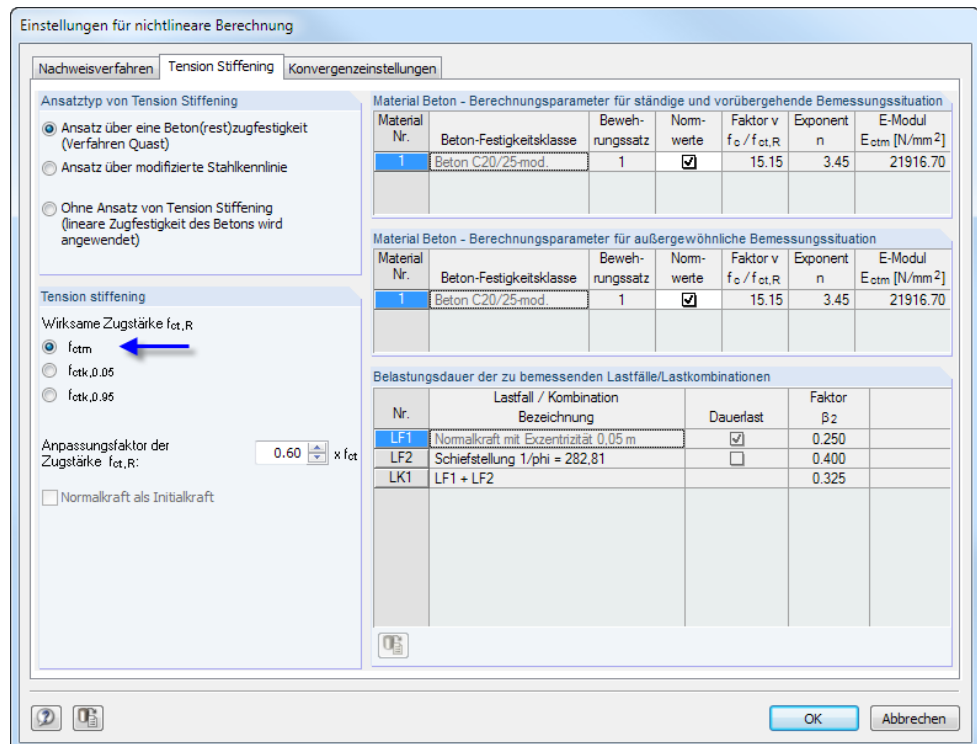


Bild 9.44: Wirksame Betonzugspannung für Tension Stiffening

Die Parameter des Registers *Konvergenzeinstellungen* bleiben unverändert.

In [15] wird mit dem ähnlichen Nachweisverfahren nach DIN 1045-1, 8.6.1 eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 51,0 \text{ cm}^2$ ermittelt. Um diese Ergebnisse mit der BETON-Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.8.6 vergleichen zu können, wird in Maske *1.6 Bewehrung* der Wert der Mindestbewehrung auf $A_{s,oben} = A_{s,unten} = 25 \text{ cm}^2$ abgeändert.

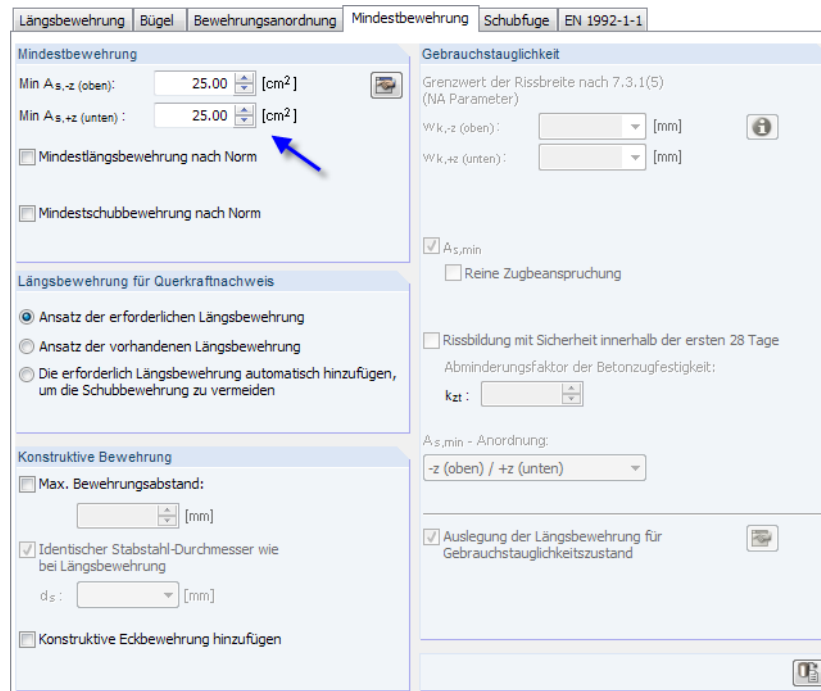


Bild 9.45: Änderung der Mindestbewehrung

Berechnung

Damit sind die Änderungen abgeschlossen und die [Berechnung] wird gestartet.

Ergebnis der nichtlinearen Berechnung

6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

A	B	C	D	E	F
Stab Nr.	Stelle x [mm]	Belastung	Sicherheit γ []	Ausnutzung $1/\gamma$ []	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 40/40					
1	0.0	LK1	2.158	0.463	

Alle Lastfälle Max: 0.47 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 0.0, LK1

Bruchschnittgrößen R_d			
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	-355.11	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	-2286.62	kN
Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Bruchkrümmung	$1/f_{Rd}$	5.2527E-03	1/m
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/f_{yRd}$	-1.3956E-19	1/m
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/f_{zRd}$	-5.2527E-03	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	180.0	°
Berechnungsdetails			
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	113.35	N/mm ²
Stahldehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	0.567	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-13.33	N/mm ²
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-3.500	‰
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{ctRd}	0.00	N/mm ²
Maximale Betonzugdehnung	ϵ_{ctRd}	1.019	‰
Einwirkende Schnittgrößen R			
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	-164.52	kNm

Bild 9.46: Maske 6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

Mit der gewählten Bewehrung ergibt sich für die Einspannstelle ein Sicherheitsfaktor γ von 2,16 (zum Vergleich: $\gamma = 1,98$ für die Bemessung nach EN 1992-1-1, 5.7).

Im folgenden Bild sind die Verformungen nach Theorie II. Ordnung und nach den beiden nichtlinearen Berechnungsvarianten gegenübergestellt.

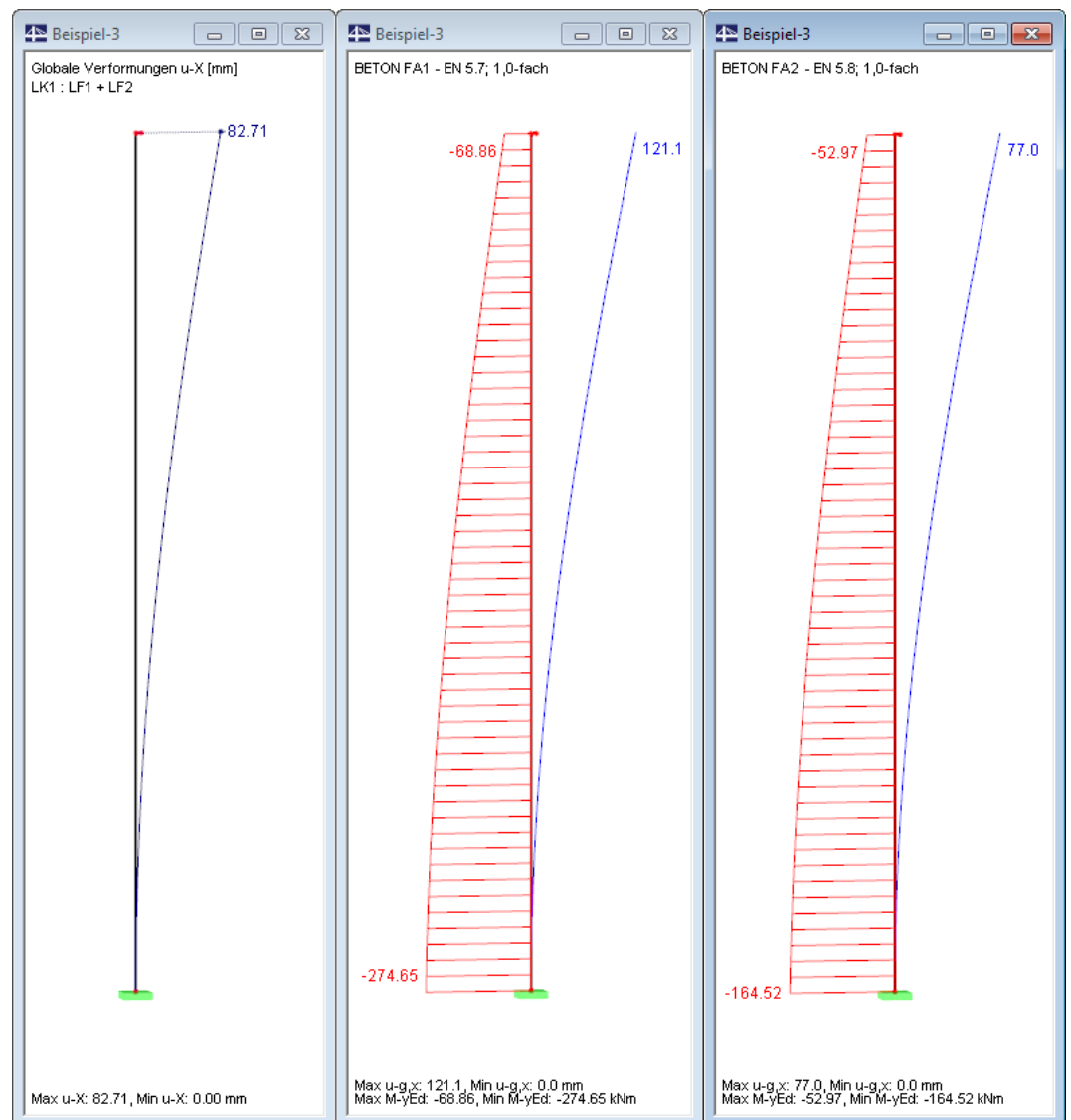


Bild 9.47: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach Theorie II. Ordnung und nach nichtlinearer Berechnung

Eine anschauliche Deutung der Ergebnisse kann durch eine Darstellung im M/N-Interaktionsdiagramm erfolgen. Im Bild 9.48 sind neben der Querschnittstragfähigkeit (abgesicherte Quantilwerte) die Tragfähigkeitskurven für die Berechnung nach Theorie I. und II. Ordnung bei linearem Materialverhalten sowie nach Theorie II. Ordnung bei nichtlinearem Materialverhalten angetragen.

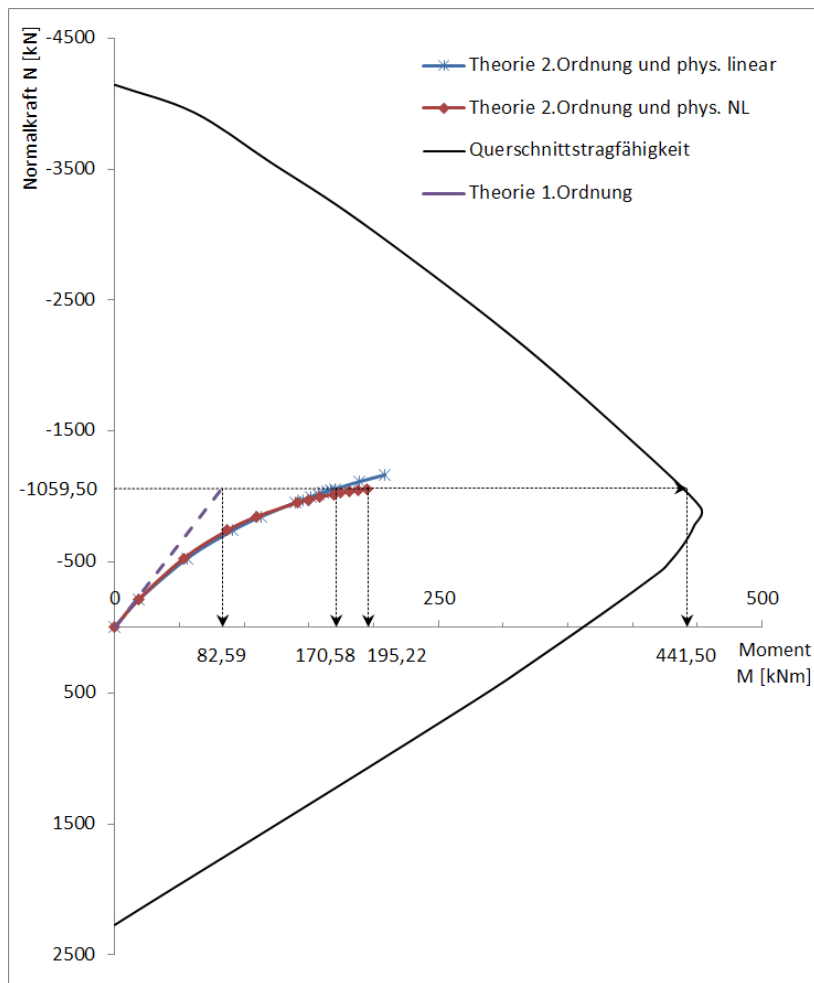


Bild 9.48: M/N-Interaktionsdiagramm

Bei dem schlanken Druckglied weicht die Berechnung nach Theorie II. Ordnung bereits bei einem geringen Lastniveau von der Berechnung nach Theorie I. Ordnung ab. Die physikalische Nichtlinearität macht sich erst bei einem höheren Lastniveau bemerkbar, schreitet dann allerdings sehr schnell voran. Durch die dabei auftretende starke Steifigkeitsminderung versagt die Stütze letztendlich infolge Stabilitätsverlustes.

Wird die materialbedingte Nichtlinearität nicht berücksichtigt, liefert die reine Querschnittsbemessung der LK1-Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung (physikalisch linear) eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 2 \cdot 5,27 = 10,54 \text{ cm}^2$.

2.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

A	B	C	D	E	F	G
Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [mm]	LF / LK EK	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 40/40						
A _{s,z} (oben)	1	0.0	LK1	5,27	cm ²	
A _{s,z} (unten)	1	0.0	LK1	5,27	cm ²	

Bild 9.49: Erforderliche Bewehrung für physikalisch lineare Bemessung

Die tatsächlich erforderliche Bewehrung wird so deutlich unterschätzt. Auch die Bemessung auf Moment und Normalkraft aus der physikalisch nichtlinearen Berechnung würde zu einer Unterbemessung führen: Es ergäbe sich für $M_y = 195,22 \text{ kNm}$ und $N = -1\,059,39 \text{ kN}$ eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 2 \cdot 7,15 = 14,30 \text{ cm}^2$. Der Grund liegt darin, dass die Schnittgrößen abhängig von der vorhandenen Bewehrung berechnet werden. Die Stütze versagt jedoch vor dem Erreichen der Grenztragfähigkeit des Querschnitts. Im Beispiel wäre dies ein Moment von ca. 441,5 kNm der Fall. In Interaktion mit der Normalkraft ergibt sich hierfür eine erforderliche Bewehrung von $A_{s,tot} = 2 \cdot 25,40 = 50,80 \text{ cm}^2$.

Literatur

- [1] *EN 1992-1-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [2] *EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [3] Ralf Avak. *Stahlbetonbau in Beispielen DIN 1045. Tl. 1 : Grundlagen der Stahlbeton-Bemessung - Bemessung von Stabtragwerken.* Werner Verlag, 5 Auflage, 2007.
- [4] Konrad Zilch und Gerhard Zehetmaier. *Bemessung im konstruktiven Betonbau.* Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [5] *DIN EN 1992-1-2:2005: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.,* 2006.
- [6] QUAST Ulrich. *Zum nichtlinearen Berechnen im Stahlbeton- und Spannbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau,* Seiten 250-253, 1994.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Herausgeber. *DAfStb-Heft 525 – Erläuterungen zu DIN 1045-1.* Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [8] D. Busjäger und Ulrich Quast. *Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1990.
- [9] Pfeiffer Uwe. *Die nichtlineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingten Achsendehnung.* Cuviller Verlag, Göttingen, 2004.
- [10] Fritz Leonhardt. *Vorlesungen über Massivbau.* Springer Verlag, 3 Auflage, 1984. Teil 1 bis 4.
- [11] Ulrich Quast. *Zur Kritik an der Stützenbemessung. Beton- und Stahlbetonbau,* 95, 2000.
- [12] Dietmar Hossler und Ekkehard Richter. *Überführung von EN 1992-1-2 in EN-Norm und Bestimmung der national festzulegenden Parameter (NDP) im Nationalen Anhang zu EN 1992-1-2. Schlussbericht.* Fraunhofer IRB, 2007.
- [13] Günter Heydel, Wolfgang Krings und Horst Hermann. *Stahlbeton im Hochbau nach EC2: Einführung und Anwendungsbeispiele.* Ernst & Sohn, 1995.
- [14] Piotr Noakowski und Horst G. Schäfer. *Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau.* Ernst & Sohn, 2003.
- [15] Jörrit Kleinschmitt. *Die Berechnung von Stahlbetonstützen nach DIN 1045-1 mit nichtlinearen Verfahren. Beton- und Stahlbetonbau,* 100, 2005.
- [16] *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001.
- [17] *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion, Kommentierte Kurzfassung.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2. Auflage, 2005.
- [18] *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [19] *DIN 1045-88: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1988.
- [20] *DIN V ENV 1992-1-1 (Eurocode 2): Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992.
- [21] *DIN EN 1992-1-1:2005 (Eurocode 2): Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [22] *DIN EN 1992-1-2:2005 (Eurocode 2): Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.

- [23] ÖNORM B 4700:2001 : „Stahlbetontragwerke EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2001.
- [24] *Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045: Biegung mit Längskraft, Schub, Torsion.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2. Auflage, 1978.
- [25] *Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045-88.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 3. Auflage, 1991.
- [26] Karl Kordina et al. *Bemessungshilfsmittel zu Eurocode 2 Teil 1 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1992.
- [27] *Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Beispiel zur Bemessung nach DIN 1045-1, Band 1: Hochbau.* Ernst & Sohn, Berlin, 2. Auflage, 2005.
- [28] *Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Beispiel zur Bemessung nach DIN 1045-1, Band 2: Ingenieurbau.* Ernst & Sohn, Berlin, 1. Auflage, 2003.
- [29] Christian Barth und Walter Rustler. *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis.* Bauwerk, Berlin, 2010.
- [30] Manfred Curbach et al. *Nichtlineare Berechnung alter Bogenbrücken auf Grundlage neuer Vorschriften.* Ernst & Sohn, Berlin, 1995.
- [31] Karl Kordina und Ulrich Quast. Bemessung von schlanken bauteilen für den durch tragwerksverformung beeinflussten grenzzustand der tragfähigkeit – stabilitätsnachweis. *Betonkalender 2002/Teil 1*, 2002.
- [32] Christoph Vater. *Rechnerisch-theoretische Untersuchungen zur Schnittgrößenumlagerung in verschieblichen und unverschieblichen Stahlbetonrahmen.* Dissertation, Technische Universität Hamburg, 1999.
- [33] Konrad Zilch und Andreas Rogge. Bemessung der stahlbeton- und spannbetonbauteile nach din 1045-1. *Betonkalender 2002/Teil 1*, 2002.

Index

3D-PDF	154	Bewehrung	70, 105, 106, 109
3D-Rendering	142, 147	Bewehrungsabstand	73
A		Bewehrungsanordnung	76
Abbrand	91	Bewehrungsfläche	106, 108
Abbruchkriterien	138	Bewehrungsgrad	82, 121, 157
Abbruchschranken	102	Bewehrungslage	73, 113
Abschnitt	117	Bewehrungssatz	70
Achsmaß	76	Bewehrungsstab	113
Adaptive Stabteilung	31, 52, 101	Bewehrungsstaffelung	73
Allgemeines Bemessungsverfahren	98	Bewehrungsverteilung	78
Alter	66	Bewehrungsvorlage	71
Anmerkung	66, 115	Bewehrungsvorschlag .. 71, 112, 114, 115, 117, 119, 139	
Anmerkungen	121	Bezugslänge	93
Anpassungsfaktor	100	BETON NL	57, 59
Anschnittmoment	69	Biegerollendurchmesser	115, 122
Ansichtsmodus	126, 145	Biegezwang	86
Anzeigefaktoren	148	Biegung	7
Auflagernahe Last	70	Blättern in Masken	53
Ausdruckprotokoll	150, 153	Brandeinwirkung	91
Außergewöhnlich	56	Brandschutz	24, 61, 91
Auslegung	98	Brandschutzklasse	91
Auslegung der Längsbewehrung	92	Brandschutznachweis .. 128, 130, 131, 137, 140	
Ausnutzung	125, 129, 133, 134	Bügel	74
Ausnutzungsgrad	98	Bügelabstand	75, 118
B		Bügelbereich	118
Basisangaben	53	Bügelbewehrung .. 106, 107, 117, 121, 140, 141	
Baustofffestigkeit	46, 47, 50	Bügelparameter	74
Beenden von BETON	53	C	
Belastungsdauer	100	Charakteristisch	58
Bemessungsdetails	106, 121	D	
Bemessungsfall	145, 146, 155, 156, 190	Dämpfung	40, 52, 102
Bemessungssituation	56, 58, 96	Dauerlast	60, 100
Benutzerprofil	158	Dehnung	33, 46
Berechnung starten	104	Dehnungsverteilung	17
Berechnungsansatz	98	Details	60, 95
Berechnungsdetails	138	Dezimalstellen	62, 158
Beton-Festigkeitsklasse	63	Direkte Lagerung	68
Betonalter	21, 23	Drahtmodell	140
Betondeckung	76	Druckbewehrung	8, 82
Betondruckfestigkeit	83	Drucken	152
Betondruckspannung	14	Druckglied	98, 101
Betondruckstrebe	9, 83	Druckkraft	8
Betondruckzone	82	Druckstrebenneigung θ	10, 83
Betonspannung	124	Druckzonenhöhe	82
Betonstahl	62, 63, 73, 74, 91	Duktilität	38
Betonzugfestigkeit	36, 86, 99	Durchbiegung	18, 58, 124, 163
Betonzuschlag	91		

Durchbiegungsdaten	93	Hydratationswärme	87
Durchmesser	73	I	
Durchschnittswerte Material	98	Indirekte Lagerung	68
E		Initialkraft	100
Ecke	78, 80	Installation	5
Eigenspannungen	87	Iteration	51, 52, 102, 138
Einheiten	62, 158	Iterationskennwert	102
Einzellast	70	K	
Endlager	69	Klassifizierung	91
Ergebnisauswertung	139	Kommentar	55
Ergebniskombination	56, 57, 59, 70	Konstruktive Bewehrung	79, 80, 140
Ergebnismasken	105	Kontrolle	103
Ergebnisse-Navigator	146	Konvergenz	51, 101, 138
Ergebnisverläufe	149	Konvergenzeinstellungen	138
Eurocode	60	Kriechen	19, 44, 50, 57, 59, 66
Excel	159	Kriechzahl	19, 20, 44, 66
Export	158	Krümmung	18, 33, 46, 49, 162, 179
Export Querschnitte	157		
F		L	
Faktor β	60	Länge	114, 118
Fehlermeldung	108, 111, 129	Längsbewehrung	72, 80, 87, 106, 107, 112, 120, 141
Fenster	144	Längskraft	7
Filter	148	Lage	78
Fließbereich	98	Lager	68
Formänderungen	98	Lagerbreite	68
Fuge	81	Langzeitwirkung	83, 92
G		Lastaufbringung	103
Gebrauchstauglichkeit	14, 49, 58, 84, 87, 96, 112, 123, 135	Lasteinwirkungsdauer	100
Geschädigte Zone	129	Lastfall	56, 108, 124, 129, 134, 136
Globaler Teilsicherheitsbeiwert	98	Lastkombination	56, 60
Grafik	146	Laststufe	52, 103
Grafikausdruck	152	M	
Grenzdurchmesser	16, 125	M-Verhältnis δ	69
Grenzlänge	102	Masken	53
Grenzwert	58, 94, 125	Masse	115, 118, 122
Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit	14, 49, 58, 71, 123, 125, 135	Material	46, 50, 62
Grenzzustand Tragfähigkeit	7, 8, 45, 56, 106, 108, 133	Materialbezeichnung	63
Grundbewehrung	73	Materialbibliothek	63
H		Materialkennwerte	62
Häufig	58	Meldung	118, 135
Haken	115	Mindestbewehrung	15, 79, 86, 124
Heißbemessung	61, 91, 128	Modifizierte Stahlkennlinie	99, 100
Hintergrundgrafik	145	Momentenausrundung	69
Hinweis	108, 125, 129, 135	Momentenumlagerung	69
Höchstbewehrungsgrad	82	Monolithische Verbindung	69
		N	
		Nachweisverfahren	97

Nationaler Anhang	54	S	
Navigator	53	Schaltflächen	126, 140
Neigung	74, 113	Schnitt	74, 118
Nennmaß	76	Schnittgrößen	78, 104, 157
Nichtlineare Berechnung .. 57, 59, 97, 112, 133, 135, 147, 166, 185		Schrumpfen	22
Norm	4, 54, 77, 82	Schubbewehrung	74, 107, 140
O		Schubfuge	81, 95
Obere Bewehrung	107, 140	Schubkraft	81, 95, 107
Oberfläche	122	Schubspannung	81, 95
Optimierung	66, 157	Schubsteifigkeit	98
Optionen	57, 59	Schwinden	44, 45, 57, 59, 66
P		Schwindmaß	19, 22, 44, 66
Panel	6, 148	Scrollrad	139
Plastisches Gelenk	98	Sekantensteifigkeit	33
Plattenbreite	78	Sicherheit	121, 129, 133, 134, 137
Plausibilitätskontrolle	103	Spannungsnachweis	84, 85, 86
Position	112, 113, 117, 122, 139	Stab	71
Positionsbügel	117	Stababstand	16, 125
Positionstab	112, 115, 139	Stabachsen	140
Programmaufruf	5	Stabdurchmesser	80, 114, 118, 122
Q		Stabilitätsverlust	98
Quasi-ständig	58	Stabsatz	71, 89, 93, 109, 126, 130
Querkraft	70, 92	Stabteilung	52, 102
Querkraftbewehrung	83	Ständig und vorübergehend	56
Querkraftnachweis	80	Staffelung	73
Querkrafttragfähigkeit	8, 83	Stahlliste	121
Querschnitt	64, 129	Stahloberfläche	73
Querschnittsbezeichnung	64	Stahlspannung	14, 124
Querschnittsbibliothek	64	Starten von BETON	5
Querschnittsinfo	67	Steifigkeit	40, 48, 102, 138
Querschnittsoptimierung	157	Stelle x .. 108, 110, 114, 118, 120, 124, 129, 134, 136	
Querschnittsseite	91	Stützensenkung	87
R		Stützmoment	69
Randmaße	76	T	
Reduzierungsbeiwert α	83, 92	Tangentensteifigkeit	33
Relationsbalken	126	Teilsicherheitsbeiwert Beton	83, 92
Relative Luftfeuchte	20	Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl	83, 92
Relaxation	44	Temperaturprofil	129
Rissabstand	17	Tension Stiffening	35, 45, 99, 100
Rissbildung	38	Theorie II. Ordnung	98
Rissbreite	16, 85, 125, 136	Torsion	92, 107
Rissbreitenbegrenzung	85, 97	Torsionsbewehrung	78
Rissbreitennachweis	84, 85	Torsionssteifigkeit	99
Rotationsfähigkeit	82	Tragfähigkeit	7, 47, 56, 95, 106, 108, 133
RSTAB-Arbeitsfenster	145	Trocknungsschwinden	22
		Typ	124, 136
		U	
		Überhöhung	94

Umlaufende Bewehrung	78	Vorspannung	100
Unbemessbarkeit	111, 132	Voute	89, 110
Untere Bewehrung	107, 140	X	
Unverformtes System	97	x-Stelle	108, 110, 120, 124, 127, 129, 131
V		W	
Verankerung	73, 114	Wärmedehnung	92
Verankerungsart	73, 74, 115	Winkelhaken	115
Verankerungslänge	73, 74, 140	Wirksame Zugstärke $f_{ct,R}$	100
Verankerungstyp	122	Wirtschaftlichste Bewehrung	87
Verbund	17, 115	Z	
Vereinfachtes Verfahren	95	Zementart	21
Verformung 4, 18, 49, 93, 97, 102, 124, 138, 160, 166, 180		Zentrischem Zwang	86
Verformungsnachweis	86, 93	Zone	91, 130
Verjüngung	89	Zugkraft	7
Versatzmaß	121	Zugkraftdeckung	146
Verschiebung	136	Zugversteifung	35
Verschobene Stabenden	97	Zustand II .. 18, 33, 50, 57, 59, 99, 133, 135, 176	
Visualisierung	142	Zwang	86
Völligkeitsbeiwert	100	Zwischenablage	158
Völligkeitsfaktor	60	Zwischenergebnisse .. 106, 121, 123, 133, 135, 149	
Vollmodell	140		
Vorhandene Bewehrung	112		
Vorkrümmung	91		