



Fassung
März 2018

Zusatzmodul

RF-BETON Stäbe

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 RF-BETON Stäbe	4
1.2	Gebrauch des Handbuchs	5
1.3	Aufruf von RF-BETON Stäbe	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	32
2.4.3	Tension Stiffening	34
2.4.3.1	Modell: Zugfestigkeit des Betons	35
2.4.3.2	Modifizierte Stahlkennlinie	37
2.4.4	Mittlere Momenten-Krümmungs-Beziehung	38
2.4.5	Ermittlung der Element-Steifigkeiten	39
2.4.5.1	Biegesteifigkeit	39
2.4.5.2	Längs-, Schub- und Torsionssteifigkeit	40
2.4.6	Kriechen und Schwinden	43
2.4.7	Grenzzustand der Tragfähigkeit	44
2.4.7.1	Materialkennwerte	45
2.4.7.2	Sicherheitsnachweis	46
2.4.8	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	48
2.4.9	Konvergenz	50
3.	Eingabedaten	52
3.1	Basisangaben	52
3.1.1	Tragfähigkeit	55
3.1.2	Gebrauchstauglichkeit	57
3.1.3	Details	59
3.1.4	Brandschutz	60
3.2	Materialien	61
3.3	Querschnitte	63



3.4	Rippen	67
3.5	Lager	69
3.6	Bewehrung	71
3.6.1	Längsbewehrung	73
3.6.2	Bügel	75
3.6.3	Bewehrungsanordnung	77
3.6.4	Mindestbewehrung	80
3.6.5	Schubfuge	82
3.6.6	Norm	83
3.6.7	Gebrauchstauglichkeit	85
3.6.8	Vouten	90
3.6.9	Brandschutz	92
3.7	Durchbiegungsdaten	94
4.	Berechnung	96
4.1	Detaleinstellungen	96
4.1.1	Tragfähigkeit	96
4.1.2	Gebrauchstauglichkeit	97
4.2	Details für nichtlineare Berechnung	98
4.2.1	Nachweisverfahren	98
4.2.2	Tension Stiffening	101
4.2.3	Konvergenzeinstellungen	103
4.3	Kontrolle	104
4.4	Start der Berechnung	105
5.	Ergebnisse	106
5.1	Erforderliche Bewehrung	107
5.1.1	Erforderliche Bewehrung querschnittsweise	107
5.1.2	Erforderliche Bewehrung stabsatzweise	110
5.1.3	Erforderliche Bewehrung stabweise	110
5.1.4	Erforderliche Bewehrung x-stellenweise	111
5.1.5	Erforderliche Bewehrung unbemessbar	112
5.2	Vorhandene Bewehrung	113
5.2.1	Vorhandene Längsbewehrung	113
5.2.2	Vorhandene Bügelbewehrung	118
5.2.3	Vorhandene Bewehrung x-stellenweise	121
5.2.4	Stahlliste	122
5.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	124
5.3.1	Gebrauchstauglichkeitsnachweis querschnittsweise	124
5.3.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabsatzweise	127
5.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis stabweise	128
5.3.4	Gebrauchstauglichkeitsnachweis x-stellenweise	128
5.4	Brandschutznachweis	129
5.4.1	Brandschutznachweis querschnittsweise	129
5.4.2	Brandschutznachweis stabsatzweise	131
5.4.3	Brandschutznachweis stabweise	132
5.4.4	Brandschutznachweis x-stellenweise	132
5.4.5	Brandschutznachweis unbemessbar	133
5.5	Nichtlineare Berechnung	134
5.5.1	Nichtlineare Berechnung - Tragfähigkeit	134
5.5.2	Nichtlineare Berechnung - Gebrauchstauglichkeit	136
5.5.3	Nichtlineare Berechnung - Brandschutz	138
5.5.4	Nichtlineare Berechnung - Berechnungsdetails	139
6.	Ergebnisauswertung	140



6.1	Bewehrungsvorschlag	140
6.2	3D-Rendering der Bewehrung	143
6.3	Ergebnisse am RFEM-Modell	146
6.3.1	Hintergrundgrafik und Ansichtsmodus	146
6.3.2	RFEM-Arbeitsfenster	147
6.4	Ergebnisverläufe	150
7.	Ausdruck	151
7.1	Ausdruckprotokoll	151
7.2	Grafikausdruck	153
8.	Allgemeine Funktionen	156
8.1	Bemessungsfälle	156
8.2	Querschnittsoptimierung	158
8.3	Einheiten und Dezimalstellen	159
8.4	Export der Ergebnisse	159
9.	Beispiele	161
9.1	Direkte Verformungsberechnung	161
9.1.1	Eingabedaten	161
9.1.2	Vorwerte der Verformungsberechnung	162
9.1.3	Krümmung im Zustand I	162
9.1.4	Krümmung im Zustand II	163
9.1.5	Ermittlung der Durchbiegung	164
9.1.6	Ergebnis in RF-BETON Stäbe	165
9.2	Nichtlineare Verformungsberechnung	167
9.2.1	Eingabedaten	167
9.2.2	Eingaben in RF-BETON Stäbe	168
9.2.3	Kontrolle der Bewehrung	170
9.2.4	Vorgaben für nichtlineare Berechnung	171
9.2.5	Ergebnisse von RF-BETON Stäbe	174
9.2.6	Handrechnung	175
9.2.6.1	Materialkennwerte für Verformungsberechnung	175
9.2.6.2	Zustand I	175
9.2.6.3	Zustand II	177
9.2.6.4	Mittlere Krümmungen	180
9.2.7	Ergebnisbewertung	181
9.3	Stabilitätsuntersuchung Kragstütze	184
9.3.1	Modell in RFEM	184
9.3.2	Nichtlineare Berechnung	186
9.3.2.1	EN 1992-1-1, 5.7	186
9.3.2.2	EN 1992-1-1, 5.8.6	191
A.	Literatur	196
B.	Index	197

1 Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-BETON Stäbe

RF-BETON Stäbe ist ein Zusatzmodul für RFEM. Durch die Integration in die RFEM-Oberfläche ist die lückenlose Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauteilen gewährleistet, die in RFEM in Form von Stabwerkelementen vorliegen.

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

RF-BETON Stäbe 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 RF-BETON Stäbe 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.

RF-BETON Stäbe 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 RFEM-Modells. Diese wirklichkeitsgetreue Darstellung des Bewehrungskorbes kann mit den übrigen Ein- und Ausgabedaten der Bemessung im Ausdruckprotokoll dokumentiert werden.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Erfolg mit RF-BETON Stäbe.

Ihr DLUBAL-Team

1.2 Gebrauch des Handbuchs

Da die Themenbereiche Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck im RFEM-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 RF-BETON Stäbe ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken. 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 RF-BETON Stäbe

Es bestehen in RFEM folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul RF-BETON Stäbe zu starten.

Menü

Sie können das Zusatzmodul aufrufen mit dem RFEM-Menü

Zusatzmodule → Stahlbetonbau → RF-BETON Stäbe.

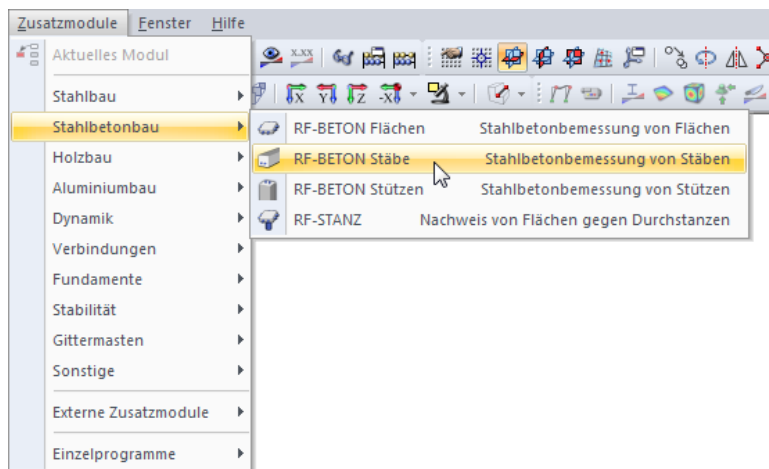


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stahlbetonbau* → *RF-BETON Stäbe*

Navigator

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

Zusatzmodule → **RF-BETON Stäbe**.

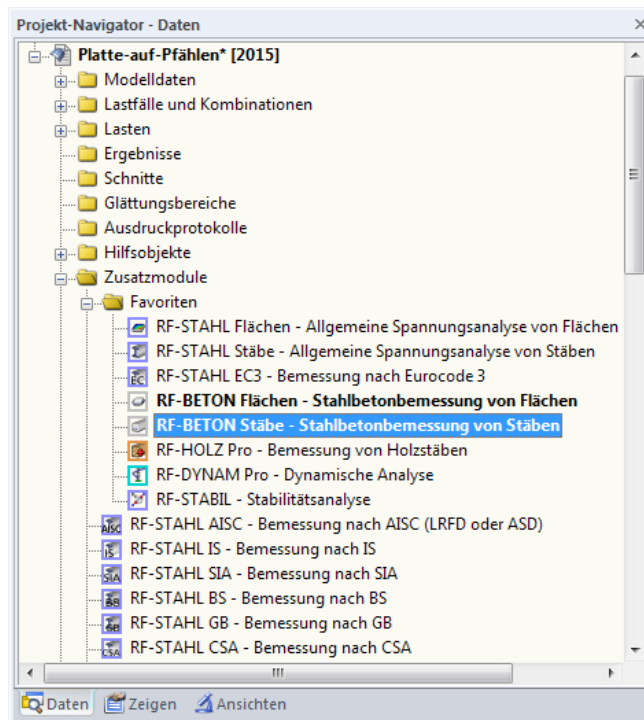
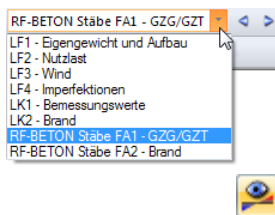


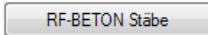
Bild 1.2: Daten-Navigator: Zusatzmodule → RF-BETON Stäbe



Panel

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

Stellen Sie den relevanten RF-BETON Stäbe-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.

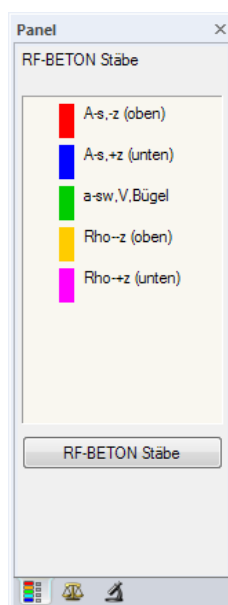


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [RF-BETON Stäbe]

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:

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

mit

$C_{Rd,c}$: Empfohlener Beiwert: $0,18/\gamma_c$
$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$: Maßstabsfaktor zur Berücksichtigung der Querschnittshöhe d: Mittlere statische Höhe in [mm]
$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$: Längsbewehrungsgrad A_{sl} : Fläche der Zugbewehrung, die mindestens $(l_{bd} + d)$ über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird
f_{ck}	: Charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit in [N/mm ²]
k_1	: Empfohlener Beiwert: 0,15
b_w	: Kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone in [mm]
d	: Statische Nutzhöhe der Biegebewehrung in [mm]
$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 f_{cd}$: Bemessungswert der Betonlängsspannung in [N/mm ²]

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:

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

mit

A_{sw}	: Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
s	: Bügelabstand
z	: Hebelarm der inneren Kräfte angenommen zu $0,9 d$
f_{ywd}	: Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
θ	: 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 $0,9 d$

$b_{eff,i}$: 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 3.30, Seite 77)

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 Ortbetonerzeugnissen 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.

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

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)

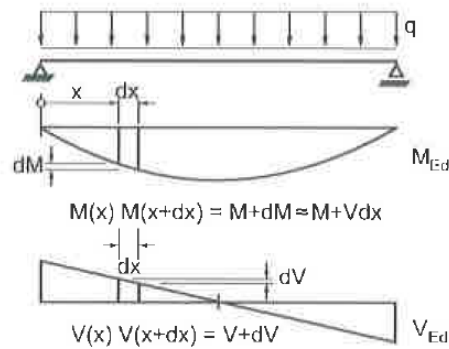
2. Berechnung aus Längskraftdifferenz in der Querschnittsergänzung aus allgemeiner Spannungsintegration

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.

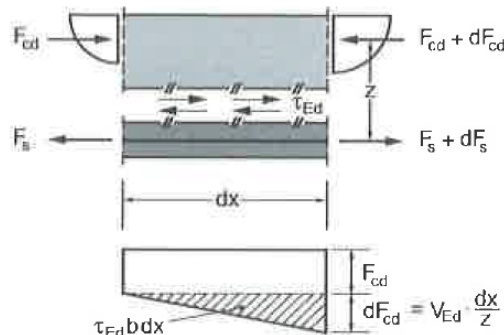
In den aktuellen Normen wird diesem Ansatz nur in geringem Maße Rechnung getragen. Ein verschieblicher Verbund wird zwar zugelassen, aber auf der sicheren Seite liegend konservativ abgegrenzt und durch Konstruktionsregeln ergänzt.

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.

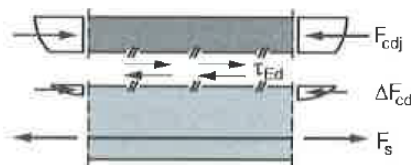
Eigenspannungen, die normalerweise mit Schubspannungen in der Fuge einhergehen (beispielsweise aus verschiedenem Schwindverhalten zweier Betonteile unterschiedlichen Alters), werden in der Regel nicht berücksichtigt. Die einwirkende Schubkraft v_{Edi} wird ausschließlich aus Schnittgrößen am Querschnitt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

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

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:

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

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:

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

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:

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

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

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 $N_{Ed} = \text{Zugkraft}$

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)

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

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

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.

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

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

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) wie folgt 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 Rippenstäbe 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 161](#) 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

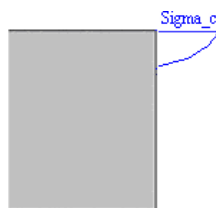


Bild 2.5: Kriecherzeugende Spannung

Unter der Annahme eines linearen Kriechverhaltens ($\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ckj}$) kann das Kriechen des Betons durch eine Abminderung des Elastizitätsmoduls 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:

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

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 in [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 in [%]

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

$T(\Delta t_i)$: 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 t_0 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

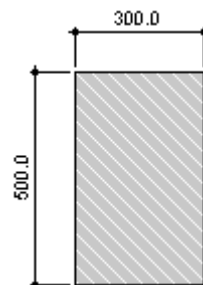
$t_{0,T} = t_T$: Wirksames Betonalter bei Belastungsbeginn unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur

α : Exponent, abhängig von der Zementart, siehe [Tabelle 2.2](#)

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

Tabelle 2.2: Exponent α

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}\beta(t_0) &:= \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 8,96^{0,2}} = 0,606 \\ \beta_c(t, t_0) &:= \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3} = \left[\frac{365 - 8,96}{538,779 + 365 - 8,96} \right]^{0,3} = 0,758 \\ \beta_H &:= 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 = \\ &1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot 50)^{18} \right] \cdot 187,5 + 250 \cdot 1,030 = 538,779 \\ \beta_H &:= \leq 1500 \cdot \alpha_3 = 1500 \cdot 1,030 = 1545 \\ \alpha_3 &:= \left(\frac{35}{33} \right)^{0,5} = 1,030\end{aligned}$$

Schwindmaß $\varepsilon(t, t_s)$

Bei der Ermittlung des Schwindmaßes $\varepsilon(t, t_s)$ gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 kann die Schwinddehnung $\varepsilon_{cs}(t)$ aus der Summe der Komponenten autogenes Schwinden $\varepsilon_{ca}(t)$ und Trocknungsschwinden $\varepsilon_{cd}(t, t_s)$ 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

$$\begin{aligned}\beta_{as}(t) &:= 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} \\ \varepsilon_{ca}(\infty) &:= 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad \text{charakteristische Betondruckfestigkeit } f_{ck} \text{ in [N/mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

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

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}(f_{cm})$$

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 Schwindens

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

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

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 2.3: 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 42,5 N

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:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 0,978 \cdot 0,0000375 = 0,0000367$$

mit

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

$$\varepsilon_{ca}(\infty) : 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (25 - 10) \cdot 10^{-6} = 0,0000375$$

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

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

$$h_0 = 187,5 \text{ mm} \Rightarrow k_h = 0,87$$

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

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

$$\text{Zementklasse N} \Rightarrow \alpha_{ds1} = 4; \alpha_{ds2} = 0,12$$

Gesamtschwindmaß:

$$\varepsilon(t, t_s) = \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t) = 0,0000367 + 0,000341 = 0,000378 = 0,378 \text{ ‰}$$

2.3 Brandschutznachweis

Die Brandschutzbemessung mit RF-BETON Stäbe 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.

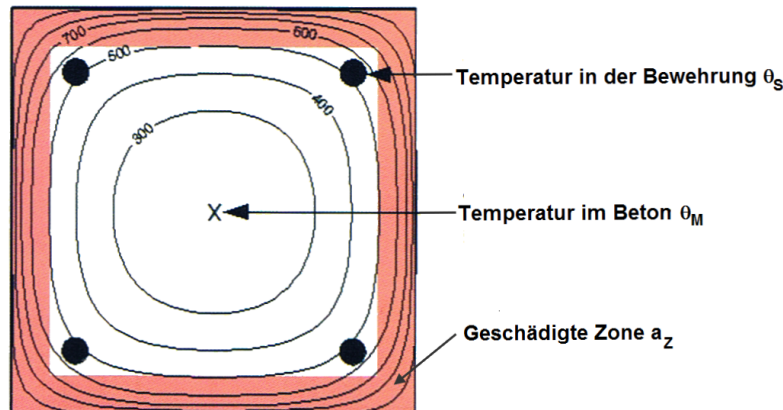


Bild 2.7: Brandbeanspruchter Querschnitt mit geschädigten Zonen

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.

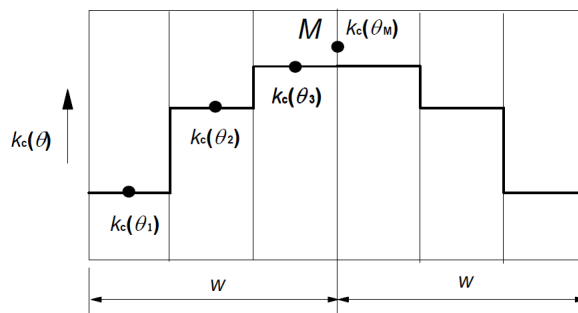


Bild 2.8: Unterteilung einer beidseits brandbeanspruchten Wand in Zonen gemäß [5], Bild B.4

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 2.4 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	$0,5 \cdot$ Bauteilbreite in Brandeinwirkungsrichtung
Vierseitig brandbeanspruchte Stütze	$0,5 \cdot$ kleineres Querschnittsmaß

Tabelle 2.4: 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.

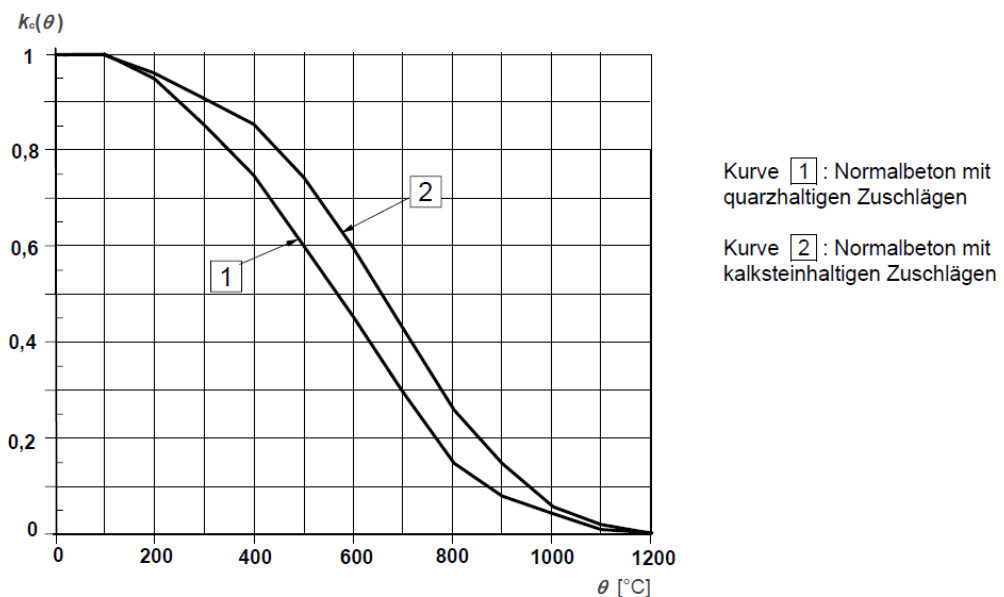


Bild 2.9: Beiwert $k_c(\theta_i)$ zur Berücksichtigung des Abfalls der Betondruckfestigkeit gemäß [5], Bild 4.1

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.

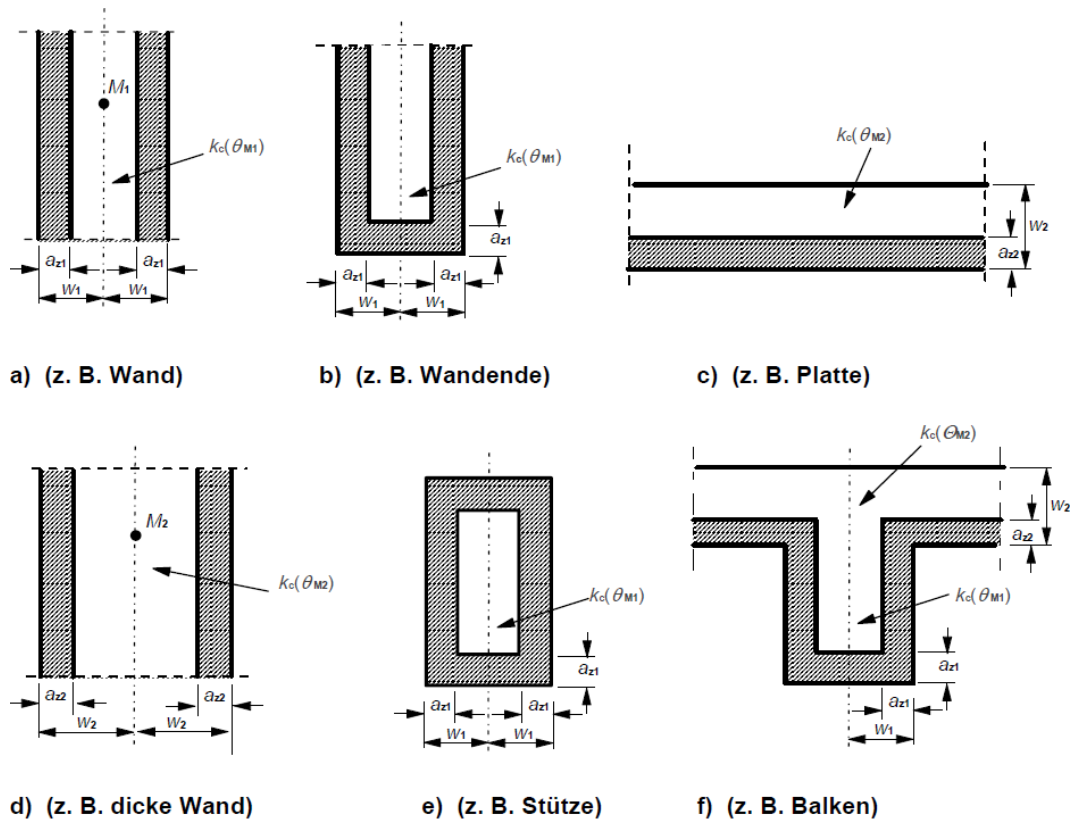


Bild 2.10: Reduktion der Festigkeit und des Querschnitts bei Brandbeanspruchung gemäß [5], Bild B.3

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 $\left(1 - \frac{0,2}{n} \right)$ 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 $\varepsilon_{cu1,\theta}$ 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	Quarz. Zuschläge			Kalksteinhaltige Zuschläge		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°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

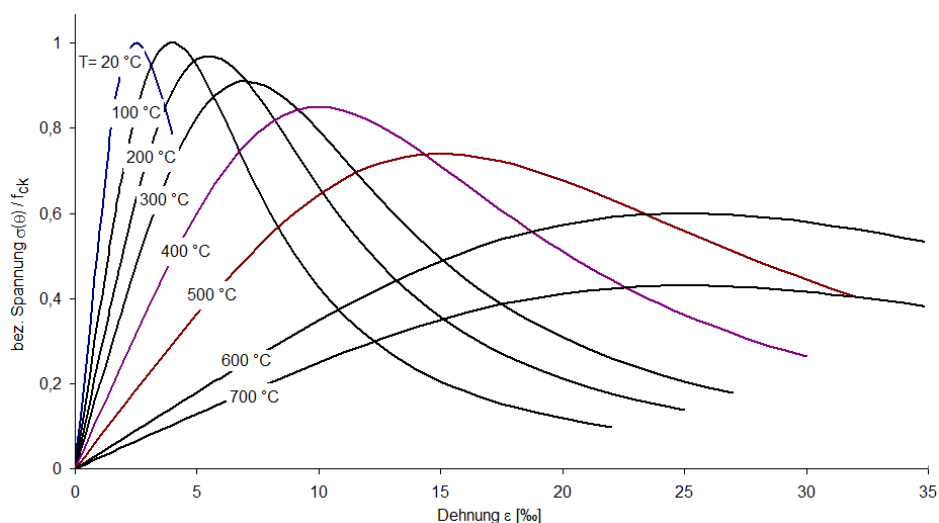


Bild 2.12: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton mit kalksteinhaltigen Zuschlägen in Abhängigkeit von der Temperatur



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 61).

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

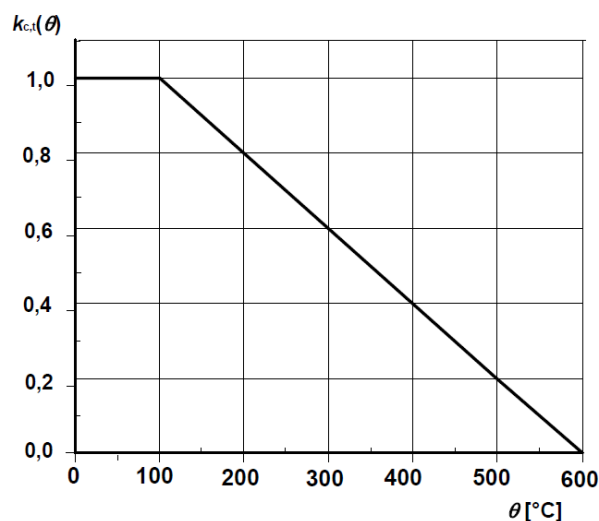


Bild 2.13: Reduktionsfaktor $k_{c,t}(\theta)$ zur Berücksichtigung temperaturabhängiger Betonzugfestigkeit f_{ct} nach [5] Bild 3.2

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.

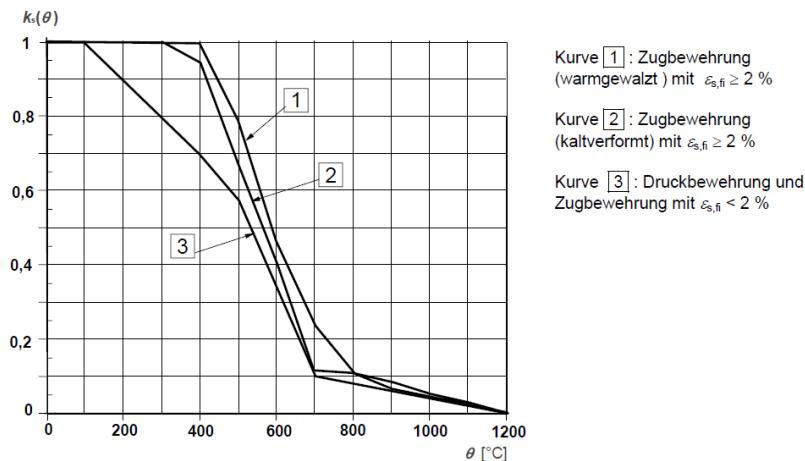


Bild 2.14: Klasse N – Reduktionsfaktor $k_s(\theta)$ nach [5] Bild 4.2a

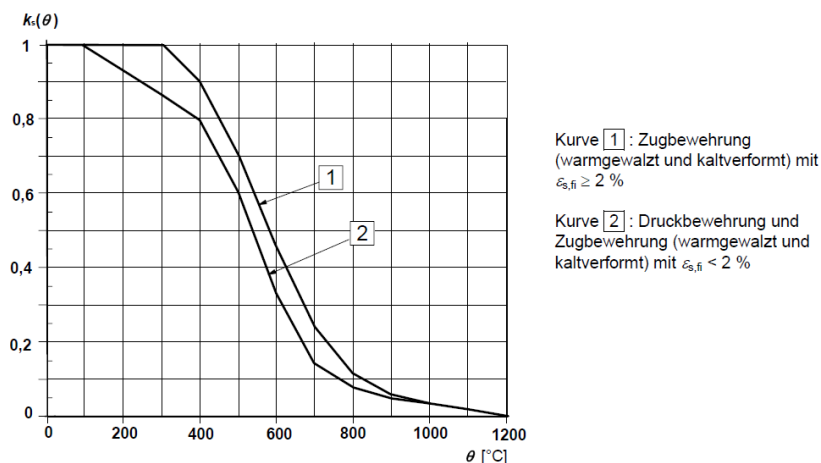


Bild 2.15: Klasse X – Reduktionsfaktor $k_s(\theta)$ nach [5] Bild 4.2b

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:

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

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.

Folgendes Flussdiagramm stellt den allgemeinen Ablauf einer nichtlinearen Berechnung dar.

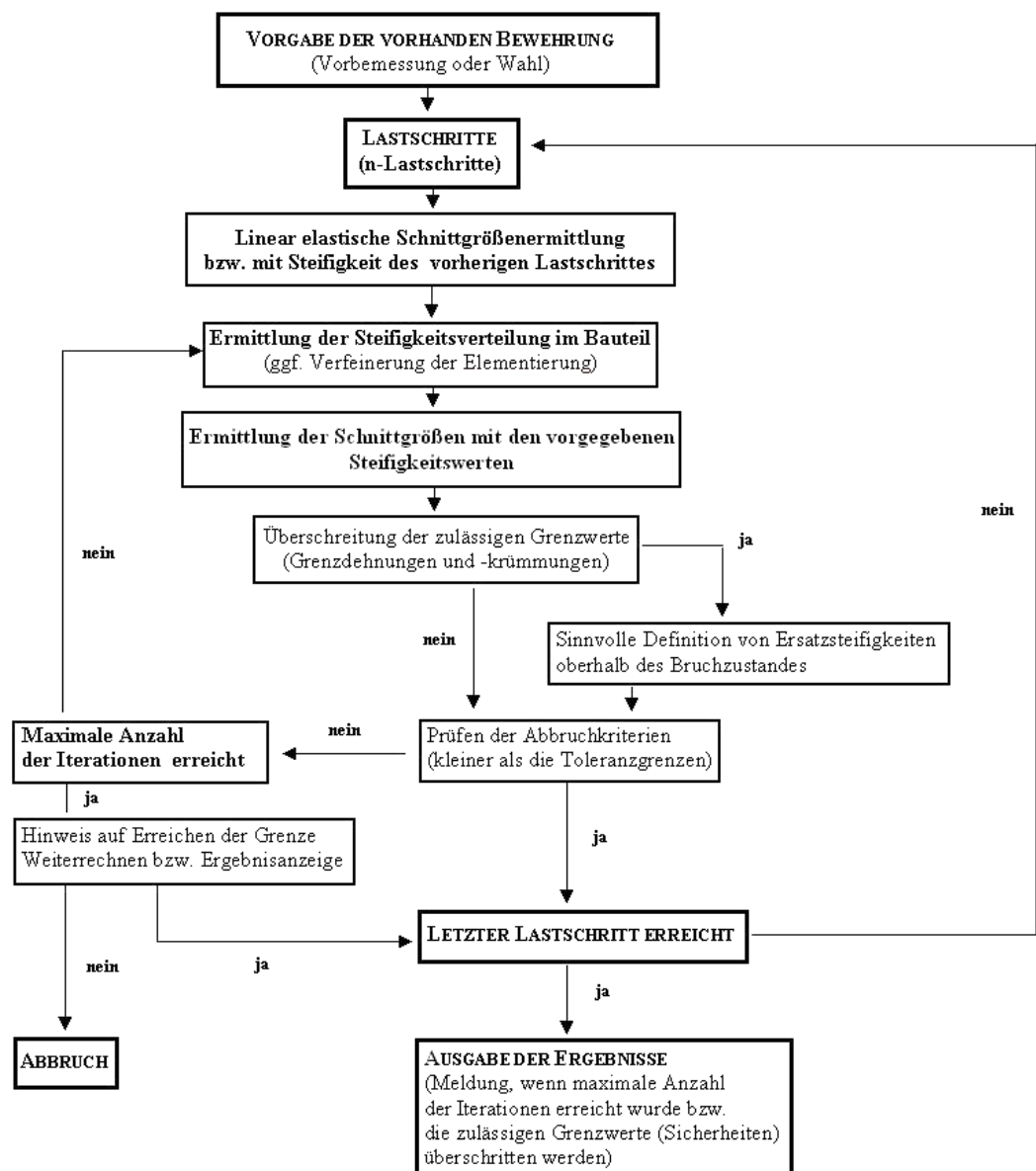


Bild 2.18: Allgemeiner Berechnungsablauf einer nichtlinearen Bemessung

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

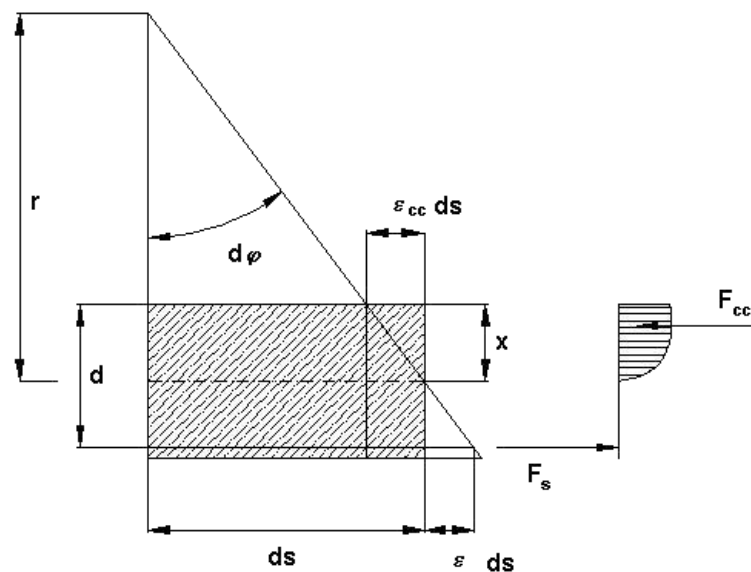


Bild 2.19: Zusammenhang zwischen Dehnung und Krümmung am infinitesimalen Element

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 Tangentensteifigkeit.

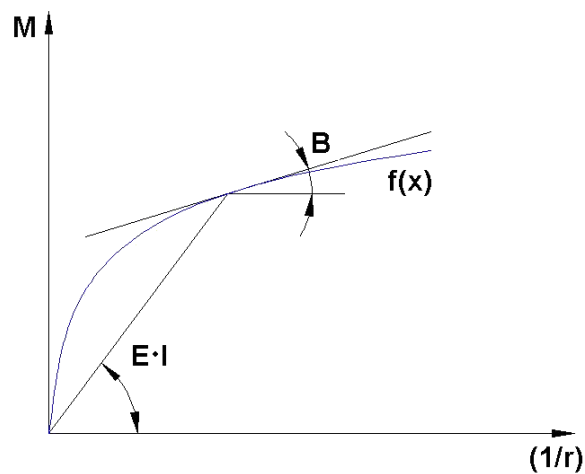


Bild 2.20: Sekantensteifigkeit ($E \cdot I$) und Tangentenbiegesteifigkeit (B)

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.

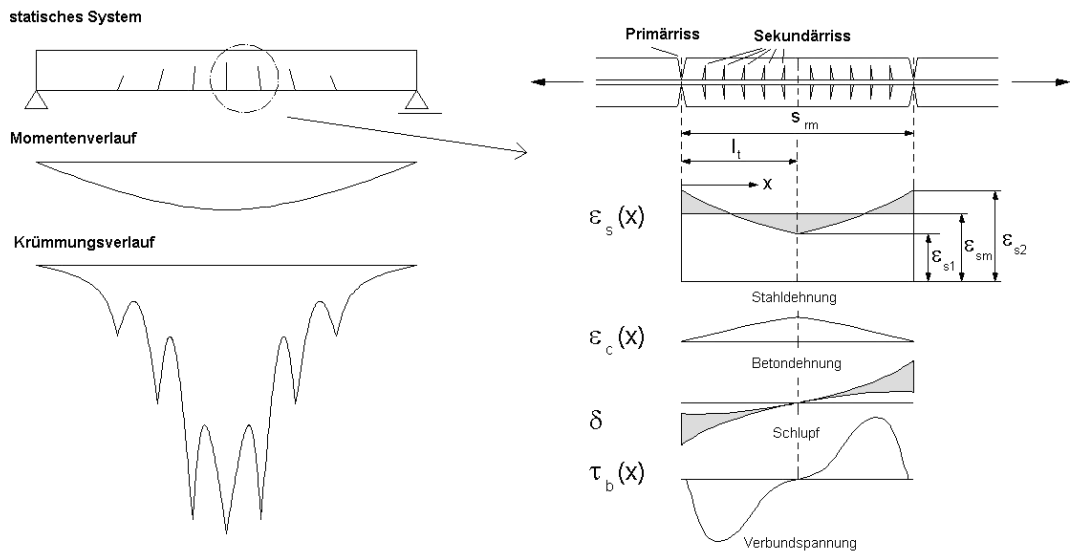


Bild 2.21: Spannungs- und Dehnungsverhalten zwischen zwei Primärrissen

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.

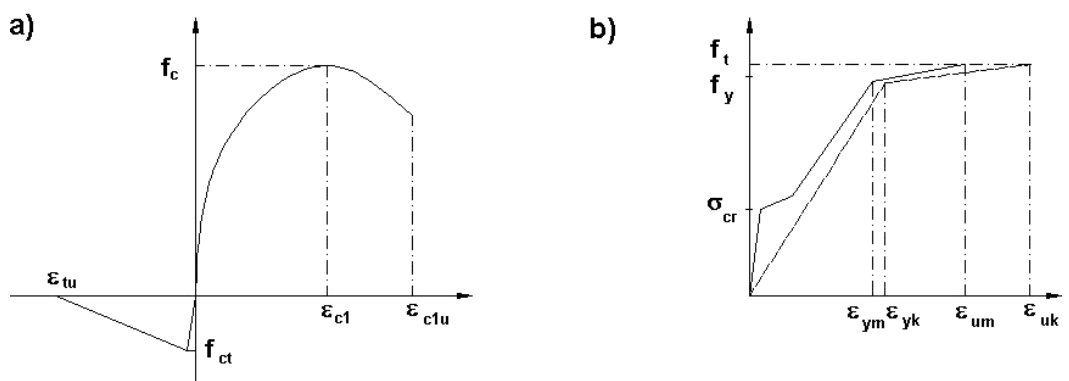


Bild 2.22: Unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung des Tension Stiffening Effekts
a) über Betonkennlinie b) modifizierte Stahlkennlinie

In RF-BETON Stäbe 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.

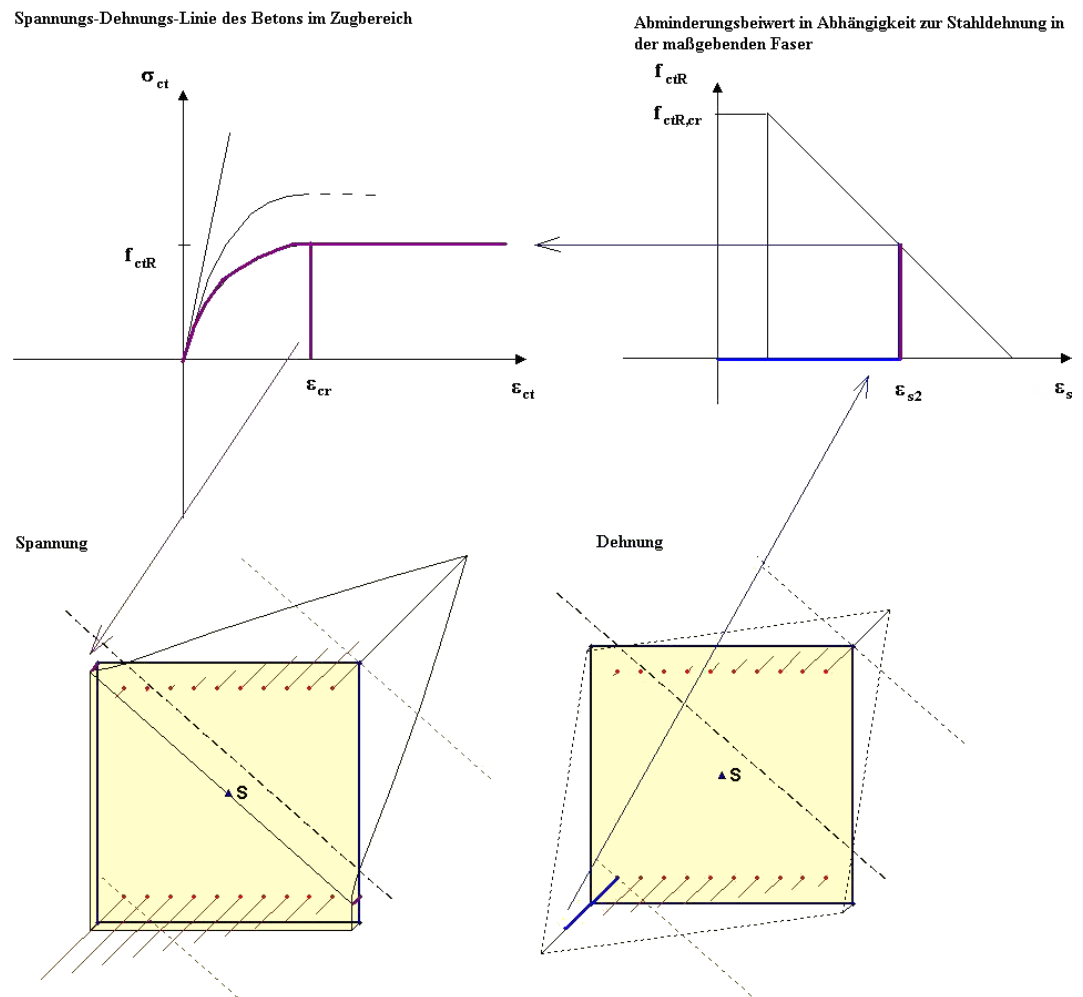


Bild 2.23: Berechnung der Restzugfestigkeit für das Tension Stiffening Modell nach QUASt

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

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

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

$$\varepsilon_{cr} = \left| \frac{\varepsilon_{c1}}{v} \right|$$

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

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

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

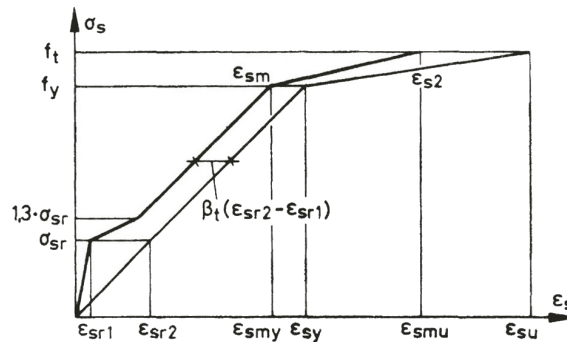


Bild 2.24: Modifizierte Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls nach [7]

Erläuterung

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

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{s1}$$

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

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

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

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

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

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

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 $[N/mm^2]$

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.

RF-BETON Stäbe 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 4.2.2).

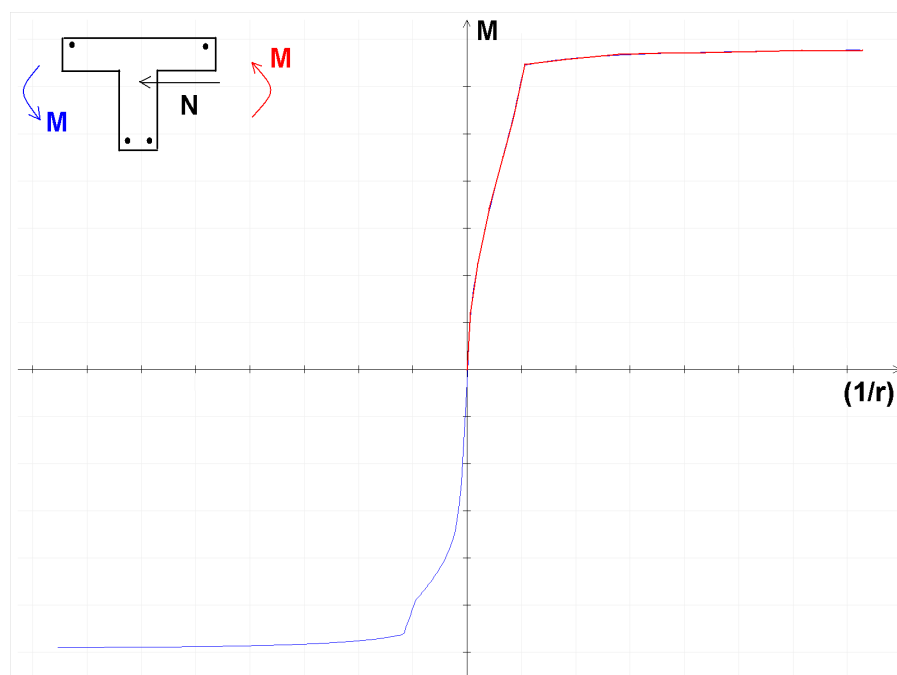


Bild 2.25: Beispielhafte Darstellung einer Momenten-Krümmungs-Beziehung

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. In diesem Fall ist in RFEM eine Verfeinerung des FE-Netzes vorzunehmen, um diese Effekte zu unterbinden.

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.

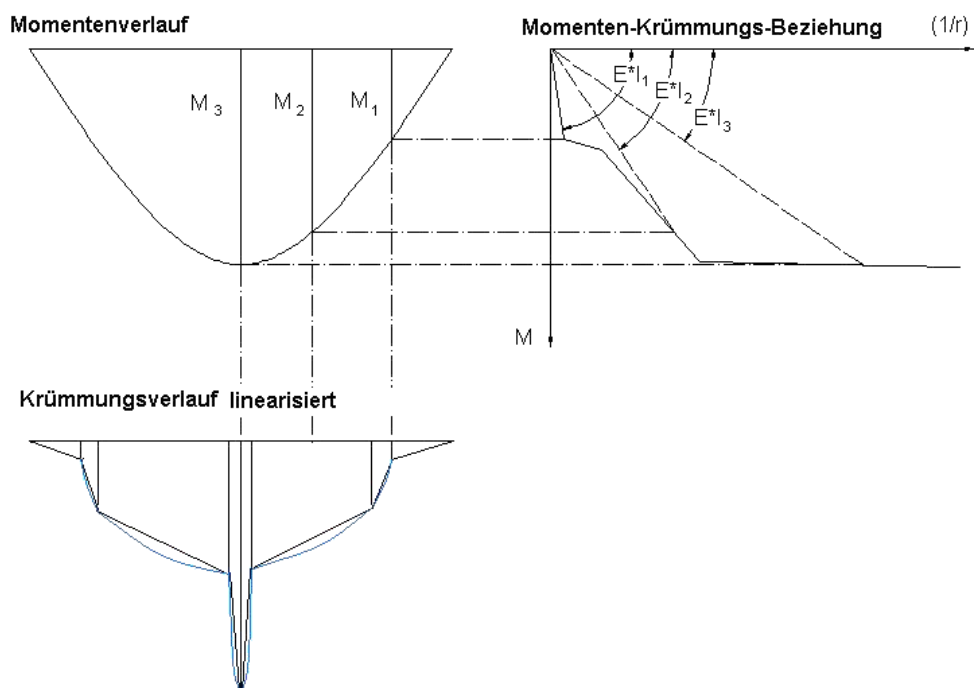


Bild 2.26: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Moment, Krümmung und Steifigkeit

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. RF-BETON Stäbe 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 RF-BETON Stäbe 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.

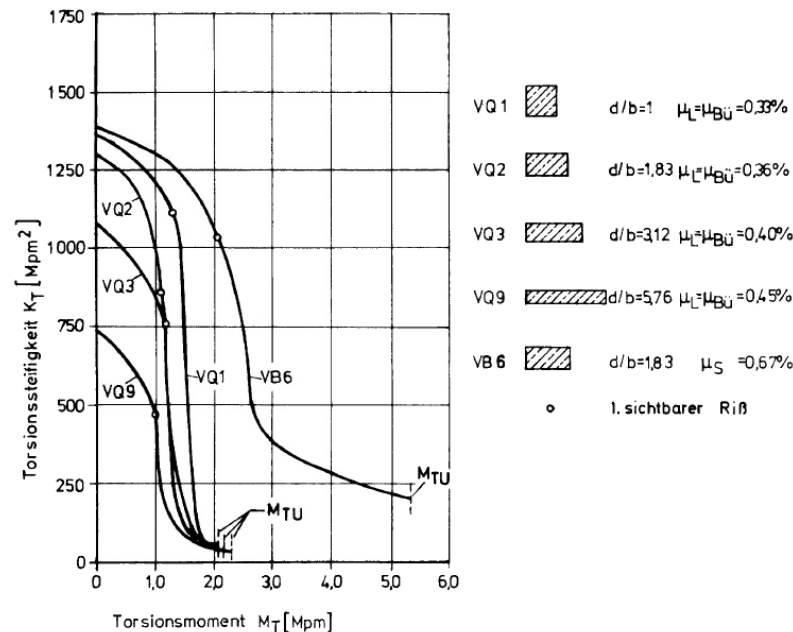


Bild 2.27: Abbildung aus LEONHARDT [10] zum Abfall der Torsionssteifigkeit bei Rissbildung

Für die Berechnung mit RF-BETON Stäbe 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°:

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

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:

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

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

Ermittlung des Rissmoments für Hohlquerschnitt:

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

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

$T_{Rd,sy}$: 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 RF-BETON Stäbe 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

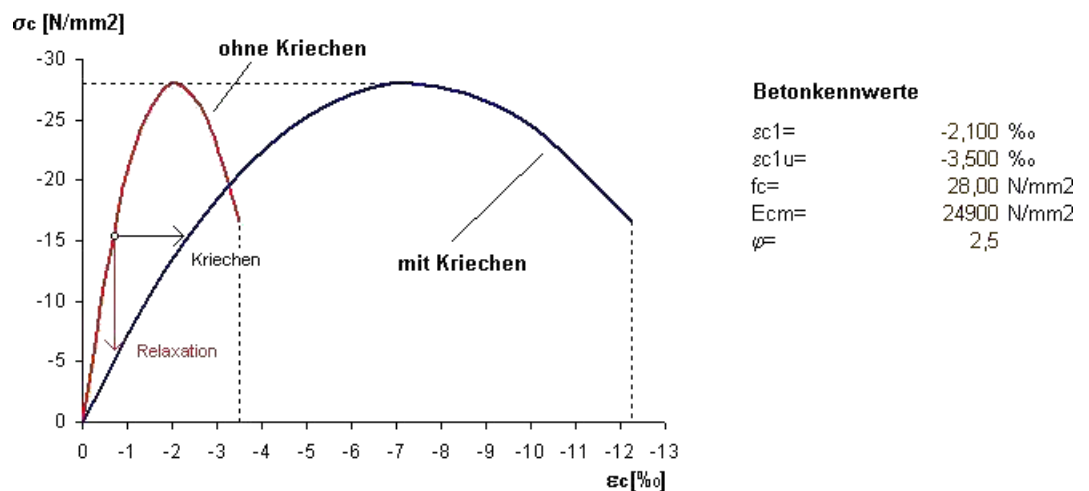


Bild 2.28: Verzerrung der Spannungs-Dehnungs-Linie zur Erfassung des Kriecheinflusses

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 RF-BETON Stäbe 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.



In RF-BETON Stäbe 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 RF-BETON Stäbe stehen beide oben beschriebenen nichtlinearen Berechnungsverfahren zur Verfügung (vgl. Bild 4.4, Seite 98).

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 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 2.29 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.

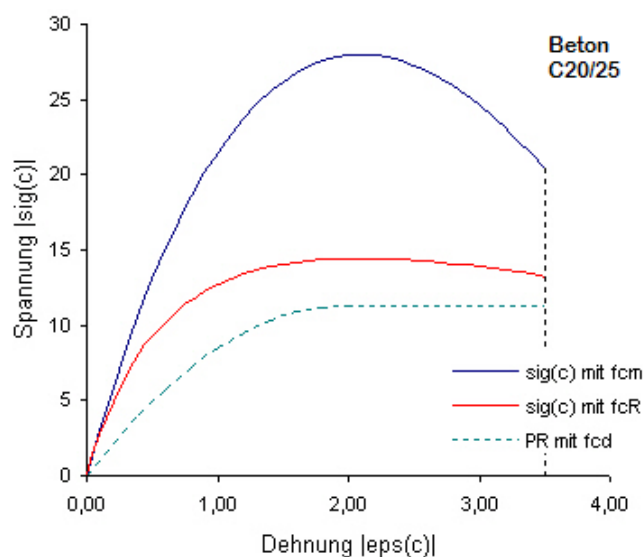


Bild 2.29: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Schnittgrößen und Verformungsberechnung

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 Verformungsrechnung 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 RF-BETON Stäbe 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 Fließmomente M_y (mittleren Baustoffeigenschaften) nicht erreichen wird.

Im Modul RF-BETON Stäbe 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 2.5: 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 (tangentiale 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 (tangentiale 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. RF-BETON Stäbe 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. Um diese Inkongruenz 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.

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

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 2.30) Möglichkeiten zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens.

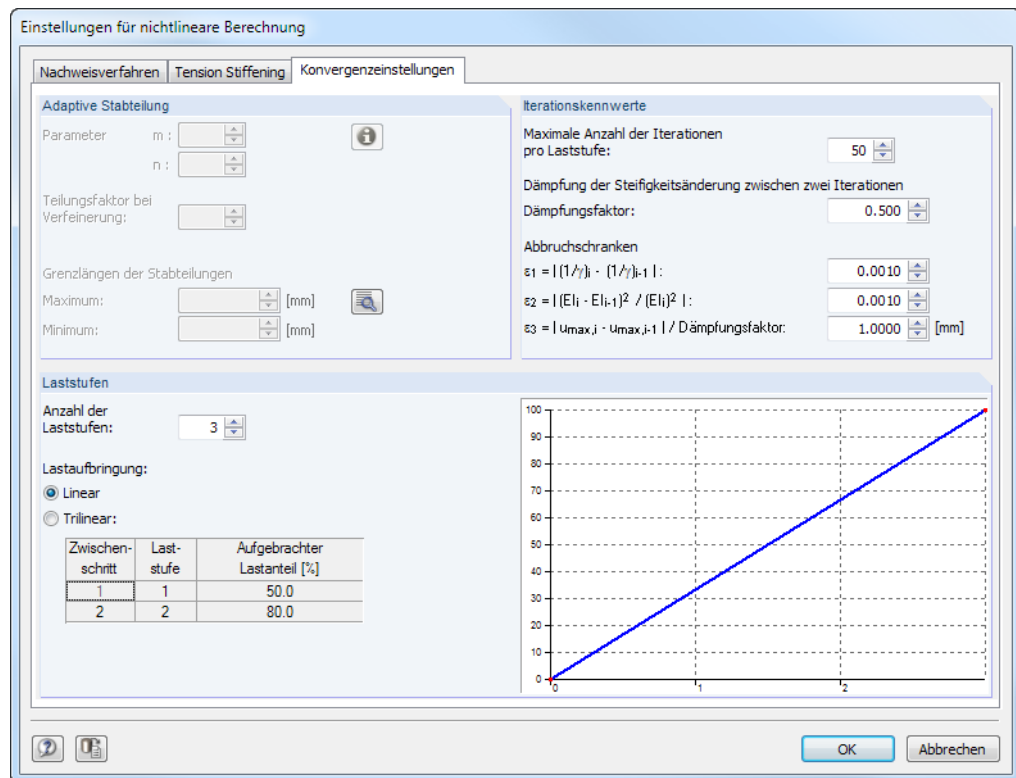


Bild 2.30: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen*

Erhöhung der Iterationsanzahl

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

Erhöhung der Anzahl an Laststufen ggf. trilinear

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 aufzubringen.

Verringerung des Dämpfungsfaktors

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 156](#)).

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

- Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen
- 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. RF-BETON Stäbe 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- und Ergebniskombinationen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sowie des Brandschutzes.

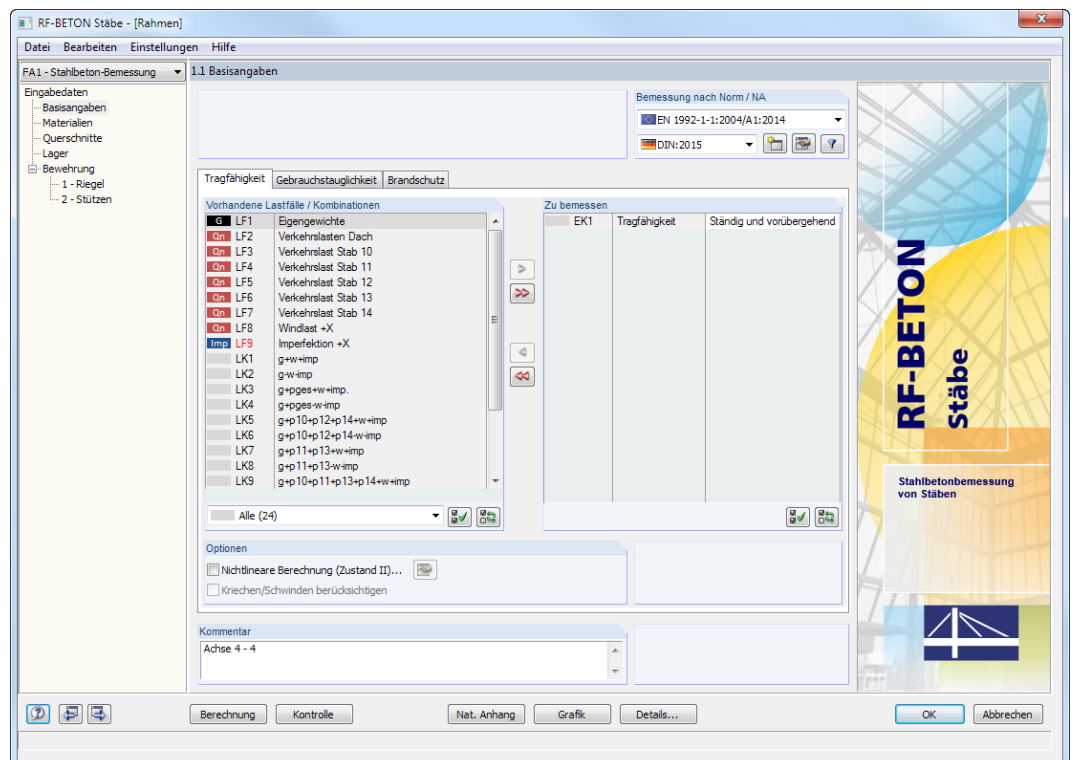


Bild 3.1: Maske 1.1 Basisangaben

Bemessung nach Norm / NA

Norm

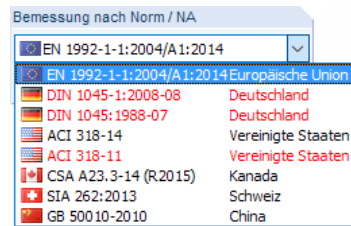


Bild 3.2: Verfügbare Normen

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.

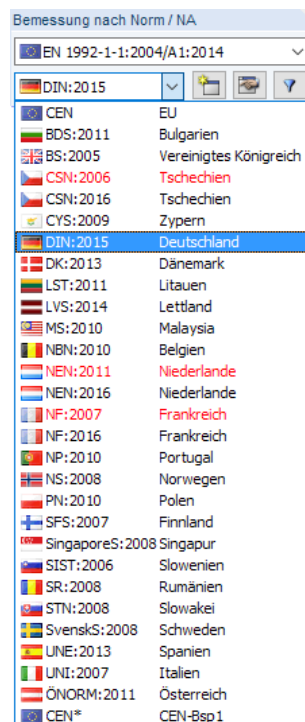


Bild 3.3: Nationale Anhänge für EN 1992-1-1

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

Parameter des Nationalen Anhangs - DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04

Norm: Stahlbeton (EN 1992-1-1)

Ursprünglicher Anhang: DIN

Bezeichnung:


2. Grundlagen für die Tragwerksplanung			
2.4.2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Eigenschaften von Baustoffen			
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ständige, vorübergehend)	γ_c	1.500	
Teilsicherheitsbeiwert für Stahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ständige, vorübergehend)	γ_s	1.150	
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Außergewöhnlich)	γ_c	1.300	
Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Außergewöhnlich)	γ_s	1.000	
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	γ_c	1.000	
Teilsicherheitsbeiwert für Stahl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	γ_s	1.000	
3. Baustoffe			
3.1 Beton			
Maximal zulässige Betondruckfestigkeitsklasse	C_{max}	C100/115	
Beiwert zur Berücksichtigung Langzeiteinwirkung auf Druckfestigkeit	α_{cc}	0.850	
Beiwert zur Berücksichtigung Langzeiteinwirkung auf Zugfestigkeit	α_{ct}	0.850	
Beiwert zur Berücksichtigung der Langzeiteinwirkungen auf die Verbundspannung	α_{ct}	1.000	
3.2 Betonstahl			
Maximalwert für die Streckgrenze	f_{yk}	500.000	N/mm ²
Designwertes der Grenzdehnung Betonstahl	ϵ_{ud}	0.025	
4. Dauerhaftigkeit und Betondeckung			
5. Ermittlung der Schnittgrößen			
6. Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)			
6.2.2 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung			
6.2.3 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung			
6.2.4 Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten			
6.2.5 Schubkraftübertragung in Fugen			
7. Nachweise im Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit (GZG)			
8. Allgemeine Bewehrungsregeln			
9. Konstruktionsregeln			
9.2 Balken			
9.5 Stützen			
11. Zusätzliche Regeln für Bauteile und Tragwerke aus Leichtbeton			

Anmerkung:

OK Abbrechen

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

Kommentar

Gebrauchstauglichkeit Zustand II

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

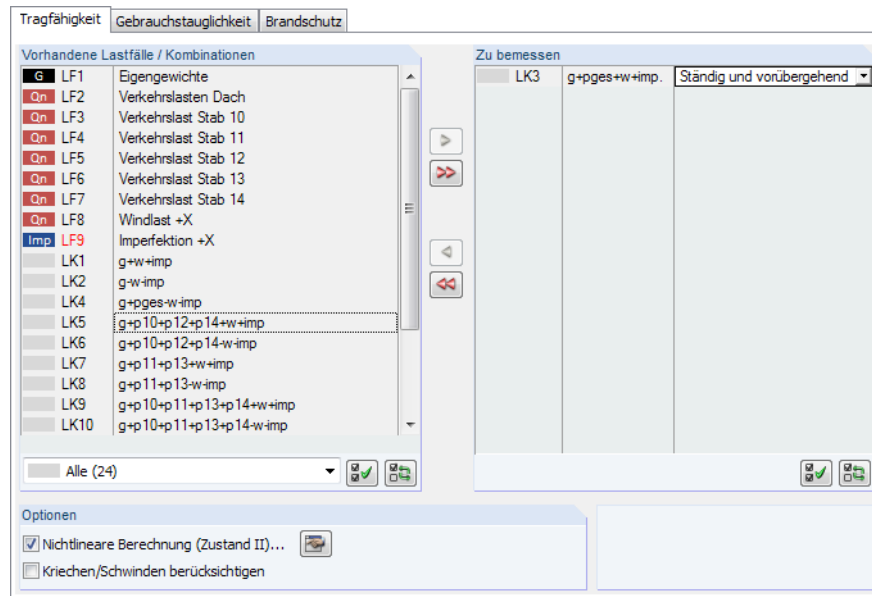


Bild 3.6: Maske 1.1 Basisangaben, Register Tragfähigkeit

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

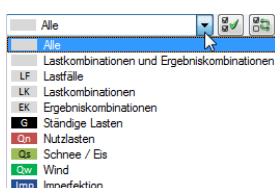
In diesem Abschnitt sind alle Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die in RFEM angelegt wurden.

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 54 und Bild 3.37, Seite 83).

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

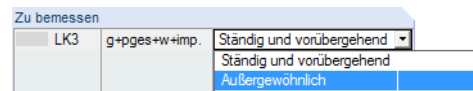


Bild 3.7: Bemessungssituation zuweisen

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

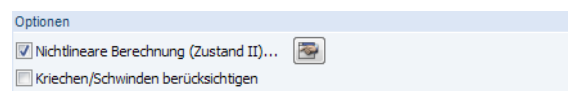



Bild 3.8: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-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 44 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 98 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 65).

3.1.2 Gebrauchstauglichkeit



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

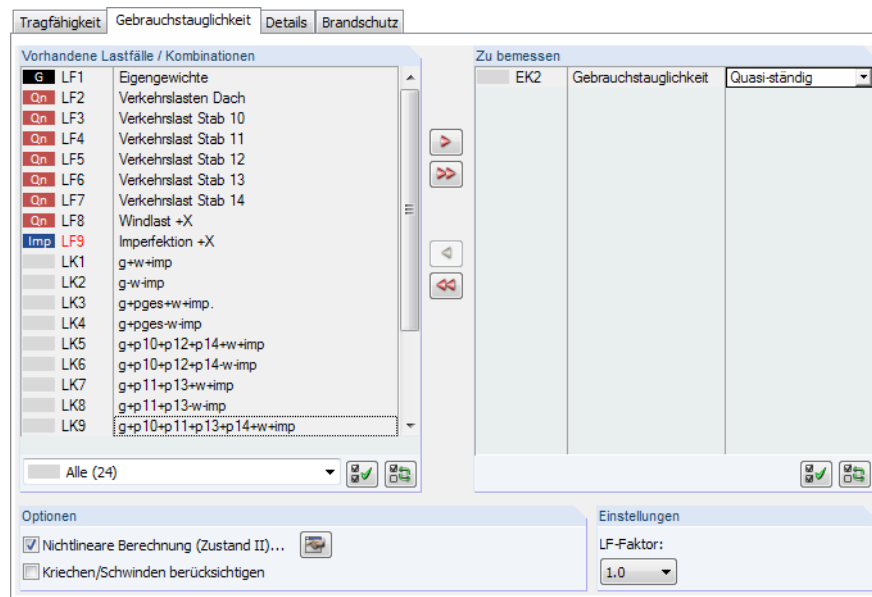


Bild 3.9: Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

Dieser Abschnitt listet alle in RFEM definierten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen 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 RFEM erzeugt werden.

Zu bemessen



Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen 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.

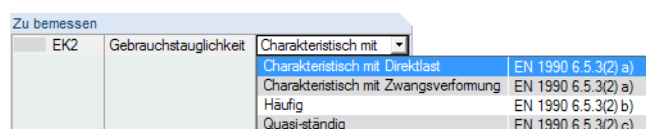


Bild 3.10: Bemessungssituation zuweisen

Details...

Über die Schaltfläche [Details] sind Einstellmöglichkeiten für die einzelnen Bemessungssituationen zugänglich (siehe [Kapitel 4.1.2, Seite 97](#)).

Optionen

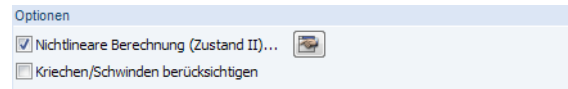



Bild 3.11: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-BETON NL** benötigt. Die nichtlineare Analyse für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist im [Kapitel 2.4.8](#) ab [Seite 48](#) beschrieben.



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

Die Schaltfläche  ruft den Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* auf. Dieser Dialog besteht aus drei Registern. Sie sind im [Kapitel 4.2](#) ab [Seite 98](#) 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 65](#)).

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	Verkehrslast 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.

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

Faktor β

Diese Spalte wird angezeigt, wenn in Maske 1.6 der Nachweis der *Verformung* $u_{l,z}$ vorgegeben ist (siehe Bild 3.38, Seite 85). Der Faktor β beträgt 1,0 bei Kurz- und 0,5 bei Langzeitbelastung.

3.1.4 Brandschutz

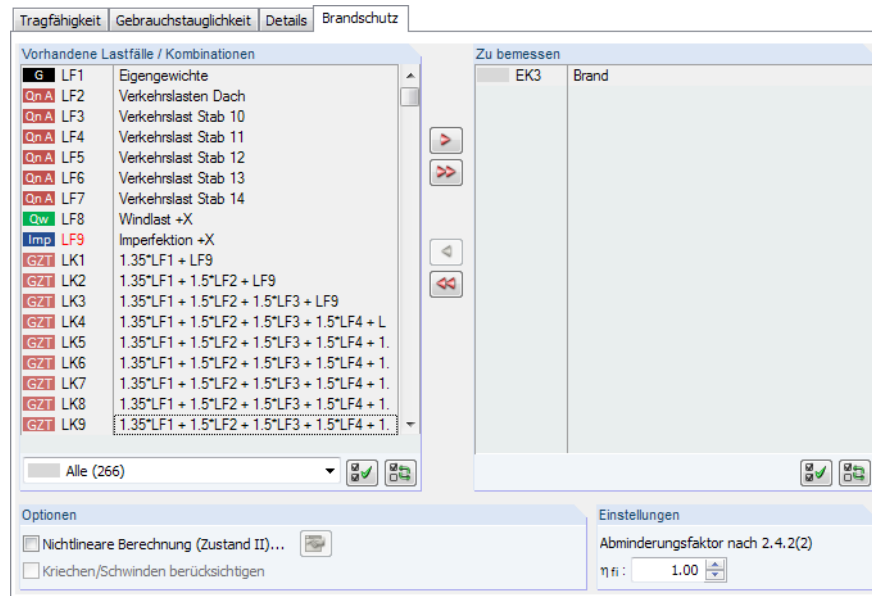


Bild 3.13: Maske 1.1 Basisangaben, Register Brandschutz

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

Dieser Abschnitt listet alle in RFEM definierten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen auf.

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

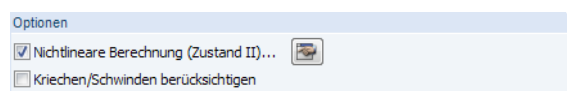


Bild 3.14: Optionen für nichtlineare Berechnung

Nichtlineare Berechnung

Für die nichtlineare Nachweismethode wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-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 98](#) 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 65](#)).

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 RFEM für Stäbe benutzt werden. 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.	A Material-Bezeichnung Beton-Festigkeitsklasse	B Betonstahl	C 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 4.3 des RFEM-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 159).

Materialbezeichnung

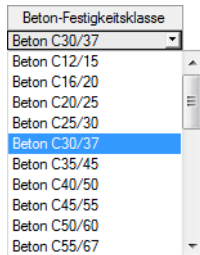
Beton-Festigkeitsklasse

Die in RFEM 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 RF-BETON Stäbe grundsätzlich nicht editierbar.

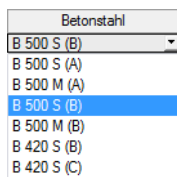


Betonstahl

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.

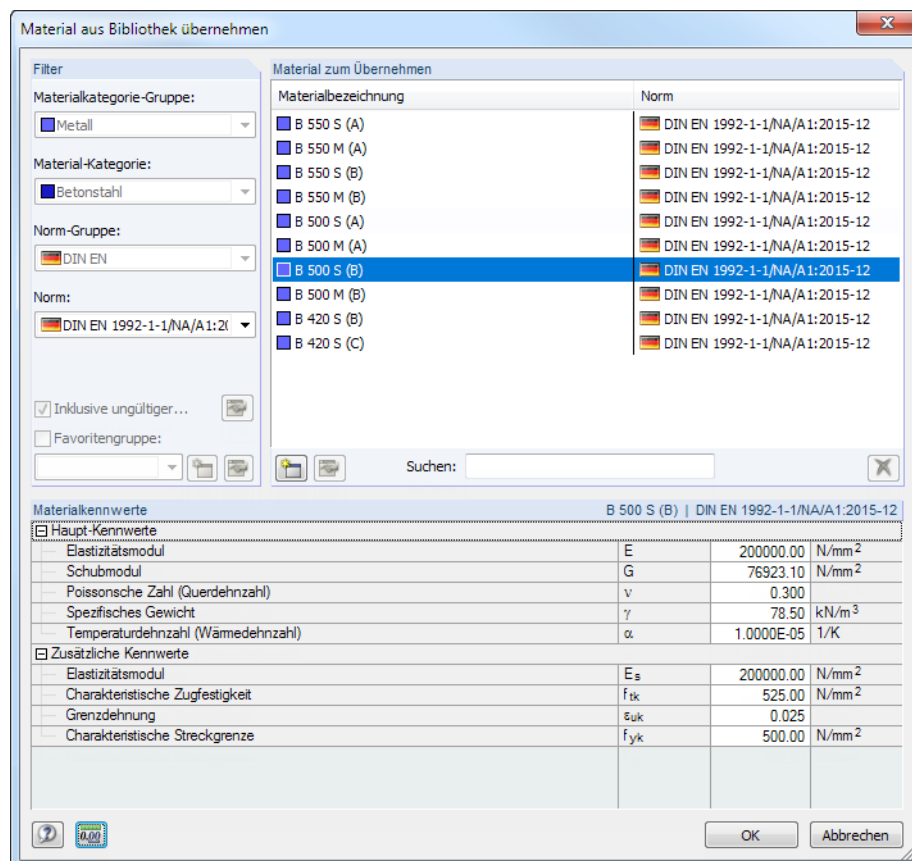


Bild 3.16: Dialog *Material aus Bibliothek übernehmen*

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.

OK

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

Das Kapitel 4.3 des RFEM-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	B	C	D	E
	Material Nr.	Querschnittsbezeichnung	Optimieren	Anmerkung	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

Bild 3.17: Maske 1.3 Querschnitte

Querschnittsbezeichnung

Die in RFEM 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 4.13 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

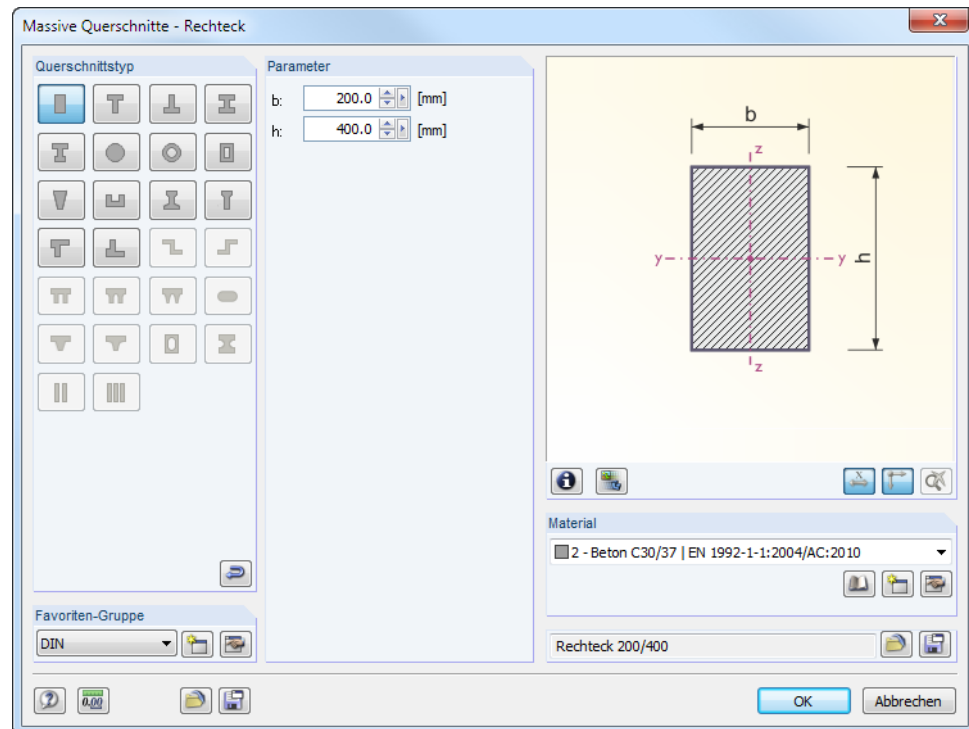
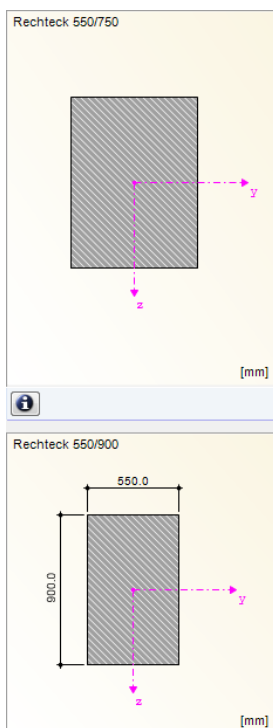


Bild 3.18: Parametrische massive Rechteckquerschnitte der Querschnittsbibliothek

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

Ein geänderter Querschnitt wird mit blauer Schrift gekennzeichnet.

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



Optimieren

Jeder zulässige Querschnitt kann einen Optimierungsprozess durchlaufen. Dabei wird für die RFEM-Schnittgrößen das Profil gesucht, das die Vorgaben des Dialogs *Optimierungsparameter* mit den geringstmöglichen Abmessungen erfüllt (siehe Bild 8.5, Seite 158).


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 158.

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.

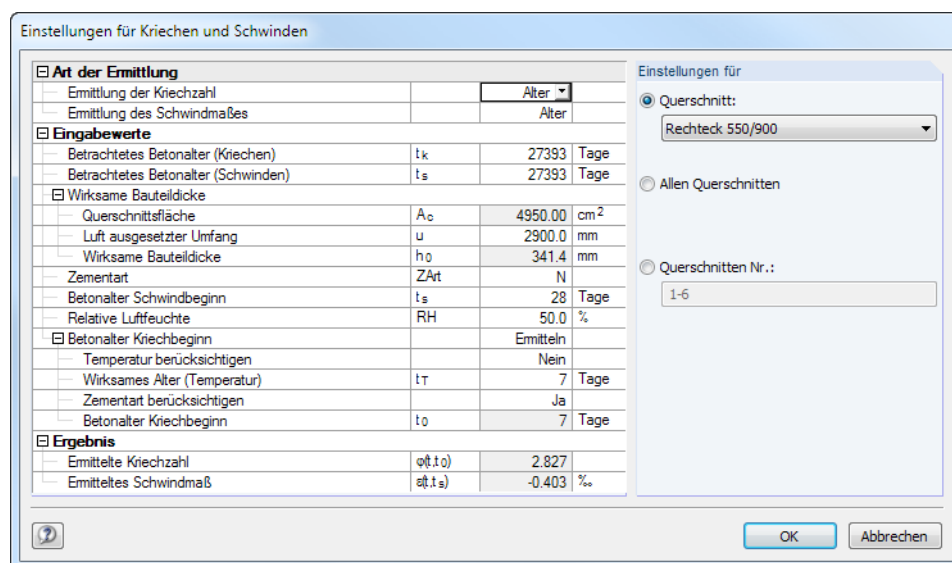


Bild 3.19: Dialog *Einstellungen für Kriechen und Schwinden*

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.

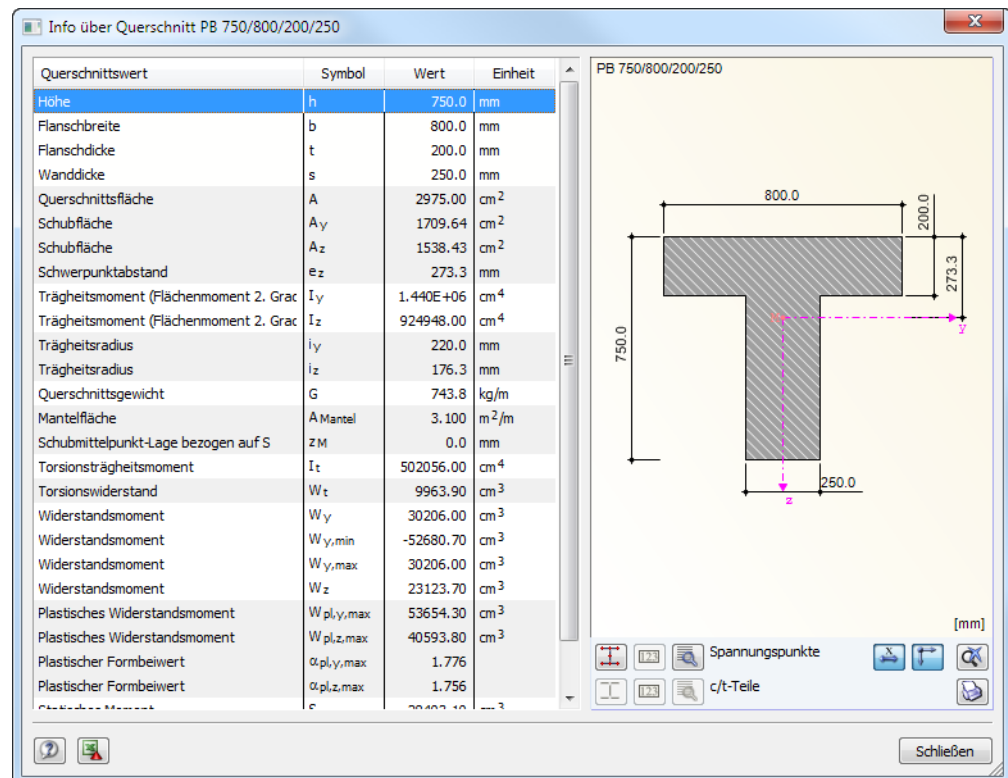


Bild 3.20: Dialog *Info über Querschnitt*

3.4 Rippen

Die in RFEM definierten Rippen sind voreingestellt. Rippen stellen einen besonderen Stabtyp dar, der aus einem Balken und einem mitwirkenden Plattenquerschnitt besteht (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 4.18). Es werden die Rippenschnittgrößen aus RFEM übernommen und für die Bemessung verwendet.

1.4 Rippen

Stab Nr.	Querschnitt Nr.		Fläche 1	Mitwirkende Breite		Fläche 2
	Anfang	Ende		$b_{eff,1}$ [m]	$b_{eff,2}$ [m]	
1	1	1	1	1.104	1	1.104
2	1	1	1	1.104	1	1.104
3	1	1	2	0.785	1	0.785
4	1	1	2	0.785	1	0.785
5	1	1	3	0.488	2	0.488
6	1	1	3	0.488	2	0.488

Rechteck 200/400

Optionen

☐ Mitwirkende Breite der Rippe für Berechnung der Schnittgrößen darstellen

PBU 600/1003.7/1003.7/200/200/200

Bild 3.21: Maske 1.4 Rippen

In den Spalten D und F können die mitwirkenden Breiten b_{eff} angepasst werden. Dies erfordert keine Neuberechnung in RFEM, da die Systemsteifigkeit unverändert bleibt. Die Berechnung der Querschnittseigenschaften und die Integration der Rippenschnittgrößen erfolgt automatisch bei jeder Änderung der mitwirkenden Breiten.

Stab Nr.

Es werden die Nummern der Stäbe angegeben, die in RFEM als Stabtyp *Rippe* definiert wurden.

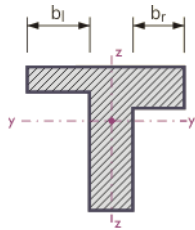
Querschnitt Nr. Anfang / Ende


Die Spalten A und B geben Auskunft über die Querschnittsnummern (siehe Kapitel 3.3). Bei unterschiedlichen Nummern liegt ein Voutenstab vor.

Mitwirkende Breite b_{eff}

In den Spalten D und F werden die mitwirkenden Breiten für die linke bzw. rechte Stabseite angegeben. Die Werte für b_1 und b_2 aus dem RFEM-Dialog *Neue Rippe* (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 4.18) sind hier voreingestellt. Aus den Integrationsbreiten für die Anteile der Flächenschnittgrößen werden die Rippenschnittgrößen ermittelt.

Die mitwirkende Breite steuert die Querschnittsbemessung in Form eines Ersatzquerschnitts. Daher besteht die Möglichkeit, die Werte für b_{eff} anzupassen. Reduzierte mitwirkende Breiten wirken sich in Form verminderter Stabschnittgrößen aus, die in die Bemessung mit RF-BETON Stäbe eingehen. Eine Vergrößerung der Integrationsbreiten ist nicht zulässig.



Die mitwirkenden Breiten können direkt geändert werden. Alternativ lassen sich die Breiten über die Schaltfläche  in einem Dialog anpassen, der die Parameter des Ersatzquerschnitts *Unsymmetrischer Plattenbalken* verwaltet. Bei der Eingabe der Breiten b_l und b_r ist die Querschnittsskizze zu beachten.

Für die Kontrolle der mitwirkenden Breiten ist das Kontrollfeld *Mitwirkende Breite der Rippe für Berechnung der Schnittgrößen darstellen* anzuhaken. Die Tabelle wird dabei um zwei Spalten erweitert.

1.4 Rippen

Stab Nr.	A		B		C	D		E		F		G		H	
	Querschnitt Nr.	Anfang	Ende	Fläche 1		$b_{eff,1}$ [m]	b_1 [m]	Fläche 2	$b_{eff,2}$ [m]	b_2 [m]					
1	1	1	1	1	1.104	1.104	1	1.104	1.104						
2	1	1	1	1	1.104	1.104	1	1.104	1.104						
3	1	1	2	0.785	0.785	1	0.785	0.785							
4	1	1	2	0.785	0.785	1	0.785	0.785							
5	1	1	3	0.488	0.488	2	0.488	0.488							
6	1	1	3	0.488	0.488	2	0.488	0.488							

Rechteck 200/400

Optionen

☒ Mitwirkende Breite der Rippe für Berechnung der Schnittgrößen darstellen

PBU 600/700/1003.7/200/200/200

Bild 3.22: Maske 1.4 Rippen



Mit dem Anhängen des Kontrollfeldes wird auch die Schaltfläche [Rippe bearbeiten] zugänglich. Sie ermöglicht es, die Rippenparameter von RFEM anzupassen und so die Systemsteifigkeit zu beeinflussen. Dies bedeutet aber auch, dass die Schnittgrößen neu berechnet werden müssen.

In der Querschnittsgrafik unterhalb der Tabelle werden Änderungen dynamisch umgesetzt. Die Grafik zeigt den Ersatzquerschnitt an, der zur Bemessung verwendet wird.

Anmerkung

Falls die Rippe Probleme für die Bemessung bereitet, erscheint in dieser Spalte ein entsprechender Hinweis.



Für die korrekte Bemessung von Rippen sind folgende Punkte zu beachten:

- Die lokale z-Achse der Rippe muss parallel zur lokalen z-Achse der Fläche sein.
- Die lokale z-Achse der Rippe muss orthogonal zur xy-Flächenebene sein.
- Der Flächentyp der angeschlossenen Fläche muss eine *Ebene* sein.
- Der Querschnittstyp des Rippenstabes muss ein *Rechteck* sein.
- Bei Stabzügen muss ein einheitlicher Rippentyp für den ganzen Stabsatz vorliegen.
- Das Material der Rippe muss identisch mit dem Material der Fläche sein.

3.5 Lager

In dieser Maske können Lagerungsbedingungen für die Stäbe festgelegt werden. Die Lagerknoten horizontaler Stäbe sind aus RFEM voreingestellt. Das Programm erkennt, ob sich das Lager am Ende eines Stabes oder zwischen zwei Stäben (Durchlaufträger) 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.	Knoten Nr.	Lagerbreite b [mm]	Direkte Lagerung	Monolithische Verbindung	End-Lager	M-Verhältnis δ [-]	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 auflagernahen Einzellasten nach 6.2.2(6) bzw. 6.2.3(8)

Bild 3.23: 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 RFEM-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 RFEM-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

1.00
0.65
0.7
0.75
0.8
0.85
0.9
0.95

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 156](#)) wirksam.

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.

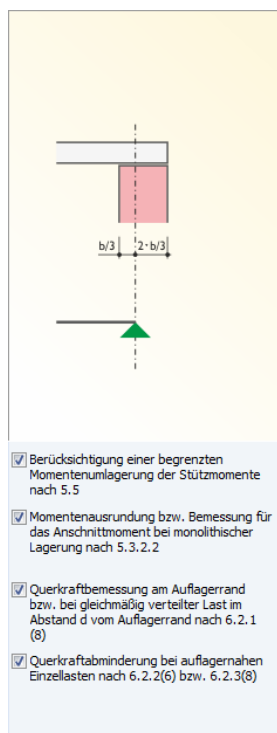
RF-BETON Stäbe ermittelt den Grenzwert und vergleicht ihn mit dem Wert, der in Spalte F festgelegt ist. Für die Umlagerung wird dann der größere der beiden Werte verwendet.

Momentenausrundung bzw. Bemessung für Anschnittmoment bei monolithischer Lagerung

Optional nimmt RF-BETON Stäbe 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.



Querkraftbemessung am Auflagerrand

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

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

Querkraftabminderung bei auflagnahen Einzellasten

Das Kontrollfeld steuert, ob der Querkraftanteil 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.

3.6 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 (*RF-BETON Stäbe-Fall*) sogenannte „Bewehrungssätze“ definiert werden: Jeder Bewehrungssatz verwaltet die Parameter der Bewehrung, die für bestimmte Stäbe oder Stabsätze gelten.

Bewehrungssatz

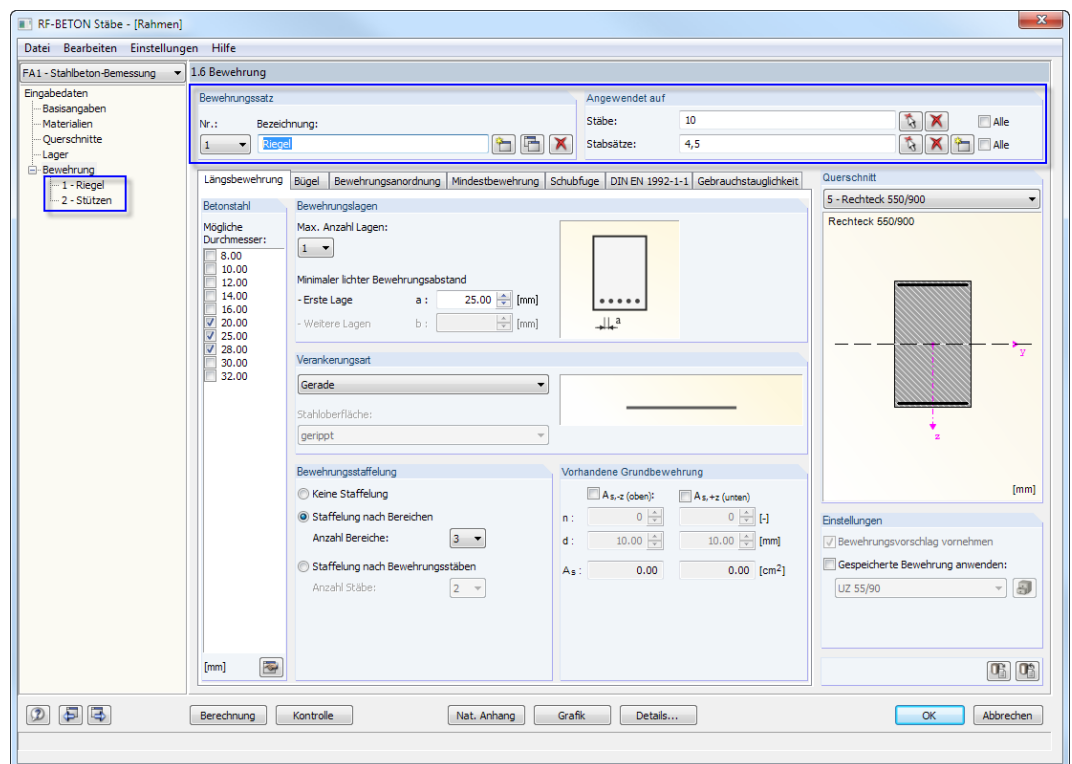


Bild 3.24: Maske 1.6 Bewehrung mit zwei Bewehrungssätzen



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.:

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 156](#)). 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 RFEM-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:

Das Kontrollfeld *Bewehrungsvorschlag vornehmen* steuert, ob RF-BETON Stäbe die Bewehrungsvorgaben in eine Stabstahlbewehrung umsetzt. Wenn dieses Feld deaktiviert wird, sind einige Eingabefelder in den Registern dieser Maske gesperrt. In diesem Fall ermittelt RF-BETON Stäbe 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 117](#)). Dann ist auch das Kontrollfeld zugänglich.

UZ 55/90
 UZ 30/75
 UZ 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 3.25](#)).

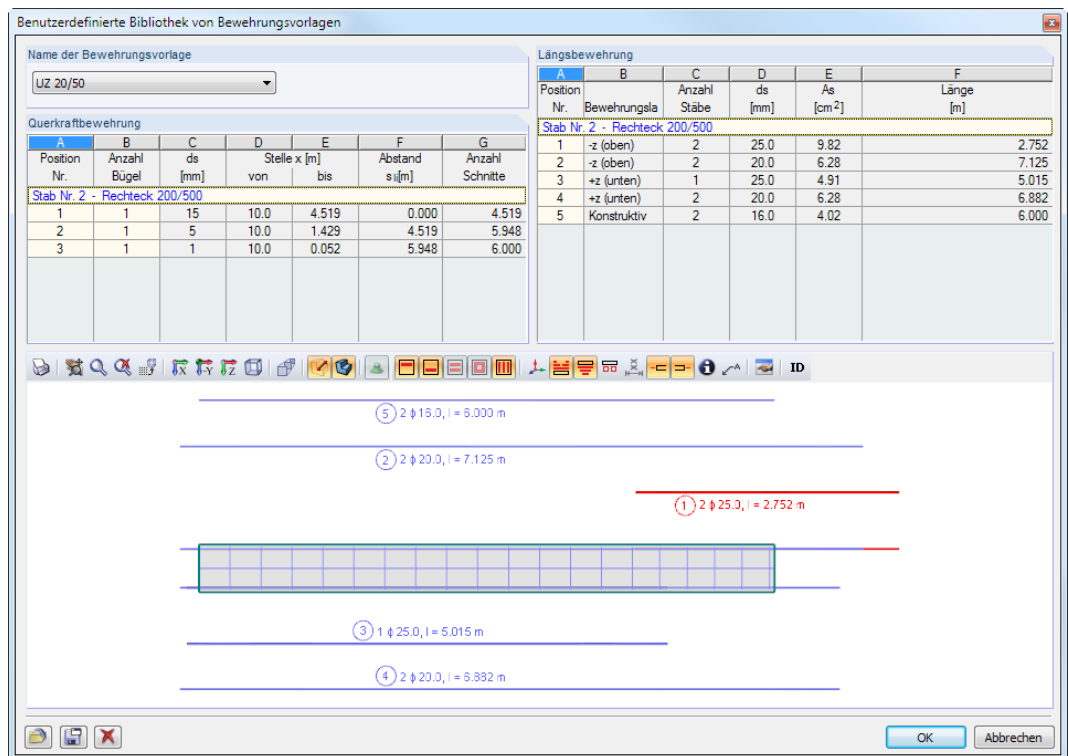


Bild 3.25: Benutzerdefinierte Bibliothek der Bewehrungsvorlagen



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 RFEM die ursprüngliche Stablänge ändern, wird dies nicht in der Bewehrungsvorlage angepasst.

3.6.1 Längsbewehrung

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

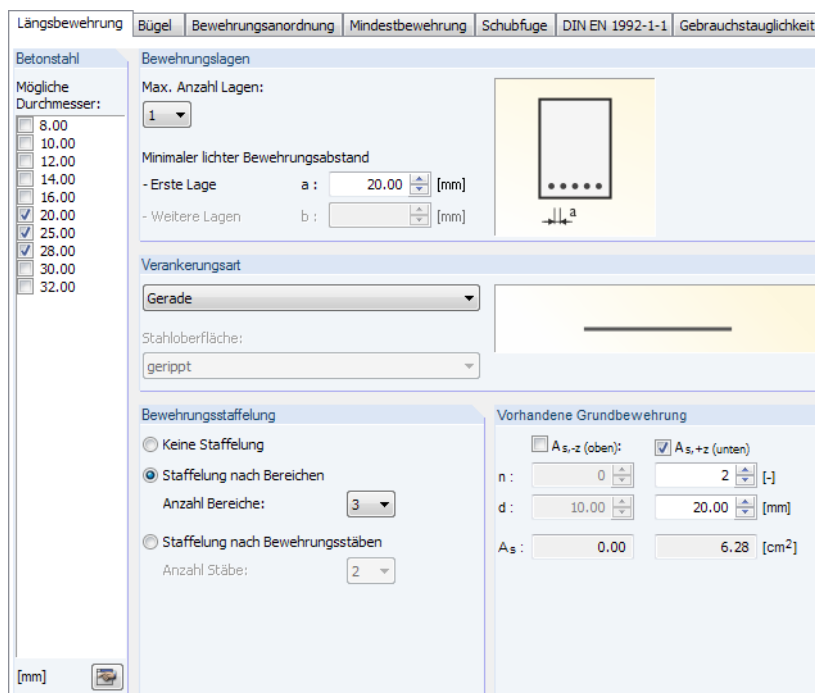


Bild 3.26: Maske 1.6 Bewehrung, Register Längsbewehrung

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.

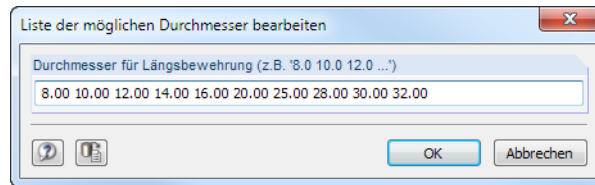


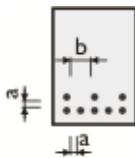
Bild 3.27: Dialog Liste der möglichen Durchmesser bearbeiten

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

Bewehrungslagen



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

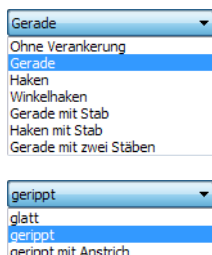


Der *Minimale lichte Bewehrungsabstand* der Bewehrungsstäbe a für die erste Lage und ggf. b für weitere Lagen kann in den beiden Eingabefeldern festgelegt werden.

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.



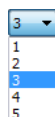
Verankerungsart

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. RF-BETON Stäbe 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 RF-BETON Stäbe 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.

3.6.2 Bügel

Dieses Register verwaltet die Vorgaben für die Querkraftbewehrung.

Bild 3.28: 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 3.27).

Bügelparameter

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

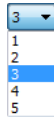
Die *Neigung* der Schubbewehrung wird durch den Winkel zwischen Längs- und Schubbewehrung beschrieben. Voreingestellt sind 90°, also lotrechte Bügel. Bei einer Änderung des Winkels sind die Normvorgaben zu berücksichtigen: EN 1992-1-1, 9.2.2 (1) erlaubt nur Winkel zwischen 45° und 90° und fordert in 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

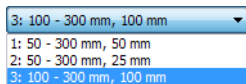
Dieser Abschnitt ist nur zugänglich, wenn ein Bewehrungsvorschlag erstellt wird.


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 RF-BETON Stäbe 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.

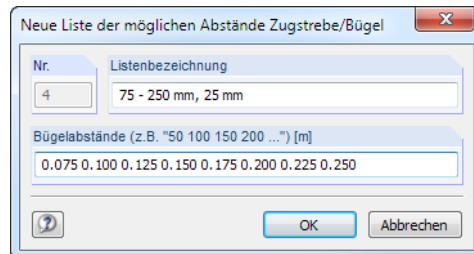


Bild 3.29: Dialog *Neue Liste der möglichen Abstände Zugstrebe/Bügel*



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 118](#)).

3.6.3 Bewehrungsanordnung

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

Bild 3.30: 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 72): 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.

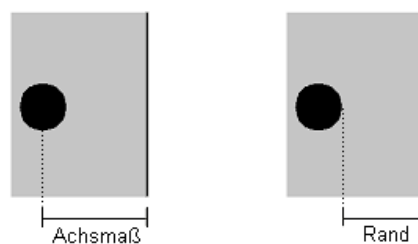
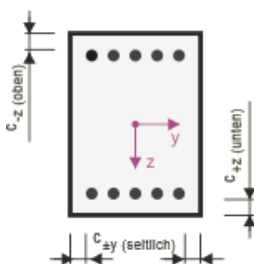


Bild 3.31: Achsmaß u und Randmaß c



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 1992-1-1, 4.4.1.1). RF-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 RFEM 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 RFEM-Arbeitsfenster können die lokalen Stabachsen über das Stab-Kontextmenü oder im *Zeigen-Navigator* eingeblendet werden (siehe Bild 3.32).

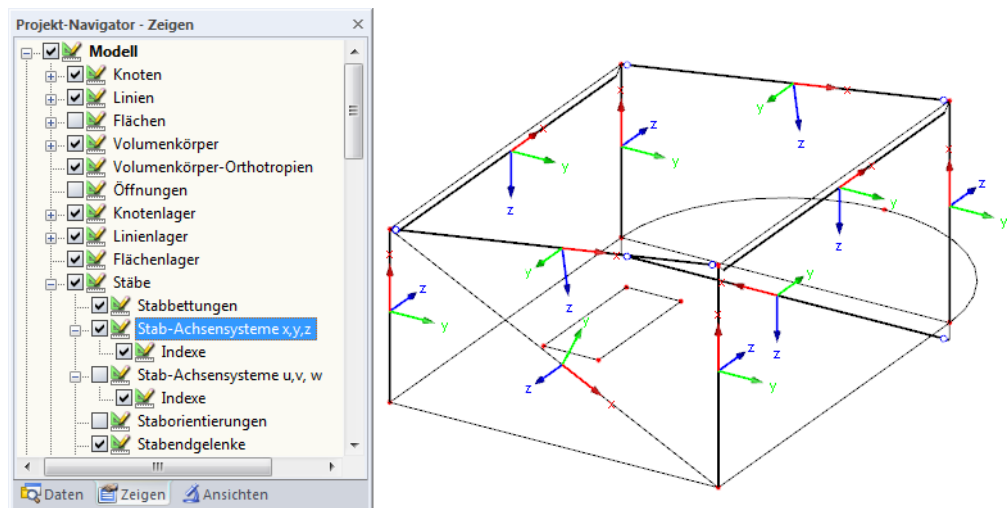
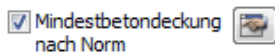


Bild 3.32: Aktivieren der Stabachsensysteme im Zeigen-Navigator von RFEM



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.

Betondeckung nach Norm DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04

C+z (unten) | C-z (oben) | C≠y (seitlich)

Parameter zur Bestimmung der Betondeckung

Expositionsklasse nach 4.4.1.2(5): XC2 [-]

Verschleißklasse nach 4.4.1.2(13): Keine [-]

Herstellungsart nach 4.4.1.3(4): Ortbeton [-]

☐ Nenndurchmesser des Größtkorns größer als 32 mm nach 4.4.1.2(3) Tabelle 4.2

	Bügelbewehrung	Längsbewehrung
Maximaler Bewehrungsdurchmesser d_s	10.00 [mm]	20.00 [mm]
Mindestbetondeckung aus		
Verbundanforderungen nach 4.4.1.2(3)	$c_{min,b}$: 10.00 [mm]	20.00 [mm]
Dauerhaftigkeitsanforderungen nach 4.4.1.2(5)	$c_{min,dur}$: 15.00 [mm]	15.00 [mm]
Additives Sicherheitselement nach 4.4.1.2(6)	$\Delta c_{dur,y}$: 0.00 [mm]	0.00 [mm]
Verringerung der Mindestbetondeckung auf Grund		
<input type="checkbox"/> Verwendung rostfreien Stahls nach 4.4.1.2(7)	$\Delta c_{dur,st}$: 0.00 [mm]	0.00 [mm]
<input type="checkbox"/> Zusätzliche Schutzmaßnahmen nach 4.4.1.2(8)	$\Delta c_{dur,add}$: 0.00 [mm]	0.00 [mm]
Mindestbetondeckung nach 4.4.1.2(2)	c_{min} : 15.00 [mm]	20.00 [mm]
<input type="checkbox"/> Benutzerdefiniertes Vorhaltemaß nach 4.4.1.3	Δc_{dev} : 15.00 [mm]	15.00 [mm]
Nenndeckung der Bewehrung nach 4.4.1.1	c_{nom} : 30.00 [mm]	35.00 [mm]
Mindestbetondeckung der Bewehrung	$c_{v,min}$: 30.00 [mm]	40.00 [mm]

OK Abbrechen

Bild 3.33: Dialog *Betondeckung nach Norm*

Bewehrungsverteilung

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.



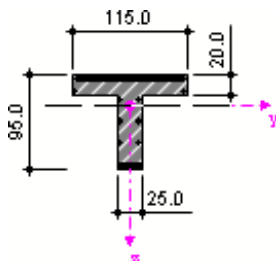
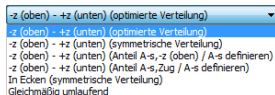
Bei einer reinen Biegung um die schwache Achse ($M_y = 0$; $M_z > 0$) ergeben sich für die Bewehrungsverteilungen *oben - unten* erhöhte Bewehrungsquerschnitte: Das Bemessungsmoment wirkt nicht in die vorgegebene Verteilungsrichtung der Bewehrung. In diesem Fall ist die Bewehrungsverteilung *In Ecken*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

Einstellungen

Es werden alle Schnittgrößen (Normal- und Querkkräfte, 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!



3.6.4 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 3.34: Maske 1.6 Bewehrung, Register Mindestbewehrung

Mindestbewehrung


Für die Vorgabe einer globalen Mindestbewehrung stehen zwei Eingabefelder zur Verfügung, in die die Mindeststahlquerschnitte $Min A_{s,-z} (oben)$ 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 3.35: 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.

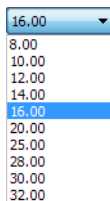
- Ansatz der erforderlichen Längsbewehrung
Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird mit der vorhandenen Zugbewehrung geführt.
- Ansatz der vorhandenen Längsbewehrung
Für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird die vom Programm vorgeschlagene oder benutzerdefinierte Längsbewehrung benutzt.
- 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.

3.6.5 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 3.36: Maske 1.6 Bewehrung, Register Schubfuge

Schubkraft in der Fuge

Mit dem Anhängen 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

Details...

Die Schaltfläche [Details] ruft den Dialog *Detaileinstellungen* mit den globalen Berechnungseinstellungen auf (siehe Bild 4.1, Seite 96). 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.

3.6.6 Norm

Die Parameter dieses Registers sind von der Norm abhängig, die in Maske 1.1 *Basisangaben* festgelegt wurde (siehe Bild 3.2, Seite 53). 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.

The screenshot shows the 'Bewehrung' (Reinforcement) register for EN 1992-1-1. The interface is divided into several sections:

- Navigation Tabs:** Längsbewehrung, Bügel, Bewehrungsanordnung, Mindestbewehrung, Schubfuge, EN 1992-1-1, Gebrauchstauglichkeit.
- Bewehrungsgrad (Reinforcement Ratio):**
 - Maximum: - Allgemein: 8.00 [%]
- Diverses (Miscellaneous):**
 - ☒ Begrenzung der Druckzonenhöhe nach 5.6.3(2)
- Querkraftbewehrung (Shear Reinforcement):**
 - Druckstrebenneigung nach 6.2.3(2) (NA-Parameter)
 - Minimum: 21.800 [°]
 - Maximum: 45.000 [°]
- Beiwerte (Coefficients):**
 - Teilsicherheitsbeiwerte nach 2.4.2.4 (NA Parameter):

	Ständig und vorübergehend	Außergewöhnl.	Gebrauchstaugl.
γ_o	1.50	1.20	1.00
γ_s	1.15	1.00	1.00
 - Reduktionsbeiwerte zur Berücksichtigung der Langzeiteffekte für Druck- und Zugfestigkeit nach 3.1.6 (NA-Parameter):

	Ständig und vorübergehend	Außergewöhnl.	Gebrauchstaugl.
α_{cc}	1.00	1.00	1.00
α_{ct}	1.00	1.00	1.00

Bild 3.37: Maske 1.6 *Bewehrung*, Register EN 1992-1-1

Bewehrungsgrad

Das 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 Übergreifungsstößen 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 $-3,50 \text{ ‰}$ 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°	45°
$\cot \theta$	2,5	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 RF-BETON Stäbe die Abminderung automatisch vor.

3.6.7 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 3.38: Maske 1.6 Bewehrung, Register Gebrauchstauglichkeit

Der theoretische Hintergrund zu den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen ist im Kapitel 2.2 ab Seite 14 beschrieben.

Für den 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_{d_s}	Tabelle 7.2 (siehe Bild 2.3, Seite 15)
Maximaler Stababstand g_{s_l}	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.

Informationen

Werte für w_{max} (mm)				
Expositionsklasse	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	0,2

OK

Bild 3.39: 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 grenz d_s	Tabelle 7.2 (siehe Bild 2.3, Seite 15)
Maximaler Stababstand grenz 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 $grenz d_s$, $grenz s_l$ 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).

Details...

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 97).

Verformungsnachweis

Wenn das Kontrollfeld angehakt wird, steht die zusätzliche Maske *1.7 Durchbiegungsdaten* zur Eingabe der Stabparameter zur Verfügung (siehe Kapitel 3.7, Seite 94).

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 3.40: 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.

Spannungsverteilung in der Zugzone vor Erstrissbildung		
Ansatz von Biegezwang	Ansatz von ...	Faktor
Ansatz von zentrischem Zwang		$k_c = 1,0$
Ansatz von Biegezwang		$k_c = 0,4$
In Abhängigkeit von definierter Belastung		$k_c = 0,0 \dots 1,0$

Art der Einspannung	
Äußere Zwangsbeanspruchung	Faktor
Lagerungsart	
Innere Zwangsbeanspruchung	$k = 0,52 \dots 0,8$
Äußere Zwangsbeanspruchung	$k = 1,0$

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 RF-BETON Stäbe 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 3.41: 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 3.42: 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 berücksichtigen 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.

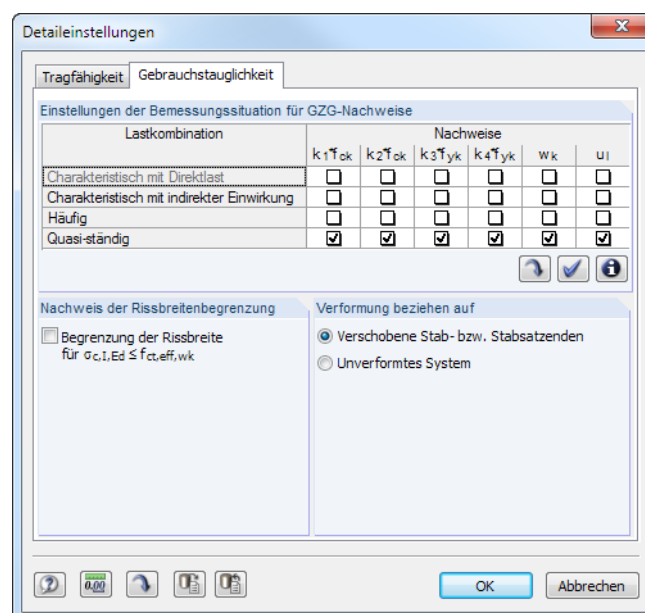


Bild 3.43: Dialog *Detaileinstellungen*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Dieses Dialogregister ist im [Kapitel 4.1.2](#) auf [Seite 97](#) beschrieben.

3.6.8 Vouten

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

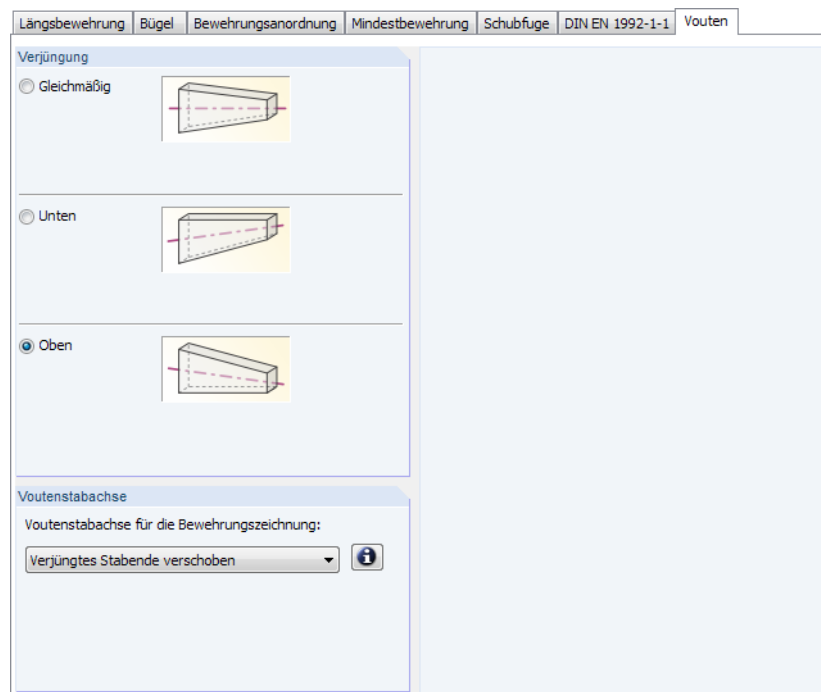


Bild 3.44: Maske 1.6 Bewehrung, Register Vouten

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

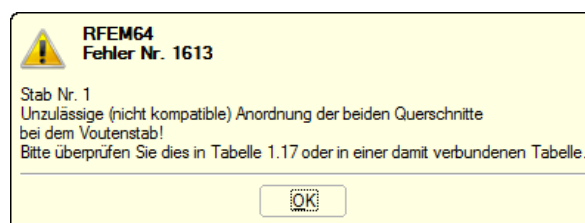


Bild 3.45: Fehlermeldung bei inkompatiblen Voutenquerschnitten



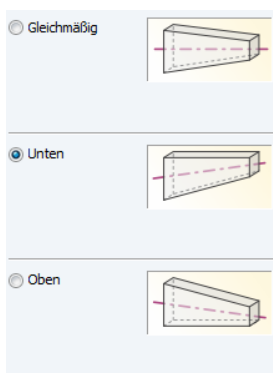
Gevoutete Stabsätze werden nur dann bemessen, wenn der gesamte Stabsatz einen linearen Querschnittsverlauf aufweist.

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 3.46).



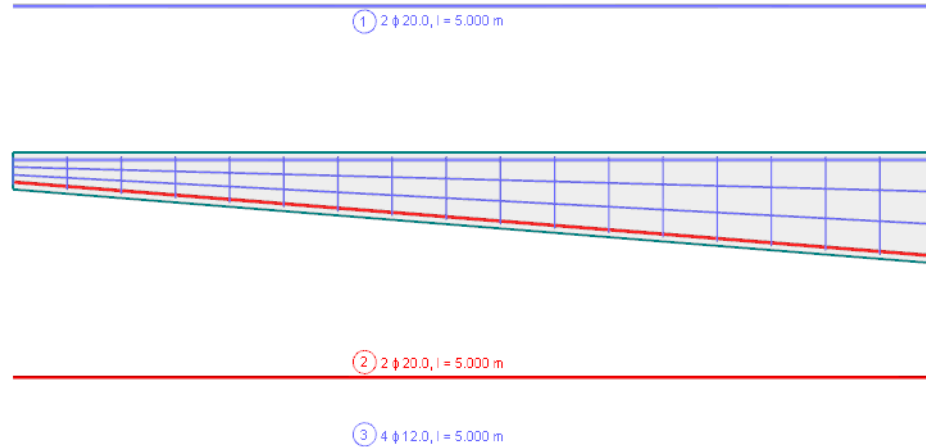


Bild 3.46: Voute mit geneigter Unterseite

Voutenstabachse

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

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



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

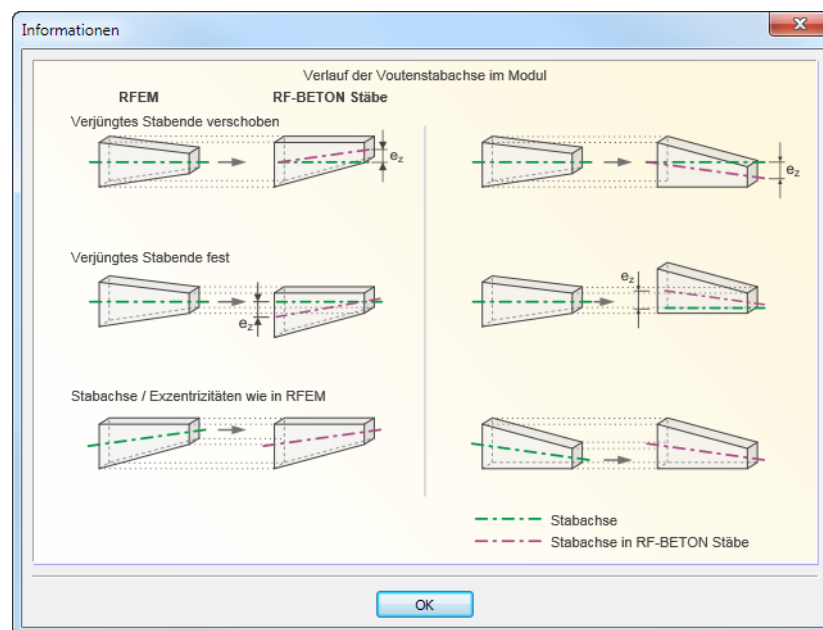


Bild 3.47: Dialog *Informationen* zur Erläuterung der Voutenstabachsen

3.6.9 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 60](#)). Die „Heißbemessung“ erfolgt nach dem vereinfachten Rechenverfahren gemäß EN 1992-1-2, Abschnitt 4.2 (siehe [Kapitel 2.3, Seite 24](#)).

Bild 3.48: 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 3.48](#)). 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 *Vor-krümmung* 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.

3.7 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	D	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 3.49: 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 RFEM-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 3.5, Seite 69).

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.
			Knoten 2 - 3: $L_1 = 6.000$			
			Knoten 3 - 5: $L_2 = 5.000$			

Bild 3.50: Bezugslängen eines Stabsatzes mit unterschiedlichen Stützweiten

Überhöhung

In dieser Spalte kann eine *Überhöhung* w_0 eingetragen werden.

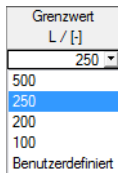
Die Form der Überhöhung wird wie folgt berechnet:

$$w_{c,x} = w_0 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{L}\right)$$

mit

- $w_{c,x}$: Überhöhung an Stelle x
- w_0 : in Spalte E vorgegebene Überhöhung
- x : Stelle x
- L : Stab- bzw. Stabsatzlänge

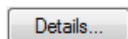
Grenzwert / $u_{z,max}$



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



Die Schaltfläche [Details] ruft den Dialog *Detaileinstellungen* auf. Dort kann im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Bezug der Verformungen geregelt werden.

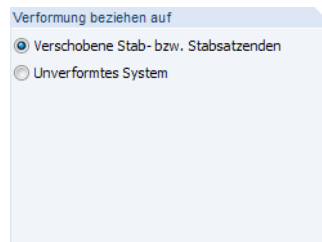


Bild 3.51: Bezug der Verformungen im Dialog *Detaileinstellungen*

Die beiden Auswahlmöglichkeiten sind im [Kapitel 4.1.2](#) auf [Seite 98](#) beschrieben.

4 Berechnung

Für die Bemessung in RF-BETON Stäbe werden die RFEM-Schnittgrößen benutzt. Wenn in RFEM 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

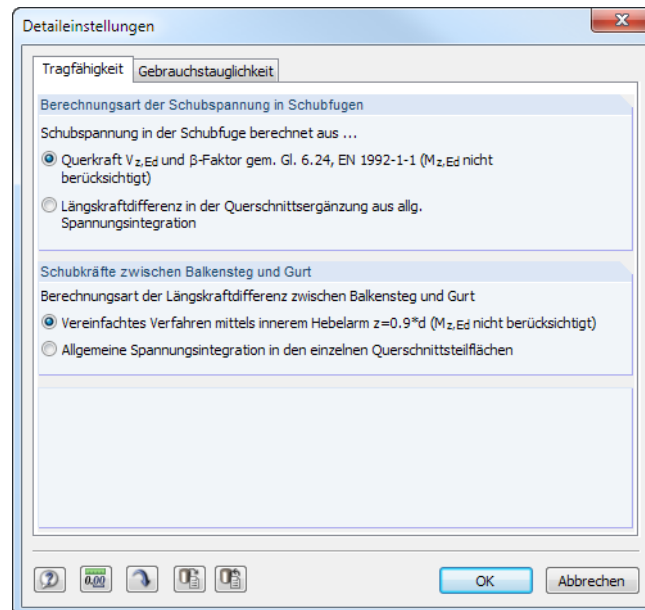


Bild 4.1: Dialog *Detaileinstellungen*, Register *Tragfähigkeit*

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 12](#) beschrieben.

4.1.2 Gebrauchstauglichkeit

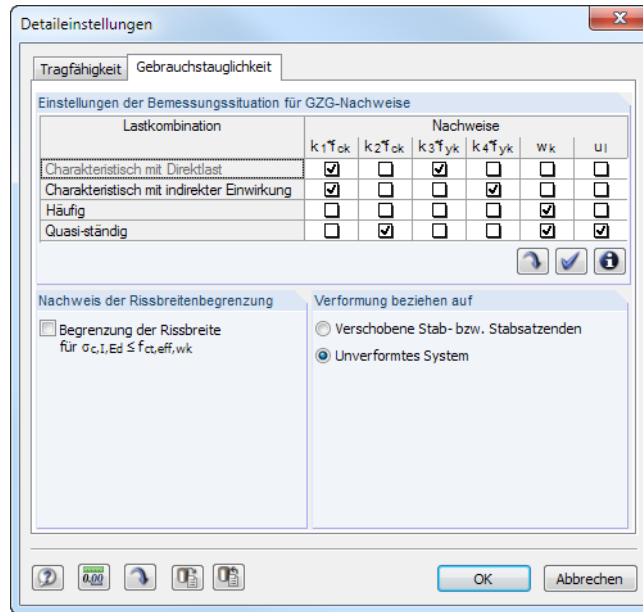


Bild 4.2: Dialog *Detaileinstellungen*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

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 *Versetzten 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 52 und Bild 3.9, Seite 57). Der Dialog besteht aus drei Registern.

4.2.1 Nachweisverfahren

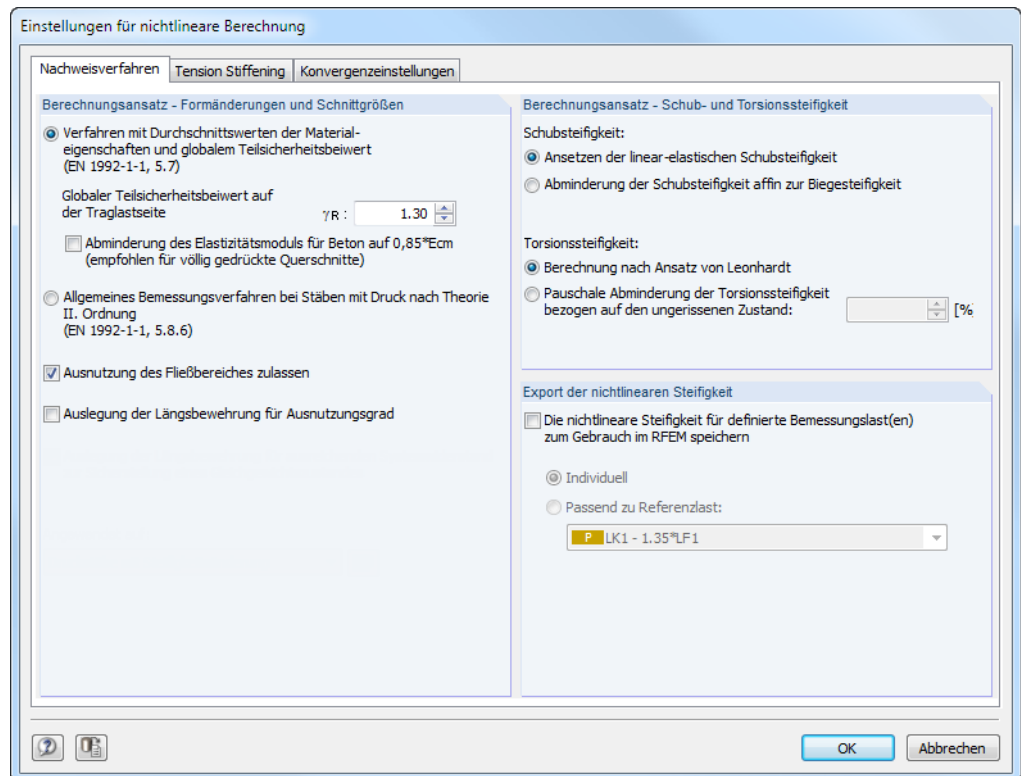
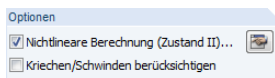


Bild 4.4: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Nachweisverfahren* für EN 1992-1-1

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 44](#) 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 46](#) 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 134](#)) 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.

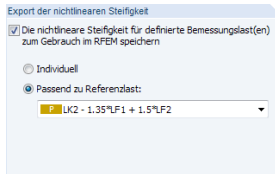
Alternativ erfolgt eine *Abminderung der Schubsteifigkeit affin zur Biegesteifigkeit*. Dabei wird der linear-elastische Schubsteifigkeitsverlauf analog zum Verlauf der Biegesteifigkeit reduziert. Die theoretischen Grundlagen sind im [Kapitel 2.4.5.2](#) auf [Seite 40](#) beschrieben.

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 2.27, Seite 41).

Export der nichtlinearen Steifigkeit



Dieser Abschnitt ermöglicht es, die Steifigkeit aus der nichtlinearen Berechnung (unter Berücksichtigung der Bewehrung und des gerissenen Zustandes) zu speichern und anschließend in RFEM zu verwenden. Auf diese Weise lassen sich die reduzierten Steifigkeiten von Stahlbetonbauteilen im gerissenen Zustand auch bei der Schnittgrößenermittlung und Bemessung der übrigen Bauteile aus Stahl oder Holz berücksichtigen. Dies ist z. B. sinnvoll, wenn die aussteifenden Komponenten eines Modells in Stahlbeton ausgeführt werden.

In RFEM ist die Berücksichtigung der nichtlinearen Steifigkeit aus dem Modul RF-BETON Stäbe im Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, Register *Zusatzoptionen* einstellbar.

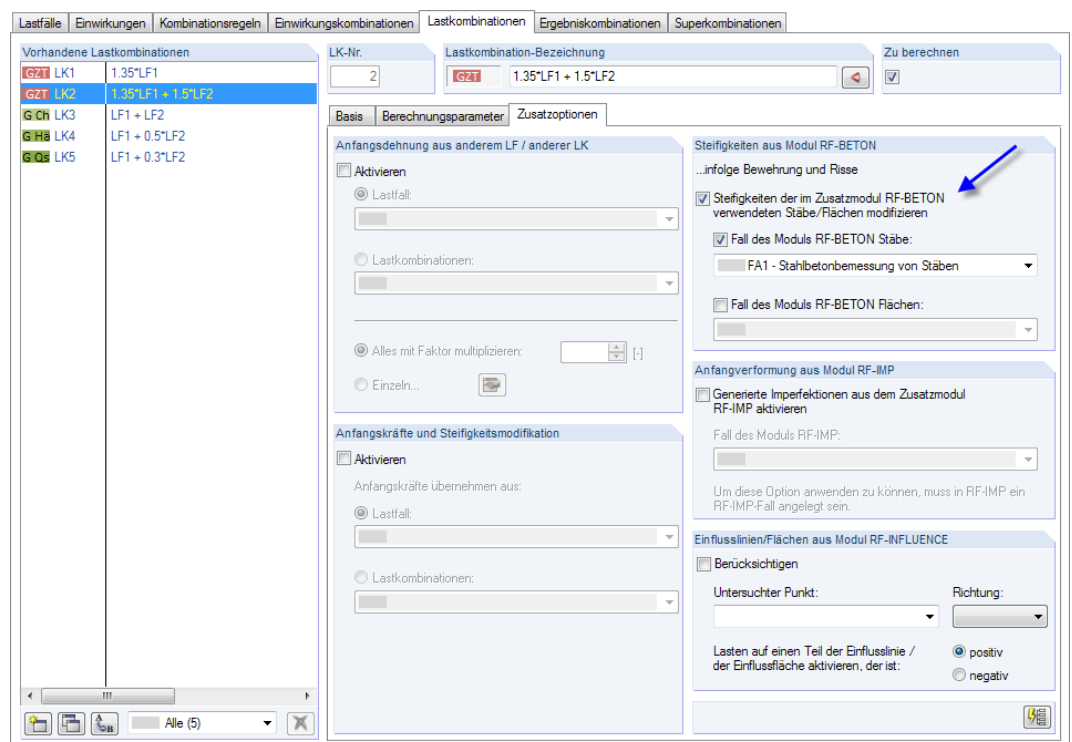


Bild 4.5: RFEM-Dialog *Lastfälle und Kombinationen bearbeiten*, Register *Zusatzoptionen*

Die zwei Auswahlfelder steuern die Zuordnung der Steifigkeiten für RFEM: Die Steifigkeiten der mit RF-BETON Stäbe nichtlinear berechneten Lastkombinationen lassen sich *Individuell* (separat) speichern. Sie sind in RFEM dann nur für die jeweiligen Lastkombinationen nutzbar. Bei der Option *Passend zu Referenzlast* hingegen wird die Steifigkeit einer Referenzlast gespeichert, die in RFEM jeder beliebigen Lastkombination zugeordnet werden kann.

4.2.2 Tension Stiffening

Einstellungen für nichtlineare Berechnung

Nachweisverfahren | **Tension Stiffening** | **Konvergenzeinstellungen**

Ansatztyp von Tension Stiffening

- ☒ Ansatz über eine Beton(rest)zugfestigkeit (Verfahren Quast)
- ☐ Ansatz über modifizierte Stahlkennlinie
- ☐ Ohne Ansatz von Tension Stiffening (lineare Zugfestigkeit des Betons wird angewendet)

Tension Stiffening

Wirksame Zugstärke $f_{ct,R}$

- ☒ f_{ctm}
- ☐ $f_{ctk,0.05}$
- ☐ $f_{ctk,0.95}$

Anpassungsfaktor der Zugstärke $f_{ct,R}$: x f_{ct}

☐ Normalkraft als Initialkraft

Material Beton - Berechnungsparameter für ständige und vorübergehende Bemessungssituation

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Normwerte	Faktor v $f_c / f_{ct,R}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C30/37	2	<input checked="" type="checkbox"/>	17.24	2.99	33000.000
1	Beton C30/37	1	<input checked="" type="checkbox"/>	17.24	3.52	33000.000
2	Baustahl S 235 JR G	2	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	19000.000

Material Beton - Berechnungsparameter für außergewöhnliche Bemessungssituation

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Normwerte	Faktor v $f_c / f_{ct,R}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C30/37	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	17.24	2.99	33000.000
2	Baustahl S 235 JR G2	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	19000.000
3	Beton C35/45	1.2	<input checked="" type="checkbox"/>	18.23	2.70	34000.000

Belastungsdauer der zu bemessenden Lastfälle/Lastkombinationen

Nr.	Lastfall / Kombination Bezeichnung	Dauerlast	Faktor β_2
LF1	Eigengewichte	<input checked="" type="checkbox"/>	0.250
LF2	Verkehrslast Dach	<input type="checkbox"/>	0.400
LF3	Verkehrslast Stab 10	<input type="checkbox"/>	0.400
LF4	Verkehrslast Stab 11	<input type="checkbox"/>	0.400
LF5	Verkehrslast Stab 12	<input type="checkbox"/>	0.400
LF6	Verkehrslast Stab 13	<input type="checkbox"/>	0.400
LF7	Verkehrslast Stab 14	<input type="checkbox"/>	0.400
LF8	Windlast +X	<input type="checkbox"/>	0.400
LF9	Imperfektion +X	<input type="checkbox"/>	0.400
LK3	g+pges+w+imp.		0.383

OK Abbrechen

Bild 4.6: 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 35](#) grafisch dargestellt.

Ansatz über modifizierte Stahlkennlinie

Wie im [Kapitel 2.4.3.2](#) auf [Seite 37](#) 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 34](#)). 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 37](#)). 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

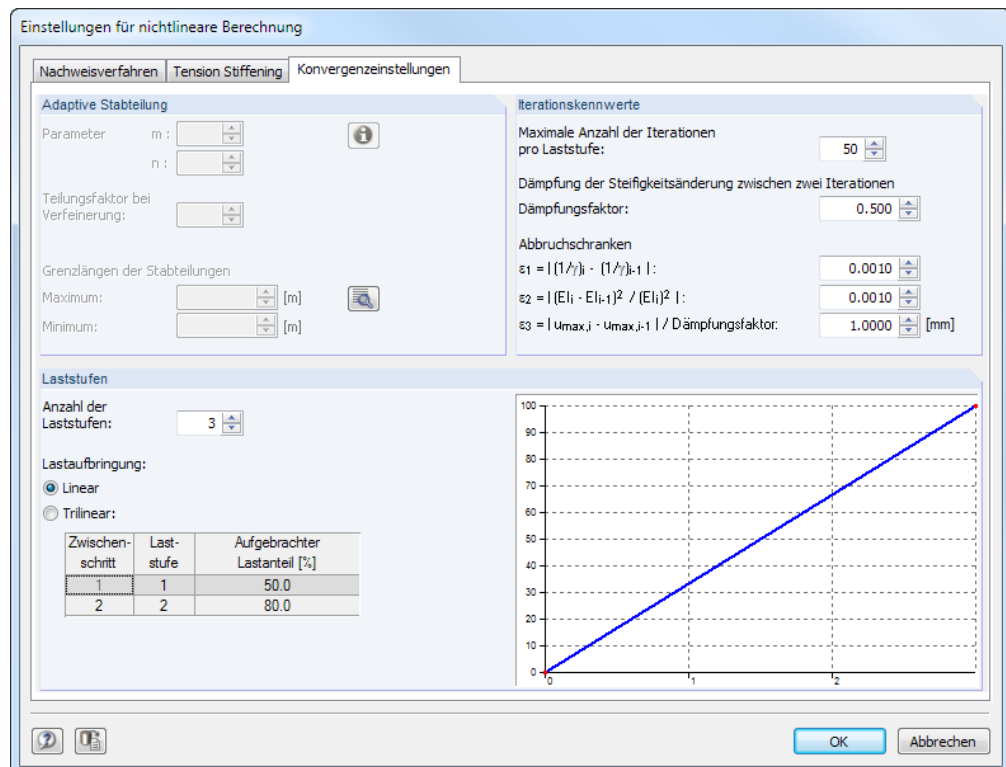



Bild 4.7: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen*

Hinweise zu diesem Register finden Sie auch im [Kapitel 2.4.9 Konvergenz](#) ab [Seite 51](#).

Adaptive Stabteilung

Die gesperrt dargestellten Einstellmöglichkeiten dieses Abschnitts sind für RF-BETON Stäbe nicht erforderlich: Für die nichtlineare Berechnung wird die FE-Teilung verwendet, die eine feine Steuerung des Konvergenzverhaltens ermöglicht.

Die Schaltfläche  ruft den RFEM-Dialog *FE-Netz* auf. Dort können die globale Maschenweite des FE-Netzes und die Teilungsvorgaben für Stäbe angepasst werden.

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 abzumildern („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

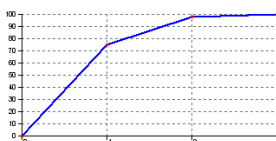
- **Linear**

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 aufgebrachten 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 RF-BETON Stäbe 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 4.8: Plausibilitätskontrolle

4.4 Start der Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske des Moduls RF-BETON Stäbe kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

RF-BETON Stäbe sucht nach den Ergebnissen der zu bemessenden Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen. Werden diese nicht gefunden, startet zunächst die RFEM-Berechnung zur Ermittlung der bemessungsrelevanten Schnittgrößen.

Die Berechnung kann auch in der RFEM-Oberfläche gestartet werden: Im Dialog *Zu berechnen* (Menü **Berechnung** → **Zu berechnen**) sind die Bemessungsfälle der Zusatzmodule wie Lastfälle oder Lastkombinationen aufgelistet.

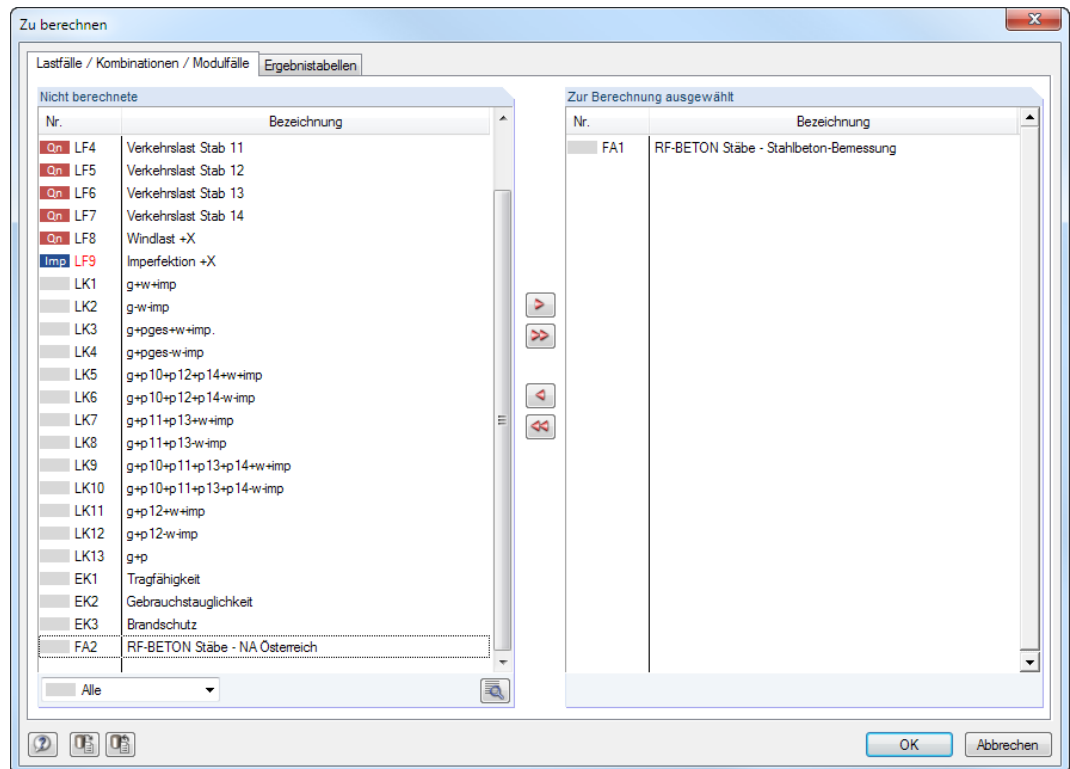
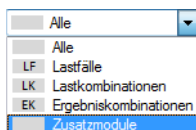


Bild 4.9: Dialog *Zu berechnen*



Falls die RF-BETON Stäbe-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 RF-BETON Stäbe-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 RF-BETON Stäbe-Fall ein und klicken dann die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] an.

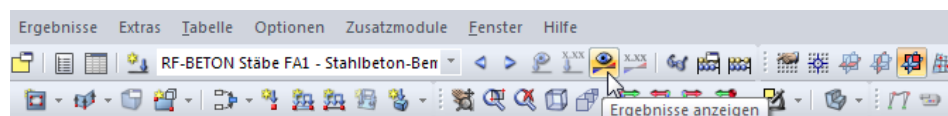


Bild 4.10: Direkte Berechnung eines RF-BETON Stäbe-Bemessungsfalls in RFEM

Der Ablauf der Bemessung kann anschließend in einem Dialog verfolgt werden (siehe [Bild 9.20](#), [Seite 173](#)).

5 Ergebnisse

Nach der Berechnung wird die Maske 2.1 *Erforderliche Bewehrung querschnittsweise* angezeigt.

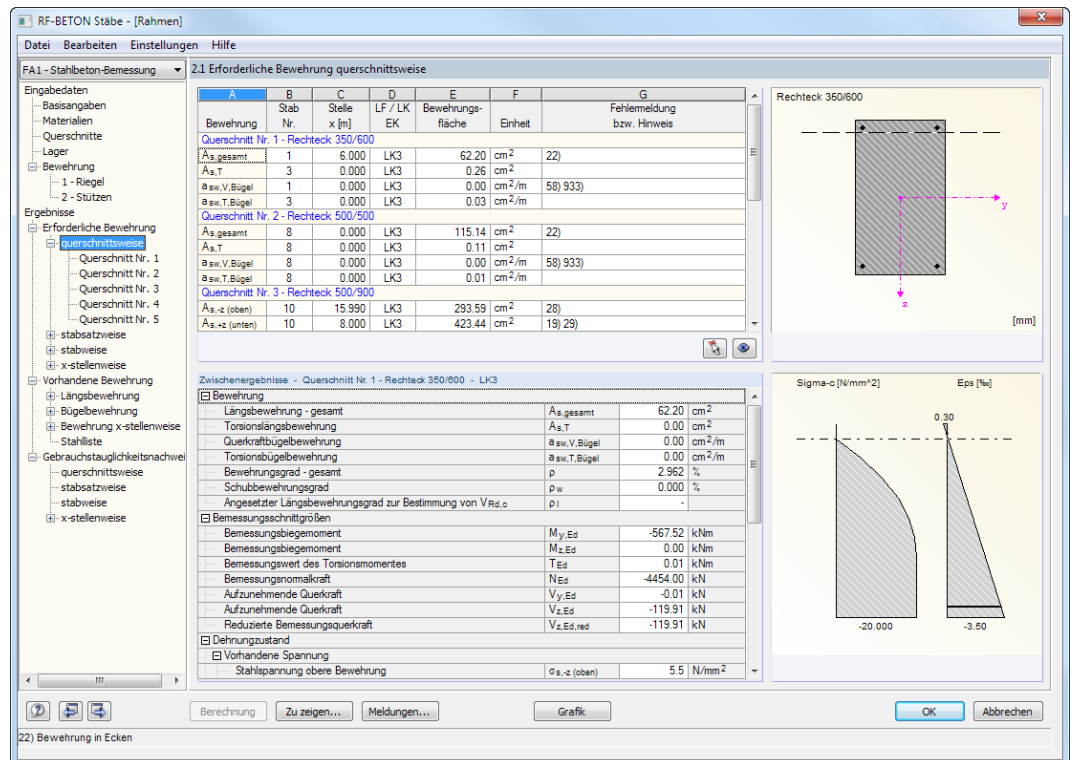


Bild 5.1: Ergebnismaske

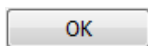
Die für den Tragfähigkeitsnachweis erforderlichen Bewehrungsquerschnitte sind in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.4 aufgelistet. Wurde ein Bewehrungsvorschlag erstellt, erscheint die vorhandene Bewehrung inklusive Stahlliste in den Ergebnismasken 3.1 bis 3.4.

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. RF-BETON Stäbe wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm RFEM.

Das Kapitel 5 stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Überprüfung der Resultate ist im Kapitel 6 ab Seite 140 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- und Ergebniskombinationen für den Nachweis der Tragfähigkeit ergeben.

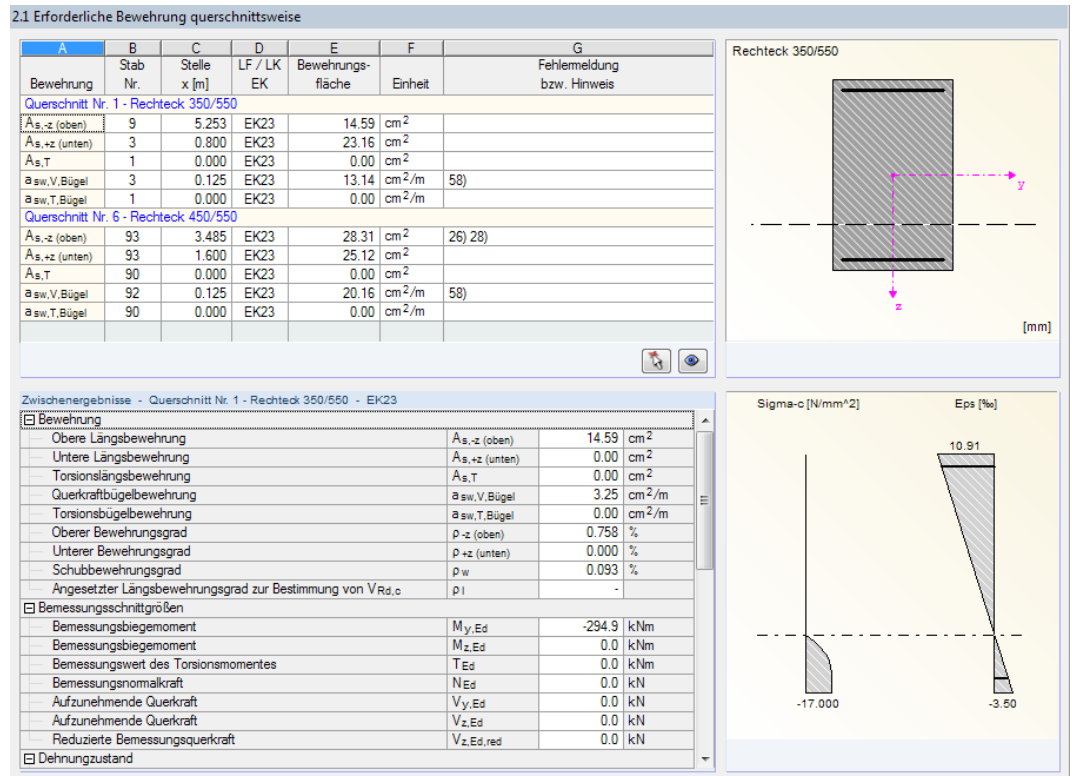


Bild 5.2: Maske 2.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

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* angehängt 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
$A_{s,-z}$ (oben)	Bewehrungsquerschnitt der erforderlichen oberen Längsbewehrung infolge Längskraft oder Biegung mit oder ohne Längskraft
$A_{s,+z}$ (unten)	Bewehrungsquerschnitt der erforderlichen unteren Längsbewehrung infolge Längskraft oder Biegung mit oder ohne Längskraft
$A_{s,T}$	Bewehrungsquerschnitt einer ggf. erforderlichen Torsionslängsbewehrung
$a_{sw,V,Bügel}$	Querschnitt der erforderlichen Schubbewehrung zur Aufnahme der Querkraft, bezogen auf die Einheitslänge 1 m
$a_{sw,T,Bügel}$	Querschnitt der erforderlichen Bügelbewehrung zur Aufnahme des Torsionsmoments, bezogen auf die Einheitslänge 1 m
$a_{sf,-z}$ (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
$a_{sw,T,Bügel}$	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 RFEM-Oberfläche lassen sich die Stabachsen im Zeigen-Navigator oder mit dem Stab-Kontextmenü darstellen (siehe Bild 3.32, Seite 78).

Zu zeigen...

Über die Schaltfläche [Zu zeigen] kann festgelegt werden, welche Bewehrungsergebnisse im oberen Abschnitt der Maske erscheinen.

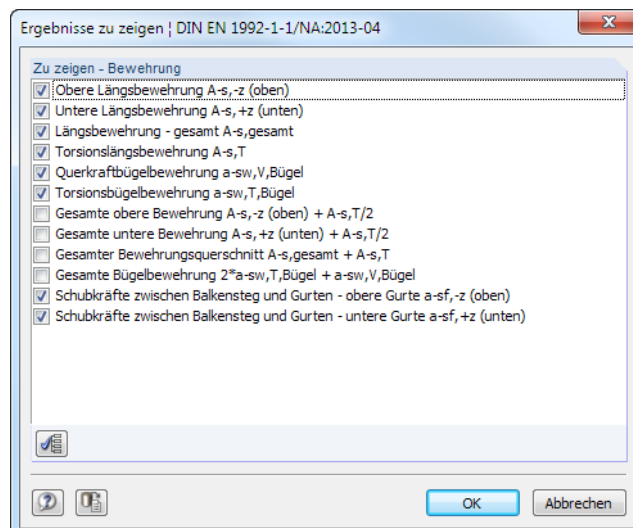


Bild 5.3: Dialog Ergebnisse zu zeigen



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 RFEM-Stabstellen x herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß ggf. vorgegebener Stabteilung (siehe RFEM-Tabelle 1.16)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RFEM-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 159](#) 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.

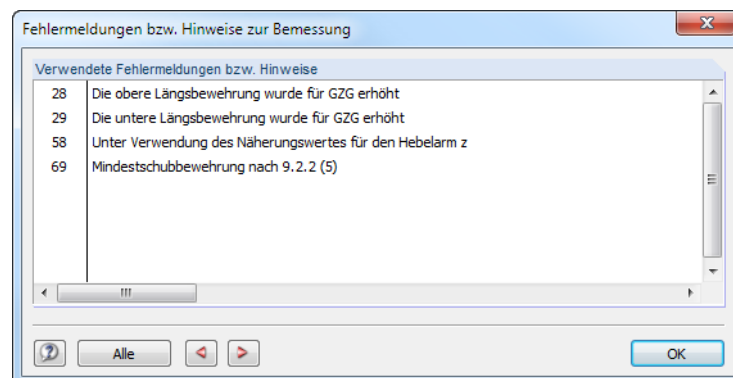


Bild 5.4: Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung*

5.1.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

2.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

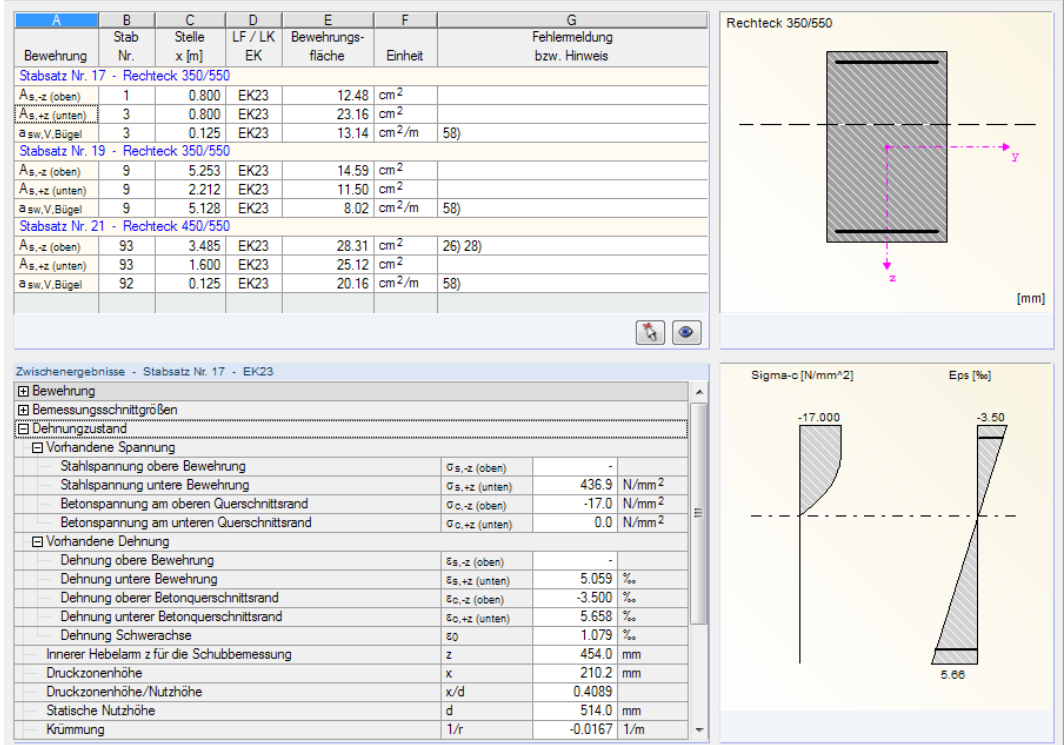


Bild 5.5: Maske 2.2 Erforderliche Bewehrung stabsatzweise

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

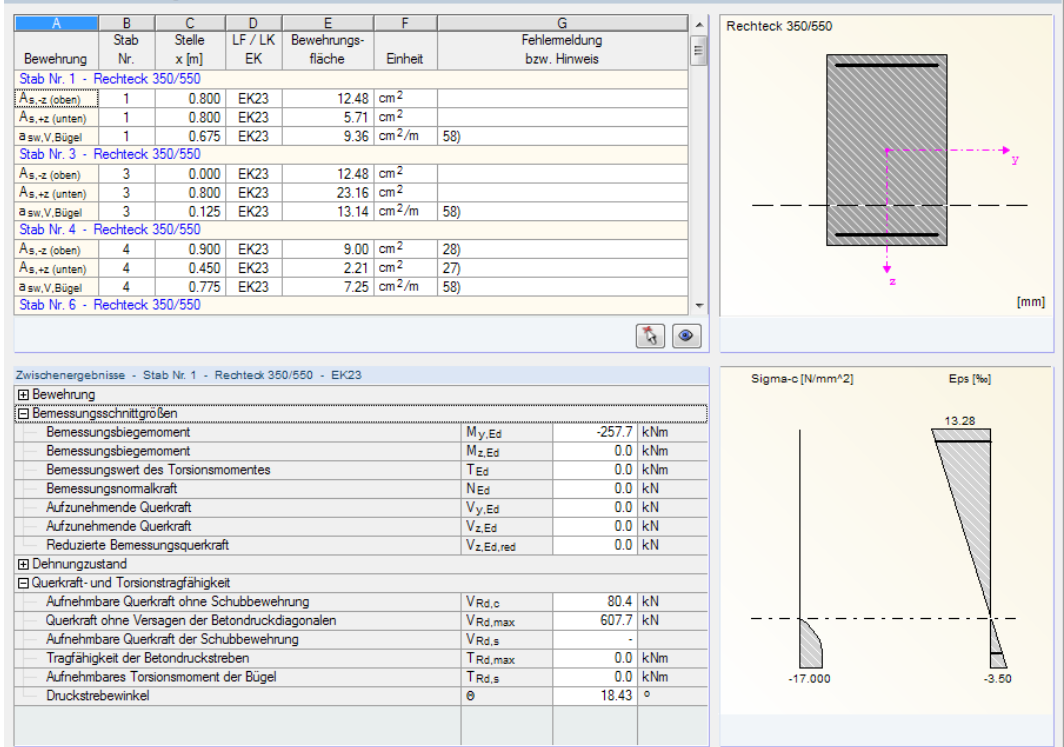


Bild 5.6: Maske 2.3 Erforderliche Bewehrung stabweise

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

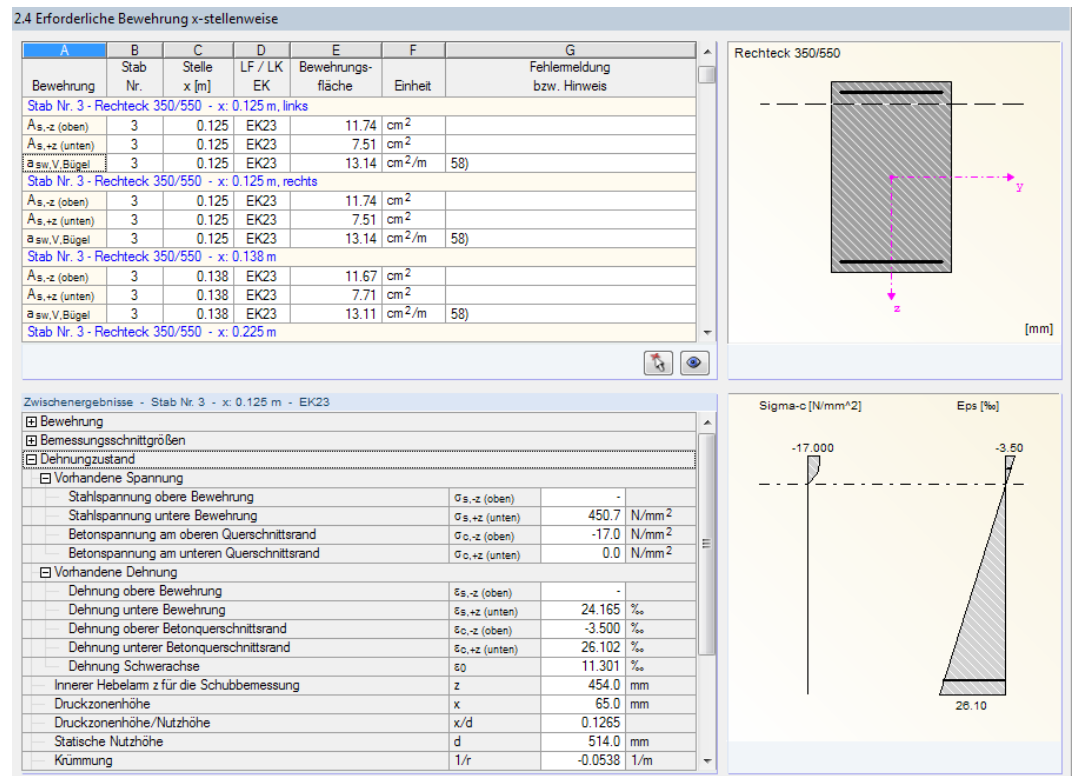


Bild 5.7: Maske 2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

Für jeden Stab werden die erforderlichen Bewehrungsflächen mitsamt Zwischenergebnissen nach x-Stellen geordnet aufgelistet:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung (siehe RFEM-Tabelle 1.16)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RFEM-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

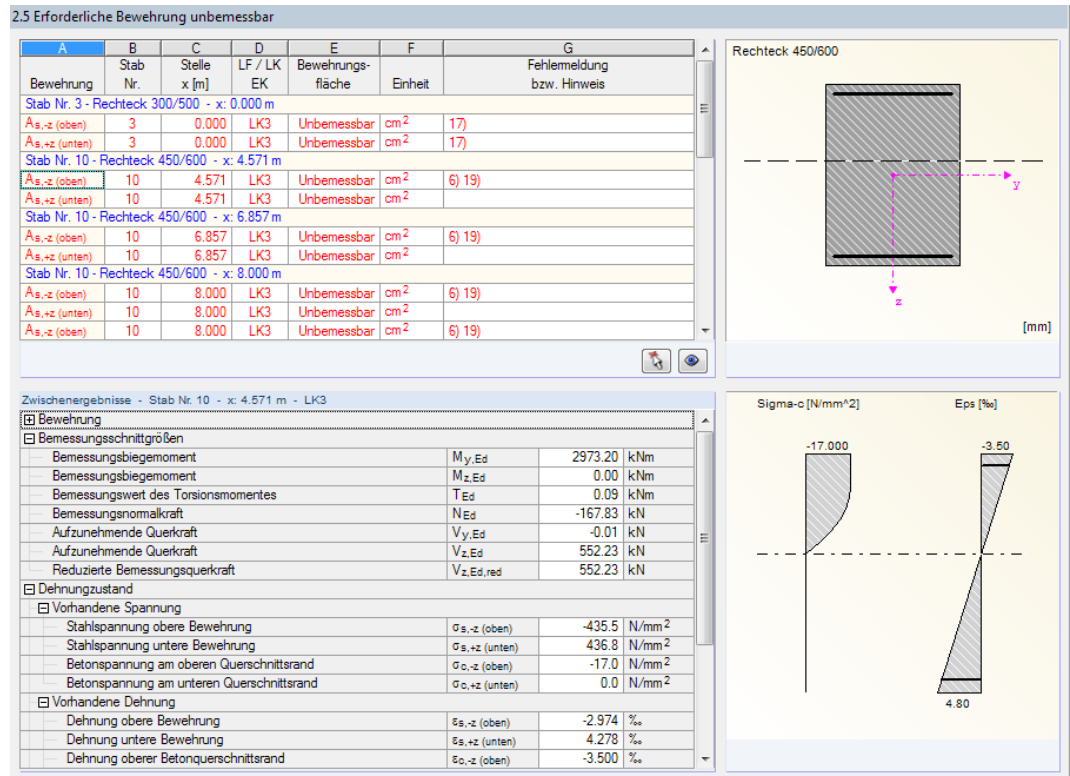


Bild 5.8: Maske 2.5 Erforderliche Bewehrung unbemessbar

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.

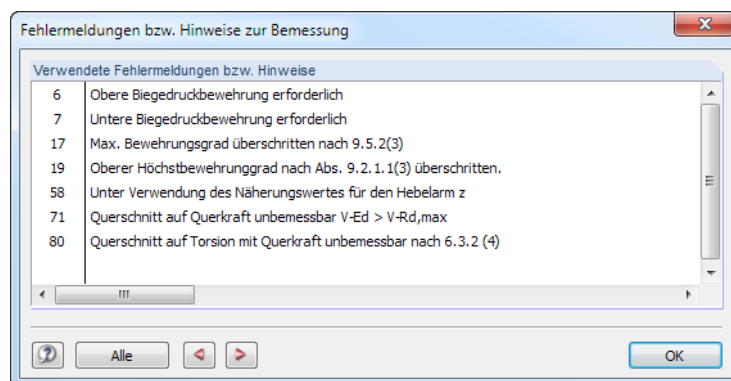


Bild 5.9: Dialog Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

Alle

Ein Klick auf [Alle] im Dialog blendet sämtliche in RF-BETON Stäbe 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 72) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe Kapitel 5.1.5, Seite 112). Auch die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sowie nichtlineare Untersuchungen erfordern einen Bewehrungsvorschlag, d. h. eine vorhandene Bewehrung.

RF-BETON Stäbe 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

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] von	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 140 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 RF-BETON Stäbe die Benutzervorgaben aus Maske 1.6 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung* (siehe [Kapitel 3.6.4, Seite 79](#)).

Anzahl Stäbe

Anzahl Stäbe
4 ...
6

Die Anzahl der Bewehrungsstäbe einer Position ist editierbar: Klicken Sie in die Zelle, um dann mit der Schaltfläche  den Bearbeitungsdialog zu öffnen.

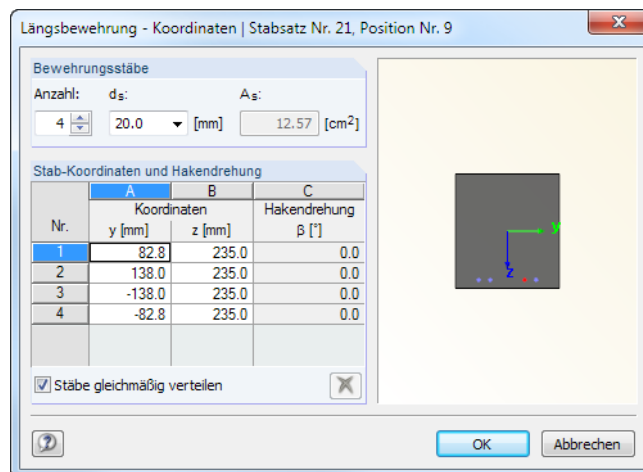


Bild 5.11: Dialog *Längsbewehrung - Koordinaten*

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 *Hakenrotation* 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_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.

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

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.

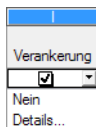
Stelle x von / bis

Diese Werte geben die rechnerischen Anfangs- und Endpositionen der Bewehrungsstäbe an. Sie sind jeweils auf den Stabanfangsknoten gemäß RFEM ($x = 0$) 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 113 und Bild 5.13, Seite 116).

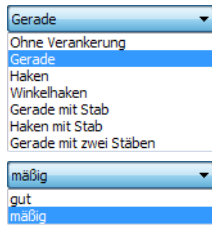
Verankerung



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 3.6.1](#) auf [Seite 74](#) beschrieben. RF-BETON Stäbe 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 *Biegerolldurchmesser* 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

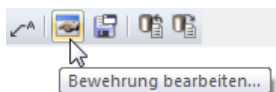
Falls eine Fußnote in der letzten Spalte angezeigt wird, liegt eine Sonderbedingung vor. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Alle [Meldungen] zum Bewehrungsvorschlag sind über die entsprechende Schaltfläche abrufbar. Es erscheint der Dialog *Fehlermeldungen* bzw. *Hinweise zur Bemessung* (siehe [Bild 5.4](#), [Seite 109](#)).

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.



Längsbewehrung bearbeiten - Stabsatz Nr. 17, Position Nr. 5

Bereich

x von: 25.59 [m]

bis: 27.18 [m]

Länge: 1.590 [m]

Bewehrungsverteilung

-z (oben)

Bewehrungsdurchmesser

d_s: 28.0 [mm]

Lage der Bewehrungsstäbe

Anzahl Stäbe: 3 A_s: 18.47 [cm²]

Stab-Koordinaten und Hakendrehung:

Nr.	Koordinaten		Hakendrehung
	y [mm]	z [mm]	β [°]
1	92.0	-239.0	180.0
2	-92.0	-239.0	180.0
3	0.0	-239.0	0.0

☐ Stäbe gleichmäßig verteilen

Verankerungen

	Verankerungstyp	Verbund	Verankerung und Zusatzlänge			Summe	Biegerollen-durchmesser d _{br}
			l _{bd}	l ₁	l ₂		
Anfang:	Gerade	mäßig	0.28	0.28		0.28 [m]	
Ende:	Gerade	mäßig	0.76	0.76		0.76 [m]	

Gerade

Gerade

Gesamtlänge: 2.631 [m]

Gesamtmasse: 38.1 [kg]

OK

Abbrechen

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.

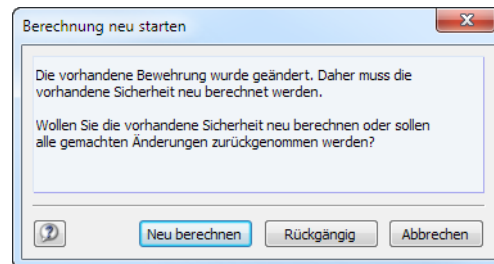


Bild 5.14: Abfrage beim Verlassen der Maske 3.1

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.

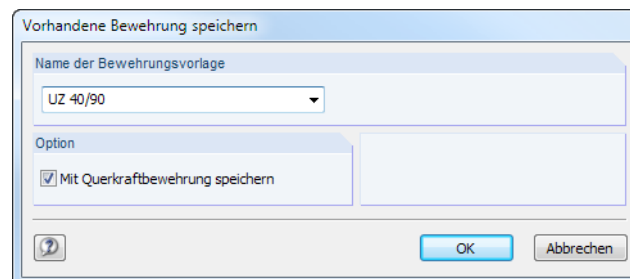


Bild 5.15: Dialog *Vorhandene Bewehrung speichern*

Mit diesen Vorlagen kann bei Änderungen der Bemessungsvorgaben in Maske 1.6 wieder die benutzerdefinierte Bewehrungsführung voreingestellt werden. Die Änderungen gehen nicht verloren, wenn RF-BETON Stäbe einen neuen Bewehrungsvorschlag erstellt.

Die Einlesemöglichkeit von Bewehrungsvorlagen ist im [Kapitel 3.6](#) beschrieben (siehe [Bild 3.25](#), [Seite 73](#)).

5.2.2 Vorhandene Bügelbewehrung

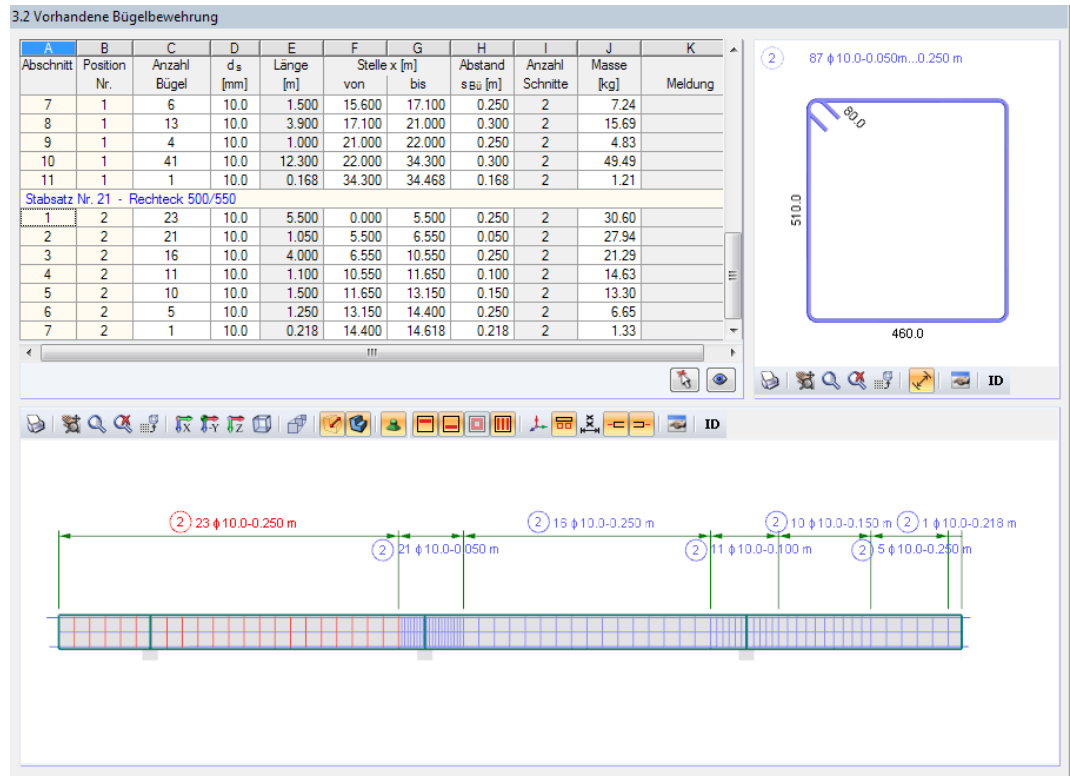


Bild 5.16: Maske 3.2 Vorhandene Bügelbewehrung

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 140](#) beschrieben.

Der Bewehrungsvorschlag berücksichtigt auch konstruktive Vorschriften. So ist beispielsweise nach EN 1992-1-1, 9.2.2 (6) als Höchstabstand $s_{l,max} = 0,75 d$ 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 3.6.2](#), [Seite 75](#)). 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 RF-BETON Stäbe die Benutzervorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel* (siehe [Kapitel 3.6.2](#), [Seite 75](#)).

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
d _s
[mm]
10.0
6.0
8.0
10.0
12.0
14.0
16.0
20.0
25.0
28.0
30.0

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 RFEM ($x = 0$) 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 3.6.2](#), [Seite 75](#)) 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

Anzahl Schnitte
2
2
3
4

Die Schnittigkeit der Bügel basiert auf den Vorgaben der Maske *1.6 Bewehrung*, Register *Bügel* (siehe [Kapitel 3.6.2](#), [Seite 75](#)). Die Anzahl der Schnitte kann über die Liste geändert werden.

Masse

Für jeden Bügelabschnitt wird die Gesamtmasse der Bügel angegeben.

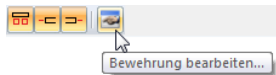
Meldung

Wird eine Fußnote in der letzten Spalte angezeigt, so liegt eine Sonderbedingung vor. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Alle [Meldungen] zum Bewehrungsvorschlag sind über die entsprechende Schaltfläche abrufbar. Es erscheint der Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung* (siehe [Bild 5.4](#), [Seite 109](#)).

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.

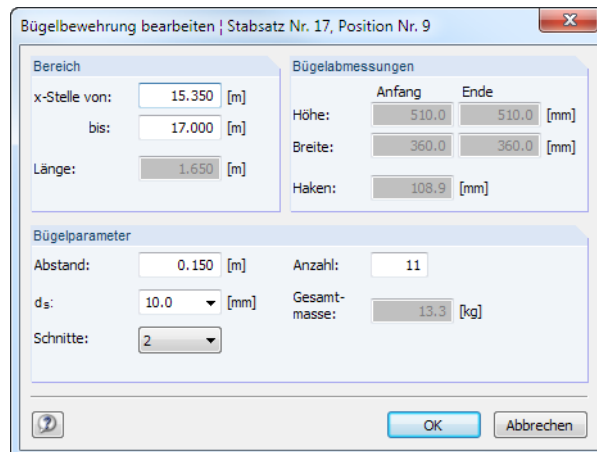


Bild 5.17: Dialog *Bügelbewehrung bearbeiten*

In diesem Dialog sind die bereits beschriebenen Bewehrungsparameter zusammengefasst. Hier lassen sich die Angaben zu *Bereich*, *Bügelabmessungen* und *Bügelparameter* kontrollieren und bei Bedarf 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 117](#)).

5.2.3 Vorhandene Bewehrung x-stellenweise

Diese Maske bietet eine x-stellenweise Auflistung der Bewehrungsquerschnitte einschließlich Anmerkungen zu den Nachweiskriterien. Bei einer Neuberechnung nach dem Ändern der Bewehrung in den Masken 3.1 und 3.2 werden die Ergebnisse aktualisiert.

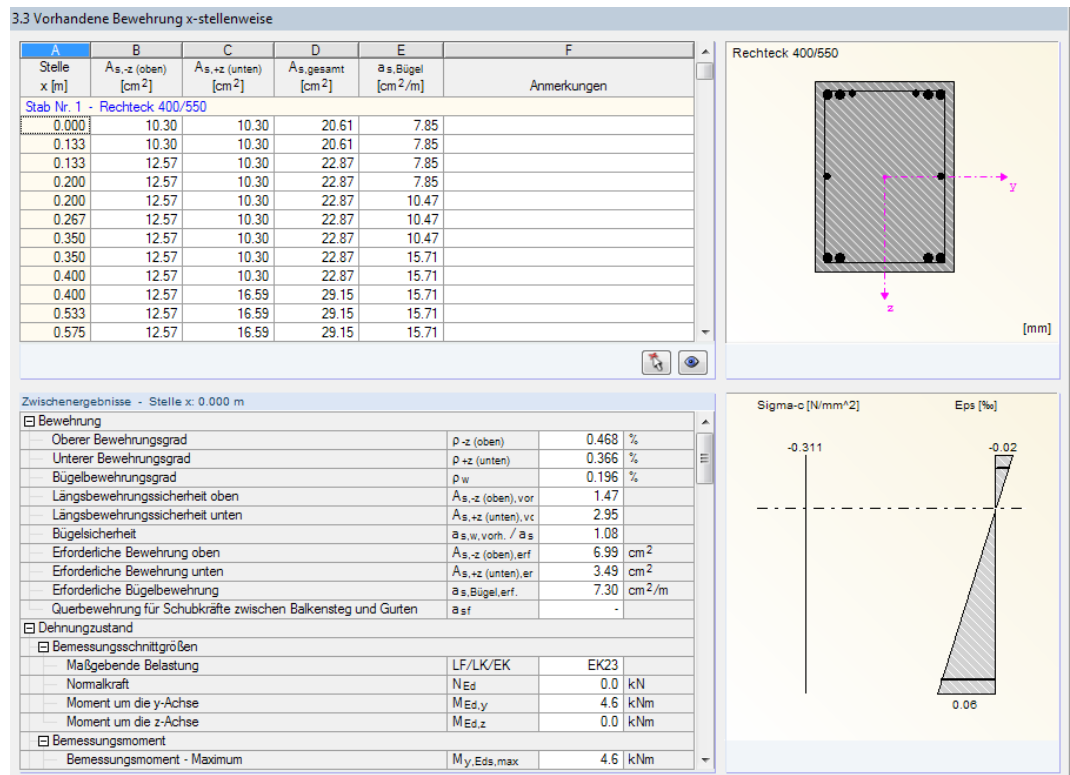


Bild 5.18: Maske 3.3 Vorhandene Bewehrung x-stellenweise

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 RFEM-Tabelle 1.16)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RFEM-Dialog *Berechnungsparameter*, Register *Globale Berechnungsparameter*)
- Extremwerte der Schnittgrößen



Bei gestaffelten Bewehrungen erscheinen zwei gleiche x-Stellen mit den beiden Bewehrungswerten an der Bereichsgrenze.

$A_{s,-z(\text{oben})}$

Dieser Wert gibt den Bewehrungsquerschnitt der vorhandenen oberen Längsbewehrung an.

$A_{s,+z(unten)}$

Dieser Wert repräsentiert den Bewehrungsquerschnitt der vorhandenen unteren Längsbewehrung.

$A_{s,gesamt}$

Die vorhandene Gesamt-Längsbewehrung ermittelt sich aus den Werten der Spalten B und C.

$a_{s,Bügel}$

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	B	C	D	E	F	G		H	I	J
Position Nr.	Bewehrungs- typ	d _s [mm]	Ober- fläche	Anzahl Stäbe	Länge [m]	Verankerungstyp			Biegerollen- durchmesser [m]	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	3.299	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 57) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe Kapitel 5.1.5, Seite 112 und Kapitel 5.2.3, Seite 121).

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 _I	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								
<input checked="" type="checkbox"/> Dehnungszustand								
<input checked="" type="checkbox"/> Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen								
<input checked="" type="checkbox"/> Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers								
<input checked="" type="checkbox"/> 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
<input checked="" type="checkbox"/> 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
<input checked="" type="checkbox"/> 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 Bewehrungssätze zur Rissbreitenbegrenzung (siehe Kapitel 3.6.7, Seite 85), der vorhandenen Bewehrung und den Schnittgrößen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.



Grundsätzlich muss nur eines der Kriterien $\lim d_s$, $\lim s_I$ 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, lokal}
σ _c
σ _s
A _{s, min}
lim d _s
lim s _i
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, 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 3.7, Seite 94).

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:

$$\sigma_s = \epsilon_s \cdot E_s$$

A_{s, min}

Die Mindestquerschnittsfläche der Betonstabstahlbewehrung beträgt gemäß EN 1992-1-1, 7.3.2, Gl. (7.1):

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

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, 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 Grenzdurchmesser des Betonstahls 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:

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

mit

$s_{r,max}$: Maximaler Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild (siehe [Kapitel 2.2.4, Seite 17](#))

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*.

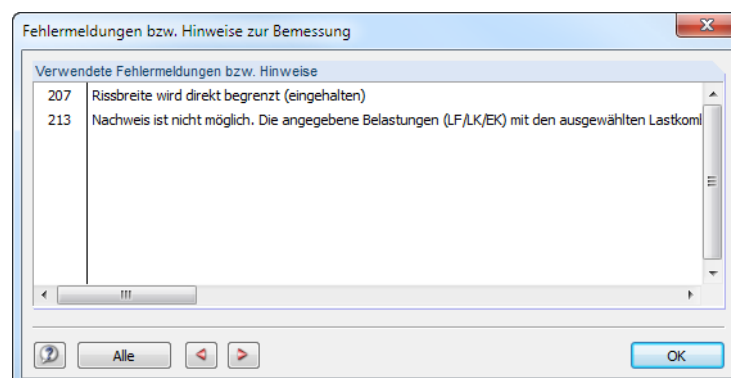


Bild 5.21: Dialog *Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung*

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 RFEM-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								
<input checked="" type="checkbox"/> Dehnungszustand								
<input checked="" type="checkbox"/> 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.								
<input checked="" type="checkbox"/> Bestimmen des maximalen Bewehrungsabstands								
<input checked="" type="checkbox"/> 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
<input checked="" type="checkbox"/> 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
<input checked="" type="checkbox"/> 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	U _{z, 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	Δ _{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	U _{z, 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	Δ _{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	σ _{c, l, -z (oben), Ed}	2.9	N/mm ²
Betonspannung am unteren Querschnittsrand	σ _{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	U _{z, 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	U _{z, 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	U _{z, 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 60](#)) und wenn keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe [Kapitel 5.1.5, Seite 112](#) und [Kapitel 5.2.3, Seite 121](#)).

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

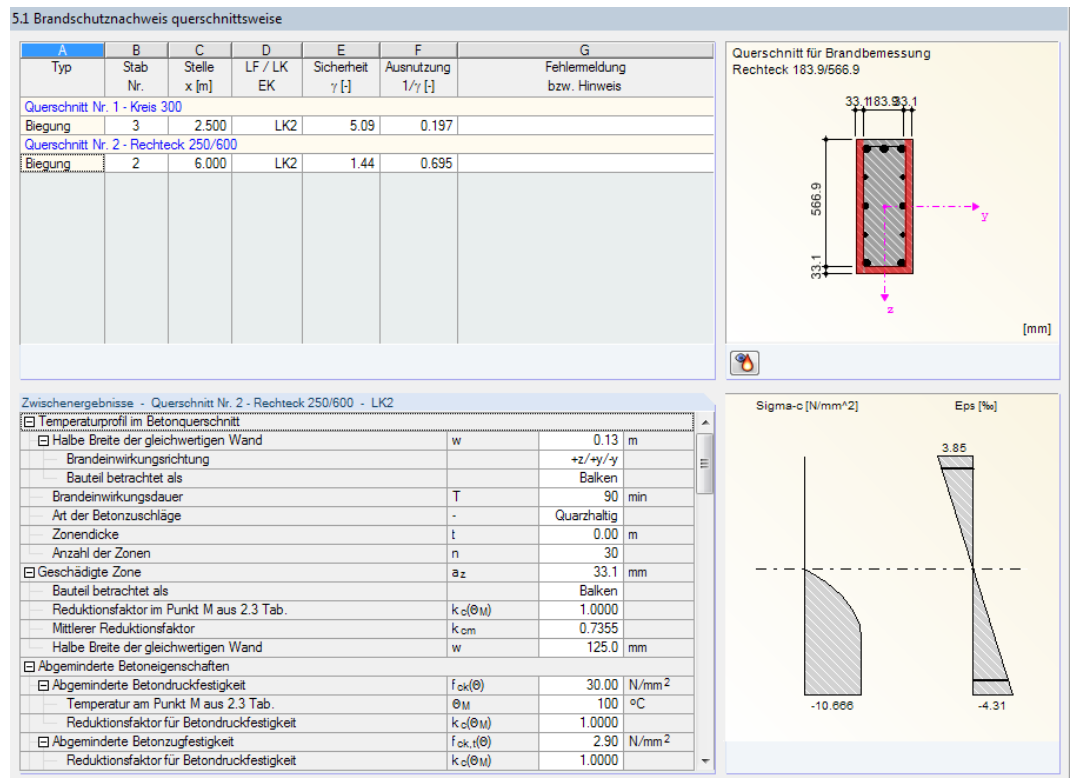


Bild 5.25: Maske 5.1 Brandschutznachweis querschnittsweise

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 3.1.4, Seite 60](#)), 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 2.3](#) ab [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 3.48, Seite 92](#)).

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 RFEM-Stabstellen x herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- Teilungspunkte gemäß eventuell vorgegebener Stabteilung (siehe RFEM-Tabelle 1.16)
- Stabteilung gemäß Vorgabe für Stabergebnisse (RFEM-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.

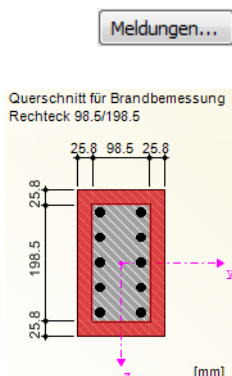
Der Abschnitt *Zwischenergebnisse* informiert, wie die vorhandenen Sicherheiten aus dem Verhältnis von Bruchschnittgröße im Brandfall zu einwirkender Schnittgröße gebildet werden.

□ 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	$M_{yRd,fi}$	-160.98	kNm
□ Bruchmoment um die z-Achse	$M_{zRd,fi}$	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.

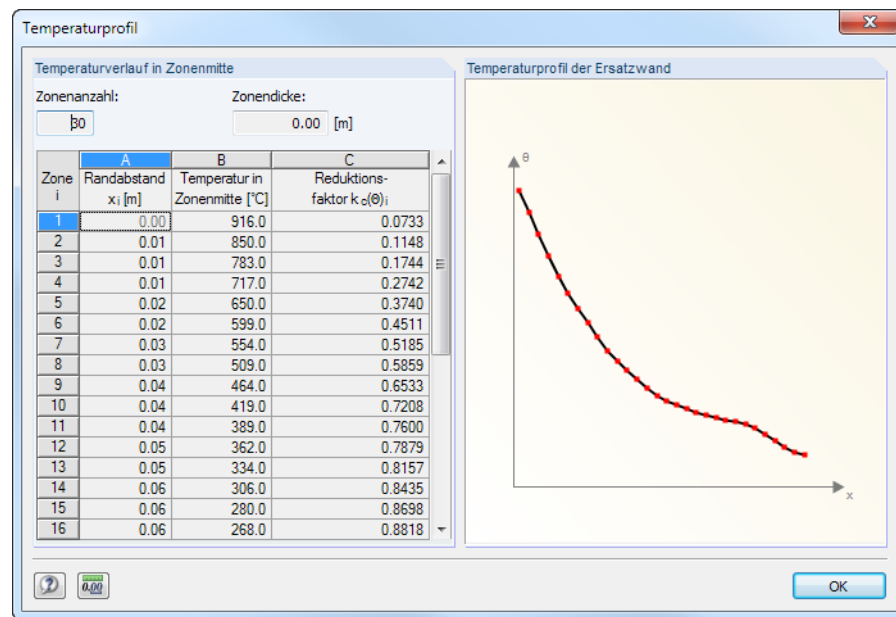


Bild 5.27: Dialog Temperaturprofil

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

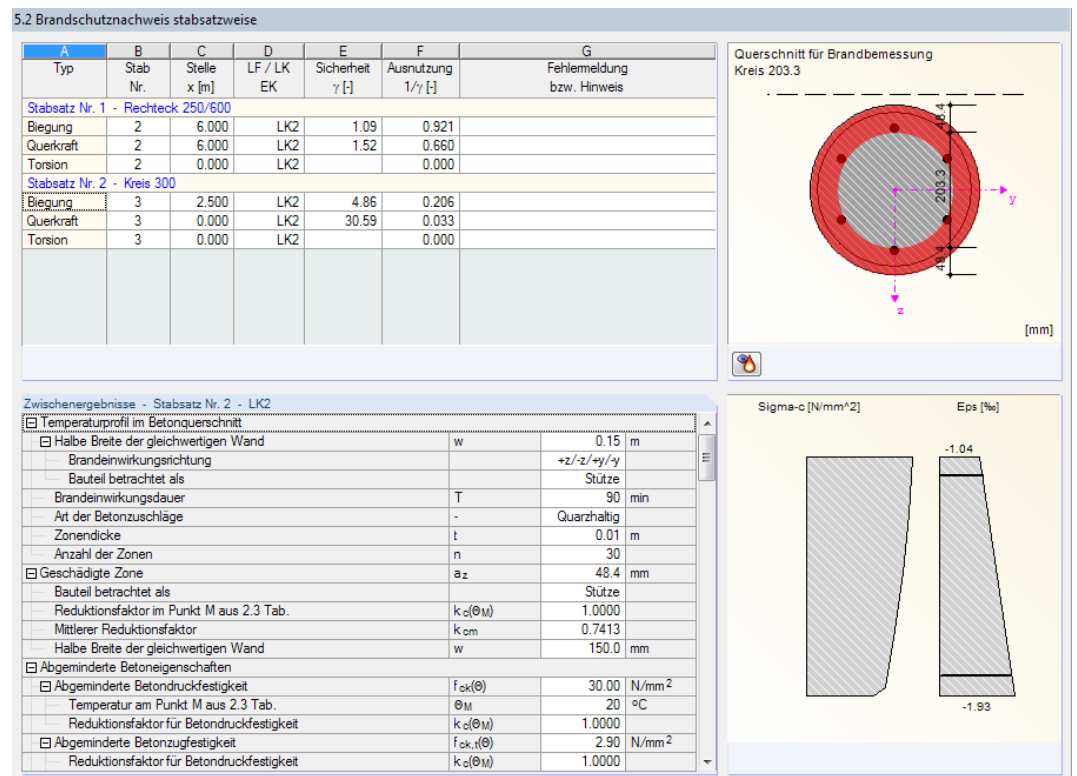


Bild 5.28: Maske 5.2 Brandschutznachweis stabsatzweise

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

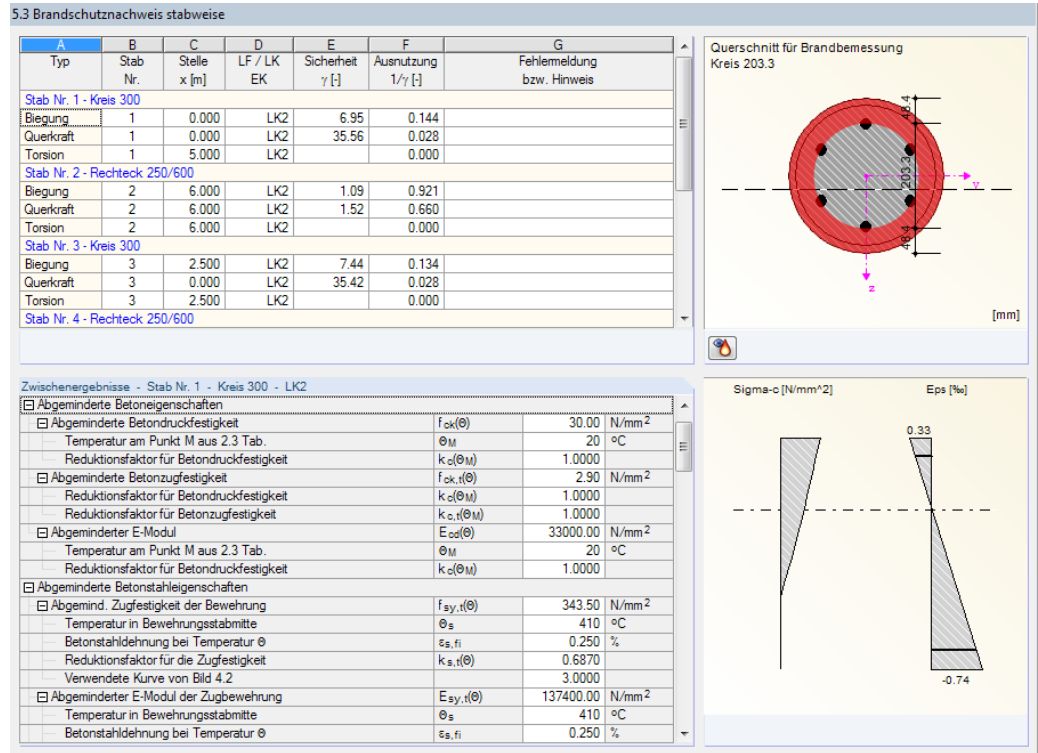


Bild 5.29: Maske 5.3 Brandschutznachweis stabweise

In dieser Maske erfolgt die Ausgabe der Brandschutznachweise nach Stäben geordnet.

5.4.4 Brandschutznachweis x-stellenweise

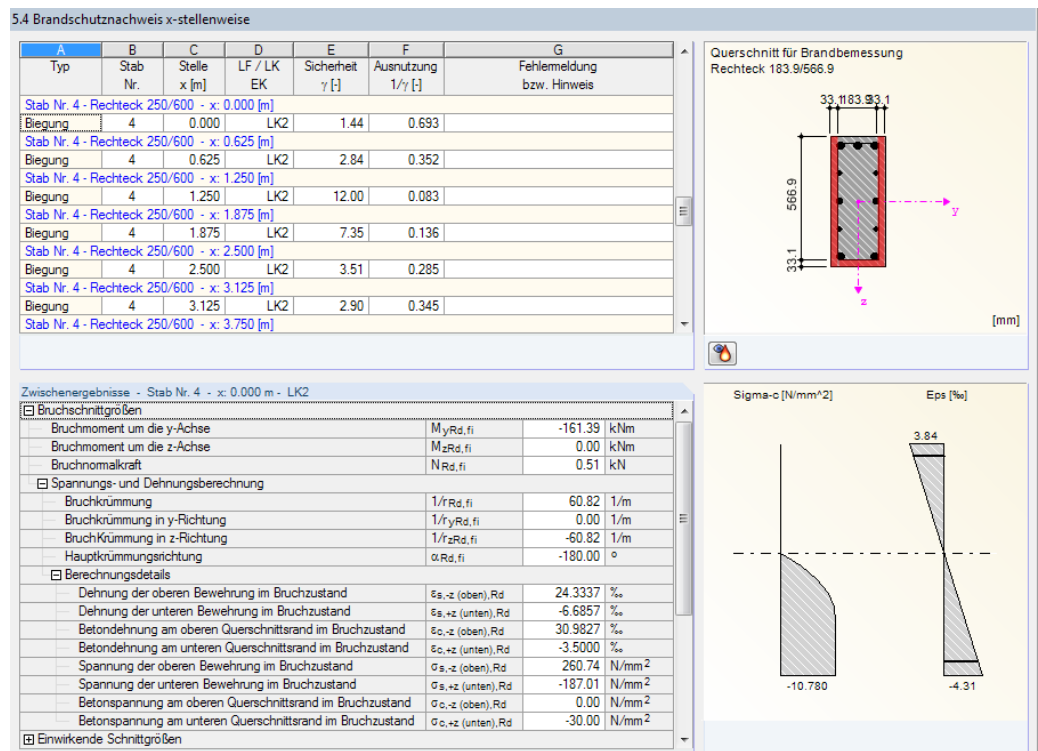


Bild 5.30: Maske 5.4 Brandschutznachweis x-stellenweise

Diese Maske gibt die Brandschutznachweise detailliert nach x-Stellen geordnet aus.

5.4.5 Brandschutznachweis unbemessbar

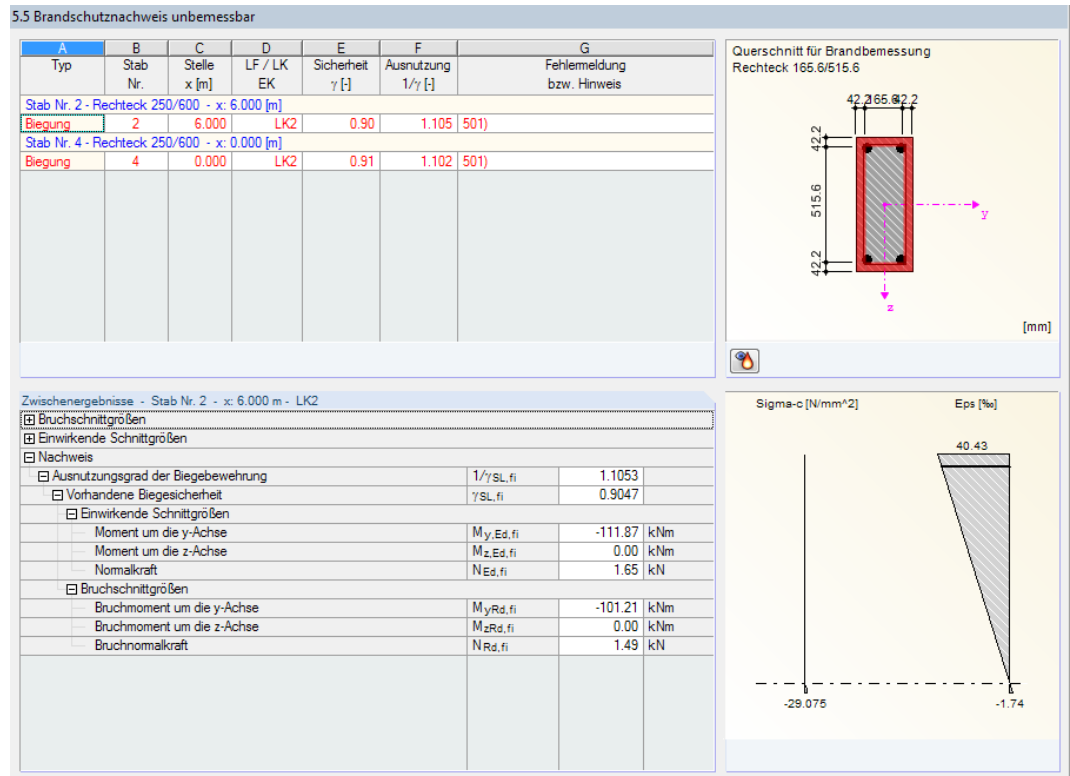


Bild 5.31: Maske 5.5 Brandschutznachweis unbemessbar

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.

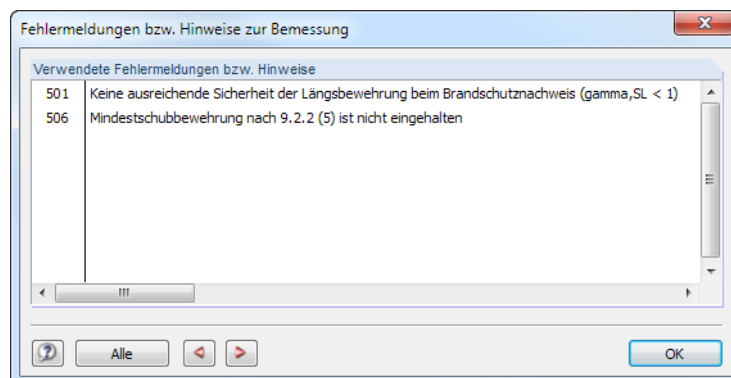
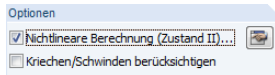


Bild 5.32: Dialog Fehlermeldungen bzw. Hinweise zur Bemessung

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 52](#)). Des Weiteren dürfen keine Unbemessbarkeiten vorliegen (siehe [Kapitel 5.1.5](#), [Seite 112](#)).

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 124](#)).

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

Bruchzustandsgrößen 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			
Stahlschubspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	566.06	N/mm ²
Stahlschubdehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	20.000	‰
Betonschubspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-28.59	N/mm ²
Betonschubdehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-2.061	‰
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{otRd}	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 98](#) und [Bild 4.6](#), [Seite 101](#)).

Der untere Abschnitt listet alle *Zwischenergebnisse* für die oben selektierte Tabellenzeile auf. Beim Klick in eine andere Zeile aktualisieren sich die Bemessungsdetails.

☒ Alle Lastfälle

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. Über die Schaltfläche [Details] im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen* (siehe Bild 2.30, Seite 51) ist der RFEM-Dialog *FE-Netz* zur Anpassung der FE-Netz-Vorgaben zugänglich.

LF / LK

Es werden die Nummern der Lastfälle oder Lastkombinationen angegeben, die für die einzelnen Querschnitte, Stäbe oder Stabsätze maßgebend sind.

☒ Alle Lastfälle

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

$$R_d = \begin{vmatrix} N_{Rd} \\ M_{y,Rd} \\ M_{z,Rd} \end{vmatrix} \quad \text{Bemessungswert des Tragwiderstandes}$$

$$E_d = \begin{vmatrix} N_{Ed} \\ M_{y,Ed} \\ M_{z,Ed} \end{vmatrix} \quad \text{Bemessungswert der Einwirkung}$$

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	
Stahldéhnung 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	‰	
Querschnittseigenschaften				
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 4.6, Seite 101) 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	°	
<input checked="" type="checkbox"/> 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	‰	
<input checked="" type="checkbox"/> Querschnittseigenschaften				
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. Über die Schaltfläche [Details] im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Konvergenzeinstellungen* (siehe Bild 2.30, Seite 51) ist der RFEM-Dialog *FE-Netz* zur Anpassung der FE-Netz-Vorgaben zugänglich.

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 Anhängen 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				
[-] Querschnittseigenschaften				
— 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	$1/r_{yRd}$	-0.0000E+00	1/m
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/r_{zRd}$	-5.1764E-02	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	-180.0	°
Berechnungsdetails			
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	269.51	N/mm ²
Stahlidehnung 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 98 und Bild 4.6, Seite 101).

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			
Erreichte 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 2.30](#), [Seite 51](#)).

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 50](#)).

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 113](#) und [Bild 5.16, Seite 118](#)).

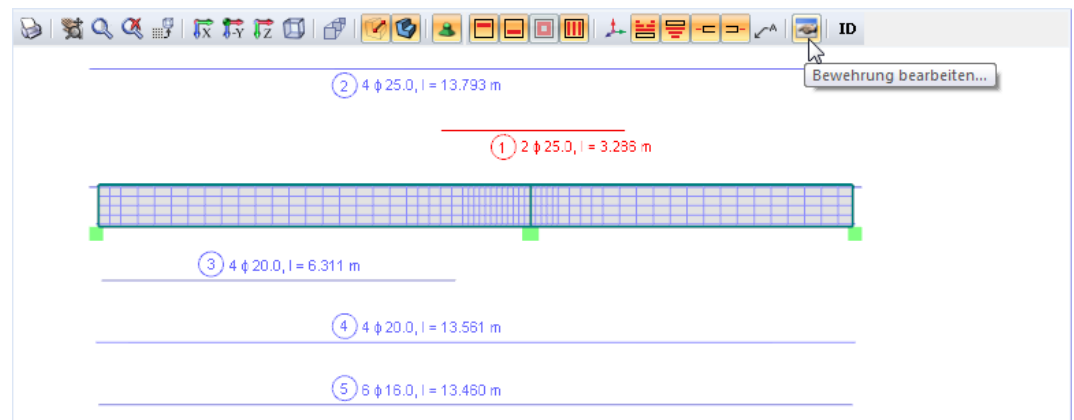


Bild 6.1: Bewehrungsskizze in Maske 3.1 Vorhandene Bewehrung

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 RFEM 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.

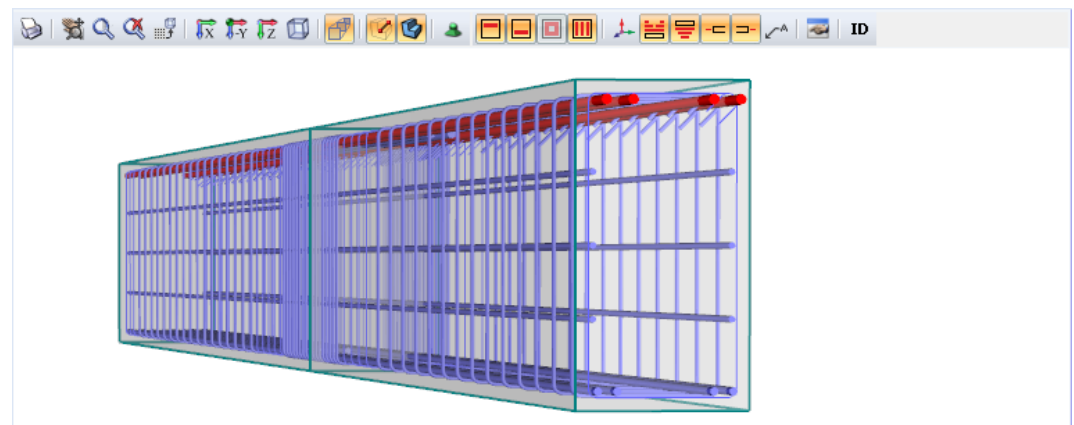
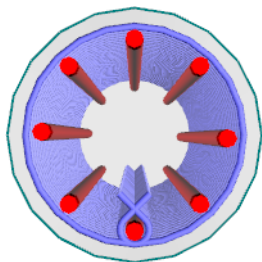


Bild 6.2: 3D-Darstellung des Bewehrungskorbes

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:



Stützenbewehrung in perspektivischer Ansicht

① 14 φ 10.0-0.300 m

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Drucken	Ruft den Dialog <i>Grafikausdruck</i> auf → Bild 7.5, Seite 154
	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

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 116 und Bild 5.17 auf Seite 120 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.

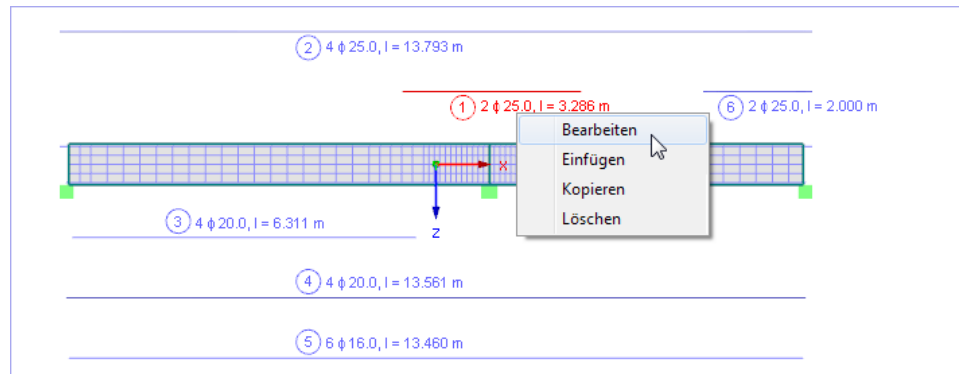
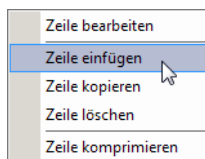


Bild 6.3: Kontextmenü der Bewehrung

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 117) 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 RF-BETON Stäbe einen neuen Bewehrungsvorschlag erstellt.

Das Einlesen von Bewehrungsvorlagen ist im Kapitel 3.6 beschrieben (siehe Bild 3.25, Seite 73).

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.

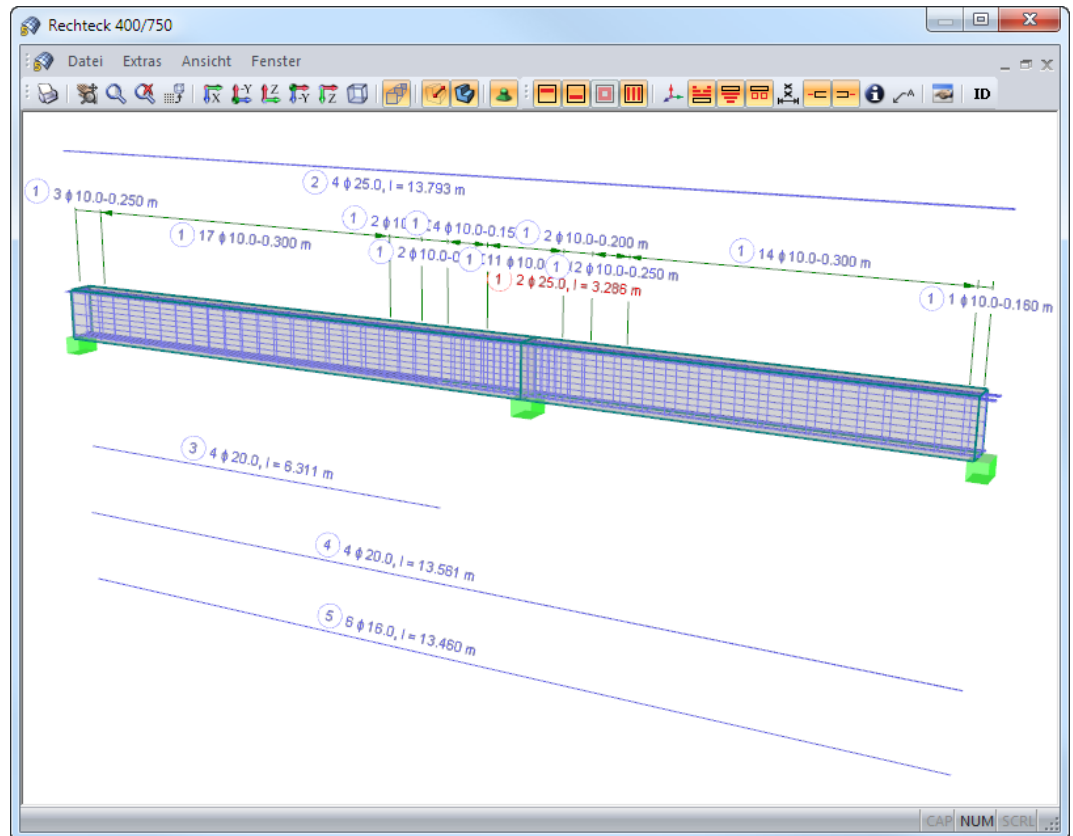


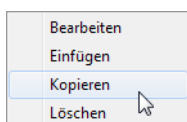
Bild 6.4: 3D-Rendering der vorhandenen Längs- und Bügelbewehrung



Die Grafik kann über das Menü *Ansicht* oder die zugeordneten Schaltflächen gesteuert werden (siehe [Tabelle 6.1](#), [Seite 141](#)). Zudem lassen sich die im [Kapitel 6.1](#) auf [Seite 140](#) 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](#)).

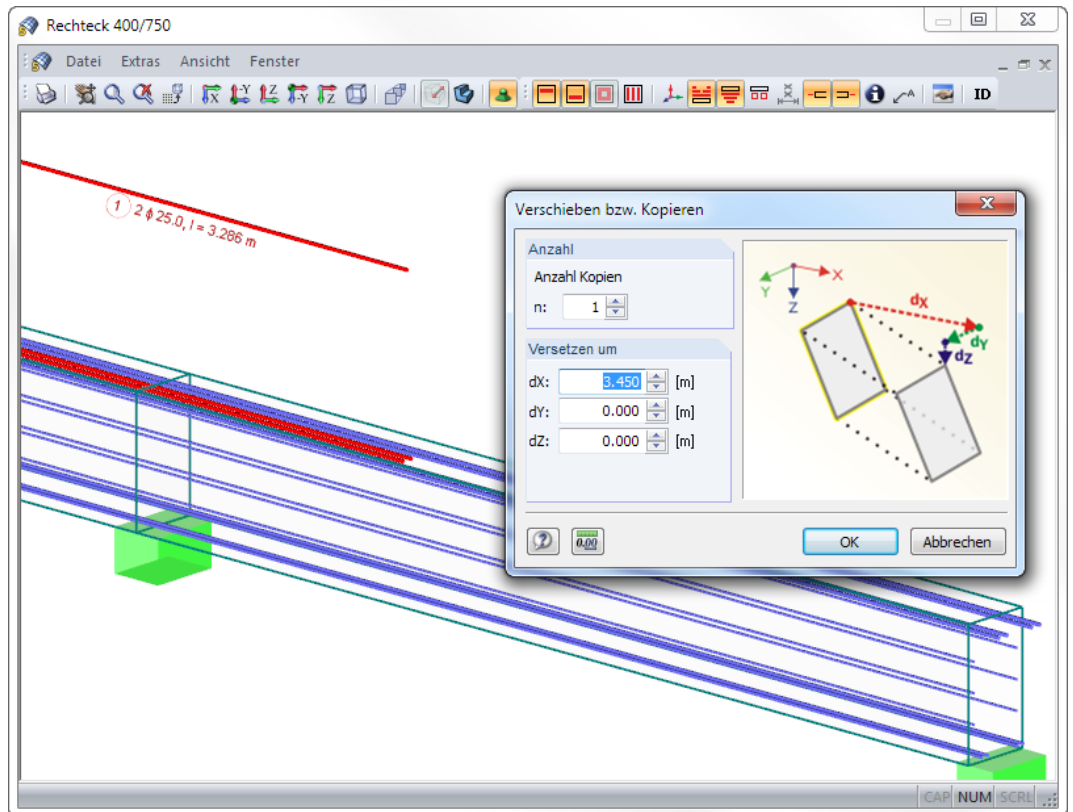


Bild 6.5: Bewehrungsposition über Kontextmenü Kopieren

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.

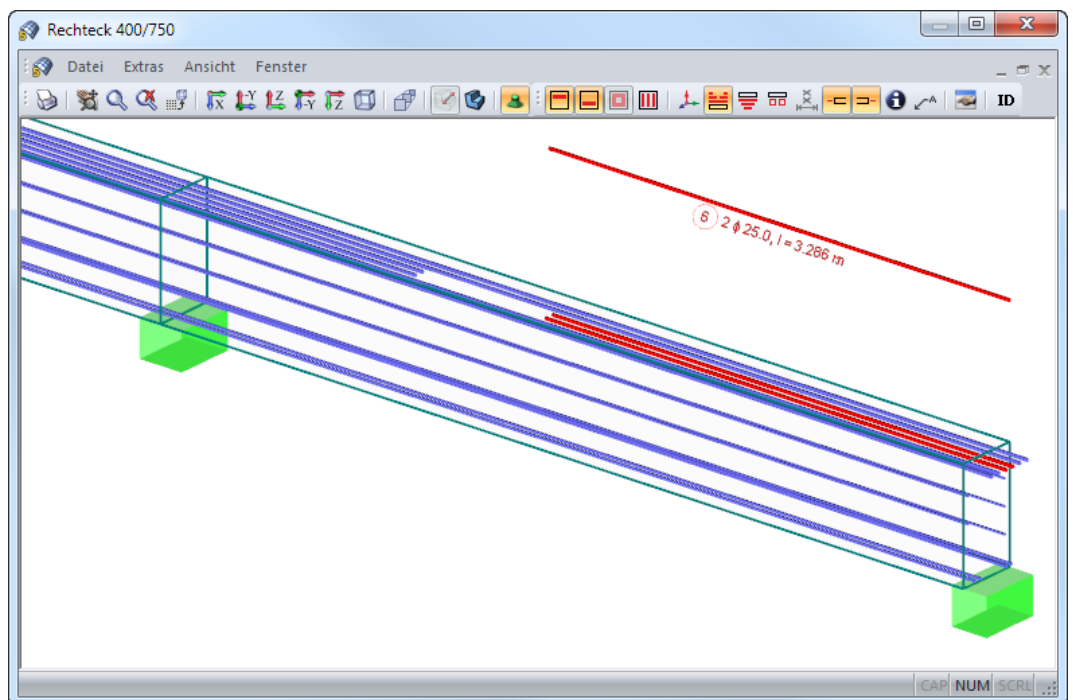


Bild 6.6: Kopierte Bewehrungsposition

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.

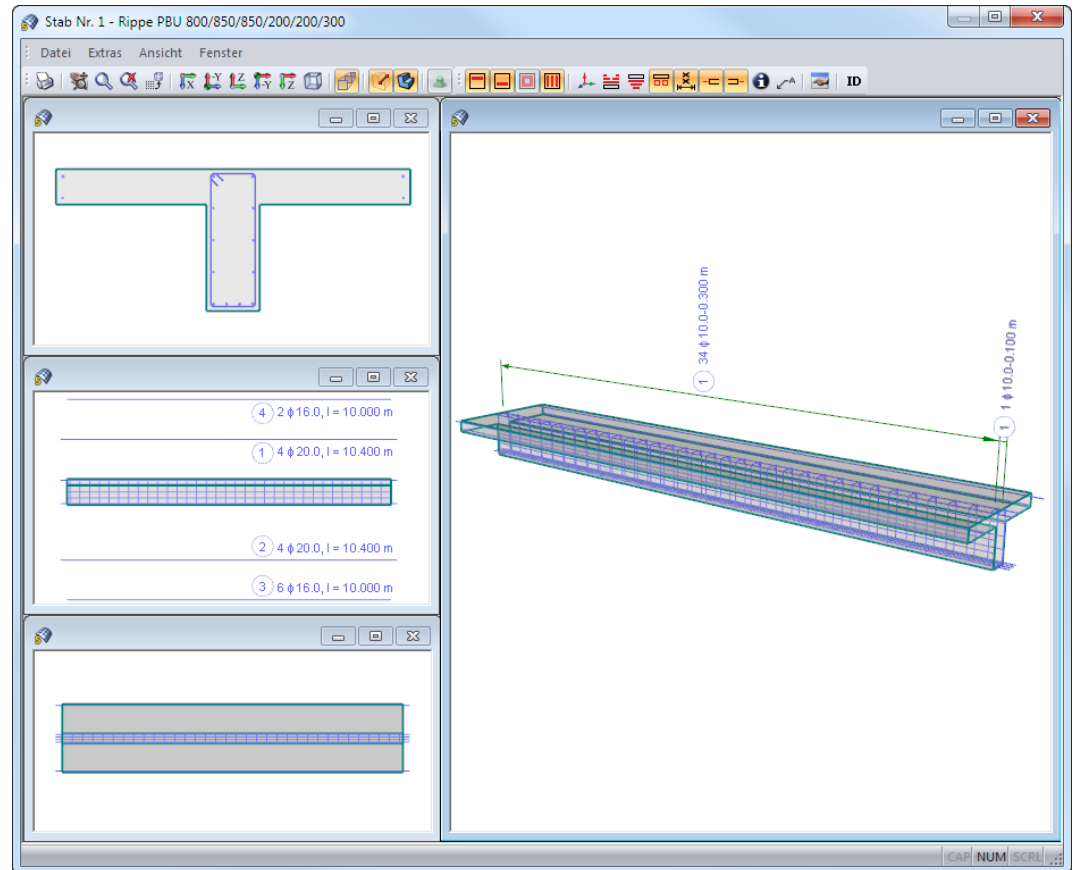


Bild 6.7: Fensterdarstellung *Isometrie und 3 Ansichten*

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 RFEM-Modell

Für die Auswertung kann auch das RFEM-Arbeitsfenster genutzt werden.

6.3.1 Hintergrundgrafik und Ansichtsmodus

Das RFEM-Arbeitsfenster im Hintergrund ist hilfreich, um die Lage eines Stabes im Modell ausfindig zu machen: Der in der Ergebnismaske von RF-BETON Stäbe selektierte Stab wird in der Hintergrundgrafik mit einem Pfeil gekennzeichnet; die x-Stelle ist in der Selektionsfarbe hervorgehoben.

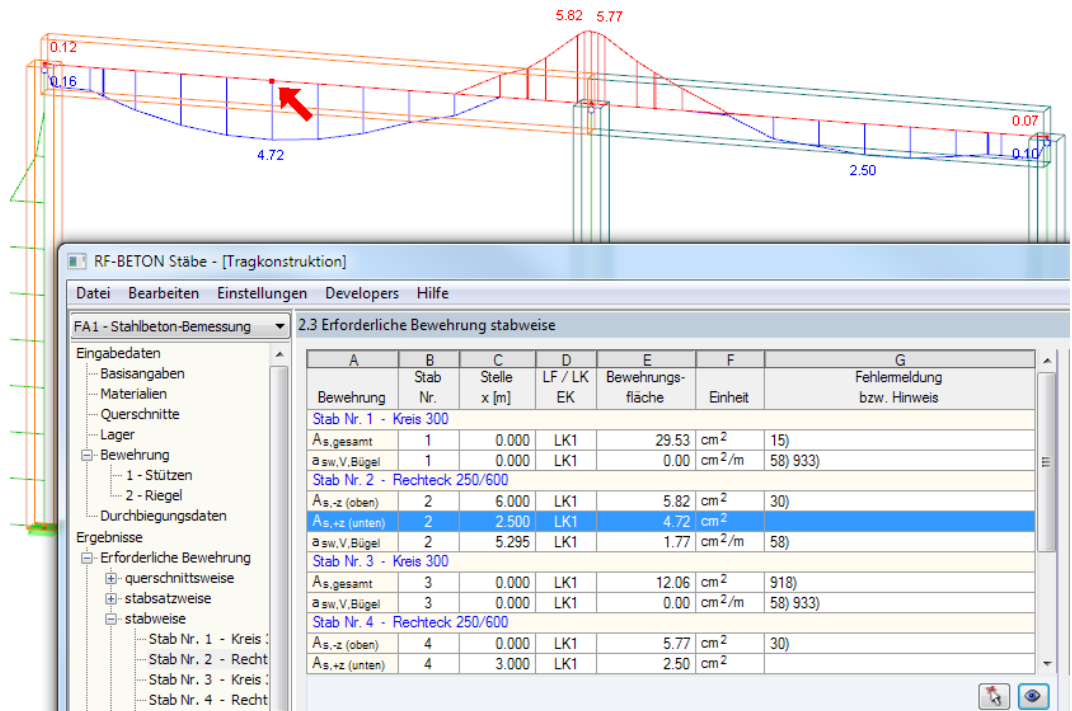


Bild 6.8: Kennzeichnung des Stabes und der aktuellen x-Stelle im RFEM-Modell



RF-BETON Stäbe FA1

Wenn die Hintergrundgrafik keine Ergebnisse des Moduls RF-BETON Stäbe anzeigt, kann die Schaltfläche [Ansicht ändern] benutzt werden, um den *Ansichtsmodus* zu aktivieren: Das Fenster wird ausgeblendet, sodass in der RFEM-Symbolleiste der Bemessungsfall eingestellt und mit der Schaltfläche die Ergebnisse aktiviert werden können.



Information

Sie befinden sich im Ansichtsmodus.

Zurück

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 RF-BETON Stäbe.

6.3.2 RFEM-Arbeitsfenster

Grafik

Die Bewehrungen und Zwischenergebnisse lassen sich auch grafisch am RFEM-Modell überprüfen: Klicken Sie die Schaltfläche [Grafik] an, um das Bemessungsmodul zu verlassen. Im Arbeitsfenster von RFEM werden dann sämtliche Bemessungsergebnisse wie die Schnittgrößen eines Lastfalls dargestellt.

Die Bemessungsfälle lassen sich in der Liste der RFEM-Menüleiste einstellen.

Ergebnisse-Navigator

Der *Ergebnisse-Navigator* ist auf die Nachweise des Moduls RF-BETON Stäbe abgestimmt: Es stehen die Bemessungsergebnisse für die Nachweise der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, des Brandschutzes und der nichtlinearen Berechnung mit allen Zwischenergebnissen zur Auswahl.

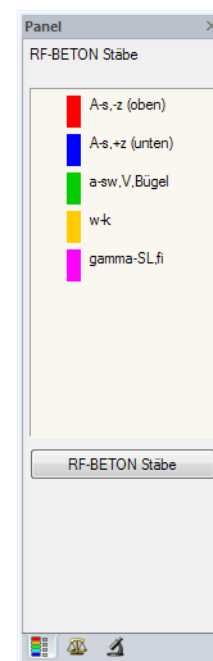
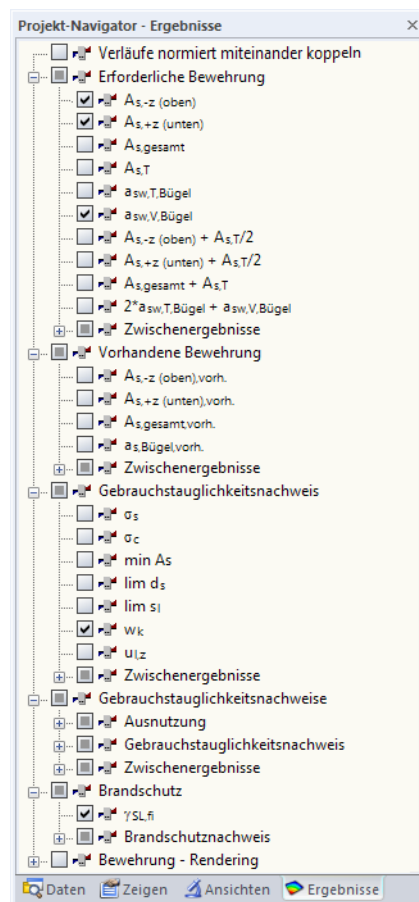
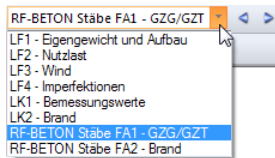


Bild 6.9: *Ergebnisse-Navigator* und Panel für RF-BETON Stäbe

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.

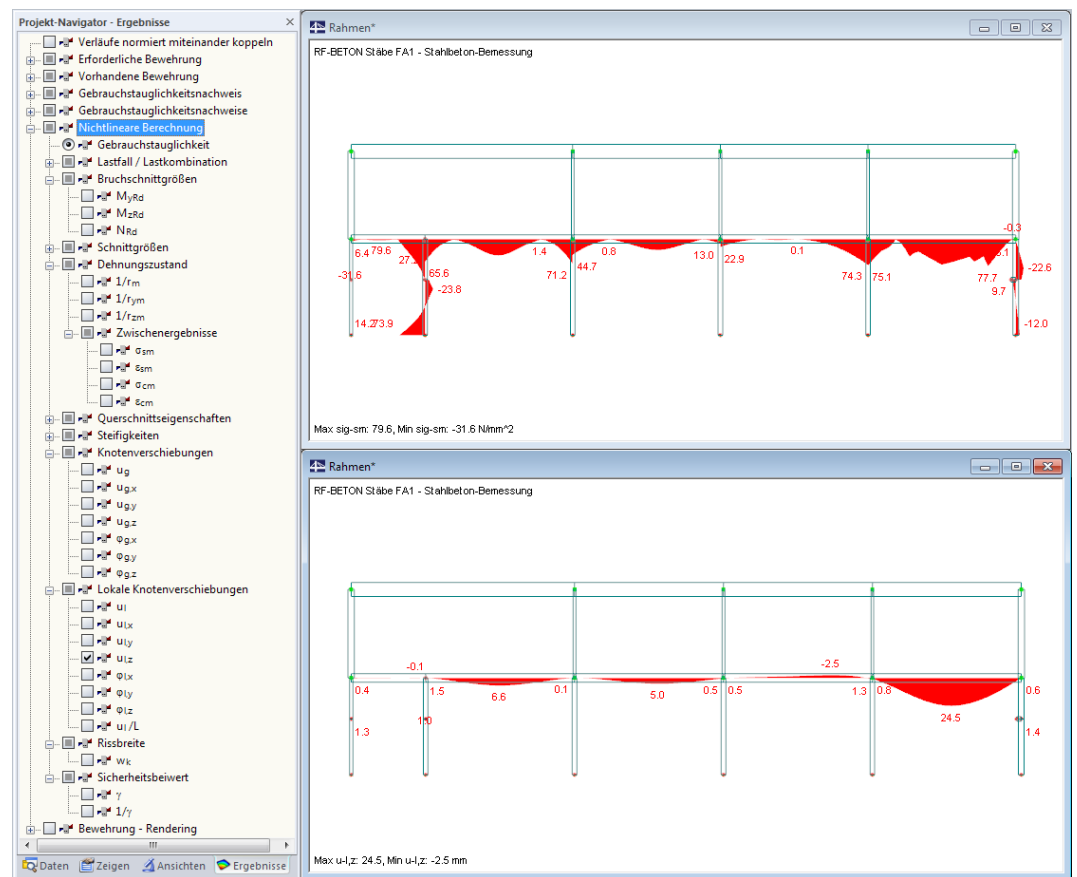


Bild 6.10: Grafische Ausgabe nichtlinearer Bemessungsergebnisse



Die Navigator-Option *Bewehrung - Rendering* ermöglicht es, die Bewehrungsstäbe und Bügel im RFEM-Arbeitsfenster darzustellen.

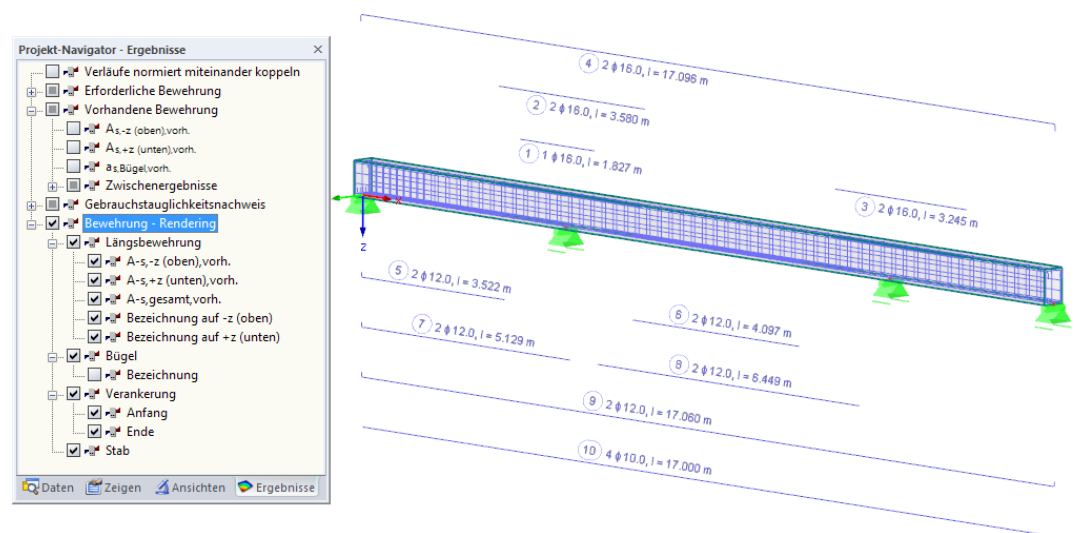


Bild 6.11: 3D-Rendering der Bewehrung in RFEM



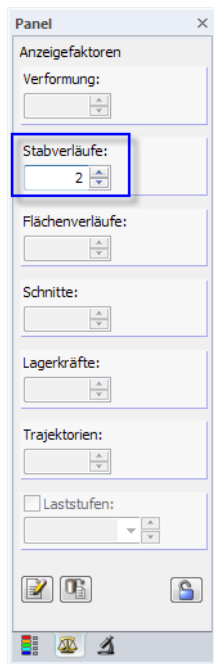
Wie in RFEM üblich, können die Grafiken mit der Schaltfläche [Drucken] auf den Drucker geleitet oder in das Ausdruckprotokoll übergeben werden (siehe [Kapitel 7.2, Seite 153](#)).

Panel

Für die Auswertung steht das Farbpanel mit den üblichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Funktionen sind im Kapitel 3.4.6 des RFEM-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 9.9.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.



Register *Faktoren*

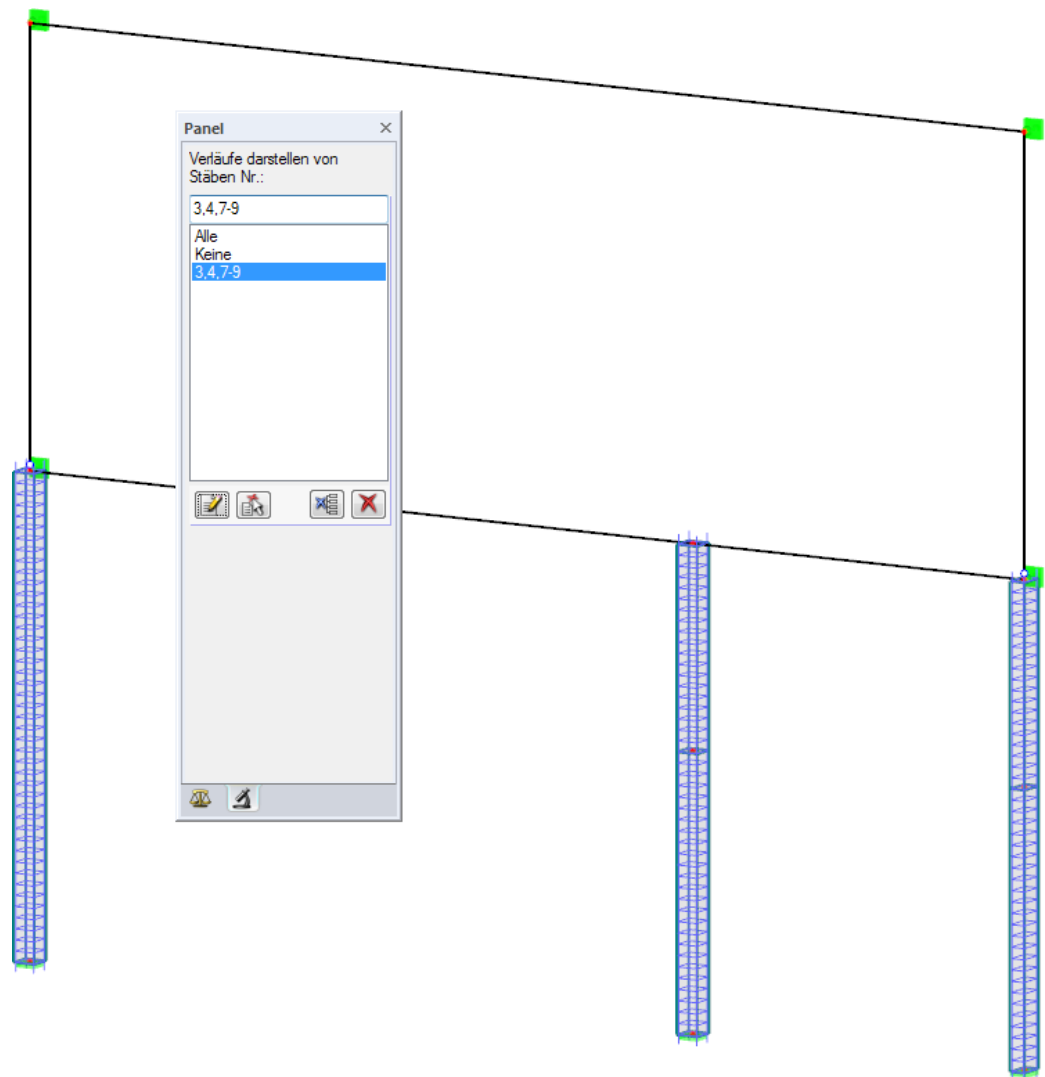


Bild 6.12: Anzeige ausgewählter Stäbe über Register *Filter*

Das Bild oben zeigt die Bewehrung der Betonstützen eines Gebäudes. Die übrigen Stäbe werden im Modell dargestellt, sind in der Anzeige jedoch ohne Bewehrungen.

RF-BETON Stäbe

Die Rückkehr zum Zusatzmodul ist über die Panel-Schaltfläche [RF-BETON Stäbe] möglich.

6.4 Ergebnisverläufe

Im RFEM-Arbeitsfenster sind die Ergebnisverläufe zugänglich über das Menü

Ergebnisse → Ergebnisverläufe an selektierten Stäben



oder die entsprechende Schaltfläche in der RFEM-Symbolleiste.

Es öffnet sich ein Fenster, das den Verlauf der Bewehrungsflächen und Zwischenergebnisse am gewählten Stab oder Stabsatz zeigt.

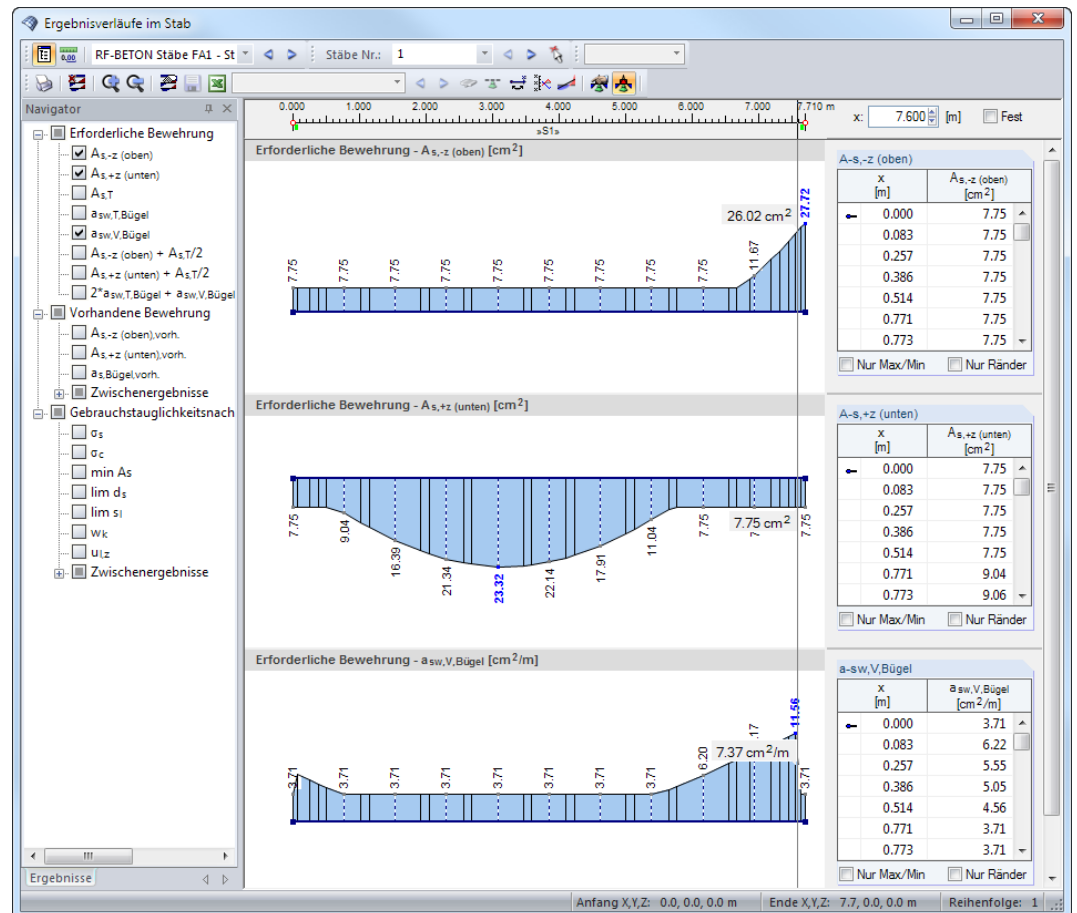


Bild 6.13: Dialog *Ergebnisverläufe im Stab*

Links im Navigator können die Bewehrungen und Zwischenergebnisse ausgewählt werden. Über die Listen in der Symbolleiste kann zwischen den Bemessungsfällen von RF-BETON Stäbe 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 RFEM-Handbuchs.

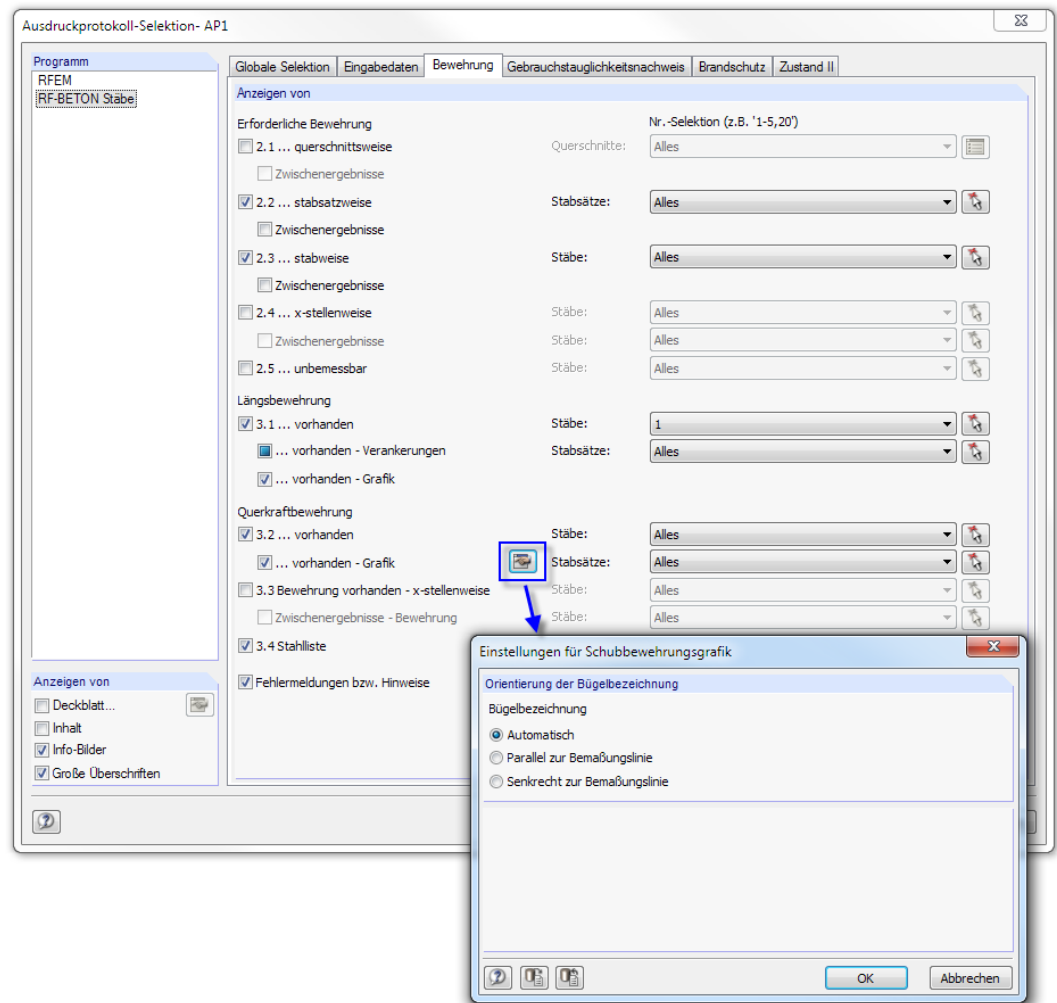


Bild 7.2: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Bewehrung*

Bei großen Systemen mit vielen Bemessungsfällen trägt die Aufteilung der Daten in mehrere Ausdruckprotokolle zur Übersichtlichkeit bei.

7.2 Grafikausdruck

In RFEM kann jedes Bild, das im Arbeitsfenster angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übergeben oder direkt zum Drucker geleitet werden. Somit lassen sich auch die am RFEM-Modell gezeigten Bewehrungen und Nachweiskriterien für den Ausdruck aufbereiten.



Das Drucken von Grafiken ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Die aktuelle Bewehrungsgrafik kann gedruckt werden über das Menü

Datei → Grafik drucken



oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

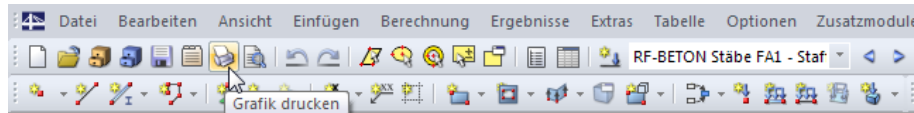



Bild 7.3: Schaltfläche [Drucken] in RFEM-Symbolleiste

Die Schaltfläche  steht auch in den Masken 3.1 und 3.2 von RF-BETON Stäbe sowie im Fenster des 3D-Renderings zur Verfügung (siehe [Bild 6.4](#), [Seite 143](#)).

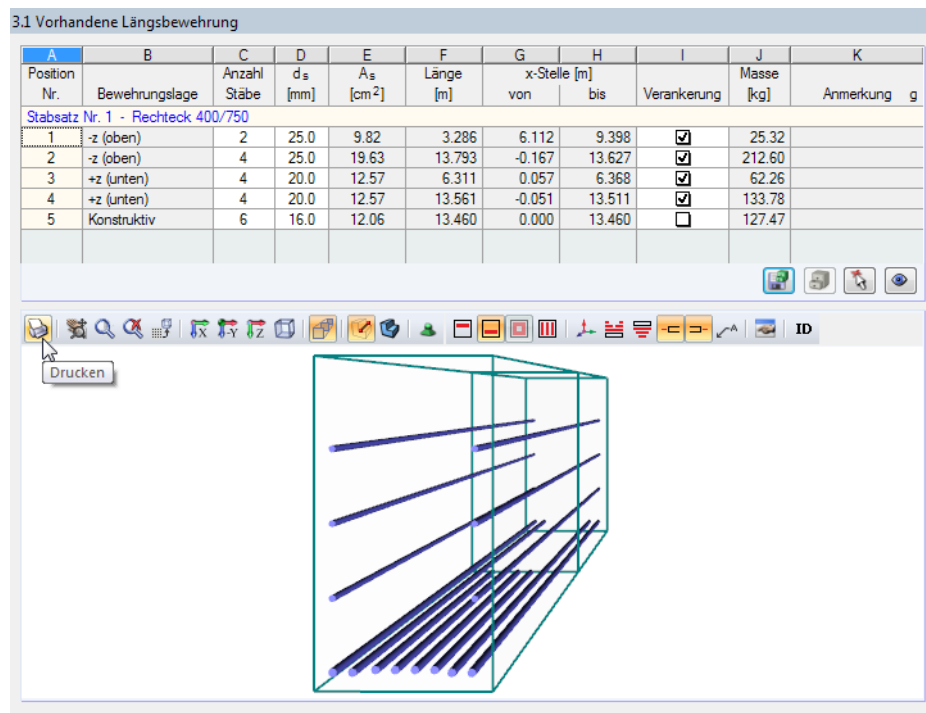


Bild 7.4: Schaltfläche [Drucken] in Maske 3.1 von RF-BETON Stäbe

Es erscheint der im [Bild 7.5](#) dargestellte Dialog *Grafikausdruck*.

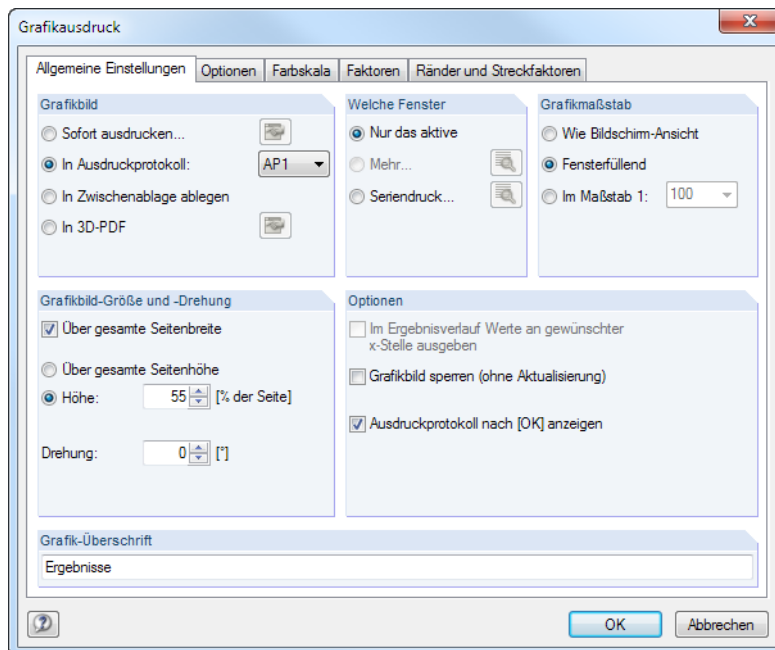
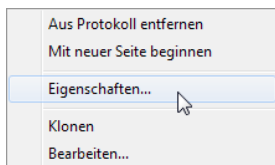


Bild 7.5: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RFEM-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.

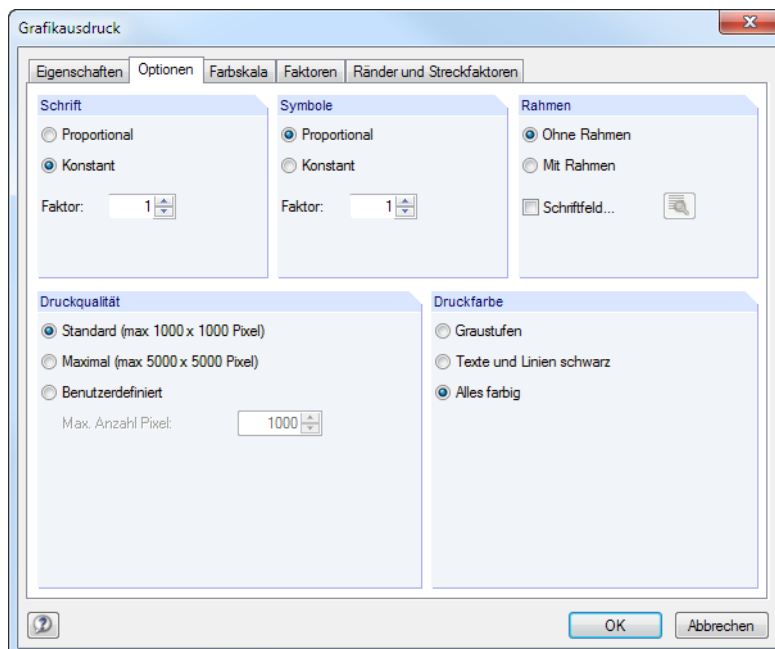


Bild 7.6: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*



Über die Kontextmenü-Option *Bearbeiten* kann die Ansicht (Blickwinkel, Objekt- und Werteanzeige etc.) im RFEM-Arbeitsfenster geändert werden.

Das Register *Basis* des *Grafikausdruck*-Dialogs bietet die Möglichkeit, die Grafik als *3D-PDF* abzu-
legen (siehe [Bild 7.5](#)). Damit können die Bewehrungsdarstellungen und Ergebnisgrafiken auch
ohne RFEM interaktiv betrachtet werden.

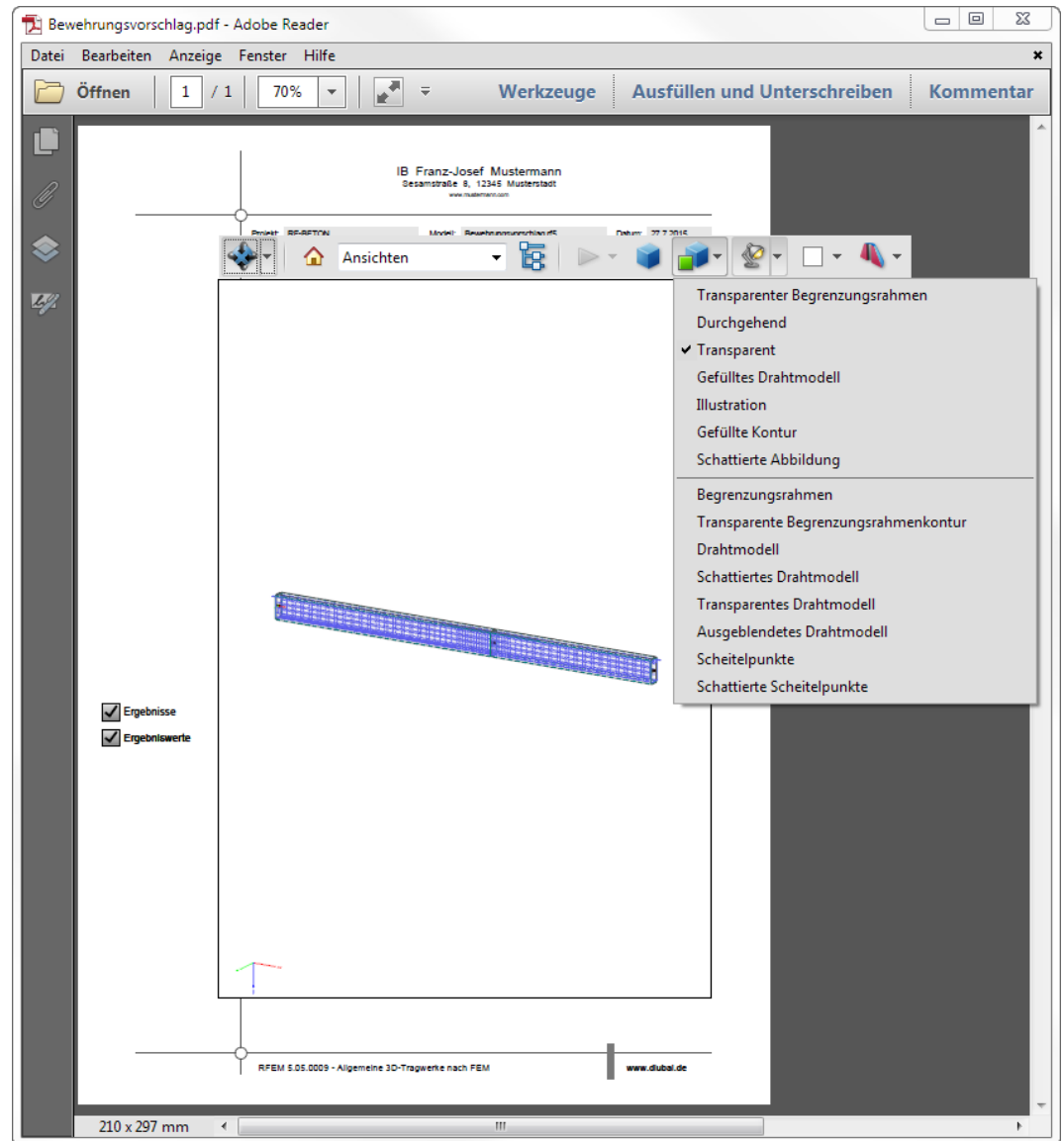


Bild 7.7: 3D-PDF aus RF-BETON Stäbe

8 Allgemeine Funktionen

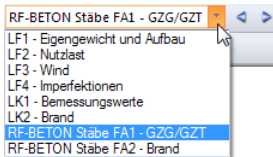
Dieses Kapitel stellt einige Menüfunktionen und Exportmöglichkeiten für die Bemessungsergebnisse vor.

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 RF-BETON Stäbe sind in RFEM über die Lastfall-Liste der Symbolleiste zugänglich.



Neuen Bemessungsfall anlegen

Ein Bemessungsfall wird angelegt über das RF-BETON Stäbe-Menü

Datei → Neuer Fall.

Es erscheint folgender Dialog.

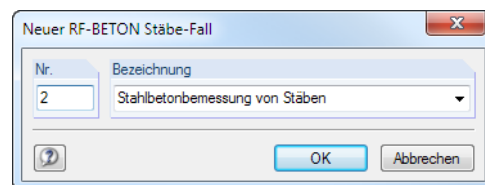


Bild 8.1: Dialog Neuer RF-BETON Stäbe-Fall

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 RF-BETON Stäbe-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der Bemessungsdaten.

Bemessungsfall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalls wird geändert über das RF-BETON Stäbe-Menü

Datei → Fall umbenennen.

Es erscheint folgender Dialog.

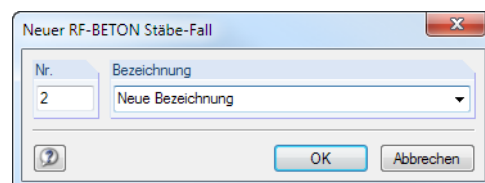


Bild 8.2: Dialog RF-BETON Stäbe-Fall umbenennen

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 RF-BETON Stäbe-Menü

Datei → Fall kopieren.

Es erscheint folgender Dialog.

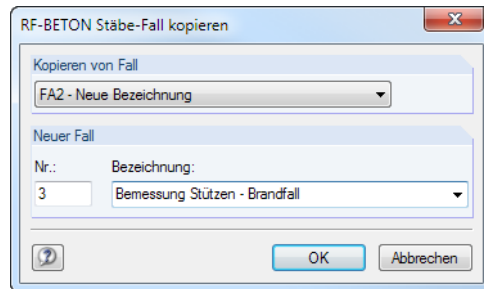


Bild 8.3: Dialog RF-BETON Stäbe-Fall kopieren

Es ist die *Nummer* und ggf. eine *Bezeichnung* für den neuen Fall festzulegen.

Bemessungsfall löschen

Bemessungsfälle lassen sich wieder löschen über das RF-BETON Stäbe-Menü

Datei → Fall löschen.

Es erscheint folgender Dialog.

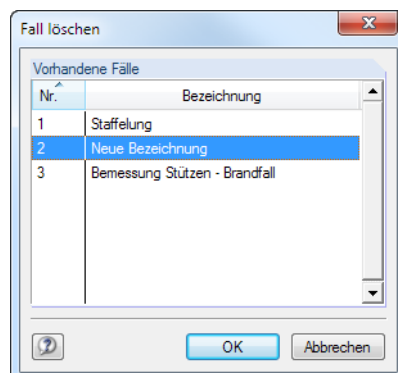


Bild 8.4: Dialog Fall löschen

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 RF-BETON Stäbe die Möglichkeit einer querschnittsweisen Optimierung an. Hierzu ist in Spalte C der Maske [1.3 Querschnitte](#) (siehe [Bild 3.17, Seite 63](#)) der relevante Querschnitt durch Anhaken festzulegen. Dies erfolgt am einfachsten über einen Klick in das Kästchen. Es erscheint folgender Dialog.

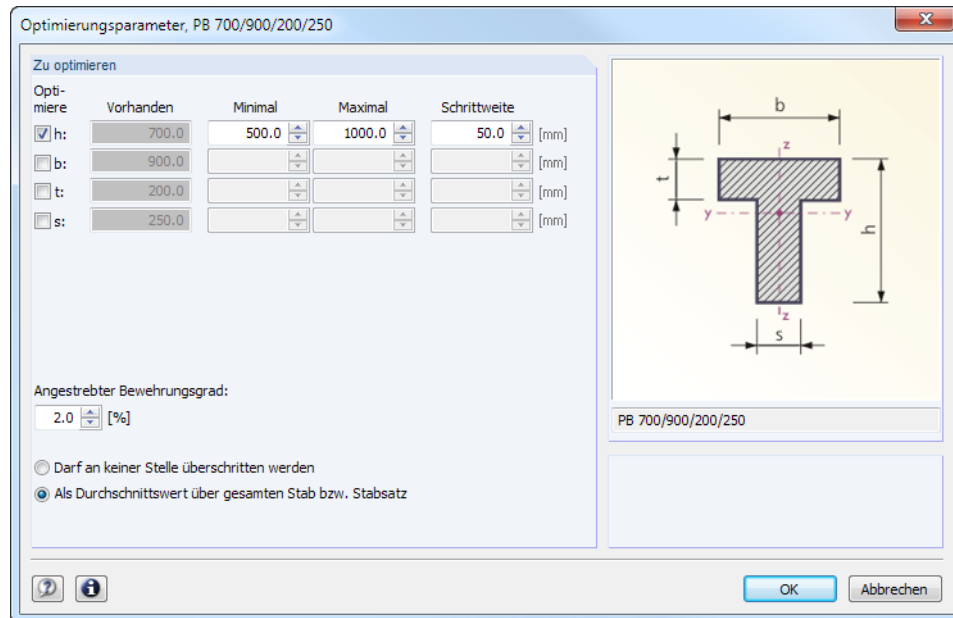


Bild 8.5: Dialog *Optimierungsparameter* eines Plattenbalkens

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 RF-BETON Stäbe, 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 RFEM 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 auch nach RFEM exportiert werden: Stellen Sie die Maske [1.3 Querschnitte](#) ein und wählen dann das Menü

Bearbeiten → Querschnitt an RFEM übergeben.

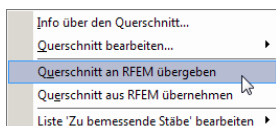
Über das Kontextmenü der Tabellenzeile in Maske [1.3](#) lässt sich der geänderte Querschnitt ebenfalls exportieren.

Vor der Übergabe erfolgt eine Abfrage, ob die Ergebnisse von RFEM gelöscht werden sollen.

Berechnung

Nach dem Start der [Berechnung] in RF-BETON Stäbe werden die RFEM-Schnittgrößen und die Nachweise in einem Rechenlauf ermittelt.

Wurde der Querschnitt noch nicht nach RFEM exportiert, so lässt sich mit der Kontextmenü-Option wieder der ursprüngliche *Querschnitt aus RFEM übernehmen*.



8.3 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RFEM und für die Zusatzmodule gemeinsam verwaltet. In RF-BETON Stäbe ist der Dialog zum Anpassen der Einheiten zugänglich über das Menü

Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.

Es erscheint der aus RFEM bekannte Dialog. In der Liste *Programm / Modul* ist RF-BETON Stäbe voreingestellt.

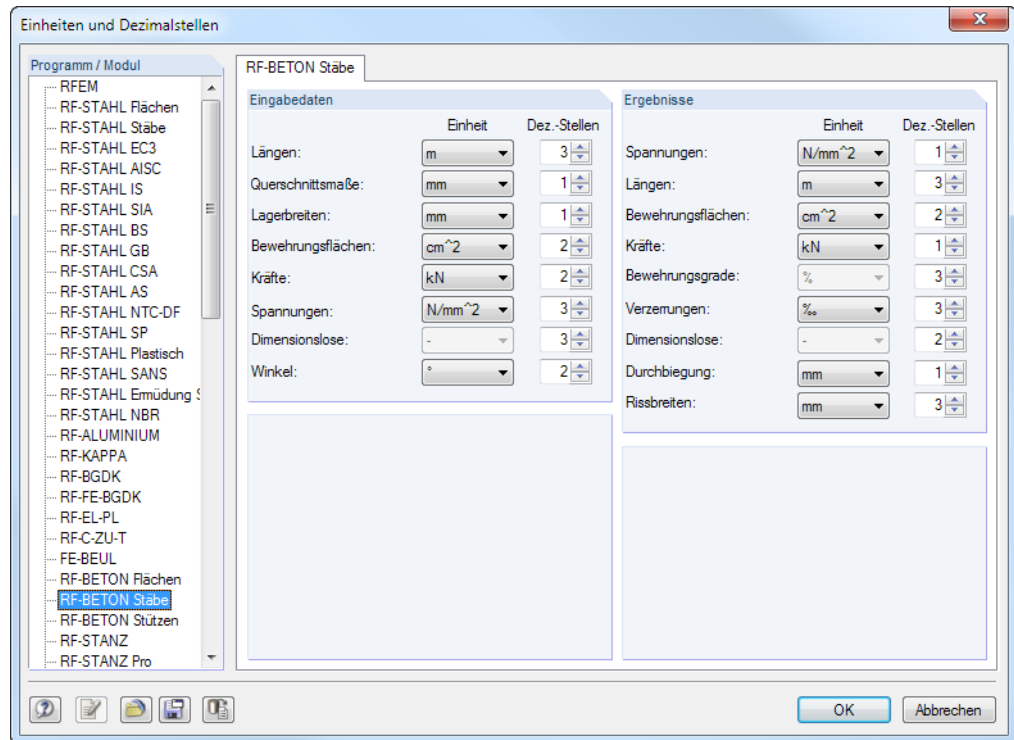


Bild 8.6: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Diese Funktionen sind im Kapitel 11.1.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

8.4 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von RF-BETON Stäbe 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 RF-BETON Stäbe können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe [Kapitel 7.1, Seite 151](#)) und dort exportiert werden über das Menü

Datei → Export in RTF.

Diese Funktion ist im Kapitel 10.1.11 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

MS Excel

RF-BETON Stäbe 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.

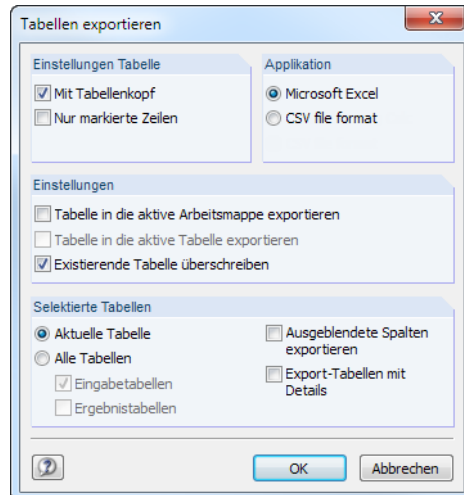


Bild 8.7: Dialog Tabellen exportieren

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden.

Excel wird automatisch aufgerufen, d. h. das Programm braucht vorher nicht geöffnet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Stab	Stelle	LF / LK	Bewehrungs-		Fehlermeldung		
2	Bewehrung	Nr.	x [m]	EK	fläche	Einheit	bzw. Hinweis		
3	Querschnitt Nr. 3 - Rechteck 500/900								
4	A _{s,z} (oben)	10	16,000	LK1	67,66	cm^2			
5	A _{s,z} (unten)	10	8,000	LK1	73,14	cm^2			
6	A _{s,T}	10	0,007	LK1	0,01	cm^2			
7	a _{sw,V} , Bügel	10	15,990	LK1	10,18	cm^2/m	58)		
8	a _{sw,T} , Bügel	10	16,000	LK1	0,00	cm^2/m			
9	Querschnitt Nr. 5 - Rechteck 550/900								
10	A _{s,z} (oben)	13	16,000	LK1	19,14	cm^2			
11	A _{s,z} (unten)	13	6,857	LK1	10,44	cm^2			
12	A _{s,T}	14	0,000	LK1	2,35	cm^2			
13	a _{sw,V} , Bügel	13	0,000	LK1	5,10	cm^2/m	58) 69)		
14	a _{sw,T} , Bügel	14	0,000	LK1	0,12	cm^2/m			
15									
16									
17									

Bild 8.8: Ergebnis in Excel

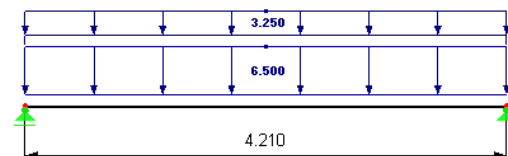
9 Beispiele

9.1 Direkte Verformungsberechnung

Dieses 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

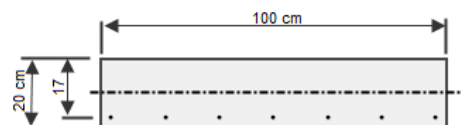


Bild 9.1: System, Belastung und Querschnitt

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	$1,50 \text{ kN/m}$ $\Rightarrow g_k = 6,50 \text{ kN/m}$
Nutzlast Büro	$2,00 \text{ kN/m}$
Trennwandzuschlag	$1,25 \text{ kN/m}$ $\Rightarrow q_k = 3,25 \text{ kN/m}$

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

$$\rho_e = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{4,45 \text{ cm}^2}{100 \cdot 20 \text{ cm}^2} = 0,002225$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200\,000}{10\,000} = 20,0$$

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_l

$$x_l = \frac{b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + \alpha_e \cdot A_s \cdot d - A_s \cdot d}{\alpha_e \cdot A_s - A_s + b \cdot h} = \frac{100 \cdot 20 \cdot \frac{20}{2} + 20,0 \cdot 4,45 \cdot 17 - 4,45 \cdot 17}{20 \cdot 4,45 - 4,45 + 100 \cdot 20} = 10,28 \text{ cm}$$

$$\xi = x_l/h = 10,28/20 = 0,514$$

$$\begin{aligned} \kappa &= 1 + 12 \cdot (0,5 - \xi)^2 + 12 \cdot (\alpha - 1) \cdot \rho \cdot \left(\frac{d}{h} - \xi \right)^2 \\ &= 1 + 12 \cdot (0,5 - 0,514)^2 + 12 \cdot (20 - 1) \cdot 0,002225 \cdot \left(\frac{17}{20} - 0,514 \right)^2 = 1,06 \end{aligned}$$

$$I_{c,l} = \kappa \cdot b \cdot \frac{h^3}{12} = 1,06 \cdot 100 \cdot \frac{20^3}{12} = 70\,667 \text{ cm}^4 = 0,0007067 \text{ m}^4$$

$$W_{c,l} = \frac{I_{c,l}}{h - x_l} = \frac{70\,667}{20 - 10,28} = 7\,270,2 \text{ cm}^3$$

$$S_l = A_s \cdot (d - x_l) = 4,45 \cdot (17 - 10,28) = 29,904 \text{ cm}^3 = 0,000299 \text{ m}^3$$

Krümmung infolge Belastung

$$\left(\frac{1}{r} \right)_M = \frac{M_{Ed}}{E_{c,eff} \cdot I_c} = \frac{0,01850 \text{ MNm}}{10\,000 \text{ MN/m}^2 \cdot 0,0007067 \text{ m}^4} = 0,00262 \text{ m}^{-1}$$

Krümmung infolge Schwindens

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cs} = \varepsilon_{cs\infty} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_l}{I_c} = 0,0005 \cdot 20,0 \cdot \frac{0,000299 \text{ m}^3}{0,0007067 \text{ m}^4} = 0,00042 \text{ m}^{-1}$$

Gesamtkrümmung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{tot,I}} = \left(\frac{1}{r}\right)_M + \left(\frac{1}{r}\right)_{cs} = 0,00262 + 0,00042 = 0,00304 \text{ m}^{-1}$$

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 $M_{Ed} = 18,50 \text{ kNm}$ wie folgt:

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right)} = \frac{18,5 \times 10^{-3}}{4,45 \times 10^{-4} \cdot \left(0,17 - \frac{0,0468}{3}\right)} = 269,60 \text{ N/mm}^2$$

Die Krümmung nach abgeschlossener Rissbildung ermittelt sich zu:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{M,II} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{1,346 \times 10^{-3}}{170 - 46,8} = 0,010931 \text{ m}^{-1}$$

mit

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{269,26}{200\,000} = 1,346 \times 10^{-3}$$

Krümmung infolge Schwindens

Die Krümmung im Zustand II wird in der Handrechnung mit einer Tabelle aus [13] ermittelt (siehe Bild 9.2).

$$\omega_1 = \alpha_e \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} = 20,0 \cdot \frac{4,45 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm} \cdot 17 \text{ cm}} = 0,052 \rightarrow \beta = 1,10$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cs,II} = \varepsilon_{cs\infty} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_{II}}{I_{II}} = \varepsilon_{cs\infty} \cdot \beta \cdot \frac{1}{d} = 0,0005 \cdot 1,10 \cdot \frac{1}{0,17 \text{ m}} = 0,00324 \text{ m}^{-1}$$

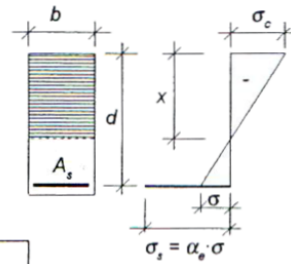
Gesamtkrümmung

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\text{tot,II}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{M,II} + \left(\frac{1}{r}\right)_{cs,II} = 0,01093 + 0,00324 = 0,01417 \text{ m}^{-1}$$

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_i	$\xi = k_s$	$\zeta = k_t$	$2/(\xi \cdot \zeta)$	$2/(\xi^2 \cdot \zeta)$	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 :

$$\omega_i = \alpha_s \cdot \frac{A_s}{b \cdot d}$$

E-Moduln-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 :

$$\alpha_s \cdot \left(\frac{S}{J} \right) = \beta \cdot \frac{1}{d}$$

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:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot W_I = 2,2 \cdot 0,007270 \times 10^3 = 16,0 \text{ kNm}$$

Die Spannung $\sigma_{s,cr}$ unmittelbar nach Rissbildung wird mit M_{cr} wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{s,cr} = \frac{M_{cr}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = \frac{16,0 \times 10^{-3}}{4,45 \times 10^{-4} \cdot \left(0,17 - \frac{0,0468}{3} \right)} = 232,87 \text{ N/mm}^2$$

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:

$$f = k \cdot I_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{r_m} = \frac{5}{48} \cdot 4,21^2 \text{ m}^2 \cdot 0,01005 \text{ m}^{-1} = 18,6 \text{ mm}$$

9.1.6 Ergebnis in RF-BETON Stäbe

Für die Vergleichsrechnung mit RF-BETON Stäbe 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.

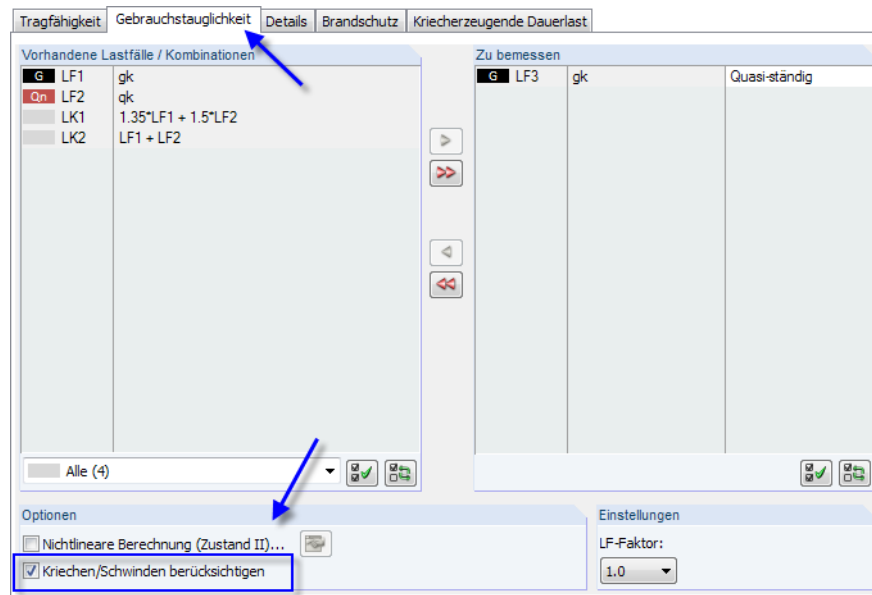


Bild 9.3: Vorgaben für Gebrauchstauglichkeitsnachweis in Maske 1.1 *Basisangaben*

Kriechzahl und Schwindmaß können dann in Maske 1.3 *Querschnitte* direkt definiert werden.

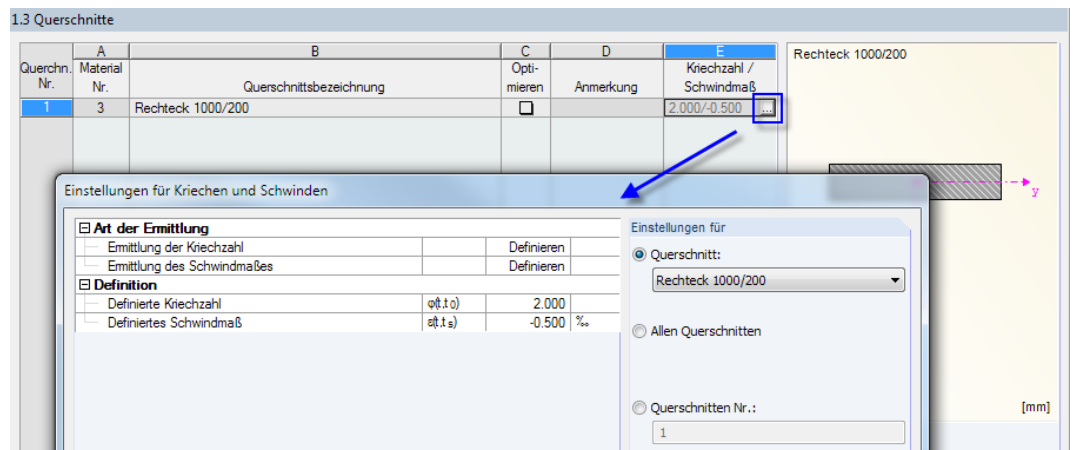


Bild 9.4: Definieren von Kriechzahl und Schwindmaß in Maske 1.3 *Querschnitte*

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_{1,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.	A	B	C	D	E	F	G
	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 $\ell/250$ voreingestellt.

Berechnung

Die [Berechnung] liefert den maximalen Verformungswert von **18,9 mm** in Stabmitte, der die Handrechnung bestätigt. Der Grenzwert von $\ell/250$ 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.

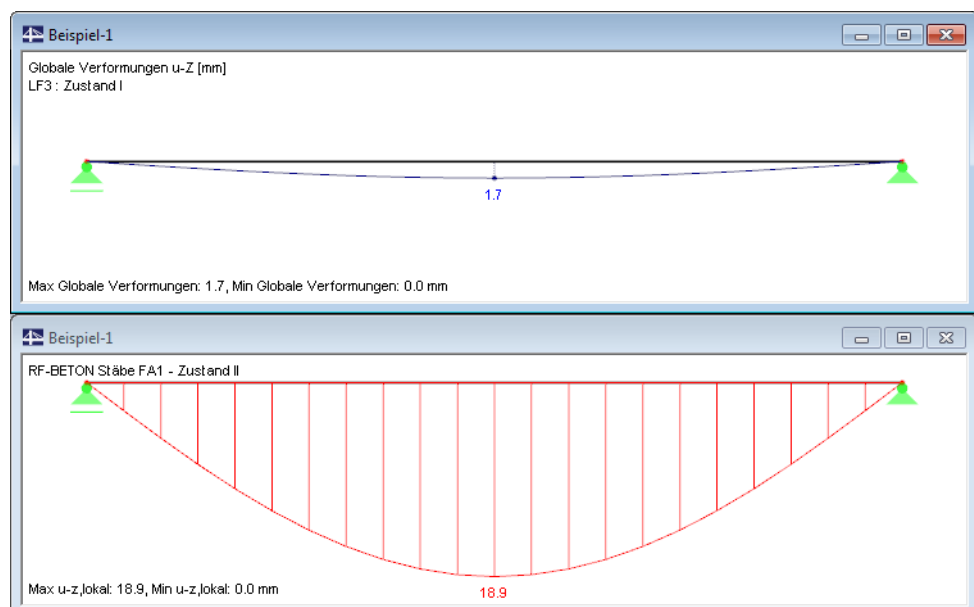


Bild 9.8: Verformungen im Zustand I und Zustand II

9.2 Nichtlineare Verformungsberechnung

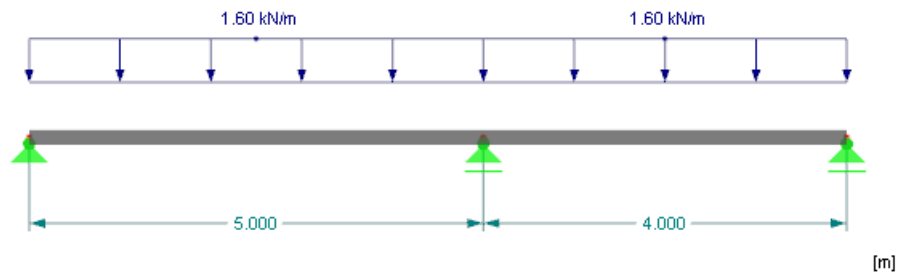
Das zweite Beispiel stellt die Grundprinzipien einer nichtlinearen Berechnung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit vor.

Es wird eine Vergleichsrechnung für ein Zweifeldsystem durchgeführt. Dabei werden der verwendete Ansatz zur Begrenzung der Biegeschlankheit und die angesetzte Zugfestigkeit genauer betrachtet.

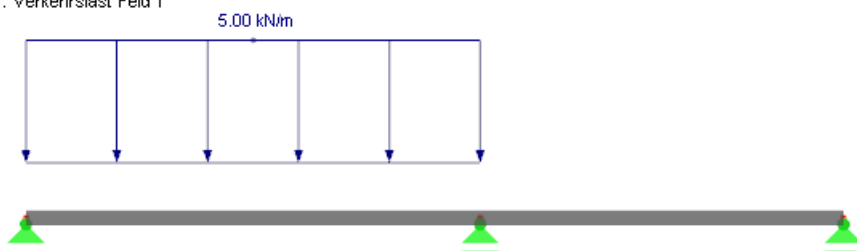
9.2.1 Eingabedaten

System und Belastung

LF1 : Ständige Belastung



LF2 : Verkehrslast Feld 1



LF3 : Verkehrslast Feld 2

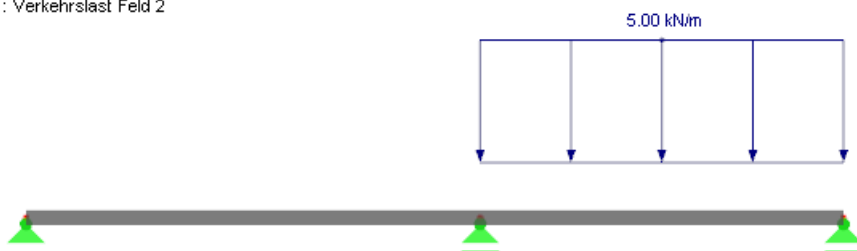


Bild 9.9: System und Belastung

Plattendicke	16 cm
Material	Beton C20/25 BSt 500 S (A)
Expositionsklasse	XC1
Betondeckung	$c_{\text{nom}} = 22 \text{ mm}$

Kombination für Grenzzustand der Tragfähigkeit

Mit dem Anhängen der entsprechenden *Basisangaben*-Option erzeugt RFEM automatisch eine Ergebniskombination, die für die Nachweise der Tragfähigkeit verwendet wird. Diese Ergebniskombination bildet die Umhüllende folgender Lastkombinationen:

$$\begin{aligned} \text{LK1:} & 1,35 \cdot \text{LF1} + 1,5 \cdot \text{LF2} + 1,5 \cdot \text{LF3} \\ \text{LK2:} & 1,35 \cdot \text{LF1} + 1,5 \cdot \text{LF2} \\ \text{LK3:} & 1,35 \cdot \text{LF1} + 1,5 \cdot \text{LF3} \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned} \text{LK4:} & \text{LF1} + 0,6 \cdot \text{LF2} + 0,6 \cdot \text{LF3} \\ \text{LK5:} & \text{LF1} + 0,6 \cdot \text{LF2} \\ \text{LK6:} & \text{LF1} + 0,6 \cdot \text{LF3} \end{aligned}$$

9.2.2 Eingaben in RF-BETON Stäbe

Für die Bestimmung der Bewehrung wird nur der Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet. Hierzu wird in Maske 1.1 *Basisangaben* die EK1 zur Bemessung ausgewählt.

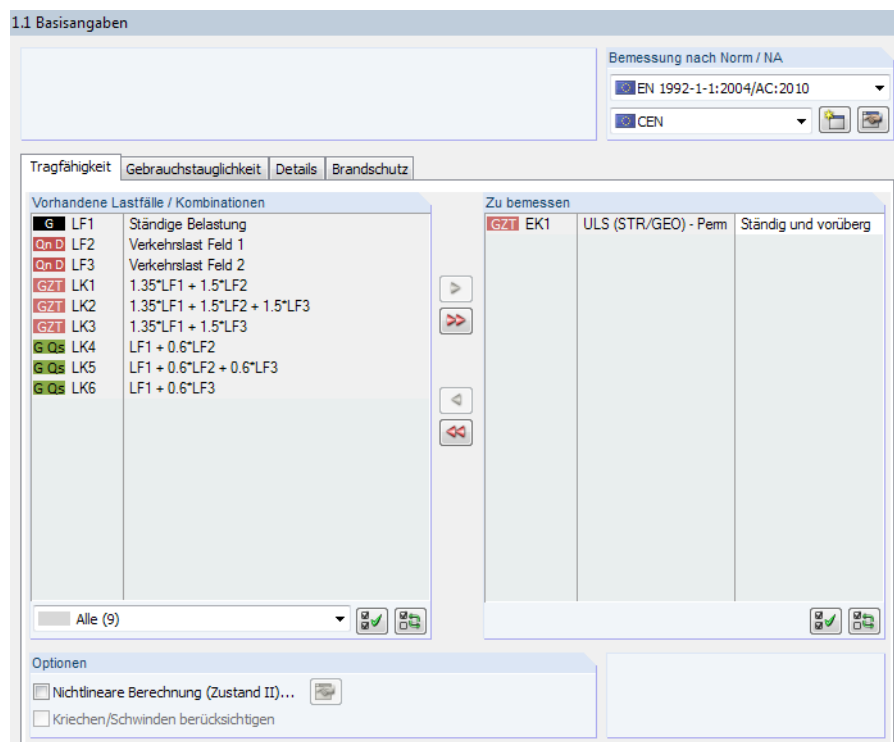


Bild 9.10: Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Tragfähigkeit*

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 172).

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.	A Knoten Nr.	B Lagerbreite b [mm]	C Direkte Lagerung	D Monolithische Verbindung	E End-Lager	F 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

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

Bewehrungsanordnung

Mindestbewehrung

Schubfuge

EN 1992-1-1

Querschnitt
1 - Rechteck 100/16
Rechteck 100/16

Einstellungen
☒ Bewehrungsvorschlag vornehmen

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

OK Abbrechen

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

Position Nr.	Bewehrungslage	Anzahl Stäbe	d_s [mm]	A_s [cm ²]	Länge [cm]	G x-Stelle [cm] von	H bis	I Verankerung	J Masse [kg]	K 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.

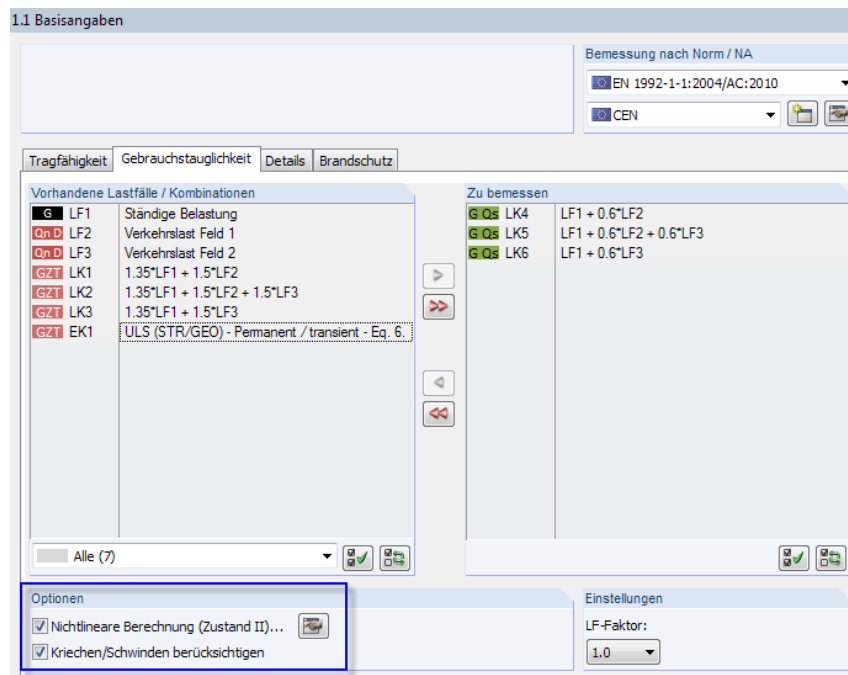


Bild 9.15: Maske 1.1 Basisangaben, Register *Gebrauchstauglichkeit*

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.

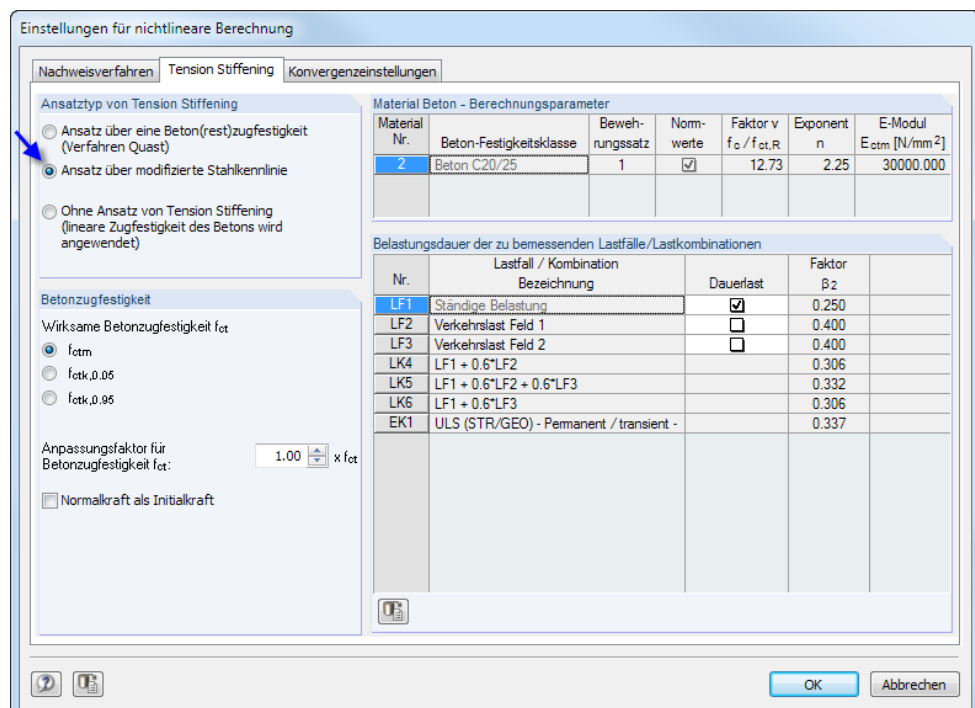



Bild 9.16: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Tension Stiffening*

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. Über die Schaltfläche  ist jedoch die FE-Teilung der Stäbe wie folgt anzupassen.

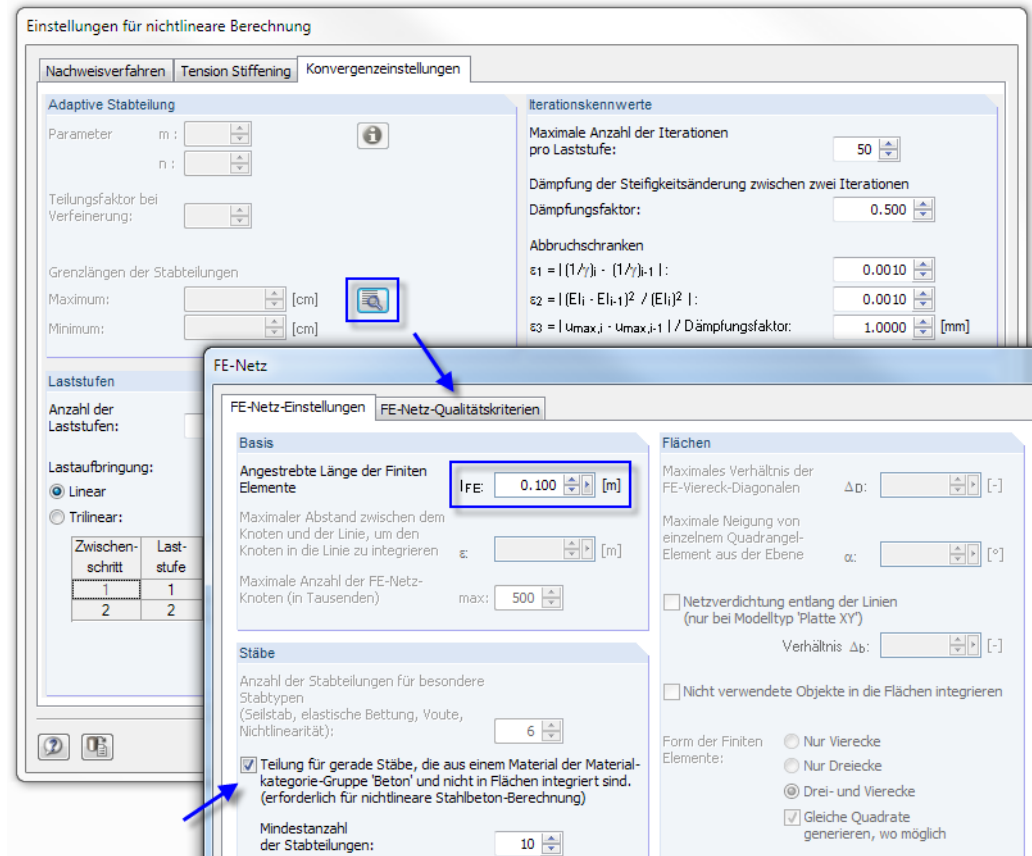


Bild 9.17: Dialoge *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* und *FE-Netz*

In Maske 1.3 *Querschnitte* erfolgen abschließend die Vorgaben zu Kriechen und Schwinden.

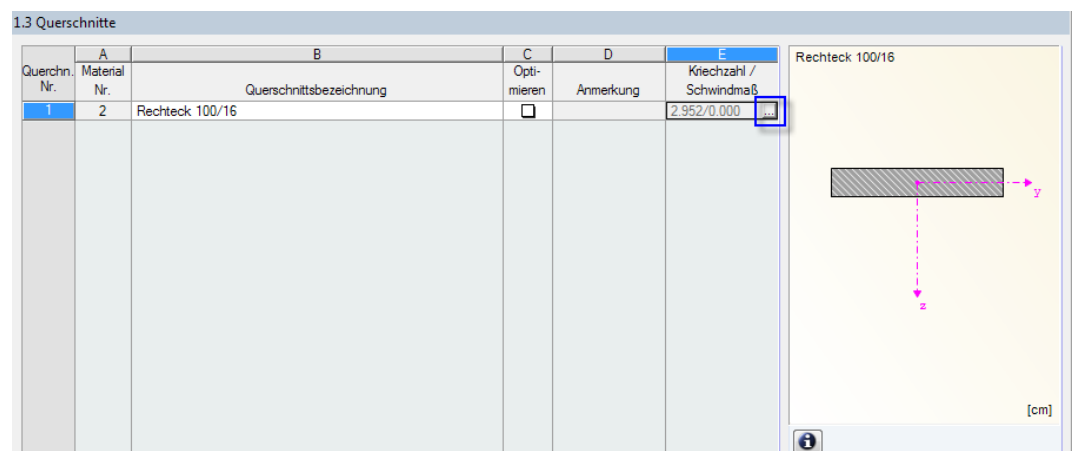

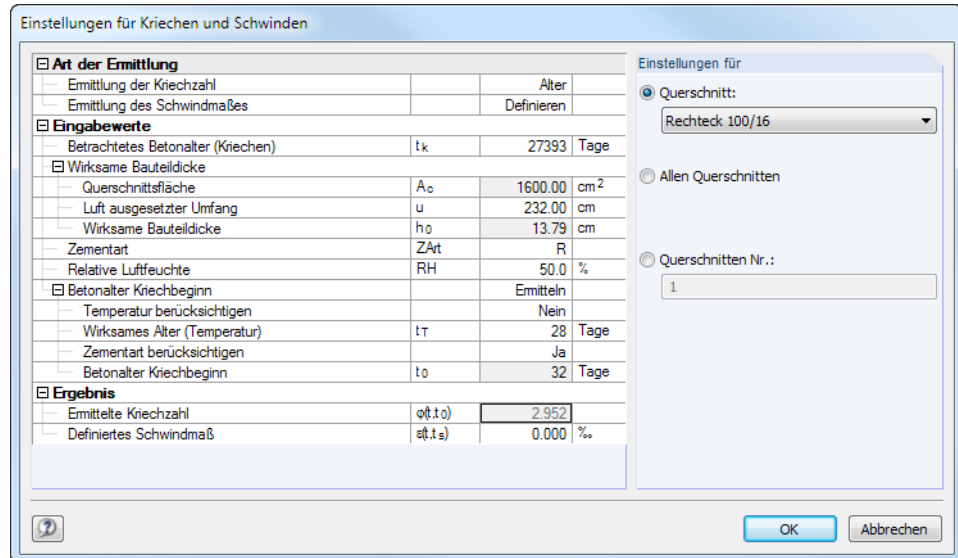


Bild 9.18: Maske 1.3 *Querschnitte*

Die Zellschaltfläche  in Spalte E ruft den Dialog zur Eingabe der Kriech- und Schwindparameter auf.



Einstellungen für Kriechen und Schwinden			
Art der Ermittlung			
<input type="checkbox"/> Ermittlung der Kriechzahl		Alter	
<input type="checkbox"/> Ermittlung des Schwindmaßes		Definieren	
Eingabewerte			
<input type="checkbox"/> Betrachtetes Betonalter (Kriechen)	tk	27393	Tage
<input type="checkbox"/> Wirksame Bauteildicke			
Querschnittsfläche	A _c	1600.00	cm ²
Luft ausgesetzter Umfang	u	232.00	cm
Wirksame Bauteildicke	h ₀	13.79	cm
Zementart	ZArt	R	
Relative Luftfeuchte	RH	50.0	%
<input type="checkbox"/> Betonalter Kriechbeginn			
Temperatur berücksichtigen		Nein	
Wirksames Alter (Temperatur)	t _T	28	Tage
Zementart berücksichtigen		Ja	
Betonalter Kriechbeginn	t ₀	32	Tage
Ergebnis			
Ermittelte Kriechzahl	$\phi(t, t_0)$	2.952	
Definiertes Schwindmaß	$\epsilon(t, t_s)$	0.000	‰

Einstellungen für

☒ Querschnitt:
Rechteck 100/16

☐ Allen Querschnitten

☐ Querschnitt Nr.:
1

OK Abbrechen

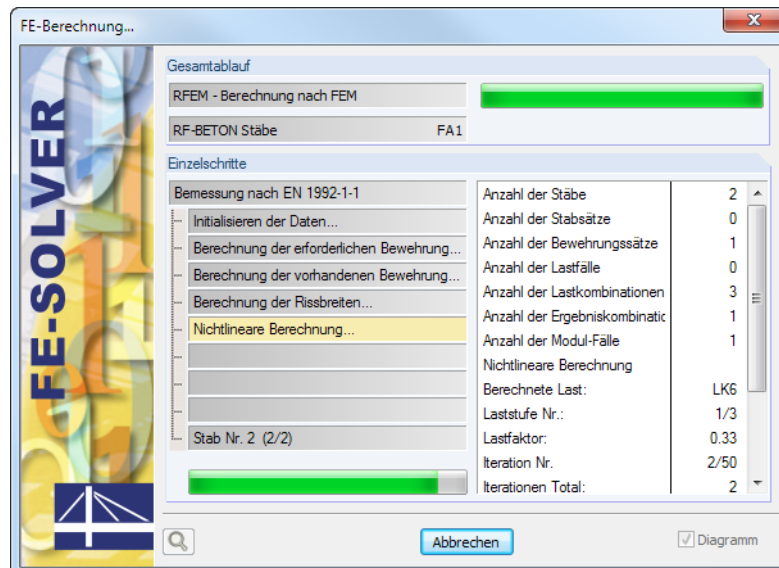
Bild 9.19: Dialog *Einstellungen für Kriechen und Schwinden*

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.



FE-Berechnung...

Gesamtablauf

RFEM - Berechnung nach FEM

RF-BETON Stäbe FA1

Einzelschritte

Bemessung nach EN 1992-1-1

Initialisieren der Daten...

Berechnung der erforderlichen Bewehrung...

Berechnung der vorhandenen Bewehrung...

Berechnung der Rissbreiten...

Nichtlineare Berechnung...

Stab Nr. 2 (2/2)

Anzahl der Stäbe: 2

Anzahl der Stabsätze: 0

Anzahl der Bewehrungssätze: 1

Anzahl der Lastfälle: 0

Anzahl der Lastkombinationen: 3

Anzahl der Ergebniskombinationen: 1

Anzahl der Modul-Fälle: 1

Nichtlineare Berechnung

Berechnete Last: LK6

Laststufe Nr.: 1/3

Lastfaktor: 0.33

Iteration Nr.: 2/50

Iterationen Total: 2

Abbrechen

☒ Diagramm

Bild 9.20: Nichtlineare Berechnung

9.2.5 Ergebnisse von RF-BETON Stäbe

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	2.000	LK4	22.47	22.47	0.13	
		LK5	20.19	20.19	0.12	
		LK6	6.37	6.37	0.06	
	2.100	LK4	22.65	22.65	0.13	
		LK5	20.32	20.32	0.12	
		LK6	6.41	6.41	0.06	
	2.200	LK4	22.72	22.72	0.13	
		LK5	20.34	20.34	0.12	
		LK6	6.42	6.42	0.06	
	2.300	LK4	22.66	22.66	0.13	
		LK5	20.25	20.25	0.12	
		LK6	6.39	6.39	0.06	
	2.400	LK4	22.49	22.49	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 $x = 2,200$ m vor. Die Verschiebung $u = 22,72$ 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	17.64	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			
– 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
– Rissmoment 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			
☐ 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	$1/r_I$	5.3220E-03	1/m
– Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yI}$	3.3255E-16	1/m
– Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zI}$	5.3220E-03	1/m
– Hauptkrümmungsrichtung	α_I	0.0	°
– Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sI}	58.54	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}	42926200.00	mm ⁴
– Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zII}	1.33333E+10	mm ⁴
– Fläche	A_{II}	20121.70	mm ²
☐ Spannungs- und Dehnungsberechnung			
– Hauptkrümmung	$1/r_{II}$	1.3700E-02	1/m
– Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yII}$	4.7563E-21	1/m
– Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zII}$	1.3700E-02	1/m
– Hauptkrümmungsrichtung	α_{II}	0.0	°
– Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sII}	242.30	N/mm ²
– Stahldehnung	ϵ_{sII}	1.211	‰
– Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cII}	-4.80	N/mm ²
– Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cII}	-0.638	‰
– Stahlspannung für Rissmoment	σ_{srII}	164.80	N/mm ²
– Stahldehnung für Rissmoment	ϵ_{srII}	0.824	‰
☐ Querschnittseigenschaften			
☐ Querschnittssteifigkeiten (Sekantenwerte)			
☐ Globale Knotenverformungen			
☐ Lokale Knotenverformungen			
☐ Rissbreite			
☐ Sicherheitsnachweis			
– Sicherheitsfaktor	γ	2.437	
– Ausnutzungsgrad	$1/\gamma$	0.410	

Bild 9.22: Zwischenergebnisse für Stab 1 an Stelle $x = 2,200$ m, LK 4

9.2.6 Handrechnung

Die Ergebnisse werden für die Stelle $x = 2,20$ 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 $(1 + \varphi) = 3,95$:

$$E_c = E_{cm} = 7\,594,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{2c1} = -7,9 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{c1u} = -13,8 \text{ ‰}$$

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 σ_{srI} und Stahldehnung ε_{srI} für Rissmoment

$$\sigma_{srI} = f_{ctm} \cdot \frac{5,5}{8} \cdot \alpha_e = 2,2 \cdot \frac{5,5}{8} \cdot 26,33 = 39,82 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{srI} = \frac{\sigma_{sr}}{E_s} = \frac{39,82}{200\,000} = 1,991 = 0,199 \text{ ‰}$$

Fiktive Stahl- und Betonspannung für tatsächliches Moment $M = 17,64 \text{ kNm}$

$$\sigma_{sI} = \frac{M}{I} \cdot z_{sI} \cdot \alpha_e = \frac{1\,764}{44\,041} \cdot 5,5 \cdot 26,33 = 5,77 \text{ kN/cm}^2 = 57,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = -\frac{M}{I} \cdot z_{cc} = -\frac{1\,764}{44\,041} \cdot 8 = -0,32 \text{ kN/cm}^2 = -3,2 \text{ N/mm}^2$$

Krümmung im Zustand I $(1/r)_{z,I} = (1/r)_I$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{z,I} = \frac{M}{E \cdot I} = \frac{0,01764}{7\,594,9 \cdot 4,4\,041 \times 10^{-4}} = 5,283 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Ergebnisse von RF-BETON Stäbe

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	$1/r_I$	5.3220E-03	1/m
Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yI}$	3.3255E-16	1/m
Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zI}$	5.3220E-03	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_I	0.0	°
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_I	58.54	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: Detaillergebnisse für Zustand I

9.2.6.3 Zustand II

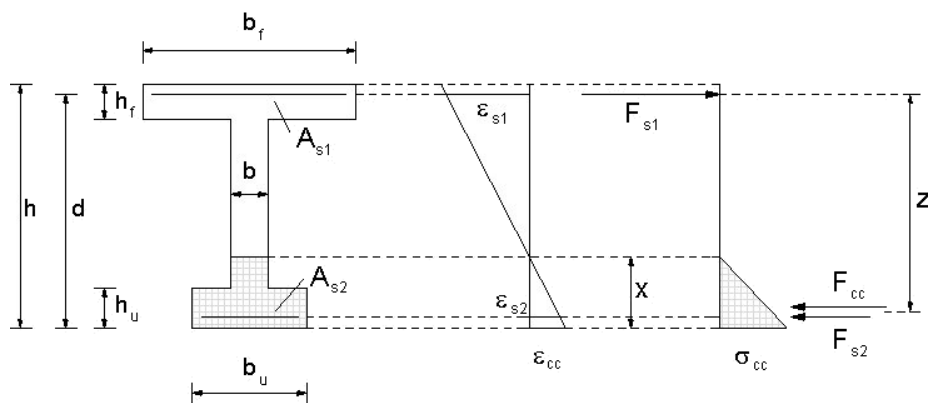
Querschnittswerte im Zustand II

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 σ_{sII} und Stahldehnung ε_{sII} für Rissmoment

Um die Spannungen und Dehnungen bei Rissbildung zu ermitteln, kann im Regelfall von vereinfachten Annahmen (linear elastischem Werkstoffgesetzen) 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

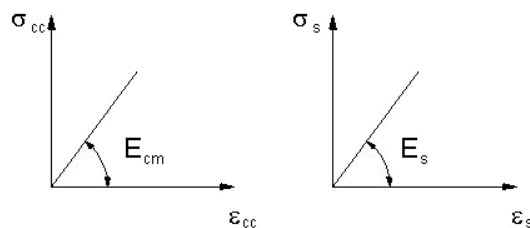


Bild 9.24: Beziehungen zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen für Gebrauchslasten

Berechnung der Druckzonenhöhe x_{II}

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} = \frac{6,22 \text{ cm}^2}{100 \cdot 13,5 \text{ cm}^2} = 0,004607$$

$$\begin{aligned} \xi &= -\alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right) + \sqrt{\alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right)'' + 2 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{A_{s2} \cdot d_2}{A_{s1} \cdot d}\right)} \\ &= -26,33 \cdot 0,004607 \cdot (1 + 1) + \\ &\quad + \sqrt{\left[26,33 \cdot 0,004607 \cdot (1 + 1)\right]'' + 2 \cdot 26,33 \cdot 0,004607 \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot 2,5}{1 \cdot 13,5}\right)} \\ &= 0,3459 \end{aligned}$$

$$x_{II} = \xi \cdot d = 0,346 \cdot 13,5 = 4,67 \text{ cm}^4$$

Trägheitsmoment

$$\begin{aligned} \kappa &= 4 \cdot \xi^3 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot (1 - \xi)^2 + 12 \cdot \alpha_e \cdot \rho \cdot \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \cdot \left(\xi - \frac{d_2}{2}\right)^2 \\ &= 4 \cdot 0,346^3 + 12 \cdot 26,33 \cdot 0,00460 \cdot (1 - 0,346)^2 + \\ &\quad + 12 \cdot 26,33 \cdot 0,0046 \cdot 1 \cdot \left(0,346 - \frac{2,5}{13,5}\right)^2 \\ &= 0,826 \end{aligned}$$

$$I_{c,II} = \kappa \cdot b \cdot \frac{d^3}{12} = 0,826 \cdot 100 \cdot \frac{13,5^3}{12} = 16\,935 \text{ cm}^4$$

Spannungen für Risschnittgrößen

$$\sigma_{cr,II} = \frac{M}{I_{y,II}} \cdot x = \frac{1\,210}{16\,935} \cdot 4,67 \cdot 10 = 3,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sr1,II} = \alpha_e \cdot \frac{M}{I_{y,II}} \cdot (d - x) = 26,33 \cdot \frac{1\,210}{16\,935} \cdot (13,5 - 4,67) \cdot 10 = 166,12 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sr2,II} = \sigma_{sr1,II} \cdot \frac{x - d_2}{d - x} = 166,12 \cdot \frac{4,67 - 2,5}{13,5 - 4,67} = 40,82 \text{ N/mm}^2$$

Stahldehnung für Risschnittgrößen

$$\varepsilon_{sr1,II} = \frac{\sigma_{sr1,II}}{E_s} = \frac{166,012}{200\,000} \cdot 1\,000 = 0,8\,306 \text{ ‰}$$

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 1992-1-1, Bild 3.2 bzw. 3.3.

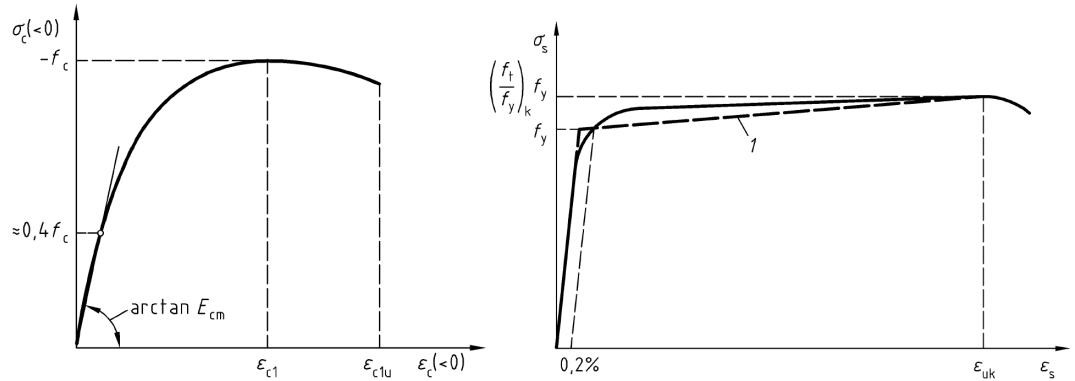


Bild 9.25: Beziehungen zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen für Gebrauchslasten nach [2]

Die genaue Berechnung der Spannungen im Zustand II erfolgt mithilfe einer Drittanwendung zur genauen Spannungsintegration. Für $M = 17,64 \text{ kNm}$ liefert sie folgende Ergebnisse:

$$\sigma_{s1,II} = 242,27 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{s2,II} = -59,07 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{s1,II} = 1,211 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2,II} = -0,638 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{c,II} = -0,6378 \text{ ‰}$$

Ergebnisse von RF-BETON Stäbe

☐ Zustand II			
☐ Querschnittseigenschaften			
Trägheitsmoment um die y-Achse	I_{yII}	42926200.00	mm^4
Trägheitsmoment um die z-Achse	I_{zII}	1.33333E+10	mm^4
Fläche	A_{II}	20121.70	mm^2
☐ Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Hauptkrümmung	$1/r_{II}$	1.3700E-02	1/m
Krümmung in y-Richtung	$1/r_{yII}$	4.7563E-21	1/m
Krümmung in z-Richtung	$1/r_{zII}$	1.3700E-02	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{II}	0.0	°
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sII}	242.30	N/mm^2
Stahldehnung	ε_{sII}	1.211	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cII}	-4.80	N/mm^2
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ε_{cII}	-0.638	‰
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}	M_u	43.00	kNm
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	43.00	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	0.00	kN
Einwirkende Schnittgrößen R	M	17.64	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

$\varepsilon_{s2,II} = 1,211 \text{ ‰}$: Stahldehnung im Zustand II

$\varepsilon_{sr,II} = 0,8306 \text{ ‰}$: Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand II

$\varepsilon_{sr,I} = 0,199 \text{ ‰}$: Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand I

$\beta_t = 0,306$: 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.

$$I_{y,m} \cdot E = \frac{M_y}{(1/r)_{z,m}} = \frac{0,01764}{1,226 \times 10^{-2}} = 1,43883 \text{ MNm}^2 = 1438,83 \text{ kNm}^2$$

mit

$M_y = 17,64 \text{ kNm}$: Vorhandenes Moment

$(1/r)_{z,m} = 1,226 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$: Stahldehnung für Risschnittgröße im Zustand II

Ergebnisse von RF-BETON Stäbe

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: Detailliergebnisse der mittleren Krümmungen

9.2.7 Ergebnisbewertung

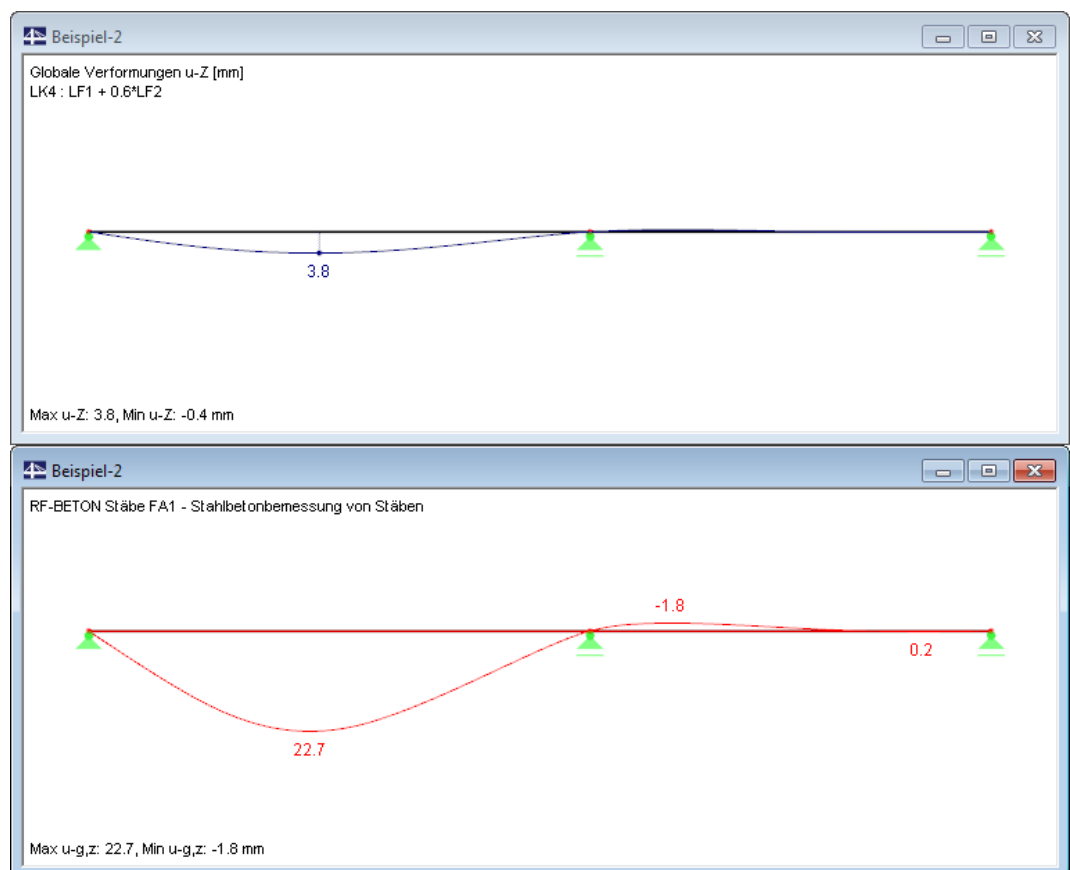


Bild 9.28: Verformungen nach linear elastischer Berechnung (oben) und nichtlinearer Berechnung mit Kriechen (unten)

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 $\ell/250$.

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.

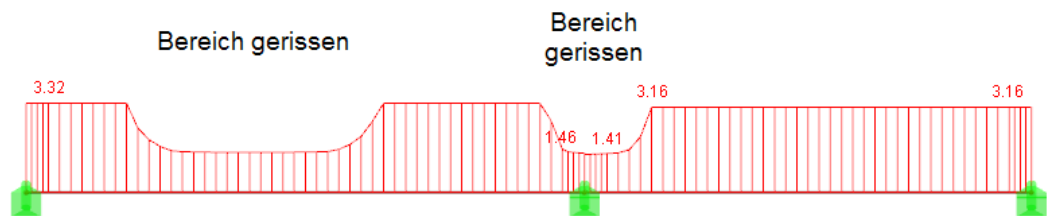
Kriechen

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 $I_{y,m} \cdot E$: 3.32, Min $I_{y,m} \cdot E$: 1.41 MNm^2

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 Spannungsgradienten 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

$$f_{cm} = 20 + 5 = 25 \text{ N/mm}^2$$

: Der Mittelwert wird abweichend zur DIN 1045-1 über den Summanden 5 N/mm^2 berücksichtigt.

$$C_v = 0,85 - 0,2 \cdot 0,16 = 0,818 \geq 0,65$$

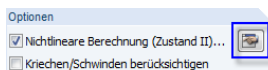
: Berücksichtigung der Vorschädigung des Bauteils

$$C_h = \frac{2,6 + 24 \cdot 0,16}{1,0 + 40 \cdot 0,16} = 0,870$$

: Einfluss der Bauteildicke

$$C_{\eta} = 1$$

: Einfluss der Ausmitte $\eta = M/(N \cdot h) \rightarrow \infty$ 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).

Nachweisverfahren Tension Stiffening Konvergenzeinstellungen

Ansatztyp von Tension Stiffening

☐ Ansatz über eine Beton(rest)zugfestigkeit (Verfahren Quast)

☒ Ansatz über modifizierte Stahlkennlinie

☐ Ohne Ansatz von Tension Stiffening (lineare Zugfestigkeit des Betons wird angewendet)

Betonzugfestigkeit

Wirksame Betonzugfestigkeit f_{ct}

☒ f_{ctm}

☐ $f_{ctk,0.05}$

☐ $f_{ctk,0.95}$

Anpassungsfaktor für Betonzugfestigkeit f_{ct} : x f_{ct}

☐ Normalkraft als Initialkraft

Material Beton - Berechnungsparameter

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Normwerte	Faktor v	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
2	Beton C20/25	1	<input checked="" type="checkbox"/>	8.96	2.25	30000.000

Belastungsdauer der zu bemessenden Lastfälle/Lastkombinationen

Nr.	Lastfall / Kombination	Bezeichnung	Dauerlast	Faktor β_z
LF1	Ständige Belastung		<input checked="" type="checkbox"/>	0.250
LF2	Verkehrslast Feld 1		<input type="checkbox"/>	0.400
LF3	Verkehrslast Feld 2		<input type="checkbox"/>	0.400
LK4	LF1 + 0.6*LF2			0.306
EK1	ULS (STR/GEO) - Permanent / transient -			0.337

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 $u_1 = 12,8$ mm führt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Anhaltswert von $\ell/250 = 5\,000/250 = 20$ 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.

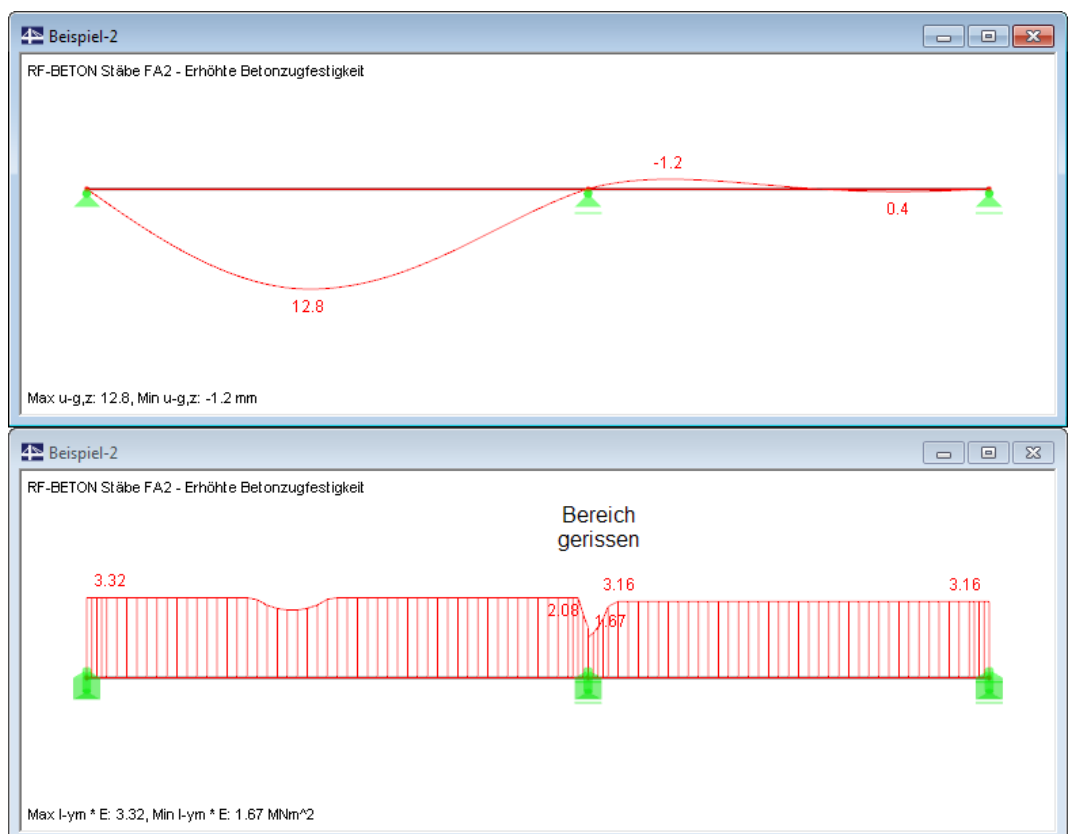


Bild 9.31: Verformung und Biegesteifigkeit bei erhöhter Betonzugfestigkeit (Spannungsgradient)

Es zeigt sich, wie empfindlich die nichtlineare Berechnung auf veränderte Berechnungsparameter reagiert. Der Unterschied ist bei Bauteilen mit großen Steifigkeitssprüngen zwischen gerissenen und ungerissenen Zustand besonders ausgeprägt.

9.3 Stabilitätsuntersuchung Kragstütze

9.3.1 Modell in RFEM

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

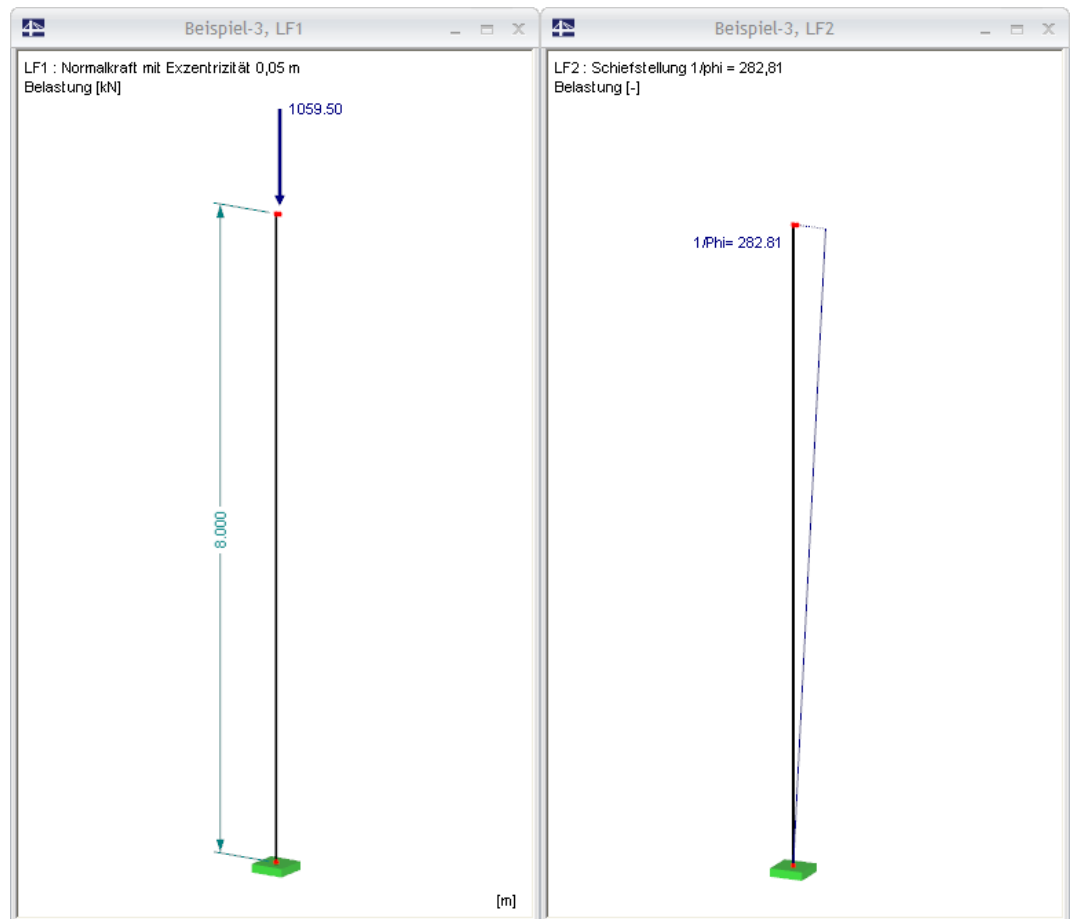


Bild 9.32: System und Belastung

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:

LK 1 LF1 + LF2

- Alternativen:

LK 2 0,20 · LF1 + LF2

LK 3 0,50 · LF1 + LF2

LK 4 0,70 · LF1 + LF2

LK 5 0,80 · LF1 + LF2

LK 6 0,90 · LF1 + LF2

LK 7 0,92 · LF1 + LF2

LK 8 0,94 · LF1 + LF2

LK 9 0,96 · LF1 + LF2

LK 10 0,97 · LF1 + LF2

LK 11 0,98 · LF1 + LF2

LK 12 0,99 · LF1 + LF2

LK 13 1,05 · LF1 + LF2

LK 14 1,10 · LF1 + LF2

Für die Berechnung wird keine Steifigkeitsreduzierung durch den Teilsicherheitsfaktor γ_M vorgenommen (RFEM-Voreinstellung).

Ergebnisse

Die Berechnung mit RFEM 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: RFEM-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 RF-BETON Stäbe

Die wesentlichen Eingaben sind in den folgenden Bildern dargestellt.

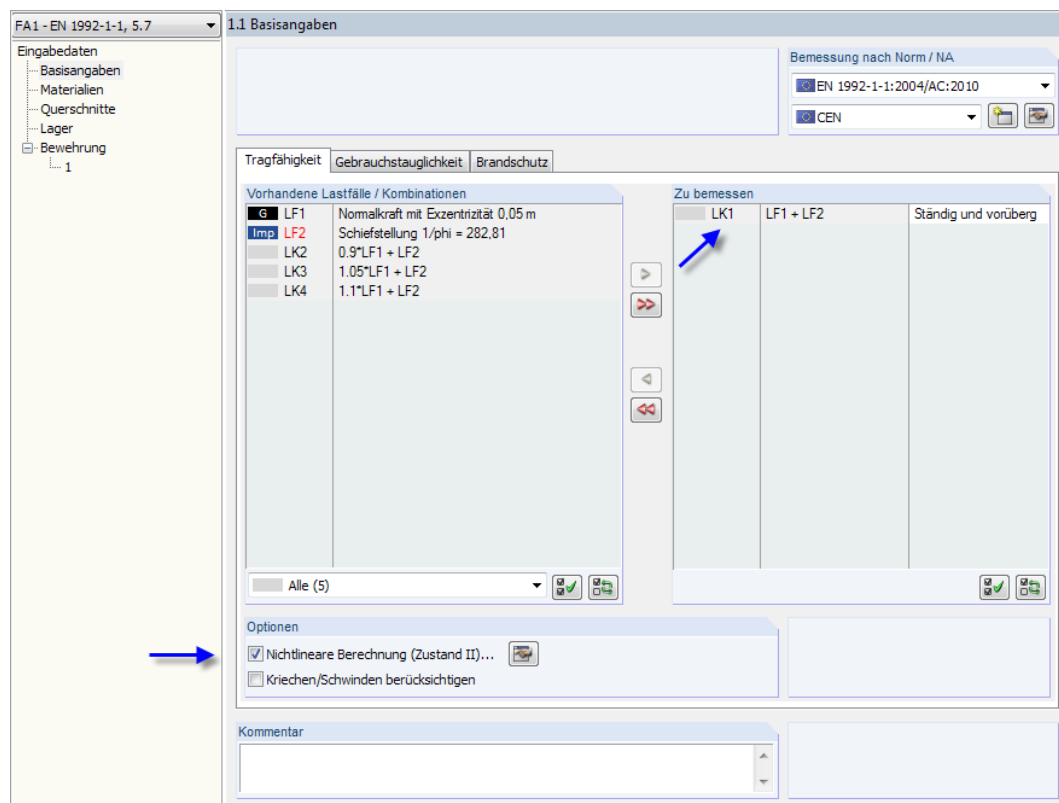
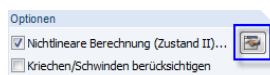


Bild 9.33: Basisangaben zur nichtlinearen Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.7



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.

Einstellungen für nichtlineare Berechnung

Nachweisverfahren | Tension Stiffening | Konvergenzeinstellungen

Berechnungsansatz - Formänderungen und Schnittgrößen

- ☒ Verfahren mit Durchschnittswerten der Materialeigenschaften und globalem Teilsicherheitsbeiwert (EN 1992-1-1, 5.7)
 - Globaler Teilsicherheitsbeiwert auf der Traglastseite γ_R : 1.30
 - ☒ Abminderung des Elastizitätsmoduls für Beton auf 0,85 \cdot E_{cm} (empfohlen für völlig gedrückte Querschnitte)
 - ☐ Allgemeines Bemessungsverfahren bei Stäben mit Druck nach Theorie II. Ordnung (EN 1992-1-1, 5.8.6)
 - ☒ Ausnutzung des Fließbereiches zulassen
 - ☐ Auslegung der Längsbewehrung für Ausnutzungsgrad

Berechnungsansatz - Schub- und Torsionssteifigkeit

Schubsteifigkeit:

- ☒ Ansetzen der linear-elastischen Schubsteifigkeit
- ☐ Abminderung der Schubsteifigkeit affin zur Biegesteifigkeit

Torsionssteifigkeit:

- ☒ Berechnung nach Ansatz von Leonhardt
- ☐ Pauschale Abminderung der Torsionssteifigkeit bezogen auf den ungerissenen Zustand: [%]

Export der nichtlinearen Steifigkeit

- ☐ Die nichtlineare Steifigkeit für definierte Bemessungslast(en) zum Gebrauch im RFEM speichern
 - ☒ Individuell
 - ☐ Passend zu Referenzlast: LK1 - LF1 + LF2

OK | Abbrechen

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 QUASt 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.

Einstellungen für nichtlineare Berechnung

Nachweisverfahren | Tension Stiffening | Konvergenzeinstellungen

Ansatztyp von Tension Stiffening

- ☒ Ansatz über eine Beton(rest)zugfestigkeit (Verfahren Quast)
- ☐ Ansatz über modifizierte Stahlkennlinie
- ☐ Ohne Ansatz von Tension Stiffening (lineare Zugfestigkeit des Betons wird angewendet)

Tension stiffening

Wirksame Zugstärke $f_{ct,R}$:

- ☐ f_{ctm}
- ☒ $f_{ctk,0.05}$
- ☐ $f_{ctk,0.95}$

Anpassungsfaktor der Zugstärke $f_{ct,R}$: 0.60 $\times f_{ct}$

☐ Normalkraft als Initialkraft

Material Beton - Berechnungsparameter für ständige und vorübergehende Bemessungssituation

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Normwerte	Faktor $v_{f_{ct,R}}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C20/25-mod.	1	<input checked="" type="checkbox"/>	22.22	2.76	22304.00

Material Beton - Berechnungsparameter für außergewöhnliche Bemessungssituation

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Normwerte	Faktor $v_{f_{ct,R}}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C20/25-mod.	1	<input checked="" type="checkbox"/>	22.22	2.76	22304.00

Belastungsdauer der zu bemessenden Lastfälle/Lastkombinationen

Nr.	Lastfall / Kombination Bezeichnung	Dauerlast	Faktor β_2
LF1	Normalkraft mit Exzentrizität 0,05 m	<input checked="" type="checkbox"/>	0.250
LF2	Schiefstellung $1/\phi = 282.81$	<input type="checkbox"/>	0.400
LK1	LF1 + LF2		0.325

OK | Abbrechen

Bild 9.35: Wirksame Betonzugspannung für Tension Stiffening

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.

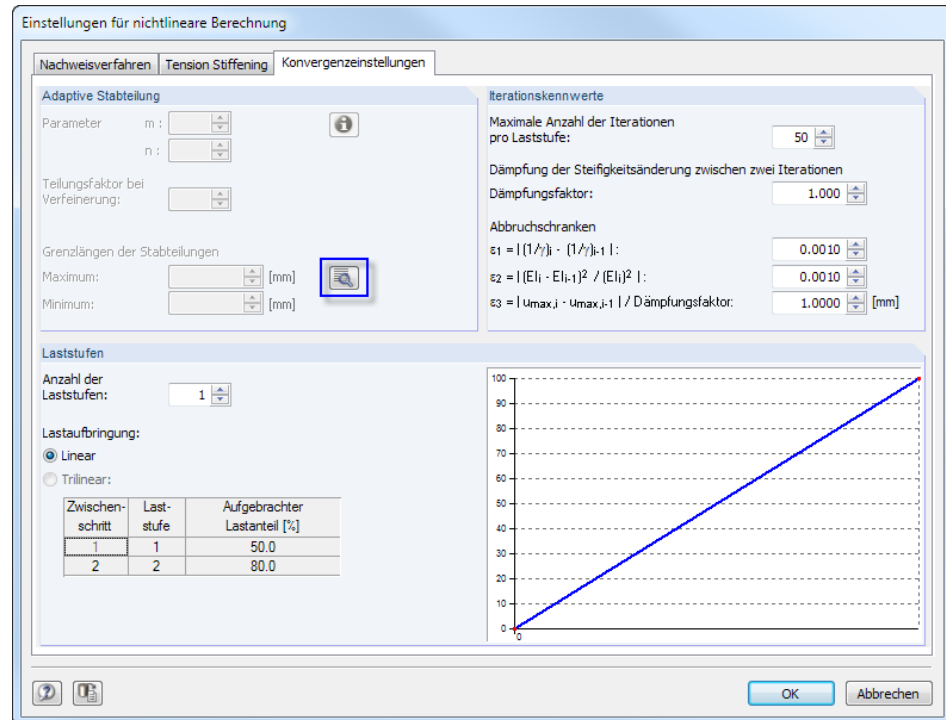


Bild 9.36: Konvergenzeinstellungen



Um den Verlauf der Steifigkeiten hinreichend genau abzubilden, wird die Maschenweite des FE-Netzes auf 0,20 m begrenzt.

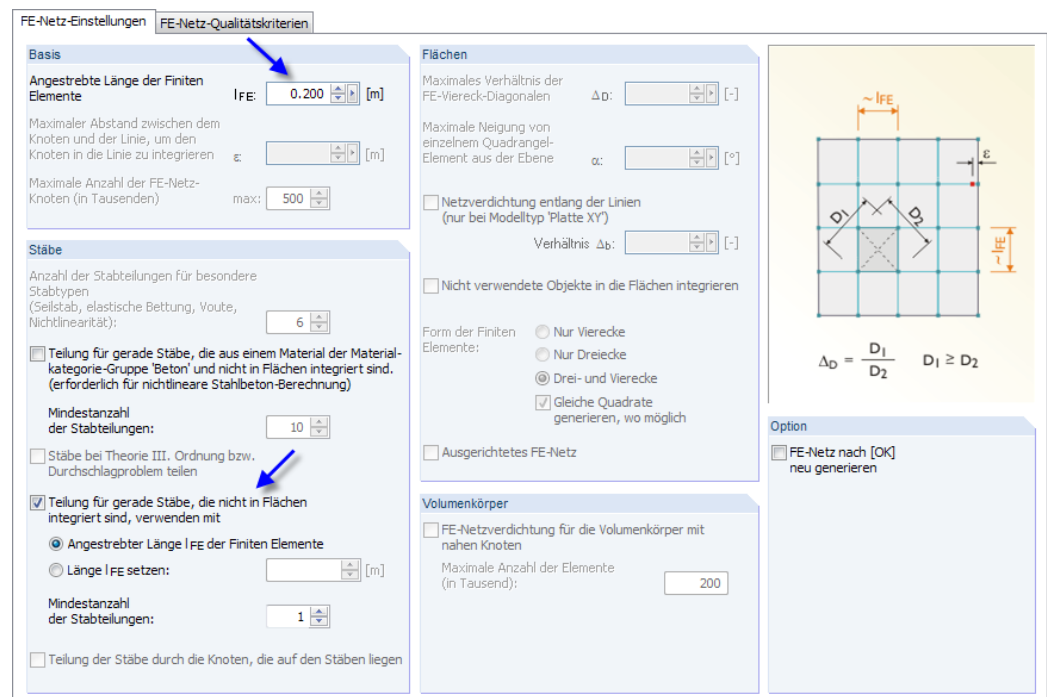


Bild 9.37: FE-Netz-Einstellungen

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 RF-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.

Bild 9.38: Vorgabe des Stabstahldurchmessers

Die Betondeckung wird mit $c_{nom} = 27,5 \text{ mm}$ gewählt, sodass sich ein Achsabstand von 40 mm ergibt.

Bild 9.39: 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 9.40: 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 $\gamma [-]$	Ausnutzung $1/\gamma [-]$	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr. 1 - Rechteck 40/40					
1	0.0	LK1	1.989	0.503	

☐ Alle Lastfälle Max: 0.51 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 0.0, LK1

<input checked="" type="checkbox"/> Bruchschnittgrößen R_u			
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	-542.37	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	-2738.65	kN
<input checked="" type="checkbox"/> Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Bruchkrümmung	$1/r_{Rd}$	6.2989E-03	1/m
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/r_{yRd}$	3.6335E-19	1/m
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/r_{zRd}$	-6.2989E-03	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	180.0	°
<input checked="" type="checkbox"/> Berechnungsdetails			
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	201.23	N/mm ²
Stahndehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	1.006	‰
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 Betondehnung	ϵ_{ctRd}	1.507	‰
<input checked="" type="checkbox"/> Einwirkende Schnittgrößen R ($\gamma_R = 1.30$)			
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	-272.75	kNm

Bild 9.41: Maske 6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

Die Interpretation der Ergebnisse ist im vorherigen Beispiel (Kapitel 9.2) beschrieben.

Mit dem Sicherheitsfaktor $\gamma = 1,989$ 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.

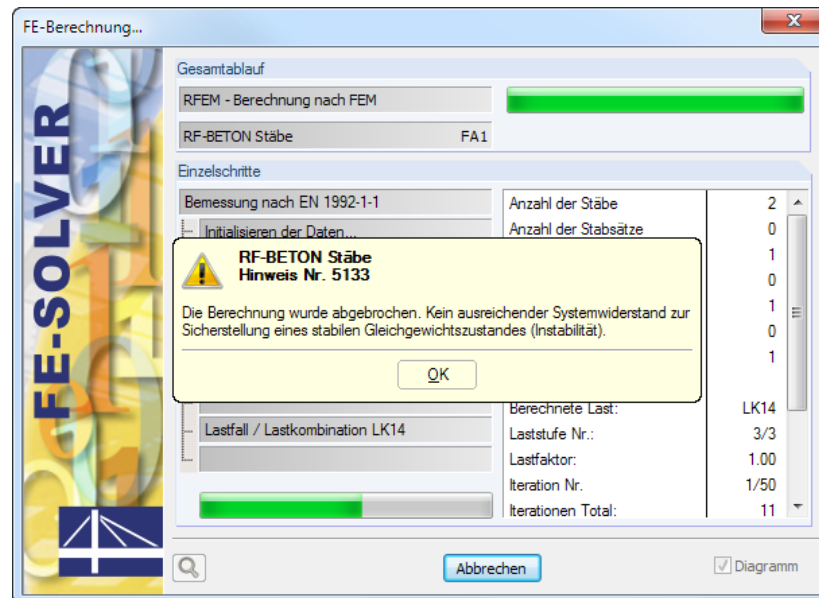


Bild 9.42: Abbruch der Berechnung für LK 14 wegen Instabilität

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 RF-BETON Stäbe

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 RF-BETON-Menü

Datei → Fall kopieren.

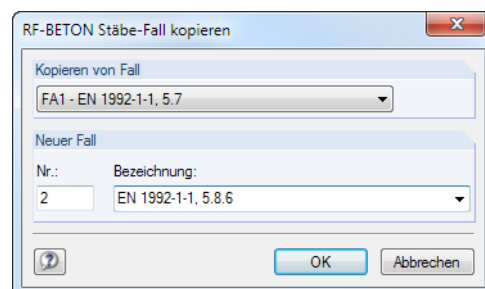
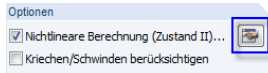


Bild 9.43: Kopieren des ersten Bemessungsfalls



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 festgelegt.

Bild 9.44: 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 48). 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.

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Norm-werte	Faktor v $f_c / f_{ct,R}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C20/25-mod.	1	<input checked="" type="checkbox"/>	15.15	3.45	21916.70

Material Nr.	Beton-Festigkeitsklasse	Bewehrungssatz	Norm-werte	Faktor v $f_c / f_{ct,R}$	Exponent n	E-Modul E_{ctm} [N/mm ²]
1	Beton C20/25-mod.	1	<input checked="" type="checkbox"/>	15.15	3.45	21916.70

Nr.	Lastfall / Kombination Bezeichnung	Dauerlast	Faktor β_2
LF1	Normalkraft mit Exzentrizität 0,05 m	<input checked="" type="checkbox"/>	0.250
LF2	Schiefstellung 1/phi = 282,81	<input type="checkbox"/>	0.400
LK1	LF1 + LF2		0.325

Bild 9.45: 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 RF-BETON-Berechnung nach EN 1992-1-1, 5.8.6 vergleichen zu können, wird in Maske 1.6 *Bewehrung* die Mindestbewehrung auf $A_{s,oben} = A_{s,unten} = 25 \text{ cm}^2$ abgeändert.

Bild 9.46: Ändern 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	2.163	0.462	

Alle Lastfälle Max: 0.47 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Stab Nr. 1, x: 0.0, LK1

Bruchschnittgrößen R_d			
Bruchmoment um die y-Achse	M_{yRd}	-354.57	kNm
Bruchmoment um die z-Achse	M_{zRd}	0.00	kNm
Bruchnormalkraft	N_{Rd}	-2291.05	kN

Spannungs- und Dehnungsberechnung			
Bruchkrümmung	$1/r_{Rd}$	5.2364E-03	1/m
Bruchkrümmung in y-Richtung	$1/r_{yRd}$	-2.5093E-19	1/m
Bruchkrümmung in z-Richtung	$1/r_{zRd}$	-5.2364E-03	1/m
Hauptkrümmungsrichtung	α_{Rd}	180.0	°

Berechnungsdetails			
Stahlspannung in der maßgebenden Faser	σ_{sRd}	112.39	N/mm²
Stahndehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{sRd}	0.562	‰
Betonspannung in der maßgebenden Faser	σ_{cRd}	-13.33	N/mm²
Betondehnung in der maßgebenden Faser	ϵ_{cRd}	-3.500	‰
Rechnerisch angesetzte Betonrestzugfestigkeit	σ_{ctRd}	0.00	N/mm²
Maximale Betondehnung	ϵ_{ctRd}	1.013	‰

Einwirkende Schnittgrößen R			
Biegemoment um die y-Achse	M_{yEd}	-163.96	kNm

Bild 9.47: Maske 6.1.1 Tragfähigkeit für nichtlineare Berechnung querschnittsweise

Mit der gewählten Bewehrung ergibt sich für die Einspannstelle ein Sicherheitsfaktor γ von 2,163 (zum Vergleich: $\gamma = 1,989$ 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.

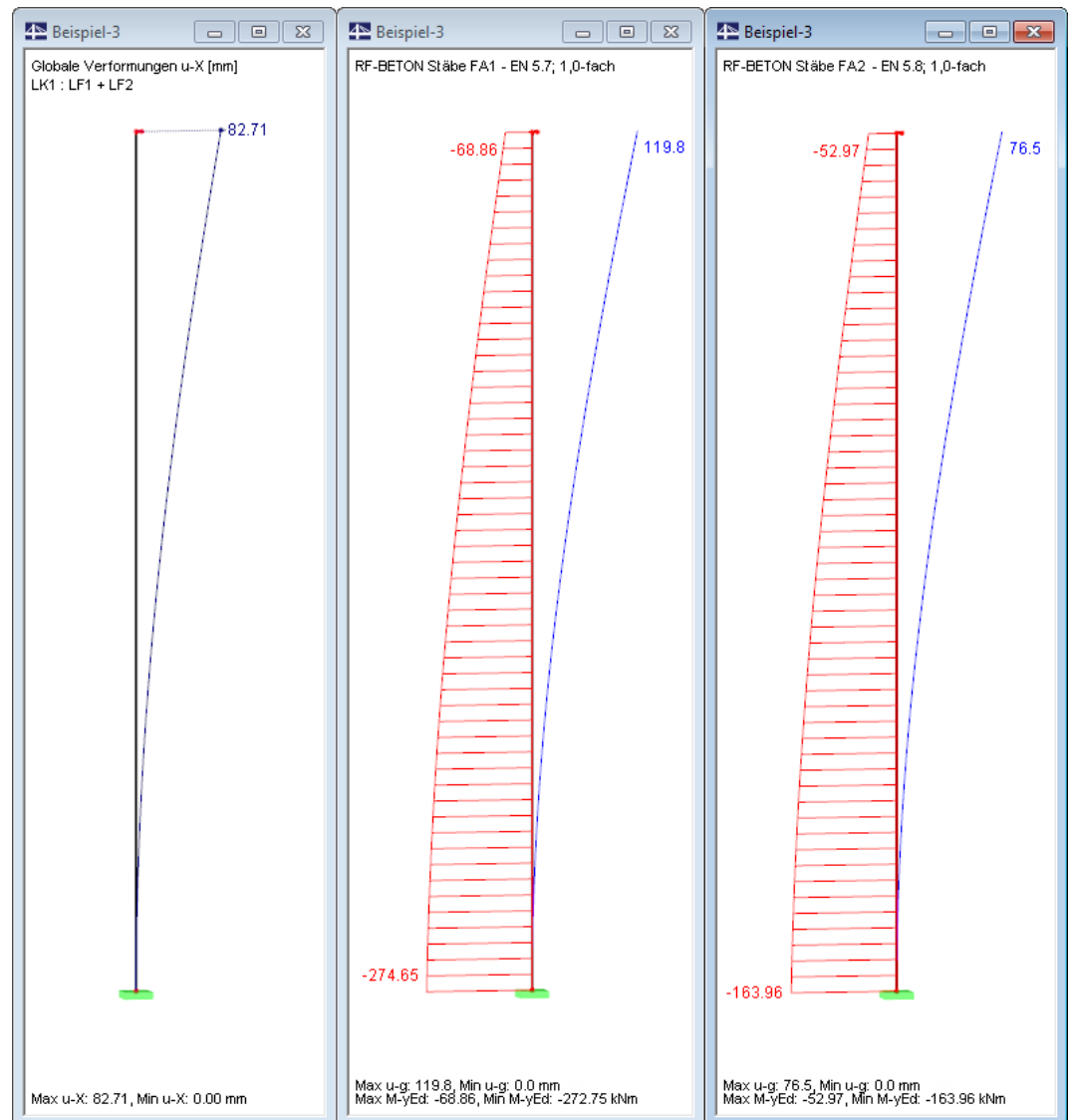


Bild 9.48: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach Theorie II. Ordnung und nach nichtlinearer Berechnung

Eine anschauliche Deutung der Ergebnisse kann durch eine Darstellung im M/N-Interaktionsdiagramm erfolgen. Im Bild 9.49 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.

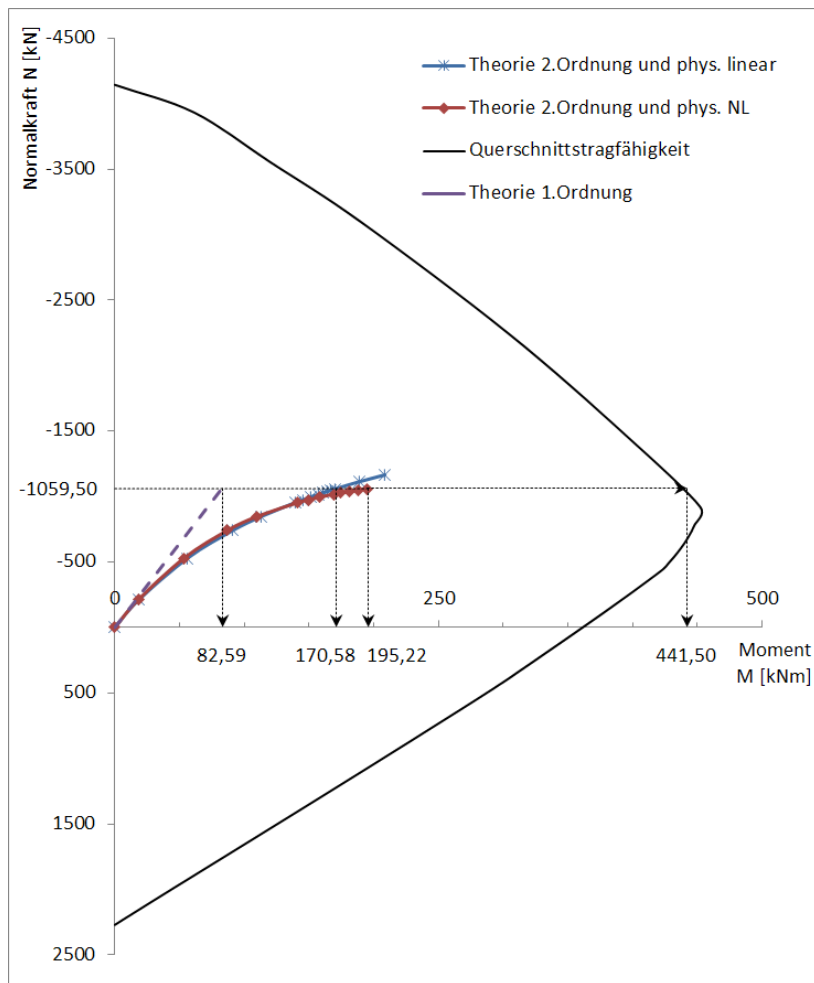


Bild 9.49: M/N-Interaktionsdiagramm

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 9.50: 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 $N = -1059,39 \text{ kN}$ 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 ist dies bei einem Moment von ca. 441,5 kN 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 Verlag, 2 Auflage, 2010.
- [5] DIN EN 1992-1-2:2005: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall., 2006.
- [6] Ulrich Quast. Zum nichtlinearen Berechnen im Stahlbeton- und Spannbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau, 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 Hosser 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.

Index

3D-PDF	155	Bewehrung	71, 106, 107, 110
3D-Rendering	143, 148	Bewehrungsabstand	74
A		Bewehrungsanordnung	77
Abbrand	92	Bewehrungsfläche	107, 109
Abbruchkriterien	139	Bewehrungsgrad	83, 122, 158
Abbruchschranken	104	Bewehrungslage	74, 114
Abschnitt	118	Bewehrungssatz	71
Achsmaß	77	Bewehrungsskizze	140
Adaptive Stabteilung	103	Bewehrungsstab	114
Allgemeines Bemessungsverfahren	99	Bewehrungsstaffelung	74
Alter	65	Bewehrungsverteilung	79
Anmerkung	65, 116	Bewehrungsvorlage	72
Anmerkungen	122	Bewehrungsvorschlag .. 72, 113, 115, 117, 118,	120, 140
Anpassungsfaktor	102	Bezugslänge	94
Anschnittmoment	70	Biegerollendurchmesser	116, 123
Ansichtsmodus	127, 146	Biegezwang	87
Anzeigefaktoren	149	Biegung	7
Auflagernahe Last	69	Blättern in Masken	52
Ausdruckprotokoll	151, 153, 154	Brandeinwirkung	92
Außergewöhnlich	55	Brandschutz	24, 60, 92
Auslegung	99	Brandschutzklasse	92
Auslegung der Längsbewehrung	93	Brandschutznachweis .. 129, 131, 132, 138, 141	
Ausnutzung	125, 126, 129, 130, 134, 135	Bügel	75
Ausnutzungsgrad	99	Bügelabstand	76, 119
B		Bügelbereich	119
Basisangaben	52	Bügelbewehrung .. 107, 108, 118, 122, 141, 142	
Baustofffestigkeit	45, 46, 49	Bügelparameter	75
Beenden von RF-BETON Stäbe	52	C	
Belastungsdauer	102	Charakteristisch	57
Bemessungsdetails	107, 122	D	
Bemessungsfall	146, 156, 157, 191	Dämpfung	39, 50, 103
Bemessungssituation	55, 57, 97	Dämpfungsfaktor	51
Benutzerprofil	159	Dauerlast	59, 102
Berechnung starten	105	Dehnung	32, 45
Berechnungsansatz	99	Dehnungsverteilung	17
Berechnungsdetails	139	Details	59, 95, 96
Beton-Festigkeitsklasse	62	Dezimalstellen	61, 159
Betonalter	21, 23	Direkte Lagerung	69
Betondeckung	77	Drahtmodell	141
Betondruckfestigkeit	84	Druckbewehrung	8, 83
Betondruckspannung	14	Drucken	153
Betondruckstrebe	9, 84	Druckglied	99, 102
Betondruckzone	83	Druckkraft	8
Betonspannung	125	Druckstrebenneigung θ	10, 84
Betonstahl	61, 62, 74, 75, 92	Druckzonenhöhe	83
Betonzugfestigkeit	35, 86, 87, 101, 125	Duktilität	37
Betonzuschlag	92		

Durchbiegung	18, 57, 125, 164	Hydratationswärme	88
Durchbiegungsdaten	94	I	
Durchmesser	74	Indirekte Lagerung	69
Durchschnittswerte Material	99	Initialkraft	102
E		Installation	5
Ecke	79, 81	Iteration	50, 103, 139
Eigenspannungen	88	Iterationskennwert	103
Einheiten	61, 159	K	
Einzellast	71	Klassifizierung	92
Endlager	70	Kommentar	54
Ergebnisauswertung	140	Konstruktive Bewehrung	80, 81, 141
Ergebniskombination	55, 56, 58, 71	Kontrolle	104
Ergebnismasken	106	Konvergenz	50, 103, 139
Ergebnisse-Navigator	147	Konvergenzeinstellungen	139
Ergebnisverläufe	150	Kriechen	19, 43, 49, 56, 58, 65
Eurocode	59	Kriechzahl	19, 20, 43, 65
Excel	160	Krümmung	18, 32, 45, 48, 163, 180
Export	100, 159	L	
Export Querschnitte	158	Länge	115, 119
F		Längsbewehrung	73, 81, 88, 107, 108, 113, 121, 141, 142
Faktor β	59	Längskraft	7
Fehlermeldung	109, 112, 130	Lage	79
Fenster	145	Lager	69
Filter	149	Lagerbreite	69
Fließbereich	99	Langzeitwirkung	84, 93
Formänderungen	99	Lastaufbringung	104
Fuge	82	Lasteinwirkungsdauer	102
G		Lastfall	55, 109, 125, 130, 135, 137
Gebrauchstauglichkeit	14, 48, 57, 85, 88, 97, 113, 124, 136	Lastkombination	55, 59
Geschädigte Zone	130	Laststufe	51, 104
Globaler Teilsicherheitsbeiwert	99	M	
Grafik	147	M-Verhältnis δ	70
Grafikausdruck	153	Masken	52
Grenzdurchmesser	16, 126	Masse	116, 119, 123
Grenzwert	57, 95, 126	Material	45, 49, 61
Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit	14, 48, 57, 72, 124, 126, 136	Materialbezeichnung	62
Grenzzustand Tragfähigkeit	7, 8, 44, 55, 107, 109, 134	Materialbibliothek	62
Grundbewehrung	74	Materialkennwerte	61
H		Meldung	119, 136
Häufig	57	Mindestbewehrung	15, 80, 87, 125
Haken	116	Mitwirkende Breite	67
Heißbemessung	60, 92, 129	Modifizierte Stahlkennlinie	101, 102
Hintergrundgrafik	146	Momentenausrundung	70
Hinweis	109, 126, 130, 136	Momentenumlagerung	70
Höchstbewehrungsgrad	83	Monolithische Verbindung	70

N		
Nachweisverfahren	98	
Nationaler Anhang	53	
Navigator	52	
Neigung	75, 114	
Nennmaß	77	
Nichtlineare Berechnung	56, 58, 98, 113, 134, 136, 148, 167, 186	
Norm	4, 53, 78, 83	
O		
Obere Bewehrung	108, 141	
Oberfläche	123	
Optimierung	65, 158	
Optionen	56, 58	
P		
Panel	6, 149	
Plastisches Gelenk	99	
Plattenbreite	79	
Plausibilitätskontrolle	104	
Position	113, 114, 118, 123, 140	
Positionsbügel	118	
Positionsstab	113, 116, 140	
Programmaufruf	5	
Q		
Quasi-ständig	57	
Querkraft	71, 93	
Querkraftbewehrung	84	
Querkraftnachweis	81	
Querkrafttragfähigkeit	8, 84	
Querschnitt	63, 130	
Querschnittsbezeichnung	63	
Querschnittsbibliothek	63	
Querschnittsinfo	66	
Querschnittsoptimierung	158	
Querschnittsseite	92	
R		
Randmaß	77	
Reduzierungsbeiwert α	84, 93	
Relationsbalken	127	
Relative Luftfeuchte	20	
Relaxation	43	
RF-BETON NL	56, 58	
RFEM-Arbeitsfenster	146	
Rippe	67, 68	
Rissabstand	17	
Rissbildung	37	
Rissbreite	16, 86, 126, 137	
Rissbreitenbegrenzung	86, 98	
Rissbreitennachweis	85, 86	
Rotationsfähigkeit	83	
S		
Schaltflächen	127, 141	
Schnitt	75, 119	
Schnittgrößen	79, 105, 158	
Schrumpfen	22	
Schubbewehrung	75, 108, 141	
Schubfuge	82, 96	
Schubkraft	82, 96, 108	
Schubspannung	82, 96	
Schubsteifigkeit	99	
Schwinden	19, 43, 44, 56, 58, 65	
Schwindmaß	19, 22, 43, 65	
Scrollrad	140	
Sekantensteifigkeit	33	
Sicherheit	122, 130, 134, 135, 138	
Spannungsnachweis	85, 86, 87	
Stab	72	
Stababstand	16, 126	
Stabachsen	141	
Stabdurchmesser	81, 115, 119, 123	
Stabilitätsverlust	99	
Stabsatz	68, 72, 90, 94, 110, 127, 131	
Ständig und vorübergehend	55	
Staffelung	74	
Stahlliste	122	
Stahloberfläche	74	
Stahlspannung	14, 125	
Starten von RF-BETON Stäbe	5	
Steifigkeit	39, 47, 103, 139	
Stelle x	109, 111, 115, 119, 121, 125, 130, 135, 137	
Stützensenkung	88	
Stützmoment	70	
T		
Tangentensteifigkeit	33	
Teilsicherheitsbeiwert Beton	84, 93	
Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl	84, 93	
Temperaturprofil	130	
Tension Stiffening	34, 44, 101	
Theorie II. Ordnung	99	
Torsion	93, 108	
Torsionsbewehrung	79	
Torsionssteifigkeit	100	
Tragfähigkeit	7, 46, 55, 96, 107, 109, 134	
Trocknungsschwinden	22	
Typ	125, 137	

U		
Überhöhung	95	
Umlaufende Bewehrung	79	
Unbemessbarkeit	112, 133	
Untere Bewehrung	108, 141	
Unverformtes System	98	
V		
Verankerung	74, 115	
Verankerungsart	74, 75, 116	
Verankerungslänge	74, 75, 141	
Verankerungstyp	123	
Verbund	17, 116	
Vereinfachtes Verfahren	96	
Verformung .. 18, 48, 94, 98, 104, 125, 139, 161, 167, 181		
Verformungsnachweis	87, 94	
Verjüngung	90	
Versatzmaß	122	
Verschiebung	137	
Verschobene Stabenden	98	
Visualisierung	143	
Völligkeitsbeiwert	102	
Völligkeitsfaktor	59	
Vollmodell	141	
Vorhandene Bewehrung	113	
		Vorkrümmung
		Vorspannung
		Voute
		X
		x-Stelle
		W
		Wärmedehnung
		Winkelhaken
		Wirksame Zugstärke $f_{ct,R}$
		Wirtschaftlichste Bewehrung
		Z
		Zementart
		Zentrischer Zwang
		Zone
		Zugkraft
		Zugkraftdeckung
		Zugversteifung
		Zustand II .. 18, 33, 49, 56, 58, 101, 134, 136, 177
		Zwang
		Zwischenablage
		Zwischenergebnisse .. 107, 121, 122, 124, 134, 136, 150