



Fassung
Januar 2015

Zusatzmodul

RF-BETON Flächen

Stahlbetonbemessung

Programm- Beschreibung

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 2014
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 Flächen	4
1.2	Gebrauch des Handbuchs	5
1.3	Aufruf des RF-BETON Flächen - Moduls	5
2.	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Modelltyp	7
2.2	Bemessung von 1D- und 2D-Bauteilen	8
2.3	Scheiben	11
2.3.1	Bemessungsschnittgrößen	11
2.3.2	Zweibahnige Bewehrungsnetze mit $k > 0$	14
2.3.3	Zweibahnige Bewehrungsnetze mit $k < 0$	17
2.3.4	Mögliche Belastungssituationen	18
2.3.5	Nachweis der Betondruckstrebe	21
2.3.6	Ermittlung der erforderlichen Bewehrung	21
2.3.7	Bewehrungsregeln	22
2.4	Platten	25
2.4.1	Bemessungsschnittgrößen	25
2.4.2	Nachweis des aussteifenden Moments	30
2.4.3	Ermittlung der statisch erforderlichen Bewehrung	33
2.4.4	Querkraftbemessung	34
2.4.4.1	Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung	35
2.4.4.2	Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung	39
2.4.4.3	Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe	41
2.4.4.4	Beispiel Querkraftbemessung	41
2.4.5	Bewehrungsregeln	43
2.5	Schalen	45
2.5.1	Bemessungskonzept	45
2.5.2	Hebelarm der inneren Kräfte	46
2.5.3	Ermittlung der Bemessungsmembrankräfte	51
2.5.3.1	Bemessungsmomente	54
2.5.3.2	Bemessungsnormalkräfte	56
2.5.3.3	Hebelarm der inneren Kräfte	56
2.5.3.4	Membrankräfte	57
2.5.3.5	Bemessungsmembrankräfte	58
2.5.4	Nachweis der Betondruckstreben	59
2.5.5	Erforderliche Längsbewehrung	60
2.5.6	Querkraftbemessung	61
2.5.7	Statisch erforderliche Längsbewehrung	63
2.5.8	Mindestlängsbewehrung	63
2.5.9	Einzulegende Bewehrung	64
2.6	Gebrauchstauglichkeit	66
2.6.1	Bemessungsschnittgrößen	66
2.6.2	Hauptschnittgrößen	68
2.6.3	Vorhandene Bewehrung	69
2.6.4	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	69
2.6.4.1	Eingaben für Beispiel	69



2.6.4.2	Kontrolle der Hauptschnittgrößen	69
2.6.4.3	Erforderliche Bewehrung für GZT	70
2.6.4.4	Vorgabe einer Bewehrung	71
2.6.4.5	Kontrolle der vorhandenen Bewehrung für GZG	72
2.6.4.6	Wahl der Betondruckstrebe	73
2.6.4.7	Begrenzung der Betondruckspannung	74
2.6.4.8	Begrenzung der Betonstahlspannung	77
2.6.4.9	Mindestbewehrung für Begrenzung der Rissbreite	78
2.6.4.10	Kontrolle des Stabdurchmessers	81
2.6.4.11	Nachweis des Stababstands	83
2.6.4.12	Nachweis der Rissbreite	84
2.6.5	Maßgebende Beanspruchung	88
2.7	Verformungsberechnung mit RF-BETON Deflect	89
2.7.1	Material- und Geometrieannahmen	89
2.7.2	Bemessungsschnittgrößen	89
2.7.3	Kritische Oberfläche	89
2.7.4	Querschnittswerte	90
2.7.5	Berücksichtigung von Langzeitwirkungen	90
2.7.5.1	Kriechen	90
2.7.5.2	Schwinden	90
2.7.6	Verteilungsbeiwert	92
2.7.7	Querschnittswerte für Verformungsberechnung	93
2.7.8	Materialsteifigkeitsmatrix D	94
2.7.9	Positive Definitheit der Materialsteifigkeitsmatrix	95
2.7.10	Beispiel	95
2.7.10.1	Geometrie	95
2.7.10.2	Materialien	96
2.7.10.3	Auswahl der Bemessungsschnittgrößen	96
2.7.10.4	Ermittlung der kritischen Seite	96
2.7.10.5	Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)	97
2.7.10.6	Berücksichtigung von Schwinden	99
2.7.10.7	Berechnung des Verteilungsbeiwerts	100
2.7.10.8	Endquerschnittswerte	101
2.7.10.9	Steifigkeitsmatrix des Materials	103
2.8	Nichtlineare Nachweismethode	104
2.8.1	Allgemeines	104
2.8.2	Gleichungen und Berechnungsnäherungen	104
2.8.2.1	Theoretische Ansätze	104
2.8.2.2	Ablaufdiagramm	106
2.8.2.3	Lösungsmethoden für nichtlineare Gleichungen	107
2.8.2.4	Konvergenzkriterien	108
2.8.3	Materialkennwerte	110
2.8.3.1	Beton im Druckbereich	110
2.8.3.2	Beton im Zugbereich	110
2.8.3.3	Versteifende Wirkung des Betons in Zugzone	112
2.8.3.4	Betonstahl	116
2.8.4	Kriechen und Schwinden	117
2.8.4.1	Berücksichtigung von Kriechen	117
2.8.4.2	Berücksichtigung von Schwinden	120
3.	Eingabedaten	124
3.1	Basisangaben	124
3.1.1	Tragfähigkeit	127



3.1.2	Gebrauchstauglichkeit	128
3.1.2.1	Analytische Nachweismethode	129
3.1.2.2	Nichtlineare Nachweismethode	131
3.1.3	Details	134
3.2	Materialien	135
3.3	Flächen	138
3.3.1	Analytische Nachweismethode	138
3.3.2	Nichtlineare Nachweismethode	141
3.4	Bewehrung	145
3.4.1	Bewehrungsgrade	146
3.4.2	Bewehrungsanordnung	146
3.4.3	Längsbewehrung	150
3.4.4	Norm	154
3.4.5	Bemessungsmethode	156
4.	Berechnung	157
4.1	Details	157
4.2	Kontrolle	159
4.3	Start der Berechnung	160
5.	Ergebnisse	161
5.1	Erforderliche Bewehrung Gesamt	162
5.2	Erforderliche Bewehrung flächenweise	164
5.3	Erforderliche Bewehrung punktweise	165
5.4	Gebrauchstauglichkeitsnachweis Gesamt	166
5.5	Gebrauchstauglichkeitsnachweis flächenweise	168
5.6	Gebrauchstauglichkeitsnachweis punktweise	169
5.7	Nichtlineare Berechnung Gesamt	170
5.8	Nichtlineare Berechnung flächenweise	171
5.9	Nichtlineare Berechnung punktweise	172
6.	Ergebnisauswertung	173
6.1	Bemessungsdetails	174
6.2	Ergebnisse am RFEM-Modell	176
6.3	Filter für Ergebnisse	179
6.4	Panel konfigurieren	182
7.	Ausdruck	184
7.1	Ausdruckprotokoll	184
7.2	Grafikausdruck	185
8.	Allgemeine Funktionen	187
8.1	Bemessungsfälle	187
8.2	Einheiten und Dezimalstellen	189
8.3	Export der Ergebnisse	190
A.	Literatur	193
B.	Index	194

1 Einleitung

1.1 Zusatzmodul RF-BETON Flächen

Obwohl der Verbundwerkstoff Stahlbeton zur Konstruktion von Flächentragwerken mindestens ebenso häufig eingesetzt wird wie für Stabtragwerke, finden sich in Norm und Literatur vergleichsweise wenige Ansätze zur Bemessung zweidimensionaler Bauteile. Dies gilt insbesondere für die Bemessung von Schalentragwerken, die gleichzeitig durch Momente und Normalkräfte beansprucht sind. Da mit der Methode der finiten Elemente eine wirklichkeitsnahe Modellbildung von Flächentragwerken möglich ist, müssen Bemessungsannahmen und Algorithmen gefunden werden, die diese „Vorschriftenlücke“ zwischen einem staborientierten Regelwerk und den computergenerierten Schnittgrößen von Flächentragwerken schließen.

Mit dem Zusatzmodul RF-BETON Flächen stellt sich die DLUBAL SOFTWARE GMBH dieser Herausforderung. Auf Grundlage der von BAUMANN im Jahre 1972 definierten Verträglichkeitsbedingungen wurde ein konsistenter Bemessungsalgorithmus für die Dimensionierung zwei- und dreibahniger Bewehrungsscharen entwickelt. Das Modul stellt dabei nicht nur ein Werkzeug zur Ermittlung der statisch erforderlichen Bewehrung dar: Es sind auch die Vorschriften zu zulässigen Höchst- und Mindestbewehrungsgraden für die verschiedenen Bauteiltypen (2D-Platten, 3D-Schalen, Wände, wandartige Träger) abgebildet, wie sie sich in den Normen als Konstruktionsvorgaben finden.

Bei der Ermittlung des Bewehrungsstahls kontrolliert **RF-BETON Flächen**, ob der Beton, der das Bewehrungsnetz aussteift, durch eine ausreichende Plattendicke sämtlichen Anforderungen aus Biege- und Querkraftbeanspruchung gerecht wird.

Neben der Tragfähigkeitsbemessung besteht im Modul die Möglichkeit, das Tragwerk im Zustand der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen. Diese Nachweise umfassen die Begrenzung der Betondruck- und der Betonstahlspannungen, die Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite sowie die Begrenzung der Rissbreite durch Begrenzung von Stabdurchmesser und Stababstand. Hierzu stehen analytische und nichtlineare Nachweismethoden zur Wahl.

Wenn zusätzlich das Modul **RF-BETON Deflect** lizenziert ist, können in RF-BETON Flächen die Verformungen mit dem Einfluss von Kriechen, Schwinden und Tension Stiffening nach analytischer Methode berechnet werden.

Mit einer Lizenz von **RF-BETON NL** kann in RF-BETON Flächen der Einfluss von Kriechen und Schwinden bei der Ermittlung von Verformungen, Rissbreiten und Spannungen nach nichtlinearer Methode berücksichtigt werden.

Die Bemessung ist nach folgenden Normen möglich:

- EN 1992-1-1:2004/AC:2010
- DIN 1045-1:2008-08
- ACI 318-11
- SIA 262:2003
- GB 50010-2010

Das Bild links zeigt die Nationalen Anhänge für EN 1992-1-1, die zurzeit in RF-BETON Flächen implementiert sind.

Alle Zwischenergebnisse der Bemessung sind lückenlos dargestellt. Dies schafft - der Philosophie des Hauses DLUBAL entsprechend - eine besondere Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Nachweise.

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

Ihr DLUBAL-Team

CEN	EU
BDS	Bulgarien
BS	Vereinigtes Königreich
CSN	Tschechien
CYS	Zypern
DIN	Deutschland
DK	Dänemark
LST	Litauen
NBN	Belgien
NEN	Niederlande
NF	Frankreich
NP	Portugal
PN	Polen
SFS	Finnland
SingaporeS	Singapur
SIST	Slowenien
SR	Rumänien
STN	Slowakei
SvenskS	Schweden
UNE	Spanien
UNI	Italien
ÖNORM	Österreich

Nationale Anhänge für
EN 1992-1-1

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 Flächen 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. [Sichtmodus]. 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 dennoch nicht fündig werden, so können Sie die Suchfunktion auf unserer Website www.dlubal.de nutzen, um in der umfangreichen Liste aller *Fragen und Antworten* das Problem nach bestimmten Kriterien einzugrenzen.

1.3 Aufruf des RF-BETON Flächen - Moduls

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

Menü

Sie können das Zusatzmodul aufrufen mit dem RFEM-Menü

Zusatzmodule → Stahlbetonbau → RF-BETON Flächen.

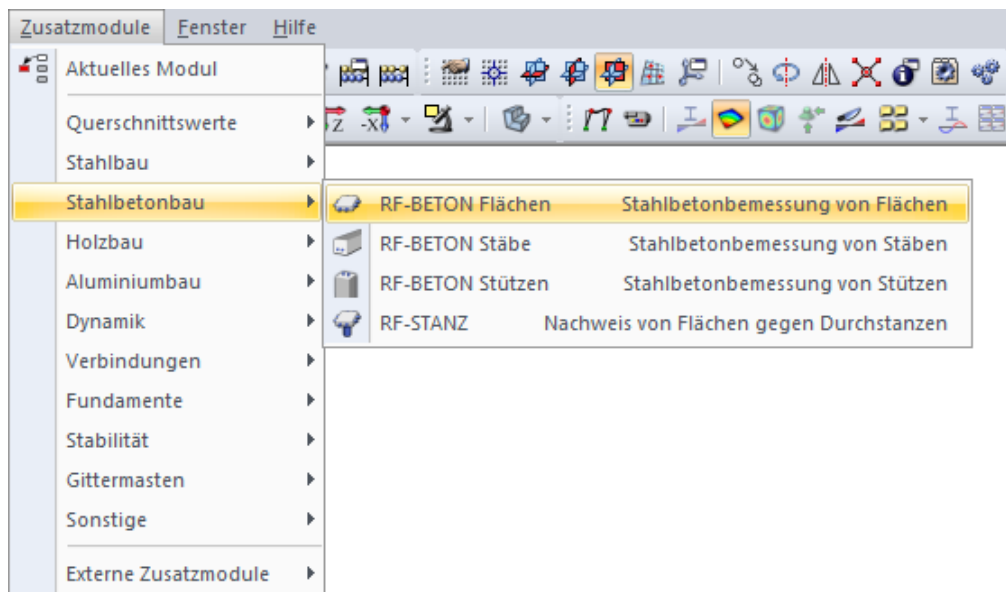


Bild 1.1: Menü: Zusatzmodule → Stahlbetonbau → RF-BETON Flächen

Navigator

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

Zusatzmodule → **RF-BETON Flächen**.

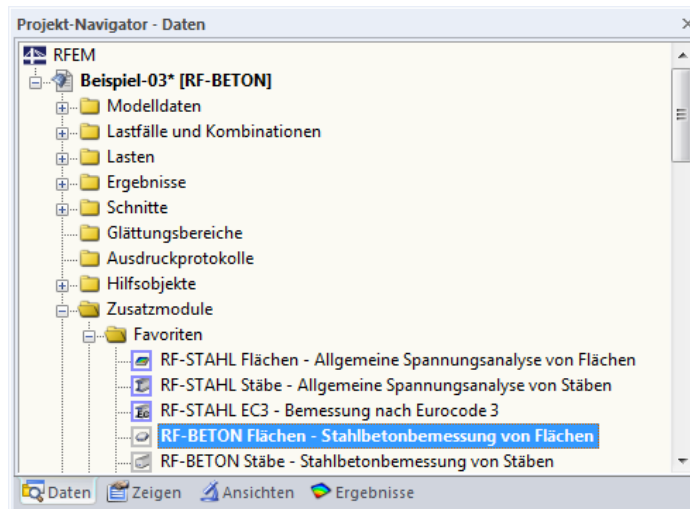
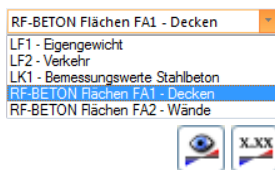


Bild 1.2: Daten-Navigator: Zusatzmodule, RF-BETON Flächen

Panel



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

Stellen Sie den relevanten RF-BETON Flächen-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 [RF-BETON Flächen] zum Aufruf des Moduls benutzen.

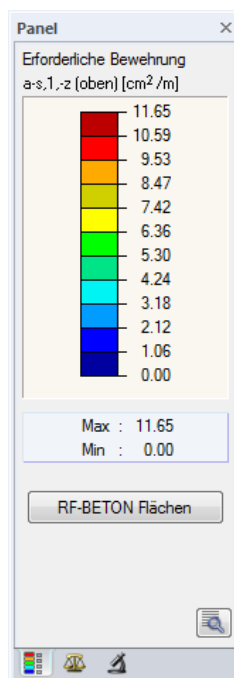


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [RF-BETON Flächen]

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Modelltyp

Der *Modelltyp*, der beim Anlegen eines neuen Modells festgelegt wird, übt einen entscheidenden Einfluss auf die Art der Bauteilbeanspruchung aus.

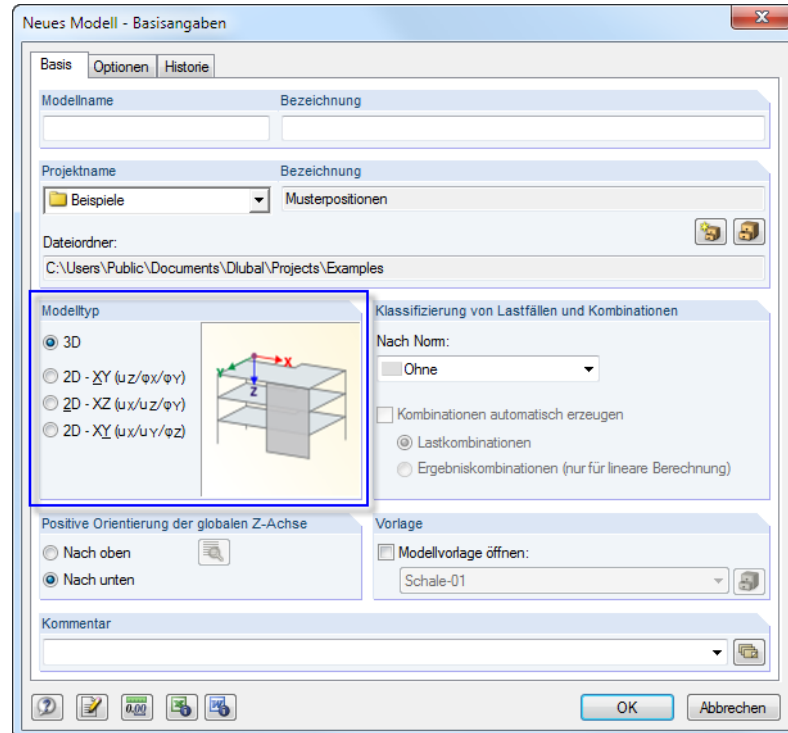


Bild 2.1: Dialog Neues Modell - Basisangaben, Abschnitt Modelltyp

Wird der Modelltyp $2D - XY(u_z/\phi_x/\phi_y)$ gewählt, liegt eine rein auf Biegung beanspruchte Platte vor. Die zu bemessenden Schnittgrößen sind dann ausschließlich Momente, deren Vektoren in der Bauteilebene liegen.

Wählt man jedoch $2D - XZ(u_x/u_z/\phi_y)$ oder $2D - XY(u_x/u_y/\phi_z)$, so liegt ein rein auf Druck oder Zug in Bauteilebene beanspruchte Wand oder Scheibe vor. Die Schnittgrößen, die zur Bemessung herangezogen werden, sind ausschließlich Normalkräfte, deren Vektoren in der Bauteilebene liegen.

Bei einem räumlichen 3D-Modelltyp werden beide Beanspruchungen (also Momente und Normalkräfte) kombiniert. In einem so definierten Bauteil können gleichzeitig sowohl Zug bzw. Druck und Biegung auftreten. Die zu bemessenden Schnittgrößen sind demzufolge dann sowohl Normalkräfte als auch Momente, deren Vektoren in der Bauteilebene liegen.

2.2 Bemessung von 1D- und 2D-Bauteilen

Um die Tragfähigkeit eines ein- oder zweidimensionalen Bauteils aus Stahlbeton nachzuweisen, ist stets ein Gleichgewichtszustand zwischen den einwirkenden Schnittgrößen und den aufnehmbaren Schnittgrößen des verformten Bauteils zu finden. Neben dieser Gemeinsamkeit beim Nachweis der Tragfähigkeit eindimensionaler Bauteile (Stäbe) und zweidimensionaler Bauteile (Flächen) besteht jedoch ein entscheidender Unterschied:

1D-Bauteil (Stab)

Bei einem Stab ist die einwirkende Schnittgröße stets so gerichtet, dass diese der aus den Bemessungsfestigkeiten der Werkstoffe ermittelten aufnehmbaren Schnittgröße gegenübergestellt werden kann. Als Beispiel sei ein zentrisch durch die Druckkraft N beanspruchter Stab genannt.

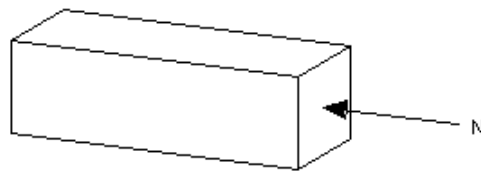


Bild 2.2: Bemessung eines Stabes

Mit den Bauteilabmessungen und dem Bemessungswert der Betondruckfestigkeit lässt sich die aufnehmbare Druckkraft bestimmen. Ist sie kleiner als die einwirkende Druckkraft, kann der erforderliche Druckbewehrungsquerschnitt mit Hilfe der vorhandenen Stahldehnung bei einer zulässigen Betonstauchung bestimmt werden.

2D-Bauteil (Fläche)

Bei einer Fläche ist die Richtung der einwirkenden Schnittgröße nur in Ausnahmefällen (Trajektorienbewehrung) so, dass die unmittelbar einwirkende Schnittgröße der aufnehmbaren Schnittgröße gegenübergestellt werden kann: Bei einer orthogonal bewehrten Wandscheibe beispielsweise sind die Richtungen der beiden Hauptnormalkräfte n_1 und n_2 in der Regel nicht identisch mit den Bewehrungsrichtungen.

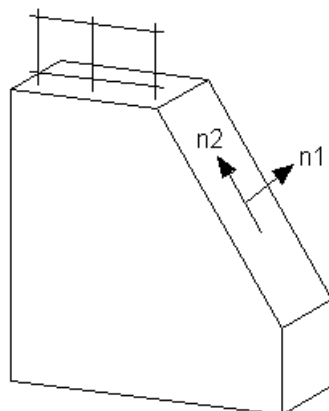


Bild 2.3: Bemessung einer Scheibe

Somit ist zur Dimensionierung der Bewehrung des Bewehrungsnetzes eine Vorgehensweise wie zur Bestimmung der Bewehrung eines Stabes nicht möglich. Es werden Schnittgrößen benötigt, die in Richtung der Bahnen des Bewehrungsnetzes verlaufen, um daraus die Betonbeanspruchung zu ermitteln. Diese Schnittgrößen werden **Bemessungsschnittgrößen** genannt.

Die Bemessungsschnittgrößen sind bildhaft vorstellbar, wenn man sich eine Masche des Bewehrungsnetzes unter Belastung betrachtet. Die zweite Hauptnormalkraft n_2 sei vereinfacht Null.

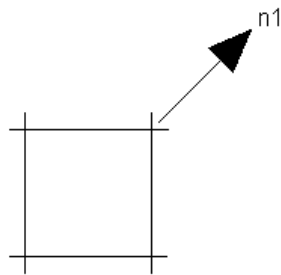


Bild 2.4: Masche des Bewehrungsnetzes mit Belastung

Unter der angegebenen Belastung verformt sich das Bewehrungsnetz wie folgt.

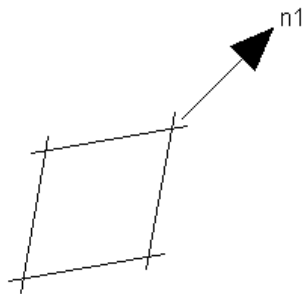


Bild 2.5: Verformung der Bewehrungsmasche

Die Größe der Verformung wird durch das Ausbilden einer Betondruckstrebe innerhalb der Bewehrungsmasche begrenzt.

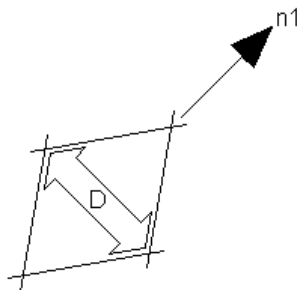


Bild 2.6: Ausbildung einer Betondruckstrebe

Durch die Betondruckstrebe werden Zugkräfte in der Bewehrung aktiviert.

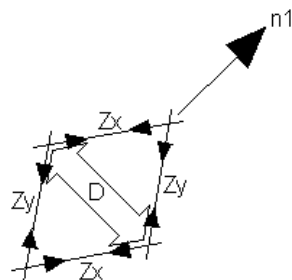


Bild 2.7: Zugkräfte in der Bewehrung

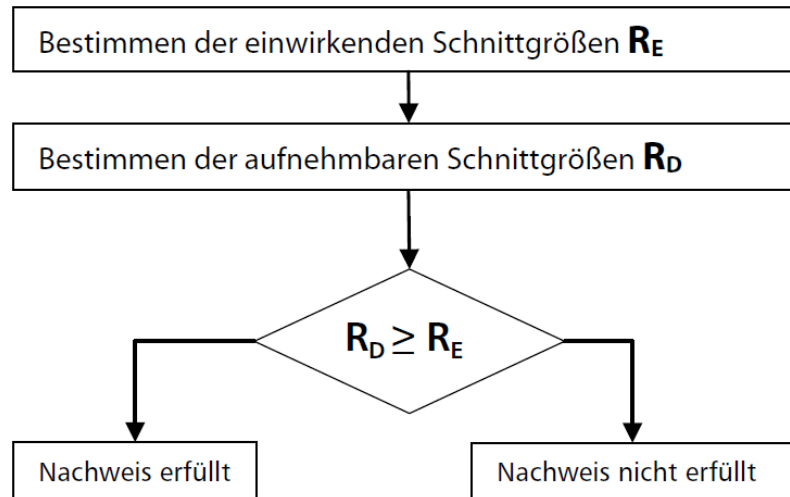
Diese Zugkräfte in der Bewehrung und die Druckkraft im Beton stellen die Bemessungsschnittgrößen dar.

Sind die Bemessungsschnittgrößen gefunden, kann die Bemessung wie bei einem eindimensionalen Bauteil verlaufen.

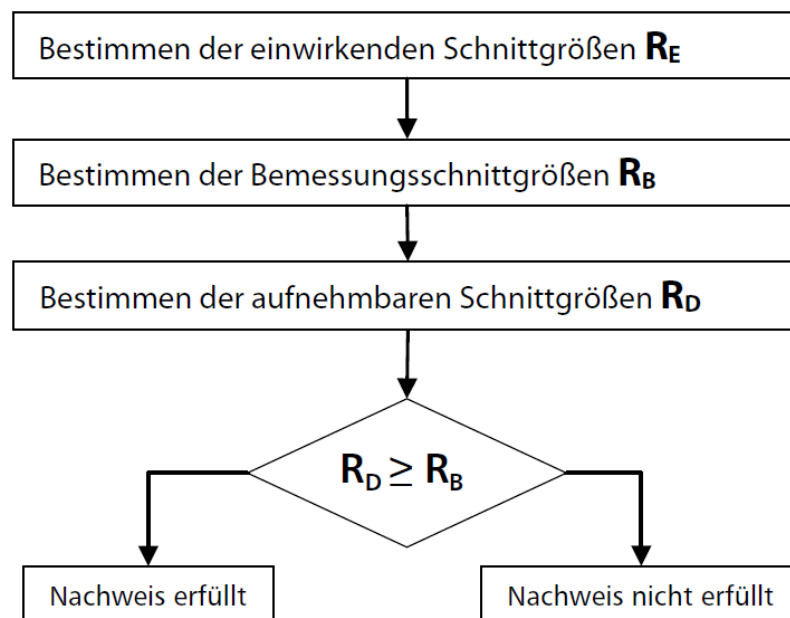
Das Hauptmerkmal bei der Bemessung zweidimensionaler Bauteile ist somit die Transformation der einwirkenden Schnittgrößen (Hauptschnittgrößen) in Bemessungsschnittgrößen, deren Richtung es ermöglicht, die Bewehrung zu dimensionieren und die Tragfähigkeit des Betons zu überprüfen.

Folgende Grafik veranschaulicht den wesentlichen Unterschied zwischen der Bemessung ein- und zweidimensionaler Bauteile.

Eindimensionales Bauteil



Zweidimensionales Bauteil



2.3 Scheiben

2.3.1 Bemessungsschnittgrößen

Die Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen für Wände und Scheiben erfolgt nach dem Transformationsverfahren von BAUMANN [1]. Die Gleichungen zur Bestimmung der Bemessungsschnittgrößen werden dort für den allgemeinen Fall einer dreibahnigen Bewehrungsschar mit beliebiger Richtung hergeleitet. Sie sind dann auch auf einfachere Fälle wie orthogonale zweibahnige Bewehrungsnetze anwendbar.

BAUMANN betrachtet die Gleichgewichtsbedingungen an folgendem Scheibenelement.

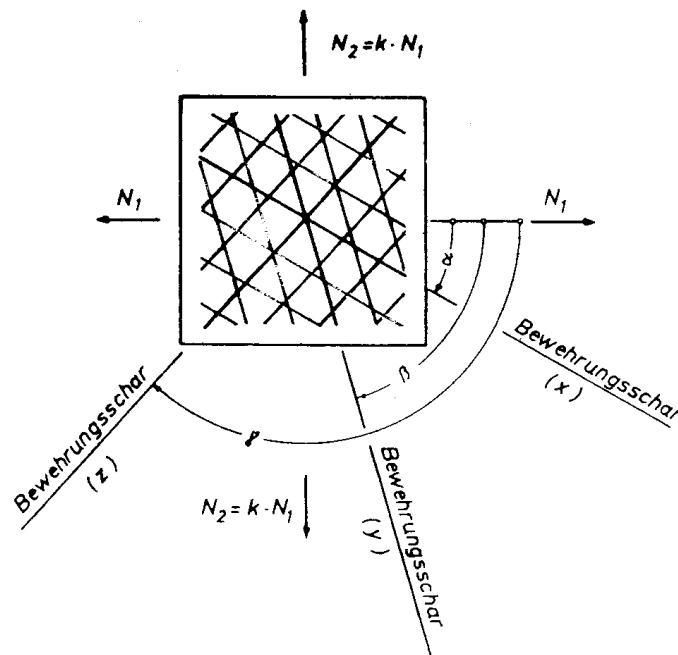


Bild 2.8: Gleichgewichtsbedingungen nach BAUMANN

Bild 2.8 zeigt einen rechteckigen Ausschnitt einer Scheibe. Diese wird durch die Hauptnormalkräfte N_1 und N_2 (Zugkräfte) beansprucht. Die Hauptnormalkraft N_2 wird durch den Faktor k als ein Vielfaches der Hauptnormalkraft N_1 ausgedrückt.

$$N_2 = k \cdot N_1 \quad (2.1)$$

In der Scheibe werden drei Bewehrungsscharen eingelegt. Die Bewehrungsscharen werden mit x , y und z bezeichnet. Der Winkel, den die erste Hauptnormalkraft N_1 im Uhrzeigersinn mit der Richtung der Bewehrungsschar x einschließt, wird mit α bezeichnet. Der Winkel zwischen erster Hauptnormalkraft N_1 und der Bewehrungsschar y wird β genannt, der Winkel zur verbleibenden Bewehrungsschar heißt γ .

In seiner Arbeit schreibt BAUMANN: „Bei Vernachlässigung von Schub- bzw. Zugbeanspruchungen im Beton kann also die äußere Beanspruchung ($N_1, N_2 = k \cdot N_1$) eines Scheibenelements im allgemeinen Falle durch drei beliebig gerichtete innere Kräfte aufgenommen werden. Bei dreibahnigen Bewehrungsnetzen entsprechen diese Kräfte den drei Bewehrungsscharen (x) , (y) und (z) , welche mit der größeren Hauptzugkraft N_1 die Winkel α, β, γ einschließen, und werden mit Z_x, Z_y, Z_z (als Zugkräfte positiv) bezeichnet.“

Um diese Kräfte Z_x, Z_y (und bei einer dritten Bewehrungsrichtung noch Z_z) zu bestimmen, wird zunächst ein Schnitt parallel zur dritten Bewehrungsschar gebildet.

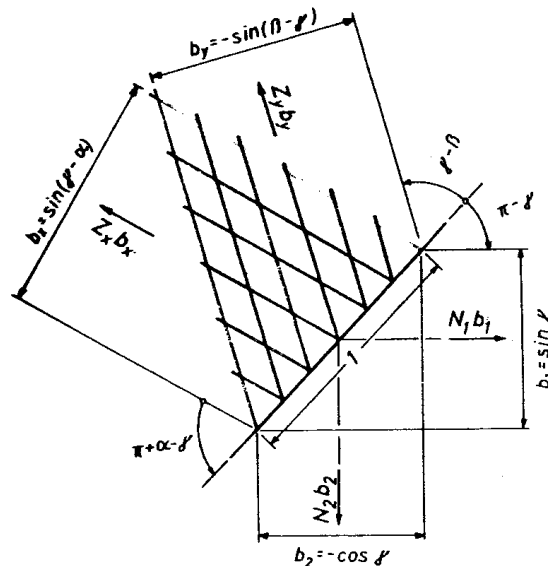


Bild 2.9: Schnitt parallel zur dritten Bewehrungsschar z

Die Schnittlänge wird mit dem Wert 1 angenommen. Mit dieser Schnittlänge werden jene projizierten Schnittlängen bestimmt, die senkrecht zur jeweils betrachteten Kraft laufen. Im Fall der äußeren Kräfte sind das die projizierten Schnittlängen b_1 (senkrecht zur Kraft N_1) und b_2 (senkrecht zur Kraft N_2). Im Fall der Zugkräfte in der Bewehrung sind das die projizierten Schnittlängen b_x (senkrecht zur Zugkraft Z_x) und b_y (senkrecht zur Zugkraft Z_y).

Das Produkt aus der jeweiligen Kraft und der zugehörigen projizierten Schnittlänge ergibt dann die Kraft, mit der ein Kräftegleichgewicht aufgestellt werden kann.

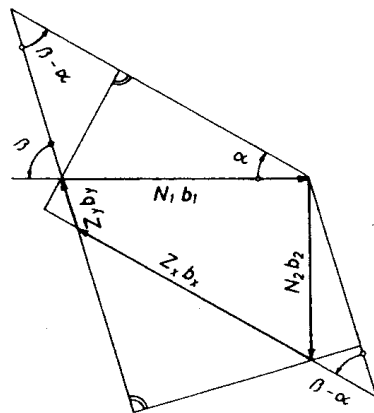


Bild 2.10: Kräftegleichgewicht in einem Schnitt parallel zur Bewehrung in Richtung z

Das Gleichgewicht zwischen den äußeren Kräften (N_1, N_2) und den inneren Kräften (Z_x, Z_y) lässt sich dann wie folgt formulieren.

$$Z_x \cdot b_x = \frac{1}{\sin(\beta - \alpha)} \cdot (N_1 \cdot b_1 \cdot \sin \beta - N_2 \cdot b_2 \cdot \cos \beta) \quad (2.2)$$

$$Z_y \cdot b_y = \frac{1}{\sin(\beta - \alpha)} \cdot (-N_1 \cdot b_1 \cdot \sin \alpha - N_2 \cdot b_2 \cdot \cos \alpha) \quad (2.3)$$

Um das Kräftegleichgewicht zwischen den äußeren Kräften (N_1, N_2) und der inneren Kraft Z_z in die Bewehrungsrichtung z zu bestimmen, wird ein Schnitt parallel zur Bewehrungsschar in Richtung x gelegt.

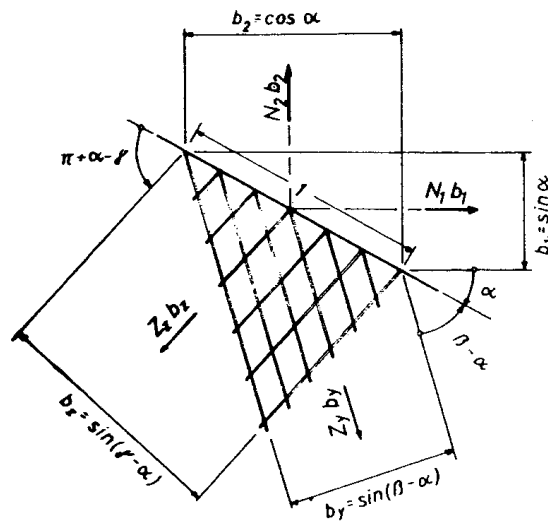


Bild 2.11: Schnitt parallel zur Bewehrungsschar in Richtung x

Grafisch lässt sich folgendes Gleichgewicht ermitteln.

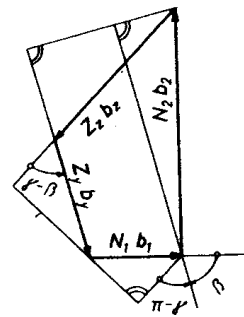


Bild 2.12: Kräftegleichgewicht in einem Schnitt parallel zur Bewehrung in Richtung x

Das Gleichgewicht zwischen den äußeren Kräften (N_1, N_2) und den inneren Kräften Z_z lässt sich dann wie folgt formulieren.

$$Z_z \cdot b_z = \frac{1}{\sin(\beta - \gamma)} \cdot (N_1 \cdot b_1 \cdot \sin \beta - N_2 \cdot b_2 \cdot \cos \beta) \quad (2.4)$$

Ersetzt man die projizierten Schnittlängen b_1, b_2, b_x, b_y, b_z durch die in der Darstellung angegebenen Werte und verwendet k als den Quotienten von Hauptnormalkraft N_2 geteilt durch N_1 , erhält man folgende Gleichungen.

$$\frac{Z_x}{N_1} = \frac{\sin \beta \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma}{\sin(\beta - \alpha) - \sin(\gamma - \alpha)} \quad (2.5)$$

$$\frac{Z_y}{N_1} = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma}{\sin(\beta - \alpha) - \sin(\beta - \gamma)} \quad (2.6)$$

$$\frac{Z_z}{N_1} = \frac{-\sin \alpha \cdot \sin \beta + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\beta - \gamma) - \sin(\gamma - \alpha)} \quad (2.7)$$

Diese Gleichungen stellen den Kern des Bemessungsalgorithmus für RF-BETON Flächen dar. Damit können aus den einwirkenden Schnittgrößen N_1 und N_2 die Bemessungsschnittgrößen Z_x , Z_y und Z_z für die jeweiligen Bewehrungsrichtungen ermittelt werden.

Durch Addition von [Gleichung 2.5](#), [Gleichung 2.6](#) und [Gleichung 2.7](#) ergibt sich:

$$\frac{Z_x}{N_1} + \frac{Z_y}{N_1} + \frac{Z_z}{N_1} = 1 + k \quad (2.8)$$

Multipliziert man [Gleichung 2.8](#) mit N_1 und substituiert k durch N_2 / N_1 , erhält man folgende Gleichung, die das Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte verdeutlicht.

$$Z_x + Z_y + Z_z = N_1 + N_2 \quad (2.9)$$

2.3.2 Zweibahnige Bewehrungsnetze mit $k > 0$

Für eine zweibahnige Bewehrung, die durch zwei positive Hauptnormalkräfte N_1 und N_2 beansprucht wird, ist die Richtung der Betondruckstrebe wie folgt zu wählen.

$$\gamma = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (2.10)$$

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, eine Druckstrebe genau mittig zwischen zwei sich kreuzenden Bewehrungsrichtungen anzuordnen.

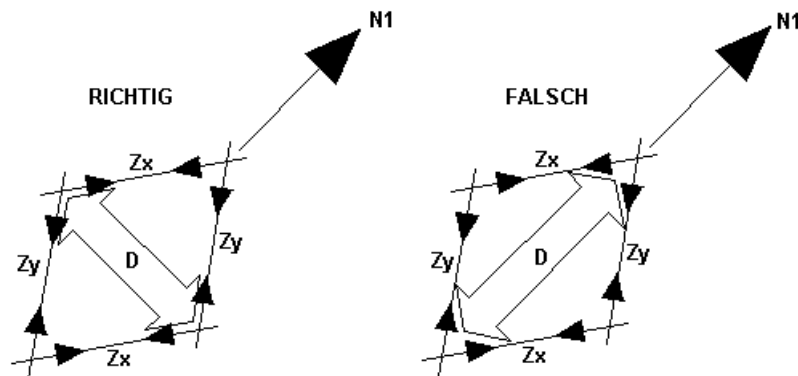


Bild 2.13: Richtige und falsche Anordnung der aussteifenden Betondruckstrebe

Während in der linken Darstellung die aussteifende Betondruckstrebe den stumpfen Winkel zwischen den sich kreuzenden Bewehrungsscharen teilt, teilt sie rechts den spitzen Winkel. Links steift sie tatsächlich das Bewehrungsnetz in der gewünschten Weise aus, während sich bei der rechten Anordnung der Betondruckstrebe das Bewehrungsnetz durch die Kraft N_1 beliebig verformen lässt.

Um sicherzustellen, dass die Druckstrebe den korrekten Winkel teilt, werden die Bemessungskräfte Z_x , Z_y und Z_z mithilfe [Gleichung 2.5](#), [Gleichung 2.6](#) und [Gleichung 2.7](#) für beide geometrisch möglichen Richtungen der Druckstrebe ermittelt. Für eine falsche Druckstrebenrichtung ergäbe sich eine Zugkraft.

Es werden somit folgende Richtungen der Betondruckstrebe untersucht.

$$\gamma_{1a} = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad \text{und} \quad \gamma_{1b} = \frac{\alpha + \beta}{2} + 90^\circ \quad (2.11)$$

Um die untersuchten Richtungen zu unterscheiden, erhält das einfache arithmetische Mittel den Index „1a“ und die Richtung der um 90° gedrehten Druckstrebe den Index „1b“.

Wie aus folgendem Graphen ersichtlich, ergibt sich für das Kräftegleichgewicht in den beiden Bewehrungsrichtungen jeweils eine Zugkraft und in die gewählte Druckstrebenrichtung eine Druckkraft.

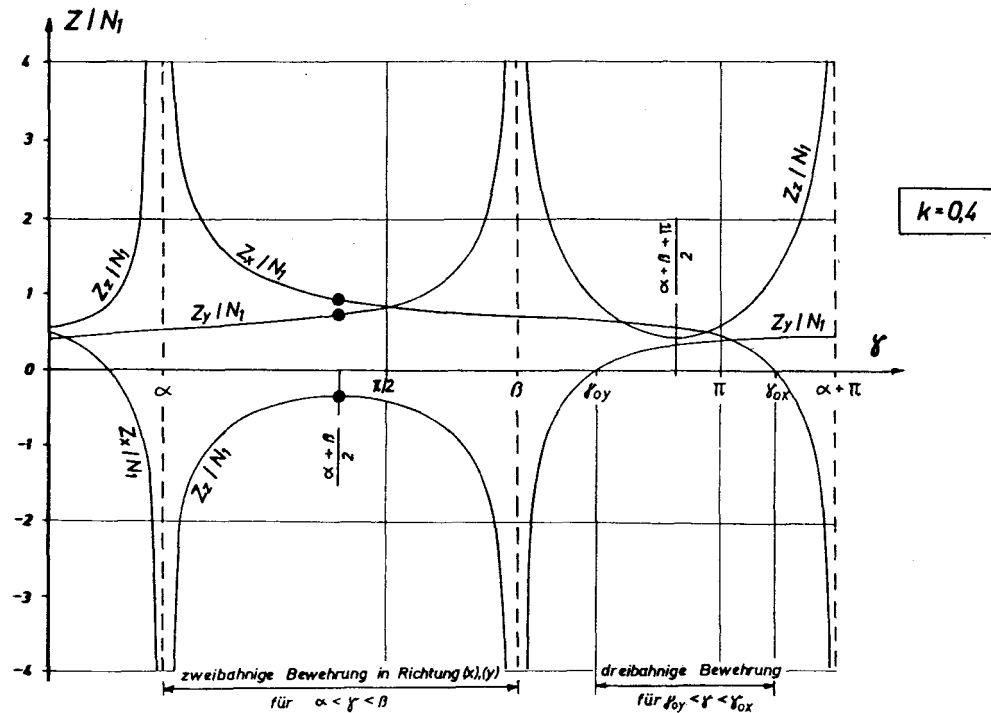


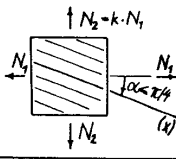
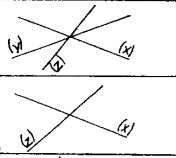
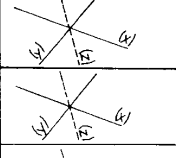
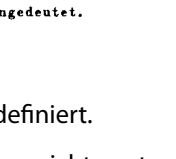
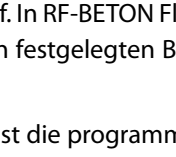
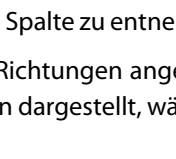

Bild 2.14: Zweibahnige Bewehrung bei reiner Zugbeanspruchung

Die Untersuchungen von BAUMANN [1] setzen bestimmte Wertebereiche für die verschiedenen Winkel voraus. So hat der Winkel α (zwischen der Hauptnormalkraft N_1 und der ihr am nächsten liegenden Bewehrungsrichtung) zwischen 0 und $\pi/4$ zu liegen. Der Winkel β muss größer als $\alpha + \pi/2$ sein.

In [1] wird die Tabelle IV mit den möglichen Gleichgewichtszuständen vorgestellt (siehe Bild 2.15). In den Zeilen 1 bis 4 dieser Tabelle finden sich die möglichen Gleichgewichtszustände für Scheiben, die ausschließlich auf Zug beansprucht sind. Zeile 4 stellt den Gleichgewichtszustand mit zwei zugbeanspruchten Bewehrungsscharen und einer Druckstrebe dar. Die Zeilen 5 bis 7 zeigen Scheiben, für die die Hauptnormalkräfte unterschiedliche Vorzeichen aufweisen.

Tabelle IV:

Zweckmäßige Wahl der Winkel β und γ für eine gegebene Richtung $0 < \alpha < \pi/4$ der Bewehrungsschar (x)

Zeile	Verhältnis $k = N_2/N_1$ der Schnittkräfte	Anzahl der erforderlichen Bewehrungsscharen	Richtung β der Bewehrungsschar (y)	Richtung γ der Kraft Z_z	durch Bewehrung aufzunehmende Zugkräfte in Richtung	vom Beton aufzunehmende Druckkraft in Richtung	Bewehrungsanordnung ¹⁾	Zeile
1	$0 < k < 1$	3	$\alpha < \beta < \gamma_{oy}$	$\gamma_{oy} < \gamma < \gamma_{ox}$	(x), (y), (z)	-		1
2			$\gamma_{oy} < \beta < \pi$	$\gamma_{ox} < \gamma < \gamma_{oy}$	(x), (y), (z)	-		2
3		2	—	$\gamma = \gamma_{oy}$	(x), (z)	-		3
4			$\alpha + \pi/2 < \beta < \gamma_{oy}$	$\gamma = \frac{\alpha + \beta}{2}$	(x), (y)	(z)		4
5	$-\tan^2 \alpha \leq k \leq 0$	2	$\alpha + \pi/2 < \beta < \pi - \alpha$	$\gamma = \frac{\alpha + \beta}{2}$	(x), (y)	(z)		5
6	$k < -\tan^2 \alpha$	2	$\alpha + \pi/2 < \beta < \pi - \alpha$ und $\beta > 2\gamma_{oy} - \alpha$	$\gamma = \frac{\alpha + \beta}{2}$	(x), (y)	(z)		6
7		1	—	$\gamma = \gamma_{oy}$	(x)	(z)		7

¹⁾ Bewehrungsscharen sind durch ausgezogene, Betondruckkräfte durch unterbrochene Linien angedeutet.

Bild 2.15: Mögliche Gleichgewichtszustände nach [1]

In der zweiten Spalte dieser Tabelle wird der Wertebereich der Belastung definiert.

Die dritte Spalte gibt an, wie viele Bewehrungsscharen für diesen Gleichgewichtszustand eine Zugkraft erhalten.

Die vierte Spalte (β) zeigt den Wertebereich der Bewehrungsrichtung β auf. In RF-BETON Flächen steht dieser nicht zur Disposition, da er sich aus den in den Eingabedaten festgelegten Bewehrungsrichtungen ergibt.

Die fünfte Spalte (γ) gibt die Richtung der inneren Kraft Z_z aus. Sie ist meist die programmseitig bestimmte Richtung der Druckstrebe, kann aber auch eine durch den Benutzer definierte dritte Bewehrungsschar sein, die tatsächlich eine Zugkraft erhält.

Ob die Kraft in die Richtung γ tatsächlich eine Druckkraft ist, ist der siebten Spalte zu entnehmen.

In der vorletzten Spalte werden die benötigten inneren Kräfte mit ihren Richtungen angezeigt. Dabei sind Bewehrungsscharen, die eine Zugkraft erhalten, durch Volllinien dargestellt, während mögliche Druckstreben durch Strichlinien versinnbildlicht sind.

2.3.3 Zweibahnige Bewehrungsnetze mit $k < 0$

Weisen in einem zweibahnigen Bewehrungsnetz die Hauptnormalkräfte N_1 und N_2 unterschiedliche Vorzeichen auf, ergibt sich für das Kräftegleichgewicht in den beiden Bewehrungsrichtungen jeweils eine Zugkraft und in die gewählte Druckstrebenrichtung eine Druckkraft.

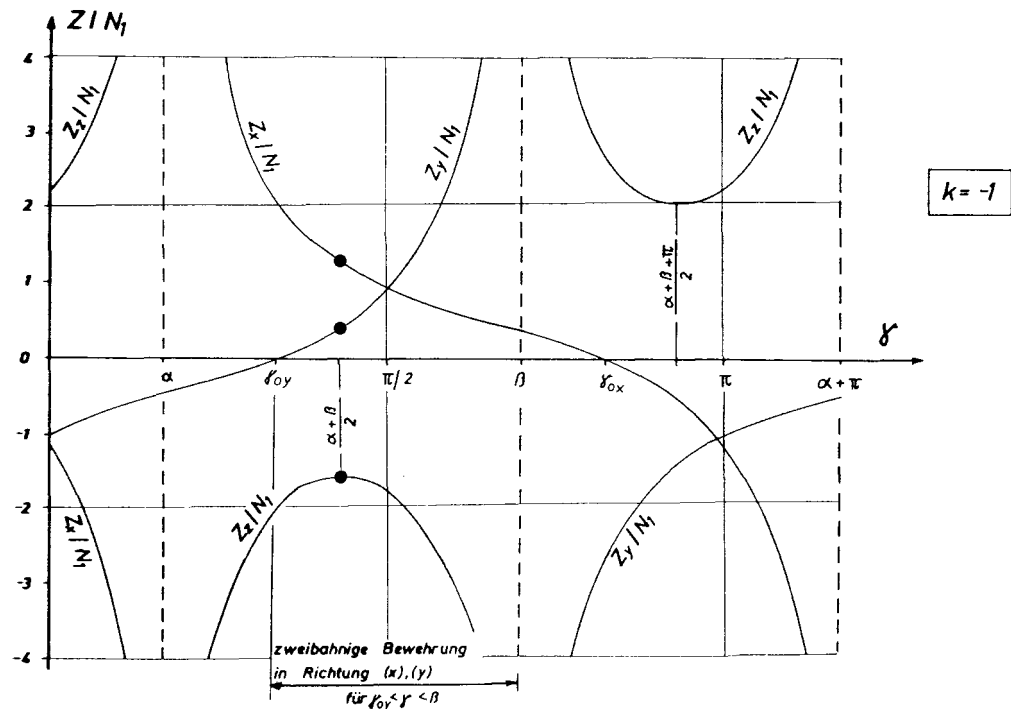


Bild 2.16: Zweibahnige Bewehrung bei Zug- und Druckbeanspruchung

Beispiele für diesen möglichen Gleichgewichtszustand sind in Tabelle IV (Bild 2.15) in den Zeilen 5 und 6 zu finden.

Für eine Scheibe, die sowohl Zug- als auch Druckbeanspruchung erhält, kann es jedoch sein, dass sich für die gewählte Richtung der Betondruckstrebe (arithmetisches Mittel zwischen den beiden Bewehrungsrichtungen) eine Druckstrebe wie erwartet in Richtung γ und eine weitere in Richtung β ergibt. Dies ist genau dann der Fall, wenn sich das arithmetische Mittel im obigen Diagramm links vom Nulldurchgang des Kräfteverlaufs von Z_y befindet. Diese Art des Gleichgewichts ist jedoch nicht möglich. Es wird die Bewehrung der konjugierten Richtung ermittelt, d. h. für die Druckstrebenrichtung γ wird der Wert γ_{0y} verwendet.

$$\tan \gamma_{0y} = -k \cdot \cot \alpha \quad (2.12)$$

Dies bedeutet, dass in der zweiten Bewehrungsschar y unter dem Winkel β keine Kraft auftritt. Ein Beispiel für dieses Gleichgewicht der Kräfte zeigt Zeile 7 in Tabelle IV (Bild 2.15). Im Modul RF-BETON Flächen wird ein solcher Gleichgewichtsfall dann erfasst, wenn sich für die routinemäßig angenommene Druckstrebenrichtung (arithmetisches Mittel zwischen den Richtungen der beiden Bewehrungsscharen) eine Druckkraft in Richtung der Bewehrungsschar y ergibt.

Damit sind alle möglichen Gleichgewichtszustände für zweibahnige Bewehrungen vorgestellt.

2.3.4 Mögliche Belastungssituationen

Die Belastung ergibt sich durch die Hauptnormkräfte n_1 und n_2 , wobei die Hauptnormkraft n_1 unter Berücksichtigung des Vorzeichens stets größer ist als die Hauptnormkraft n_2 .

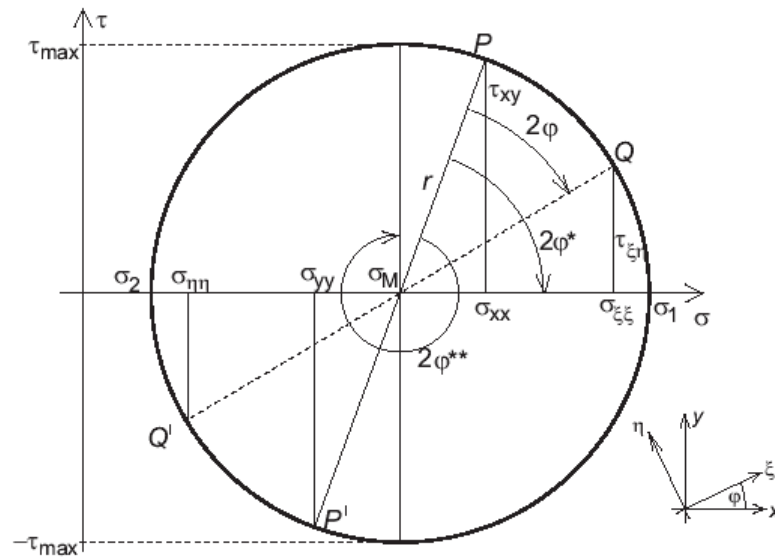


Bild 2.17: Mohrscher Spannungskreis

Je nach Vorzeichen der Hauptnormkräfte werden verschiedene Belastungssituationen unterschieden.

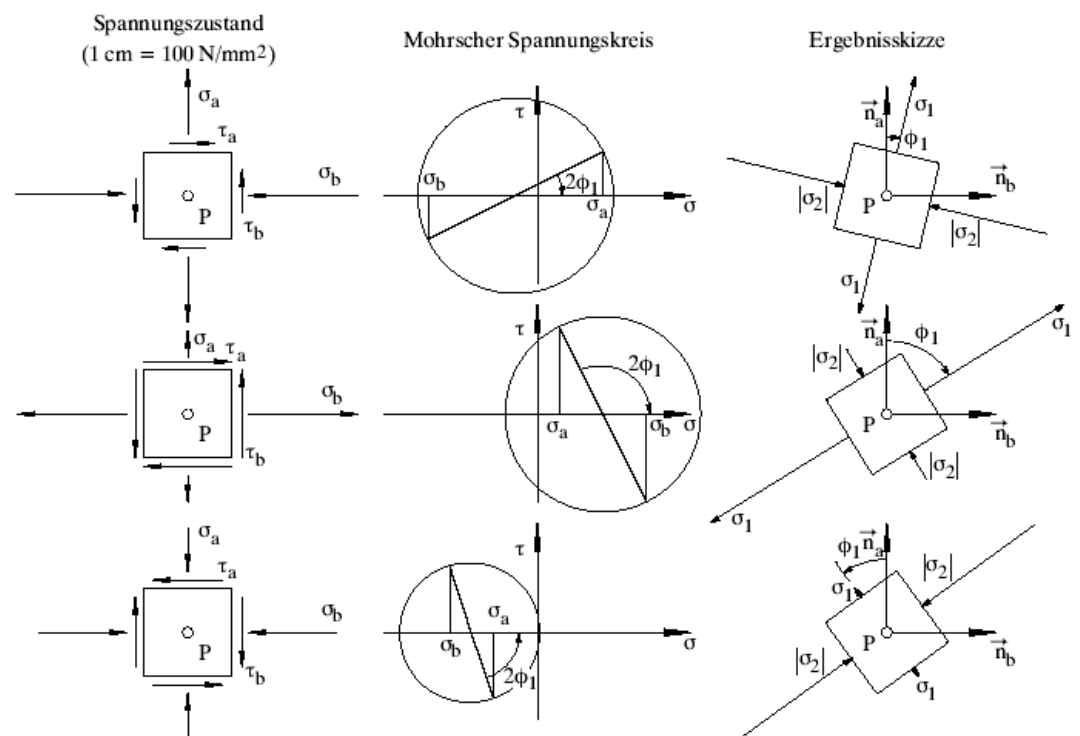


Bild 2.18: Belastungssituationen

In einer Hauptnormalkraftmatrix ergeben sich folgende Bezeichnungen der einzelnen Belastungssituationen (n_1 hier als n_I bezeichnet, n_2 als n_{II}):

$\begin{matrix} n_I \\ n_{II} \end{matrix}$	$n_I > 0$	$n_I = 0$	$n_I < 0$
$n_{II} > 0$	Elliptischer Zug (Zug - Zug)	<i>Nicht möglich</i>	<i>Nicht möglich</i>
$n_{II} = 0$	Parabolischer Zug	<i>Keine Belastung</i>	<i>Nicht möglich</i>
$n_{II} < 0$	Hyperbolischer Zustand (Zug - Druck)	Parabolischer Druck	Elliptischer Druck (Druck - Druck)

Bild 2.19: Hauptnormalkraftmatrix für Belastungssituationen

Die Ermittlung der Bemessungsnormalkräfte mithilfe [Gleichung 2.5](#) bis [Gleichung 2.7](#) ist für die Belastungssituationen *Elliptischer Zug* und *Hyperbolischer Zustand* in den vorherigen Abschnitten erläutert. Für die Belastungssituation *Parabolischer Zug* ergeben sich die Bemessungsnormalkräfte in gleicher Weise. Der Wert k ist in [Gleichung 2.5](#) bis [Gleichung 2.7](#) mit Null anzusetzen.

Es sind noch die Bemessungsnormalkräfte für folgende Belastungssituationen zu erklären.

Elliptischer Druck bei dreibahnigem Netz

[Gleichung 2.5](#) bis [Gleichung 2.7](#) werden unverändert angewandt, auch wenn die beiden Hauptnormalkräfte n_1 und n_2 negativ sind. Ergibt sich für jede der drei Bewehrungsrichtungen eine negative Bemessungsnormalkraft, wird keine der eingelegten Bewehrungsscharen aktiviert. Der Beton ist in der Lage, alleine die Hauptnormalkräfte abzutragen, also ohne die Ausbildung eines auf Zug beanspruchten Bewehrungsnetzes, das durch eine Betondruckstrebe ausgesteift wird.

Die Annahme, dass sich zur Aufnahme der Hauptnormalkräfte Betondruckkräfte in Richtung der eingelegten Bewehrung ausbilden, ist rein hypothetisch. Es liegt der Wunsch zu Grunde, eine Aufteilung der Hauptdruckkräfte in Richtung der einzelnen Bewehrungsscharen zu erhalten, um so die z. B. in EN 1992-1-1, Abschnitt 9.2.1.1 geforderte Mindestdruckbewehrung bestimmen zu können. Hierzu wird der statisch erforderliche Betonquerschnitt benötigt, der nur mithilfe der zuvor ermittelten Betondruckkräfte in Richtung der eingelegten Bewehrung ermittelt werden kann.

Zwar kommen andere Normen bei der Ermittlung der Mindestdruckbewehrung ohne einen statisch erforderlichen Betonquerschnitt aus, der sich aus der transformierten Hauptnormalkraft in eine Bemessungsnormalkraft ergibt. Aber für ein einheitliches normenübergreifendes Transformationsverfahren werden die Hauptdruckkräfte auch für diese Normen in die definierten Bewehrungsrichtungen transformiert. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bemessung mit transformierten Druckkräften auf der sicheren Seite liegt. Es werden die Betonpressungen nachgewiesen, die dann in Richtung der einzelnen Bewehrungsscharen auftreten.

Ist jedoch nach der Transformation mindestens eine der Bemessungsnormalkräfte positiv, so wird für diesen Belastungszustand das Bewehrungsnetz aktiviert. Wie in [Kapitel 2.3.2](#) und [2.3.3](#) beschrieben ist dann ein inneres Kräftegleichgewicht in Form von zwei Bewehrungsscharen und einer gewählten Betondruckstrebe herzustellen.

Elliptischer Druck bei zweibahnigem Netz

Gleichung 2.5 bis Gleichung 2.7 werden unverändert angewandt. Ist die Richtung der beiden Hauptnormalkräfte identisch mit der Richtung der beiden Bewehrungsscharen, sind die Bemessungsnormalkräfte gleich den Hauptnormalkräften.

Weichen die Hauptnormalkräfte von den Bewehrungsrichtungen ab, so wird wieder das Gleichgewicht zwischen einer Druckstrebe im Beton und den Bemessungsnormalkräften in den Bewehrungsscharen gesucht. Es werden dabei für die Richtung der Druckstrebe wieder die beiden Zwischenwinkel zwischen den Bewehrungsscharen untersucht. Wie beim elliptischen Zug gilt: Die Annahme einer Druckstrebenrichtung gilt dann als korrekt, wenn die Druckstrebe tatsächlich eine negative Bemessungskraft erhält. Finden sich für beide Druckstrebenrichtungen zulässige Lösungen, so entscheidet der kleinste Betrag aller Bemessungsnormalkräfte, welche Lösung gewählt wird.

Ist die Bemessungsnormalkraft für eine Bewehrungsrichtung eine Druckkraft, wird zunächst kontrolliert, ob der Beton diese Bemessungsnormalkraft aufnehmen kann. Ist dies nicht der Fall, wird eine Druckbewehrung ermittelt.

Parabolischer Druck bei zweibahnigem Netz

In dieser Belastungssituation ist die Hauptnormalkraft n_1 Null. Da der Quotient $k = n_2 / n_1$ nicht mehr gebildet werden kann, lassen sich Gleichung 2.5 bis Gleichung 2.7 nicht in gewohnter Weise verwenden. Es sind folgende Modifikationen notwendig.

$$\begin{aligned} \frac{Z_x}{N_1} &= \frac{\sin \beta \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma}{\sin (\beta - \alpha) - \sin (\gamma - \alpha)} \\ \frac{Z_y}{N_1} &= \frac{\sin \alpha \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma}{\sin (\beta - \alpha) - \sin (\beta - \gamma)} \\ \frac{Z_z}{N_1} &= \frac{-\sin \alpha \cdot \sin \beta + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin (\beta - \gamma) - \sin (\gamma - \alpha)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Mit diesen modifizierten Gleichungen wird in gleicher Weise nach den Bemessungsnormalkräften in den beiden Bewehrungsscharen und einer Bemessungsnormalkraft für den Beton gesucht. Ist eine Bewehrungsschar richtungsidentisch mit der einwirkenden Hauptnormalkraft, so ist ihre Bemessungsnormalkraft die Hauptnormalkraft. Anderenfalls finden sich wieder Lösungen mit einer Druckstrebe zwischen den beiden Bewehrungsscharen.

Parabolischer Druck bei dreibahnigem Netz

Es werden die oben vorgestellten Formeln gemäß Gleichung 2.13 verwendet.

Falls die Hauptnormalkraft in Richtung einer Bewehrungsschar verläuft, werden (wie beim parabolischen Zug) Lösungen für eine Druckstrebenrichtung zwischen der ersten und der zweiten Bewehrungsrichtung bzw. der ersten und der dritten Bewehrungsrichtung untersucht. Es entscheidet wieder der kleinste Betrag aller Bemessungsnormalkräfte, welche Lösung gewählt wird.

2.3.5 Nachweis der Betondruckstrebe

Eine der Bemessungskräfte stellt die Betondruckkraft in die gewählte Betondruckstrebenrichtung dar. Es wird untersucht, ob der Beton in der Lage ist, die Druckkraft aufzunehmen. Dabei wird jedoch nicht die volle zulässige Betondruckspannung f_{cd} angesetzt, sondern es wird der Empfehlung von SCHLAICH/SCHÄFER ([2], Seite 373) sinngemäß gefolgt und die zulässige Betondruckspannung auf 80 % reduziert.

Mit der reduzierten Betondruckspannung $f_{cd,08}$ wird die Größe der aufnehmbaren Normalkraft $n_{strebe,d}$ pro Meter bestimmt, indem man diese mit einer Breite von einem Meter und der Wanddicke multipliziert.

$$n_{strebe,d} = f_{cd,08} \cdot b \cdot d \quad (2.14)$$

Diese aufnehmbare Betondruckkraft kann nun mit der einwirkenden Betondruckkraft n_{strebe} verglichen werden. Der Nachweis der Betondruckstrebe gilt als erfüllt, wenn gilt

$$n_{strebe,d} \geq n_{strebe} \quad (2.15)$$

Der Nachweis der Betondruckstrebe wird für sämtliche im Programm verfügbare Normen gleich geführt, natürlich mit den jeweils gültigen Materialeigenschaften.

2.3.6 Ermittlung der erforderlichen Bewehrung

Um die Größe des einzulegenden Bewehrungsquerschnitts zu bestimmen, wird die aufzunehmende Bemessungsnormalkraft n_ϕ in die jeweilige Bewehrungsrichtung ϕ durch die Stahlspannung an der Streckgrenze geteilt.

Die Stahlspannung an der Streckgrenze ist je nach Norm und Betonsorte unterschiedlich definiert. Zur Bemessung ist noch der jeweilige Teilsicherheitsfaktor für den Betonstahl zu berücksichtigen.

Wird die Bewehrung gestaucht anstatt gezogen, so ist die Stahlspannung für die zulässige Betonstauchung im Bruchzustand zu ermitteln. Diese ist in allen Normen gleich und beträgt 2‰. Die Stahlspannung lässt sich deshalb mit dem E-Modul wie folgt ermitteln:

$$\sigma = E_s \cdot 0,002 \quad (2.16)$$

Sollte die Stahlspannung größer sein als die Stahlspannung an der Streckgrenze, wird die Stahlspannung an der Streckgrenze verwendet. Im Übrigen wird eine Druckbewehrung nur dann ermittelt, wenn die aufnehmbare Normalkraft $n_{strebe,d}$ pro Meter des Betons geringer als die einwirkende, druckerzeugende Bemessungsnormalkraft. Die Druckbewehrung wird dann für die Differenz der beiden Normalkräfte bemessen.

2.3.7 Bewehrungsregeln

In allen Normen existieren für Flächentragwerke Vorschriften über Größe und Richtung der einzulegenden Bewehrung. Dazu werden die Flächentragwerke von der Norm in bestimmte Bauteiltypen unterschieden. EN 1992-1-1 beispielsweise nennt folgende Bauteiltypen:

- Platte
- Wand
- Wandartiger Träger

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem benutzerdefinierten *Modelltyp*, dem Modell für Bemessung und dem Bauteiltyp gemäß Norm, mit dem die Größe und die Richtung von Mindest- bzw. Höchstbewehrung bestimmt werden.

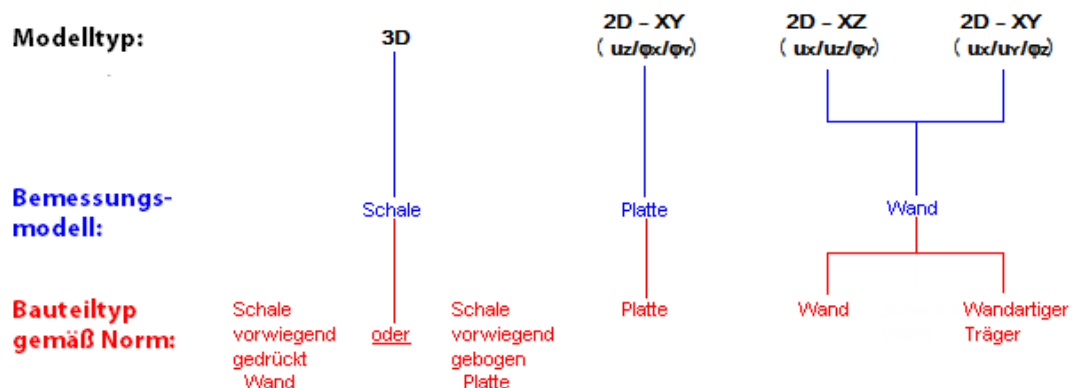


Bild 2.20: Zusammenhang zwischen Modelltyp, Bemessungsmodell und Bauteiltyp

Wird als Modelltyp 3D (siehe Bild 2.1, Seite 7) gewählt, so wird das Bauteil immer als Schale bemessen – unabhängig davon, ob in Bereichen des Bauteils sowohl Normalkräfte als auch Momente auftreten oder ob nur eine dieser Schnittgrößen vorliegt. Ein als 2D – XY($u_z/\phi_x/\phi_y$) definierter Modelltyp wird stets als Platte bemessen, die beiden Typen 2D – XZ($u_x/u_z/\phi_y$) und 2D – XY($u_x/u_y/\phi_z$) werden als Wände nachgewiesen.

Nach Wahl des Bauteiltyps werden bei der Ermittlung der erforderlichen Bewehrung automatisch die Regeln der jeweiligen Norm angewandt. Diese Regeln werden kurz für **EN 1992-1-1** vorgestellt, die die Bauteiltypen *Vollplatten*, *Wände* und *Wandartige Träger* unterscheidet.

Vollplatten

Für Vollplatten schreibt EN 1992-1-1 Folgendes vor:

- Abschnitt 9.2.1.1 (1): Die Mindestquerschnittsfläche der Längszugbewehrung muss in der Regel $A_{s,min}$ entsprechen.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d \quad (2.17)$$

- Abschnitt 9.2.1.1 (3): Die Querschnittsfläche der Zug- oder Druckbewehrung darf in der Regel außerhalb von Stoßbereichen $A_{s,max}$ nicht überschreiten. Der empfohlene Wert ist $0,04 A_c$.

Nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010 darf die Summe der Zug- und Druckbewehrung $A_{s,max} = 0,08 \cdot A_c$ nicht überschreiten. Dies gilt auch im Bereich von Übergreifungsstößen.

Wände

Für Wände finden sich in EN 1992-1-1 folgende Vorgaben:

- Abschnitt 9.6.2 (1): Die Querschnittsfläche der vertikalen Bewehrung muss in der Regel zwischen $A_{s,vmin}$ und $A_{s,vmax}$ liegen. Die empfohlenen Werte sind $A_{s,vmin} = 0,002 \cdot A_c$ und $A_{s,vmax} = 0,04 \cdot A_c$ außerhalb der Stoßbereiche.

Nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010 gilt

$$- \text{allgemein: } A_{s,vmin} = 0,15 \mid N_{Ed} \mid \div f_{yd} \geq 0,0015 \cdot A_c$$

$$- A_{s,vmax} = 0,04 \cdot A_c \text{ (dieser Wert darf innerhalb von Stoßbereichen verdoppelt werden)}$$

Der Bewehrungsgehalt sollte an beiden Wandaußenseiten gleich groß sein.

- Abschnitt 9.6.3 (1): Eine horizontale Bewehrung, die parallel zu den Wandaußenseiten (und zu den freien Kanten) verläuft, ist in der Regel außenliegend einzulegen. Sie muss in der Regel mindestens $A_{s,hmin}$ betragen. Der empfohlene Wert ist der größere Wert aus 25 % der vertikalen Bewehrung und $0,001 \cdot A_c$. Nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010 gilt

$$- \text{allgemein: } A_{s,hmin} = 0,20 \cdot A_{s,v}$$

Der Durchmesser der horizontalen Bewehrung muss mindestens ein Viertel des Durchmessers der lotrechten Stäbe betragen.

Wandartiger Träger

Gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 5.3.1 (3) liegt ein wandartiger Träger vor, wenn die Stützweite des Bauteils kleiner als die dreifache Querschnittshöhe ist. In diesem Fall gilt:

- Abschnitt 9.7 (1): Wandartige Träger sind in der Regel an beiden Außenflächen mit einer rechtwinkligen Netzbewehrung mit einer Mindestquerschnittsfläche von $A_{s,dbmin}$ zu versehen. Der empfohlene Wert ist $0,001 \cdot A_c$, aber nicht weniger als $150 \text{ mm}^2/\text{m}$ je Außenfläche und Richtung.

Nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010 gilt

$$- A_{s,dbmin} = 0,075\% \text{ von } A_c \geq 150 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Normübergreifende, selbstdefinierte Bewehrungsregeln

Neben den normativen und deshalb nicht änderbaren Bewehrungsvorgaben besteht die Möglichkeit, eigene Bewehrungsregeln zu definieren. Diese Mindestbewehrungen können im Register *Bewehrungsgrade* der Maske 1.4 *Bewehrung* festgelegt werden.

The screenshot shows the 'Bewehrungsgrade' register with the following settings:

- Mindest-Querbewehrung: 20.00 [%]
- Mindest-Bewehrung generell: 0.00 [%]
- Mindest-Zugbewehrung: 0.00 [%]
- Mindest-Druckbewehrung: 0.00 [%]
- Maximaler Bewehrungsgrad: 4.00 [%]
- Minimaler Schubbewehrungsgrad: 0.00 [%]

Bild 2.21: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsgrade*

Berechnung

Wird beispielsweise eine Mindestquerbewehrung von 20 % der größten eingelegten Längsbewehrung vorgegeben, so wird bei der [Berechnung] zunächst die maximale Längsbewehrung ermittelt. Diese wird in den Ergebnismasken als *Erforderliche Bewehrung* ausgewiesen.

2.1 Erforderliche Bewehrung Gesamt

Fläche Nr.	A Rasterpunkt	B Punkt-Koordinaten [m]			E Symbol	F Erforderliche Bewehrung	G Grund-Bewehrung	H Zusatzbewehrung		J Einheit	K Hinweis
		X	Y	Z				Erforderlich	Vorhanden		
3	R253	6.000	6.000	0.000	a _{s,1,-z} (oben)	7.76	2.57	5.19	-	cm ² /m	
4	R180	9.500	0.000	0.000	a _{s,2,-z} (oben)	6.36	2.57	3.79	-	cm ² /m	
5	R171	5.000	4.000	0.000	a _{s,1,+z} (unten)	8.54	2.57	5.97	-	cm ² /m	
5	R171	5.000	4.000	0.000	a _{s,2,+z} (unten)	16.10	2.57	13.53	-	cm ² /m	
5	R171	5.000	4.000	0.000	a _{sw}	19.82	-	-	-	cm ² /m ²	

Bemessungsdetails

☐ In FE-Punkten
 ☒ In Rasterpunkten
 Erfor. Bewehrung für: GZT

Bild 2.22: Erforderliche Längsbewehrung und Schaltfläche [Bemessungsdetails]



Die Mindestquerbewehrung lässt sich über die Schaltfläche [Bemessungsdetails] überprüfen.

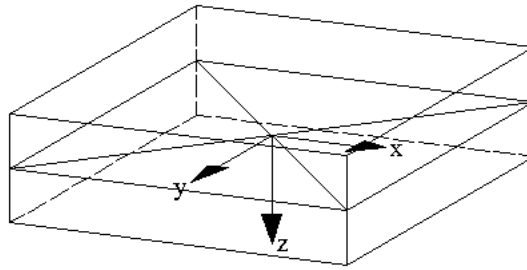


Bild 2.24: Plattenelement mit lokalem Flächen-Koordinatensystem in Plattenschwereebene



Oberer und Unterer Seite

In RFEM liegt die Flächenunterseite stets in Richtung der positiven lokalen z-Flächenachse, die Oberseite entsprechend in Richtung der negativen lokalen z-Achse. Die Flächenachsen lassen sich im Zeigen-Navigator über *Modell* → *Flächen* → *Flächen-Achsensysteme* x, y, z oder das Kontextmenü der Flächen einblenden (siehe Bild 3.29, Seite 147).

Die Hauptschnittgrößen m_1 und m_2 werden in RFEM für die Plattenschwereebene ermittelt.

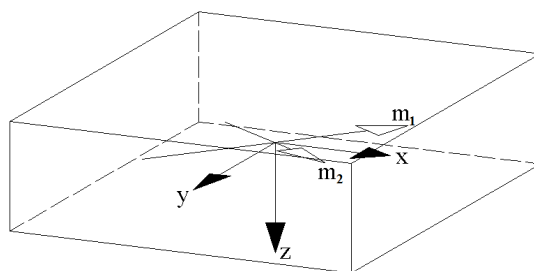


Bild 2.25: Hauptmomente m_1 und m_2 in Plattenschwereebene

Die Hauptmomente werden als einfache Pfeile dargestellt. Sie sind so orientiert wie die Bewehrung, die zu ihrer Aufnahme nötig wäre. Um aus diesen Hauptmomenten Bemessungsmomente für das Bewehrungsnetz an der Plattenunterseite zu erhalten, werden die Hauptmomente unverändert zur Plattenunterseite verschoben. Diese werden für die Bemessung mit römischen Indizes als m_I und m_{II} bezeichnet.

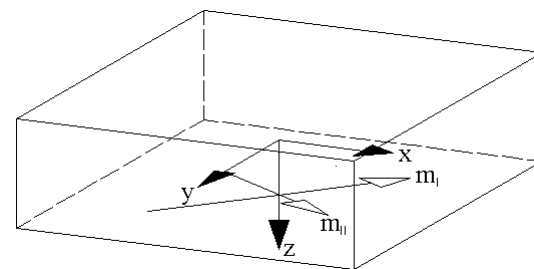


Bild 2.26: Hauptmomente verschoben an Plattenunterseite

Um die Hauptmomente zur Bestimmung der Bemessungsmomente für das Bewehrungsnetz an der Plattenoberseite zu erhalten, werden die Hauptmomente an die Plattenoberseite verschoben. Gleichzeitig wird ihre Richtung um 180° gedreht.

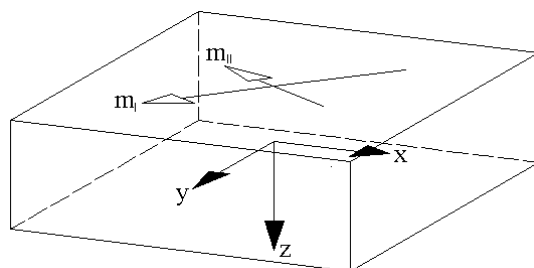


Bild 2.27: Hauptmomente verschoben an Plattenoberseite

Da üblicherweise das Hauptmoment als m_I bezeichnet wird, das unter Beachtung des Vorzeichens größer ist (siehe Bild 2.27, Seite 26), müssen die Bezeichnungen der Hauptmomente an der Plattenoberseite noch vertauscht werden.

Die Hauptmomente zur Bestimmung der Bemessungsmomente an den beiden Plattenseiten stellen sich somit wie folgt dar:

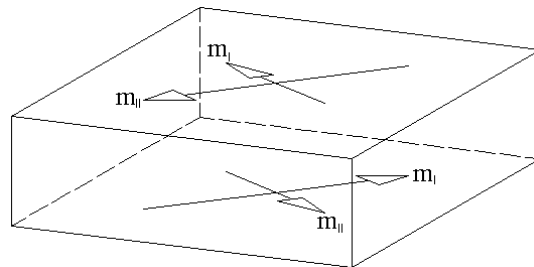


Bild 2.28: Endgültige Hauptmomente an Plattenober- und Plattenunterseite

Sind die Hauptmomente für beide Plattenseiten bekannt, können die Bemessungsmomente bestimmt werden. Dazu werden in einem ersten Schritt die Differenzwinkel der Bewehrungsrichtungen zur Richtung des Hauptmoments an jeder Plattenseite ermittelt.

Der kleinste Differenzwinkel gibt den positiven Umfassungssinn vor. Alle anderen Winkel werden in diesem positiven Umfassungssinn ermittelt und anschließend der Größe nach sortiert. In RF-BETON Flächen erhalten sie wie in folgendem Beispiel dargestellt die Bezeichnungen $\alpha_{m,+z}$, $\beta_{m,+z}$ und $\gamma_{m,+z}$. Mit dem Index +z wird die Flächenunterseite gekennzeichnet.

☐ Bemessungsbericht		
☐ Schnittgrößen der linearen Statik		
☐ Hauptschnittgrößen		
☐ Bemessungsschnittgrößen		
☐ Unterseite (+z)		
☐ Bemessungsmomente		
☐ Hauptmomente		
☐ Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der		
☐ 1. Bewehrungsrichtung	$\Delta\phi_{+z,1,b}$	0.248 °
☐ 2. Bewehrungsrichtung	$\Delta\phi_{+z,2,b}$	90.248 °
☐ 3. Bewehrungsrichtung	$\Delta\phi_{+z,3,b}$	45.248 °
☐ Differenzwinkel nach Baumann		
☐ 1. Differenzwinkel	$\alpha_{m,+z}$	0.248 °
☐ 2. Differenzwinkel	$\beta_{m,+z}$	45.248 °
☐ 3. Differenzwinkel	$\gamma_{m,+z}$	90.248 °

Bild 2.29: Differenzwinkel nach [1] für Plattenunterseite (hier für 3 Bewehrungsrichtungen)

Anschließend werden Gleichung 2.5 bis Gleichung 2.7 nach BAUMANN [1] verwendet, um die Bemessungsmomente zu bestimmen:

$$\begin{aligned}
 m_{\alpha} &= m_I \cdot \frac{\sin \beta \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma}{\sin (\beta - \alpha) - \sin (\gamma - \alpha)} \\
 m_{\beta} &= m_I \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \gamma + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma}{\sin (\beta - \alpha) - \sin (\beta - \gamma)} \\
 m_{\gamma} &= m_I \cdot \frac{-\sin \alpha \cdot \sin \beta + k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin (\beta - \gamma) - \sin (\gamma - \alpha)}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

In RF-BETON Flächen werden die Bemessungsmomente $m_{\alpha,+z}$, $m_{\beta,+z}$ und $m_{\gamma,+z}$ für die Plattenunterseite wie folgt ausgegeben:

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht			
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel nach Baumann			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
1. Bemessungsbiegemoment		$m_{\alpha,+z}$	35.89 kNm/m
2. Bemessungsbiegemoment		$m_{\beta,+z}$	-0.31 kNm/m
3. Bemessungsbiegemoment		$m_{\gamma,+z}$	0.39 kNm/m

Bild 2.30: Bemessungsmomente nach [1] für Plattenunterseite

In diesem Beispiel ist eines der Bemessungsmomente kleiner als Null. Es wird nun ein Bewehrungsnetz aus zwei Bewehrungslagen gesucht, das durch eine Betondruckstrebe ausgesteift wird.

Das erste angenommene Bewehrungsnetz besteht aus den beiden Bewehrungsscharen in die Richtungen α_m und β_m . Die Richtung γ der aussteifenden Betondruckstrebe (des aussteifenden, an dieser Plattenseite druckerzeugenden Moments) wird genau zwischen diesen Bewehrungsscharen angenommen.

$$\gamma_{1a,m} = \frac{\alpha_m + \beta_m}{2} \quad (2.19)$$

Es werden mit adaptierter Gleichung 2.5 bis Gleichung 2.7 erneut die Bemessungsmomente in den gewählten Bewehrungsscharen des Netzes und das sie aussteifende Moment bestimmt. Im Beispiel führt dies für die untere Plattenseite zur folgenden Ausgabe.

<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel nach Baumann			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
1. Bemessungsbiegemoment	$m_{\alpha,+z}$	35.89	kNm/m
2. Bemessungsbiegemoment	$m_{\beta,+z}$	-0.31	kNm/m
3. Bemessungsbiegemoment	$m_{\gamma,+z}$	0.39	kNm/m
Haben die Bemessungsmomente unterschiedliche Vorzeichen?	sign $m_{\alpha,+z}$	Ja	
Betondruckstrebenrichtung ermitteln?	strebe $m_{\alpha,+z}$	Ja	
<input checked="" type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
Neuer Differenzwinkel	$\gamma_{m,+z,1a}$	22.748	°
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
1. Bemessungsbiegemoment	$m_{\alpha,+z,1a}$	36.82	kNm/m
2. Bemessungsbiegemoment	$m_{\beta,+z,1a}$	1.02	kNm/m
3. Bemessungsbiegemoment	$m_{\gamma,+z,1a}$	-1.87	kNm/m
Druckstrebenrichtung zulässig?	$m_{strebe,+z,1a}$	Ja	

Bild 2.31: Erste Annahme für Richtung γ der Betondruckstrebe

Die Annahme des Bewehrungsnetzes führt zu einer brauchbaren Lösung, da die Druckstrebenrichtung zulässig ist.

Die Analyse weiterer Druckstrebenrichtungen muss zeigen, ob es sich dabei um die energetisch kleinste Lösung mit dem geringsten Bewehrungsbedarf handelt. Diese Untersuchungen erfolgen analog.

Sind alle sinnvollen Möglichkeiten für ein Bewehrungsnetz aus zwei Bewehrungsscharen und einer aussteifenden Betondruckstrebe untersucht, werden die Summen der absoluten Bemessungsmomente bilanziert. Für das obige Beispiel sieht die Übersicht wie folgt aus.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik			
☑ Hauptschnittgrößen			
☑ Bemessungsschnittgrößen			
☑ Unterseite (+z)			
☑ Bemessungsmomente			
☑ Hauptmomente			
☑ Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
☑ Differenzwinkel nach Baumann			
☑ Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
☑ Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
☑ Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
☑ Erste Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe			
☑ Zweite Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe			
☑ Energie = Summe der abs(Bemessungsbiegemomente)			
☑ Kleinste Energie für alle zulässigen Fälle			
	$\Sigma_{min,+z}$	36.58	kNm/m
	Energie für Differenzwinkel $\gamma_{m,+z,1a}$	$\Sigma_{\gamma m,+z,1a}$	39.71 kNm/m
	Energie für Differenzwinkel $\beta_{m,+z,2a}$	$\Sigma_{\beta m,+z,2a}$	36.58 kNm/m

Bild 2.32: Summe der absoluten Bemessungsmomente

Es wird die *Kleinste Energie für alle zulässigen Fälle* $\Sigma_{min,+z}$ als minimale absolute Summe der ermittelten Bemessungsmomente angegeben. Im Beispiel liefert das Bewehrungsnetz aus den Bewehrungslagen für den Differenzwinkel $\beta_{m,+z,2a}$ die günstigste Lösung für die untere Plattenseite.

Bei den Bemessungsdetails wird auch die Richtung der maßgebenden Druckstrebe angegeben. Diese Richtung bezieht sich auf die Definition der Differenzwinkel nach BAUMANN. Deshalb wird zusätzlich die Richtung Φ_{strebe} bezogen auf die Bewehrungsrichtung ausgegeben. Im Beispiel wird für die untere Plattenseite folgender Druckstrebenwinkel ermittelt:

☑ Schnittgrößen der linearen Statik			
☑ Hauptschnittgrößen			
☑ Bemessungsschnittgrößen			
☑ Unterseite (+z)			
☑ Bemessungsmomente			
☑ Hauptmomente			
☑ Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
☑ Differenzwinkel nach Baumann			
☑ Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
☑ Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
☑ Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
☑ Erste Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe			
☑ Zweite Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe			
☑ Energie = Summe der abs(Bemessungsbiegemomente)			
☑ Kleinste Energie für alle zulässigen Fälle			
	$\Sigma_{min,+z}$	36.58	kNm/m
	Energie für Differenzwinkel $\gamma_{m,+z,1a}$	$\Sigma_{\gamma m,+z,1a}$	39.71 kNm/m
	Energie für Differenzwinkel $\beta_{m,+z,2a}$	$\Sigma_{\beta m,+z,2a}$	36.58 kNm/m

Bild 2.33: Maßgebende Druckstrebe

Bei optimierter Richtung des Bemessungsmoments, das das Bewehrungsnetz aussteift (siehe Bild 3.40, Seite 156), ergeben sich für obiges Beispiel die Bemessungsmomente nach BAUMANN. Diese Bemessungsmomente werden wie in folgendem Bild gezeigt auf die definierten Bewehrungsrichtungen übertragen.

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptmomente
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel nach Baumann
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbiegemomente nach Baumann
<input checked="" type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Zweite Annahme für die Richtung β der Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Energie = Summe der abs(Bemessungsbiegemomente)
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Druckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Bemessungsbiegemomente
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung
<input type="checkbox"/> in 3. Richtung
<input type="checkbox"/> in Streberichtung
<input type="checkbox"/> Streberichtung optimieren?
<input type="checkbox"/> Die gefundene Druckstrebe läuft in eine Richtung, die als Bewehrungsrichtung definiert wurde.
<input type="checkbox"/> Die ermittelte Druckstrebenkraft wird die Bemessungskraft dieser Bewehrungsrichtung.
<input type="checkbox"/> Die Kraft zur Bemessung der Betondruckstrebe wird zu Null angenommen.
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbiegemomente nach Baumann
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung
<input type="checkbox"/> in 3. Richtung
<input checked="" type="checkbox"/> Endbemessungsbiegemomente
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung
<input type="checkbox"/> in 3. Richtung
<input type="checkbox"/> in Streberichtung

Bild 2.34: Endgültige Bemessungsmomente für Plattenunterseite

2.4.2 Nachweis des aussteifenden Moments

Nach der Ermittlung der Bemessungsmomente erfolgt der Nachweis der Betondruckstrebe. Dabei wird überprüft, ob die Momente, die zur Aussteifung des Bewehrungsnetzes dienen, von der Platte aufgenommen werden können.

Bei den Bemessungsdetails findet sich dieser Nachweis unter dem Eintrag *Betondruckstrebe*:

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Ersatzscheibendicke
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input type="checkbox"/> Bemessungsmembrankraft in Streberichtung
<input type="checkbox"/> Kein Nachweis erforderlich: Betondruckstrebenkraft ist Null.
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmembrankraft in Streberichtung
<input checked="" type="checkbox"/> Aufnehmbare Membrankraft Beton
<input type="checkbox"/> Breite Ersatzscheibe
<input type="checkbox"/> Ersatzscheibendicke
<input checked="" type="checkbox"/> Angesetzte Betonfestigkeit
<input type="checkbox"/> Einaxiale Betondruckfestigkeit
<input type="checkbox"/> Grad der maximalen Ausnutzung
<input type="checkbox"/> Versagen der Betondruckstrebe?

Bild 2.35: Nachweis des aussteifenden Moments

Für die ermittelten Momente wird an Plattenunterseite und Plattenoberseite eine normale Biegebemessung durchgeführt. Diese zielt jedoch nicht darauf ab, eine Bewehrung zu finden: Vielmehr soll nachgewiesen werden, dass die Betondruckzone in der Lage ist, eine resultierende Betondruckkraft zu liefern, die multipliziert mit dem Hebelarm der inneren Kräfte zu einem größeren Moment auf der Widerstandsseite führt als das einwirkende Moment.

Der Nachweis gilt als nicht erfüllt, wenn das Moment auf der Widerstandsseite selbst bei der maximal zulässigen Biegestauchung des Betons und einer maximal zulässigen Zurücknahme einer angenommenen Bewehrung kleiner ist als das maßgebende Bemessungsmoment $m_{s_{strebe}}$.

In den aktuellen Normen wird die Einhaltung der zulässigen Dehnungen über die Begrenzung des Verhältnisses zwischen Höhe der Betondruckzone x und statischer Höhe d geregelt. Dabei werden die Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Betonstahl sowie die Grenzdehnungen dieser Normen verwendet (siehe folgende Erläuterungen für EN 1992-1-1).

Spannungs-Dehnungs-Linien für Querschnittsbemessung

Als Rechenwert der Spannungs-Dehnungs-Linie für den Beton wird das Parabel-Rechteck-Diagramm gemäß EN 1992-1-1, Bild 3.3 verwendet.

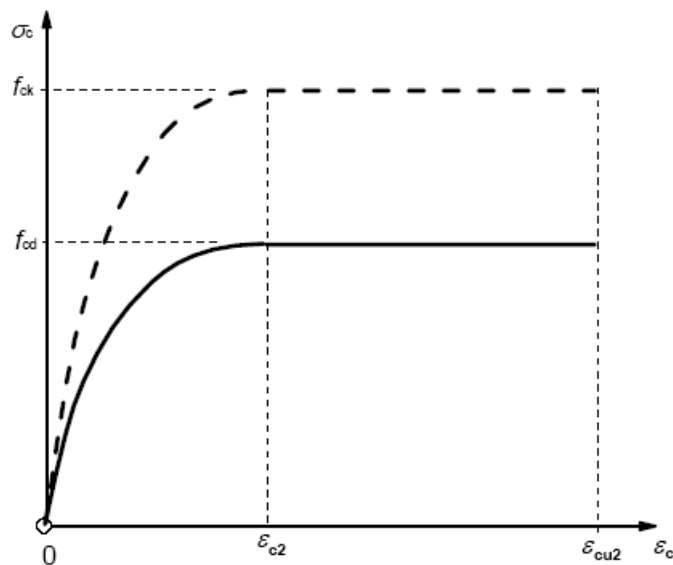


Bild 2.36: Spannungs-Dehnungs-Linie für Beton unter Druck

Die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls ist in EN 1992-1-1, Bild 3.8 dargestellt.

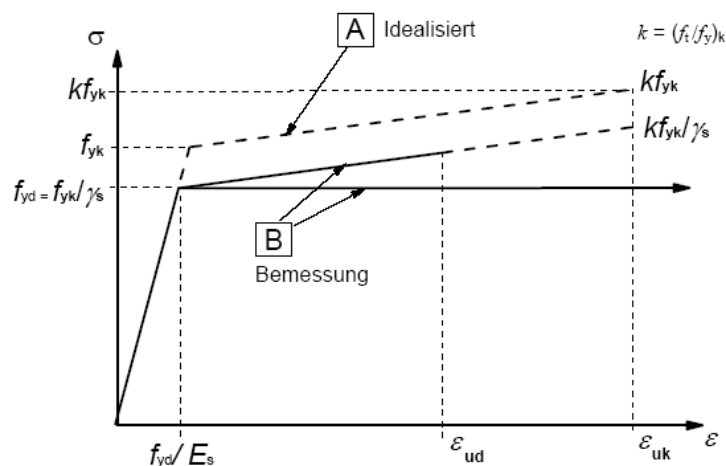


Bild 2.37: Spannungs-Dehnungs-Linie für Betonstahl

Die zulässigen Grenzverformungen sind in EN 1992-1-1, Bild 6.1 dargestellt:

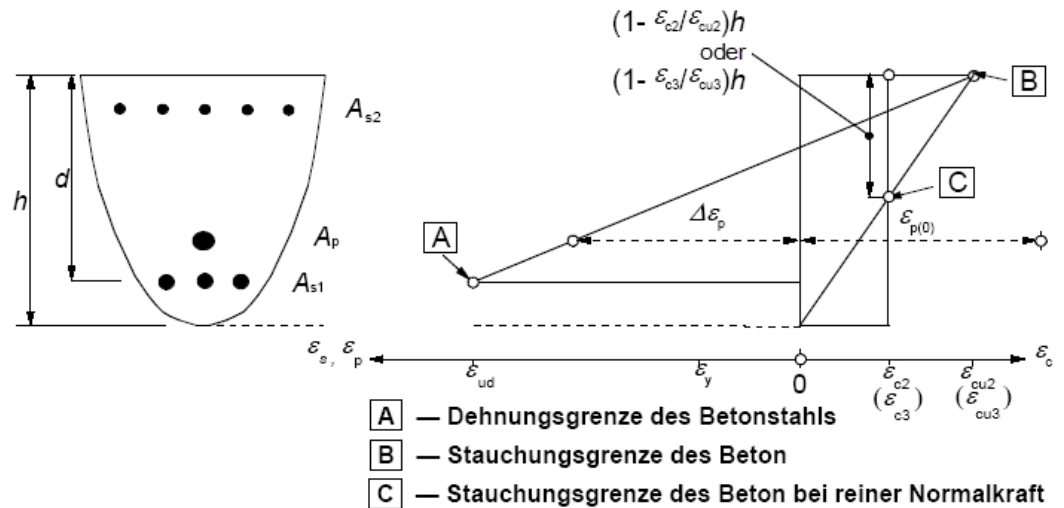


Bild 2.38: Grenzen der Dehnungsverteilung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit wird über die Grenzdehnungen bestimmt: Es versagt entweder der Beton oder der Betonstahl – je nachdem, wo die Grenzdehnung auftritt.

- Versagen des Betons, z. B. C30/37:
Grenzdehnung bei zentrischem Druck: $\epsilon_{c2} = -2,0\text{‰}$
Bruchdehnung: $\epsilon_{c2} = -3,5\text{‰}$
- Versagen des Betonstahls, z. B. B 500 S (A):
Stahldehnung unter Höchstlast: $\epsilon_{uk} = 25\text{‰}$
- Gleichzeitiges Versagen des Betons und des Betonstahls:
Die Grenzstauchungen des Betons und des Stahls treten gleichzeitig auf.

2.4.3 Ermittlung der statisch erforderlichen Bewehrung

Die im Kapitel 2.4.2 beschriebenen Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Betonstahl stellen mit den zulässigen Grenzdehnungen die Grundlage dar, um die erforderliche Längsbewehrung für die zuvor bestimmten Bemessungsmomente zu ermitteln. Dieser Prozess ist auch in den Bemessungsdetails dokumentiert.

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsnormalkräfte
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input type="checkbox"/> Kleinstes Hebelarm der inneren Kräfte
<input checked="" type="checkbox"/> aus Bemessung in 1. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> aus Bemessung in 2. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> aus Bemessung in 3. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> Membrankraft
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmembrankräfte
<input type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte
<input type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input type="checkbox"/> in 1. Bewehrungsrichtung
<input type="checkbox"/> Bemessungsmembrankraft
<input type="checkbox"/> Bemessungsspannung
<input type="checkbox"/> Maßgebender Bereich (sh. Handbuch)
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input type="checkbox"/> Dehnungen
<input type="checkbox"/> Dehnung des oberen (-z) Querschnittsrandes
<input type="checkbox"/> Dehnung der oberen (-z) Bewehrung
<input type="checkbox"/> Dehnung der unteren (+z) Bewehrung
<input type="checkbox"/> Dehnung des unteren (+z) Querschnittsrandes
<input type="checkbox"/> Verhältnis Druckzonenhöhe/Nutzhöhe
<input type="checkbox"/> Druckzonenhöhe
<input type="checkbox"/> Statische Nutzhöhe
<input type="checkbox"/> Spannungen
<input type="checkbox"/> Spannung am oberen (-z) Querschnittsrand
<input type="checkbox"/> Spannung in der oberen (-z) Bewehrung
<input type="checkbox"/> Spannung in der unteren (+z) Längsbewehrung
<input type="checkbox"/> Spannung am unteren (+z) Querschnittsrand
<input type="checkbox"/> in 2. Bewehrungsrichtung
<input type="checkbox"/> in 3. Bewehrungsrichtung
<input type="checkbox"/> Oberseite (-z)

Bild 2.39: Bemessungsdetails: Erforderliche Längsbewehrung

Es findet sich zunächst eine Unterteilung für die erforderliche Längsbewehrung an Plattenunterseite und -oberseite. Für *Unterseite* (+z) und *Oberseite* (-z) sind Haupteinträge verfügbar, die weitere Details für jede Bewehrungsrichtung enthalten.

Im Bild 2.39 ist zu erkennen, dass für die 2. und 3. Bewehrungsrichtung nur eine sehr geringe bzw. keine Bewehrung an der Plattenunterseite erforderlich ist.

Die 1. Bewehrungsrichtung ist für das Bemessungsbiegemoment $m_{\text{end},+z,\phi_1} = 35,89 \text{ kNm/m}$ zu bemessen. Dabei geben die Dehnungen Aufschluss über die Ermittlung der Längsbewehrung.

Das im Bild 2.39 gezeigte Beispiel soll mithilfe einer Bemessungstafel für ein dimensionsloses Bemessungsverfahren überprüft werden. Es liegen folgende Eingangsparameter vor:

- Querschnitt [cm]: Rechteck $b/h/d = 100/20/17$
- Materialien: Beton C20/25
B 500 S (A)
- Bemessungsschnittgrößen: $M_{\text{Eds}} = n s_{\text{end},+z,\phi_1} \cdot z_{+z,\phi_1} = 240,005 \cdot 0,161 = 38,64 \text{ kNm/m}$
 $N_{\text{Ed}} = 0,00 \text{ kNm/m}$

$$f_{cd} = \frac{\alpha \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 2,0}{1,5} = 1,13 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3864}{100 \cdot 17^2 \cdot 1,13} = 0,1183$$

Für ($\mu_{Eds} = 0,1183$) lassen sich aus den Bemessungstabellen (z. B. [3] Anhang A4) folgende Werte interpolieren:

$$\omega_1 = 0,1170 + \frac{(0,1285 - 0,1170) \cdot (0,1183 - 0,11)}{0,12 - 0,11} = 0,1265$$

$$\sigma_{sd} = 45,24 + \frac{(45,40 - 45,24) \cdot (0,1183 - 0,11)}{0,12 - 0,11} = 45,37 \text{ kN/cm}^2$$

Mit diesen Werten kann die erforderliche Längsbewehrung ermittelt werden:

$$A_{s1} = \frac{\omega_1 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{sd}} = \frac{0,1265 \cdot 100 \cdot 17 \cdot 1,13 + 0}{45,37} = 5,36 \text{ cm}^2/\text{m}$$

2.4.4 Querkraftbemessung

Die Querkraftbemessung unterscheidet sich wesentlich in den einzelnen Normen. Sie wird im Folgenden für EN 1992-1-1 vorgestellt.

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ist nur im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) zu führen. Die Einwirkungen und die Widerstände gehen mit ihren Bemessungswerten ein. Das allgemeine Nachweisformat lautet:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (2.20)$$

mit V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
(von RF-BETON Flächen ermittelte Hauptquerkraft)

V_{Rd} Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit

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

$V_{Rd,c}$ Aufnehmbare Querkraft eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung

$V_{Rd,s}$ Aufnehmbare Querkraft eines Bauteils mit Querkraftbewehrung; Begrenzung der Tragfähigkeit durch das Versagen der Querkraftbewehrung (Zugstrebenversagen)

$V_{Rd,max}$ Aufnehmbare Querkraft bedingt durch die Tragfähigkeit der Betondruckstrebe

Bleibt die einwirkende Querkraft V_{Ed} unter dem Wert von $V_{Rd,c}$, so 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.

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

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (2.21)$$

2.4.4.1 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (6,2a) \quad (2.22)$$

mit

$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$ (empfohlener Wert; nach DIN EN1992-1-1/NA:2010: $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_c$)

$k = 1 + \sqrt{(200/d)} \leq 2,0$ Maßstabsfaktor zur Berücksichtigung der Plattendicke

d mittlere statische Höhe in [mm]

$\rho_1 = A_{sl}/(b_w \cdot d) \leq 0,02$ Längsbewehrungsgrad

A_{sl} Fläche der Zugbewehrung, die mindestens um das Maß d über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt und dort wirksam verankert wird

f_{ck} charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit in [N/mm²]

b_w Querschnittsbreite

d statische Nutzhöhe der Biegebewehrung in [mm]

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$ Bemessungswert der Betonlängsspannung in [N/mm²]

N_{Ed} Einwirkende Normalkraft in Richtung der Hauptquerkraft

Es darf folgender Mindestwert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ angesetzt werden:

$$V_{Rd,c} = (\nu_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (6,2b) \quad (2.23)$$

mit

$k_1 = 0,15$ (empfohlener Wert; nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010: $k_1 = 0,12$)

$\nu_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$ (empfohlener Wert) (6.3N)

nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010:

$\nu_{min} = (0,0525/\gamma_c) \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$ für $d \leq 600$ mm (6.3aDE)

$\nu_{min} = (0,0375/\gamma_c) \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$ für $d > 800$ mm (6.3bDE)

für $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$ Interpolation möglich

Diese Gleichungen sind in erster Linie für den eindimensionalen Bemessungsfall (Balken) gedacht. Dort gibt es nur eine vorhandene Längsbewehrung, aus der der Längsbewehrungsgrad ermittelt wird. Bei zweidimensionalen Bauteilen mit bis zu drei Bewehrungsscharen kann nicht so leicht gesagt werden, wie groß die anzusetzende Längsbewehrung ist.

In Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl, um die vorhandene Längsbewehrung für den Querkraftnachweis festzulegen.

Bild 2.40: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung*

Erforderliche Längsbewehrung benutzen

Zunächst wird untersucht, welche der Bewehrungsrichtungen an beiden Plattenseiten nach der Bemessung einschließlich einer gemäß Abschnitt 6.2.3 (7) eingeleiteten Zugkraft gezogen sind. Gemäß EN 1992-1-1 darf der vorhandene Längsbewehrungsgrad nur aus der Fläche der vorhandenen Zugbewehrung bestimmt werden.

Um die Bewehrung aus den verschiedenen Bewehrungsrichtungen mit Zugkräften in Richtung β der maximalen Querkraft zu transformieren, wird die Richtung der maximalen Querkraft wie folgt bestimmt.

$$\beta = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (2.24)$$

Damit wird der Differenzwinkel $\delta\phi_i$ zwischen der jeweiligen Bewehrungsrichtung ϕ_i und der Richtung der maximalen Querkraft ermittelt.

$$\delta\phi_i = \beta - \phi_i \quad (2.25)$$

Mit dem Differenzwinkel $\delta\phi_i$ kann der Anteil $a_{sl,i}$ einer bestimmten gezogenen Längsbewehrung $a_{s,i}$ bestimmt werden.

$$a_{sl,i} = a_{s,i} \cdot \cos^2(\delta\phi_i) \quad (2.26)$$

In Gleichung 2.22 ist dann die zur Ermittlung von $V_{Rd,c}$ anzusetzende Zugbewehrung a_{sl} die Summe der Anteile aus den einzelnen Bewehrungsrichtungen, die Zug erhalten.

$$a_{sl} = \sum a_{s,i} \cdot \cos^2(\delta\phi_i) \quad (2.27)$$

Ansatz des größeren Wertes aus erforderlicher oder vorhandener Längsbewehrung (Grund- und Zusatzbewehrung) pro Bewehrungsrichtung

Bei der zweiten im Bild 2.40 auf Seite 36 dargestellten Möglichkeit wird die anzusetzende Zugbewehrung a_{sl} wie bereits beschrieben ermittelt. Zunächst wird überprüft, ob die erforderliche Längsbewehrung eine Zugkraft erhält. Die vorhandene Längsbewehrung a_{sl} wird dann nach Gleichung 2.26 und Gleichung 2.27 ermittelt.

Anschließend wird die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ ohne Querkraftbewehrung bestimmt. Dabei kann sich herausstellen, dass der Querkraftnachweis ohne Querkraftbewehrung möglich ist. Ist die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ negativ oder nicht ausreichend, wird untersucht, ob für eine Bewehrungsrichtung die statisch erforderliche Längsbewehrung $a_{s,dim}$ oder die benutzerdefinierte Grundbewehrung $a_{s,def}$ die jeweils größere Bewehrung $a_{s,max}$ darstellt.

Mit dieser größeren Bewehrung $a_{s,max}$ wird dann die vorhandene Längsbewehrung a_{sl} wieder nach Gleichung 2.26 und Gleichung 2.27 ermittelt. Anschließend wird wiederum die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ ohne Querkraftbewehrung bestimmt.

Zeigt sich, dass die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ ohne Querkraftbewehrung mit der jeweils größeren aus statisch erforderlicher und benutzerdefinierter Längsbewehrung ausreichend ist, ist der Querkraftnachweis erfüllt. Bleibt trotz dieser Längsbewehrung der Querschnitt unbemessbar, weil er völlig gerissen ist, wird eine entsprechende Meldung ausgegeben.

Falls sich trotz Ansatz der jeweils größeren aus statisch erforderlicher und benutzerdefinierter Längsbewehrung eine Querkraftbewehrung nicht vermeiden lässt, wird erneut die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ mit der statisch erforderlichen Längsbewehrung bestimmt. Es wäre wenig sinnvoll, die benutzerdefinierte Längsbewehrung anzusetzen und damit später als erforderlich auszugeben, wenn sich durch sie ohnehin keine Querkraftbewehrung vermeiden lässt.

Die Querkraftbemessung umfasst den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,max}$ der Betondruckstrebe sowie der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,s}$ der Querkraftbewehrung sowie die Ermittlung der erforderlichen Querkraftbewehrung.

Längsbewehrung automatisch hinzufügen, um Schubbewehrung zu vermeiden

Bei der dritten im Bild 2.40 gezeigten Option wird Gleichung 2.22 für $V_{Rd,c}$ nach dem Längsbewehrungsgrad ρ_l aufgelöst. $V_{Rd,c}$ wird dabei mit der einwirkenden Querkraft V_{Ed} angesetzt.

$$\rho_l = \frac{\left(\frac{V_{Ed} \cdot \gamma_c}{d \cdot b_w \cdot 0,15 \cdot \kappa \cdot \eta_1} + \frac{0,12 \cdot \gamma_c \cdot \sigma_{cd}}{0,15 \cdot \kappa \cdot \eta_1} \right)^3}{100 \cdot f_{ck}} \quad (2.28)$$

Damit ist es möglich, mit einem entsprechend hohen Längsbewehrungsgrad auf eine Querkraftbewehrung zu verzichten.

RF-BETON Flächen überprüft zunächst wieder die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ mit der statisch erforderlichen Längsbewehrung. Reicht diese erste Querkrafttragfähigkeit nicht aus, wird die Längsbewehrung a_{sl} in Richtung der Hauptquerkrafttrichtung vergrößert. Die Längsbewehrung a_{sl} kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden.

Das auf folgender Seite dargestellte Ablaufdiagramm zeigt, wann eine Querkraftbewehrung vermeidbar ist und wann eine Querkraftbewehrung mit der statisch erforderlichen Längsbewehrung aus der Bemessung vorzunehmen ist.

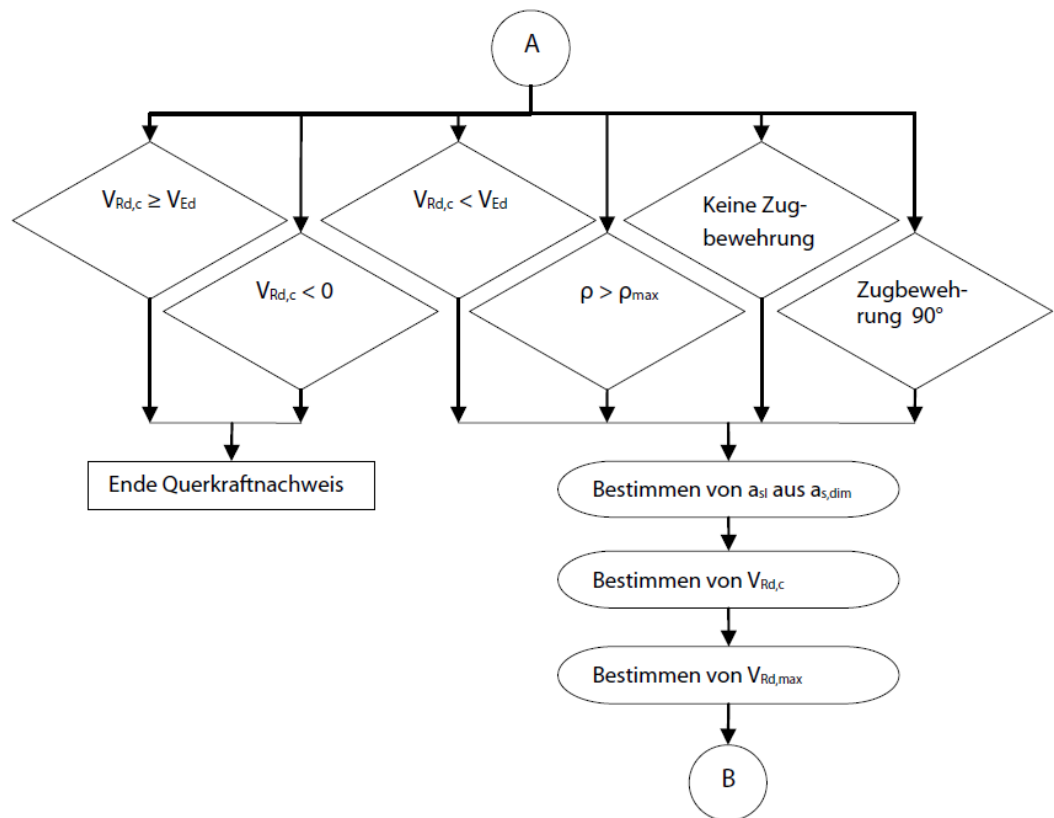


Bild 2.41: Ablauf für Erhöhung der Längsbewehrung zur Vermeidung von Querkraftbewehrung

Die zwei Stränge links ($V_{Rdc} \geq 0$, $V_{Rdc} < 0$) zeigen die erfolgreiche Vermeidung von Querkraftbewehrung sowie die Eventualität, dass selbst bei Erhöhung der Längsbewehrung die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ negativ bleibt und so für den vollkommen gerissenen Querschnitt kein Querkraftnachweis möglich ist.

Die übrigen vier Stränge ($V_{Rdc} < V_{Ed}$, $\rho > \rho_{max}$, Keine Zugbewehrung, Zugbewehrung 90°) zeigen die Gründe, warum eine Erhöhung der Längsbewehrung nicht möglich ist. Es ist z. B. trotz maximalem Längsbewehrungsgrad eine Querkraftbewehrung unvermeidlich oder der zulässige Längsbewehrungsgrad in die einzelnen Bewehrungsrichtungen überschritten. Wenn die in Hauptquerkrafttrichtung erhöhte Längsbewehrung a_{sl} auf die einzelnen Bewehrungsrichtungen verteilt wird, wird für jede dieser Bewehrungsrichtungen geprüft, ob der benutzerdefinierte Längsbewehrungsgrad eingehalten ist. Ist dies nicht der Fall, wird der Längsbewehrungsgrad ρ_i durch die Option *Erforderliche Längsbewehrung verwenden* ermittelt.

Zum Verständnis der beiden rechten Stränge muss erläutert werden, wie die in Richtung der Hauptquerkraft erhöhte Längsbewehrung auf die einzelnen Bewehrungsrichtungen verteilt wird. Ist der ermittelte Längsbewehrungsgrad ρ_i kleiner als 0,02, wird die erforderliche Längsbewehrung a_{sl} pro Meter wie folgt ermittelt.

$$a_{sl} = \rho_i \cdot d \quad (2.29)$$

Diese erforderliche Längsbewehrung wird nun auf jene Bewehrungsrichtungen aufgeteilt, die Zug erhalten. Dazu wird wieder die Winkelabweichung $\delta\phi_i$ zwischen der Richtung der maximalen Querkraft und der Bewehrungsrichtung mit Zug bestimmt.

$$\delta\phi_i = \beta - \phi_i \quad (2.30)$$

Von den Winkelabweichungen $\delta\phi_i$ wird nun die dritte Potenz des Kosinus gebildet und zur Summe $\sum(\cos^3)$ zusammengefasst.

Der Anteil $a_{sl,i}$ an der erforderliche Längsbewehrung a_{sl} ergibt sich damit wie folgt.

$$a_{sl,i} = a_{sl} \cdot \frac{\cos(\delta\phi_i)}{\sum \cos^3(\delta\phi_i)} \quad (2.31)$$

Diese anteilige erforderliche Längsbewehrung $a_{sl,i}$ wird mit der Längsbewehrung verglichen, die bei der Bemessung ermittelt wurde. Die größere Bewehrung ist maßgebend.

In [Gleichung 2.31](#) ist zu erkennen, dass der Nenner problematisch werden kann. Dies ist der Fall, wenn es keine Bewehrungsrichtungen gibt, die Zug erhalten (die Summe der 3. Potenzen der Winkelabweichungen wird nur mit den gezogenen Richtungen gebildet) oder weil es zwar gezogene Bewehrungsrichtungen gibt, die jedoch unter 90° zur Hauptquerkrafttrichtung laufen und somit ihr Kosinus ebenfalls den Wert Null liefert. Diese Möglichkeiten sind in den beiden rechten Strängen des Ablaufplans dargestellt.

In allen Fällen, bei denen keine Lösung möglich ist, wird auf eine Erhöhung der Längsbewehrung verzichtet und die Option *Erforderliche Längsbewehrung* benutzen verwendet. Dabei ist die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,s}$ mit Querkraftbewehrung zu bestimmen.

2.4.4.2 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

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

$$V_{Rd,s} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (6.8) \quad (2.32)$$

mit

A_{sw}	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
s	Bügelabstand
z	Hebelarm der inneren Kräfte
f_{ywd}	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
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 somit das Fachwerk nicht belastet. Diese Grenzen sind in EN 1992-1-1, Gleichung (6.7N) festgelegt.

$$1,00 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (6.7N) \quad (2.33)$$

Die Druckstrebenneigung θ kann somit zwischen folgenden Werten liegen:

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

Tabelle 2.1: Grenzen der Druckstrebenneigung nach EN 1992-1-1

Nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010 gelten folgende Regelungen:

$$1,00 \leq \cot \theta \leq \left(1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) / \left(1 - \frac{V_{Rd,cc}}{V_{Ed}} \right) \leq 3,0 \quad (6.7aDE) \quad (2.34)$$

mit

$$V_{Rd,cc} = c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z \quad (6.7bDE)$$

$$c = 0,5$$

$$\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$$

N_{Ed} Bemessungswert der Längskraft im Querschnitt infolge äußerer Einwirkungen ($N_{Ed} > 0$ als Längsdruckkraft)

Die Druckstrebenneigung θ kann somit zwischen folgenden Werten liegen:

	Mindestneigung	Höchstneigung
θ	18,4°	45,0°
$\cot \theta$	3,0	1,0

Tabelle 2.2: Grenzen der Druckstrebenneigung nach DIN EN 1992-1-1/NA:2010

Eine flachere Betondruckstrebe bedeutet geringere Zugkräfte in der Querkraftbewehrung und damit einen geringeren erforderlichen Bewehrungsquerschnitt. In RF-BETON Flächen wird die Neigung der Druckstrebe im Norm-Register *EN 1992-1-1* der Maske *1.4 Bewehrung* gesteuert.

Bild 2.42: Maske 1.4 Bewehrung, Register EN 1992-1-1 mit Grenzen der veränderlichen Druckstrebenneigung

Die Größe des minimalen Druckstrebenneigungswinkels θ hängt auch von den einwirkenden Schnittgrößen V_{Ed} ab, die erst während der Berechnung berücksichtigt werden können. Ist der minimale Druckstrebenwinkel zu klein gewählt, erfolgt eine entsprechende Meldung.

Bei der Berechnung wird zunächst mit dem angegebenen Minimalwert der Druckstrebenneigung die Tragfähigkeit $V_{Rd,max}$ der Betondruckstrebe bestimmt (siehe [Gleichung 2.37](#)). Ist sie kleiner als die einwirkende Querkraft V_{Ed} , so muss eine steilere Druckstrebenneigung gewählt werden. Die Druckstrebenneigung θ wird dann so lange erhöht, bis gilt:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (2.35)$$

Dieser Druckstrebenneigungswinkel führt zur kleinsten Querkraftbewehrung.

2.4.4.3 Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe

Für Bauteile mit **Querkraftbewehrung rechtwinklig zur Bauteilachse** ($\alpha = 90^\circ$) ist der Querkraftwiderstand V_{Rd} der kleinere Wert aus:

$$V_{Rd,s} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (6.8) \quad (2.36)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot \frac{f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (6.9) \quad (2.37)$$

mit

- A_{sw} Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
- s Bügelabstand
- f_{ywd} Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
- ν_1 Abminderungsbeiwert für die Betonfestigkeit bei Schubrisen
- α_{cw} Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt

Für Bauteile mit **geneigter Querkraftbewehrung** ist der Querkraftwiderstand der kleinere Wert aus:

$$V_{Rd,s} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (6.13) \quad (2.38)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{(1 + \cot^2 \theta)} \quad (6.14) \quad (2.39)$$

2.4.4.4 Beispiel Querkraftbemessung

Die Querkraftbemessung einer Platte nach EN 1992-1-1 wird anhand der Bemessungsdetails vorgestellt (vgl. Beispiel zu statisch erforderlicher Bewehrung, [Seite 33](#)).

Bei den Detailergebnissen werden zunächst die in RFEM ermittelten Querkräfte angegeben.

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Momente			
der x-Achse	m_x	-29.54	kNm/m
der y-Achse	m_y	4.14	kNm/m
Differenzmoment	m_{xy}	-1.03	kNm/m
Normalkraft mit Normalkraftvektor in Richtung			
Querkraft mit Querkraftvektor in Richtung			
der x-Achse	v_x	-6.932	kN/m
der y-Achse	v_y	-72.968	kN/m
Hauptquerkraft	v_{max}	73.297	kN/m
Hauptschnittgrößen			
Hauptmomente			
Hauptnormalkräfte			
Hauptquerkraft			
Hauptquerkraft	v_{max}	73.297	kN/m
Richtung	β_m	84.573	°

Bild 2.43: Schnittgrößen der linearen Statik - Querkräfte

Aus diesen Schnittgrößen wird die erforderliche Längsbewehrung ermittelt.

☐ Bemessungsbericht			
☐ Schnittgrößen der linearen Statik			
☐ Hauptschnittgrößen			
☐ Bemessungsschnittgrößen			
☐ Betondruckstrebe			
☐ Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
☐ Unterseite (+z)			
☐ in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,+z,1}$	0.00	cm ² /m
☐ Bemessungsmembrankraft	$n_{s,end,+z,\Phi 1}$	0.000	kN/m
Bemessungsmembrankraft gleich Null. Keine Bewehrung erforderlich.			
☐ in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,+z,2}$	0.58	cm ² /m
☐ in 3. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,+z,3}$	0.00	cm ² /m
☐ Oberseite (-z)			
☐ in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,-z,1}$	4.03	cm ² /m
☐ in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,-z,2}$	0.00	cm ² /m
☐ in 3. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,-z,3}$	0.00	cm ² /m

Bild 2.44: Erforderliche Längsbewehrung

Die Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit findet sich weiter unten in den Details. Sie beginnt mit der Ermittlung der ansetzbaren Zugbewehrung in Hauptquerkrafttrichtung.

▣ Bemessungsbericht			
▣ Schnittgrößen der linearen Statik			
▣ Hauptschnittgrößen			
▣ Bemessungsschnittgrößen			
▣ Betondruckstrebe			
▣ Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
▣ Querkraftbemessung			
Angesetzte Zugbewehrung ermittelt aus erforderlicher Längsbewehrung.			
Eine Querkraftbewehrung kann auch mit definierter Grundbewehrung nicht vermieden werden.			
▣ Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	0.61	cm ² /m
▣ Unterseite (+z)			
▣ aus 1. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,+z,1}$	0.00	cm ² /m
▣ aus 2. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,+z,2}$	0.58	cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim,+z,2}$	0.58	cm ² /m
Spannungszustand	Spannung +z,2	Zug	
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{+z,2}$	5.427	°
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{+z,2})$	0.991	
▣ aus 3. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,+z,3}$	0.00	cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim,+z,3}$	0.00	cm ² /m
Spannungszustand	Spannung +z,3	Keiner	
Keine Transformation (kein Zug)			
▣ Oberseite (-z)			
▣ aus 1. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,-z,1}$	0.04	cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim,-z,1}$	4.03	cm ² /m
Spannungszustand	Spannung -z,1	Zug	
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{-z,1}$	84.573	°
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{-z,1})$	0.009	
▣ aus 2. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,-z,2}$	0.00	cm ² /m
▣ aus 3. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,-z,3}$	0.00	cm ² /m

Bild 2.45: Querkraftbemessung - Angesetzte Zugbewehrung

Die zweite Bewehrungsrichtung an der Plattenunterseite und die erste Bewehrungsrichtung an der Plattenoberseite sind die einzigen Bewehrungsrichtungen, die Zug erhalten und annähernd parallel zur Hauptquerkrafttrichtung laufen.

Diese liefern die *Angesetzte Längsbewehrung* a_{sl} von 0,61 cm²/m.

Die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ der Platte ohne Querkraftbewehrung wird mit folgenden Parametern ermittelt:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,15} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\left(\frac{200}{d}\right)} = 1 + \sqrt{\left(\frac{200}{160}\right)} = 2,11 \leq 2,00 \rightarrow k = 2,00 \quad d \text{ in [mm]}$$

$$d = 0,160 \text{ m}$$

$$\rho_l = \frac{a_{sl}}{(b_w \cdot d)} = \frac{0,613}{(100 \cdot 16)} = 0,000383 \leq 0,02$$

$$b_w = 1,00 \text{ m}$$

$$f_{ck} = 20,0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für Beton C20/25}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\sigma_{cp} = 0,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für Beton C20/25}$$

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 2,00 \cdot (100 \cdot 0,000383 \cdot 20)^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 0,00 \right] \cdot 1000 \cdot 160 = 35,135 \text{ kN/m}$$

Das gleiche Ergebnis findet sich in den Bemessungsdetails:

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht			
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Betondruckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
<input checked="" type="checkbox"/> Querkraftbemessung			
Angesetzte Zugbewehrung ermittelt aus erforderlicher Längsbewehrung.			
Eine Querkraftbewehrung kann auch mit definierter Grundbewehrung nicht vermieden werden.			
<input checked="" type="checkbox"/> Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	0.61	cm ² /m
<input checked="" type="checkbox"/> Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung			
<input checked="" type="checkbox"/> Querkrafttragfähigkeit nach Gleichung (6.2.a)			
Sicherheitsfaktor	$C_{Rd,c}$	0.120	
<input checked="" type="checkbox"/> Beiwert Maßstabeffekt (Size Effects)	k	2.000	
Statische Nutzhöhe	d	0.160	m
<input checked="" type="checkbox"/> Längsbewehrungsgrad	ρ_l	0.000	
Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	0.61	cm ² /m
Stabbreite	b_w	1.000	m
Statische Nutzhöhe	d	0.160	m
Charakteristische Betonfestigkeit	f_{ck}	20.00	N/mm ²
Faktor der Betonlängsspannung	k_1	0.150	
<input checked="" type="checkbox"/> Betonlängsspannung	σ_{cp}	0.00	N/mm ²
Normalkraft in Hauptquerkrafttrichtung	n_{β}	0.000	kN/m
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
Bauteilhöhe	h	20.00	cm
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
Statische Nutzhöhe	d	0.160	m
Querkrafttragfähigkeit nach Gleichung (6.2.a)	$V_{Rd,c,6.2a}$	35.142	kN/m

Bild 2.46: Querkraftbemessung - Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ der Platte ohne Querkraftbewehrung wird mit der einwirkenden Querkraft V_{Ed} verglichen.

$$V_{Rd,c} = 35,142 \text{ kN/m} \geq V_{Ed} = 29,56 \text{ kN/m}$$

Damit steht fest, dass die Querkrafttragfähigkeit der Platte ohne Querkraftbewehrung ausreichend ist und keine weiteren Nachweise geführt werden müssen.

2.4.5 Bewehrungsregeln

Für Platten gelten die Bewehrungsregeln, die im [Kapitel 2.3.7](#) ab [Seite 22](#) vorgestellt sind.

In RF-BETON Flächen können benutzerdefinierte Vorgaben in Maske 1.4 *Bewehrung* getroffen werden. Dabei sind folgende Register relevant:

- Register *Bewehrungsanordnung* (siehe [Bild 3.26](#), [Seite 146](#))
- Register *EN 1992-1-1* (siehe [Bild 3.37](#), [Seite 154](#))

Falls für die Mindestschubbewehrung in den beiden Registern unterschiedliche Einstellungen vorliegen, gilt die ungünstigere Vorgabe.

Die benutzerdefinierten Bewehrungsvorgaben finden sich in den Bemessungsdetails wieder.

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte
<input checked="" type="checkbox"/> Querkraftbemessung
<input checked="" type="checkbox"/> Statisch erforderliche Längsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestlängsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Grundwert der Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestquerbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestquerbewehrungsgrad
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> Überprüfen des maximalen Bewehrungsgrades
<input checked="" type="checkbox"/> Vorhandener Bewehrungsgrad
<input checked="" type="checkbox"/> Maximaler Längsbewehrungsgrad
<input checked="" type="checkbox"/> Maximaler Längsbewehrungsgrad überschritten?

Bild 2.47: Mindestbewehrung und maximaler Bewehrungsgrad

<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen
<input checked="" type="checkbox"/> Betondruckstrebe
<input checked="" type="checkbox"/> Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte
<input checked="" type="checkbox"/> Querkraftbemessung
<input checked="" type="checkbox"/> Statisch erforderliche Längsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Überprüfen des maximalen Bewehrungsgrades
<input checked="" type="checkbox"/> Einzulegende Bewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)
<input checked="" type="checkbox"/> in 1. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> Statisch erforderliche Bewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestlängsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Bewehrung als Querbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> in 2. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> Statisch erforderliche Bewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestlängsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Bewehrung als Querbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> in 3. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> Statisch erforderliche Bewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Mindestlängsbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Bewehrung als Querbewehrung
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)
<input checked="" type="checkbox"/> in 1. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> in 2. Bewehrungsrichtung
<input checked="" type="checkbox"/> in 3. Bewehrungsrichtung

Bild 2.48: Einzulegende Bewehrung

Die einzulegende Bewehrung wird für *Unterseite (+z)* und *Oberseite (-z)* getrennt ausgegeben. Anhand der einzelnen Bewehrungen in jede Richtung ist ersichtlich, ob die einzulegende Bewehrung aus der statisch erforderlichen Bewehrung oder aus der Mindestlängsbewehrung hervorgeht.

2.5 Schalen

2.5.1 Bemessungskonzept



Schalen stellen hinsichtlich ihrer Schnittgrößen eine Mischform aus Wänden ([Kapitel 2.3](#)) und Platten ([Kapitel 2.4](#)) dar, da sowohl Normalkräfte als auch Momente in ihnen wirken.

Alle 3D-Modelltypen (siehe [Bild 2.1, Seite 7](#)) werden als Schale bemessen. RF-BETON Flächen geht dabei so vor: Zunächst werden wie in [Kapitel 2.3](#) und [Kapitel 2.4](#) gezeigt die Bemessungsnormalkräfte und die Bemessungsbiegemomente getrennt ermittelt. Diese basieren wieder auf den Hauptnormalkräften und Hauptbiegemomenten der linearen RFEM-Plattenstatik.

Für jede Bewehrungsrichtung auf jeder Flächenseite wird so eine Bemessungsnormalkraft und ein Bemessungsmoment ermittelt. Dabei kann eine der Schnittgrößen oder auch beide zu Null werden – falls die Suche nach der optimalen Richtung der Betondruckstrebe bei der Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen ergibt, dass die Bewehrung in diese Richtung nicht aktiviert wird.

Sind die Bemessungsschnittgrößen für die jeweilige Bewehrungsrichtung bestimmt, gilt das Hauptaugenmerk jener Bewehrungsrichtung, für die Bemessungsmomente vorliegen. Für sie findet nun eine übliche eindimensionale Bemessung eines Balkens mit der Breite von einem Meter statt. Ziel dieser Bemessung ist jedoch nicht, eine erforderliche Bewehrung zu finden, sondern den Hebelarm der inneren Kräfte zu bestimmen.

Sobald in dieser Vorbemessung alle Hebelarme derjenigen Bemessungsrichtungen ermittelt sind, in denen ein Bemessungsmoment auftritt, wird der kleinste Hebelarm für jede Plattenseite bestimmt. Mit dieser Exzentrizität lassen sich nun die Momente der linearen Plattenstatik in Membrankräfte umwandeln. Dazu werden die Momente der linearen Plattenstatik einfach durch den kleinsten Hebelarm z_{min} geteilt.

Zählt man nun die halbe Normalkraft aus der linearen Plattenstatik dazu, die senkrecht auf dem Momentenvektor des durch den Hebelarm der inneren Kräfte geteilten Moments steht, erhält man die endgültige Membrankraft. Dieser Prozess lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned} n_{xs} &= \frac{m_x}{z_{min}} + \frac{n_x}{2} \\ n_{ys} &= \frac{m_y}{z_{min}} + \frac{n_y}{2} \\ n_{xys} &= \frac{m_{xy}}{z_{min}} + \frac{n_{xy}}{2} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Die Momente an Plattenoberseite und Plattenunterseite werden mit unterschiedlichen Vorzeichen berücksichtigt.

Sind die Momente m_x , m_y und m_{xy} und die Normalkräfte n_x , n_y und n_{xy} der linearen Plattenstatik mithilfe des Hebelarms z_{min} aus der Vorbemessung durch die Membrankräfte n_{xs} , n_{ys} und n_{xys} substituiert, können aus diesen Membrankräften die *Hauptmembrankräfte* n_{Is} und n_{IIs} für die Plattenoberseite und die Plattenunterseite bestimmt werden.

Aus den Hauptmembrankräften n_{Is} und n_{IIs} werden wie im [Kapitel 2.3](#) ab [Seite 11](#) beschrieben die *Bemessungsmembrankräfte* n_α , n_β und n_γ nach [Gleichung 2.5](#) bis [Gleichung 2.7](#) ermittelt. Diese Bemessungsmembrankräfte n_α , n_β und n_γ werden dann den Bewehrungsrichtungen ϕ_1 , ϕ_2 und ϕ_3 zugeordnet. Man erhält so die Bemessungsmembrankräfte n_1 , n_2 und n_3 in die Bewehrungsrichtungen.

Aus den Bemessungsmembrankräften lässt sich die erforderliche Stahlmenge bestimmen, indem diese durch die Stahlspannungen σ_s geteilt werden, die sich im Zuge der Ermittlung des minimalen Hebelarmes z_{\min} in der jeweiligen Bewehrungsschar ergeben hat.

$$\begin{aligned} a_{s1} &= \frac{n_1}{\sigma_s} \\ a_{s2} &= \frac{n_2}{\sigma_s} \\ a_{s3} &= \frac{n_3}{\sigma_s} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Falls es sich bei der Bemessungsmembrankraft um eine Druckkraft handelt, wird zunächst mit der Betondruckzonenhöhe x , die sich bei der Ermittlung des Hebelarms ergeben hat, die aufnehmbare Normalkraft n_c des Betons bestimmt.

$$n_c = f_{cd} \cdot b \cdot x \quad (2.42)$$

Sollte die aufnehmbare Normalkraft n_c des Betons nicht ausreichend sein, wird für die Differenzkraft zwischen der einwirkenden Normalkraft und der aufnehmbaren Normalkraft eine Druckbewehrung ermittelt. Die Bemessungsspannung für diese Druckbewehrung ergibt sich aus der Verformung der Druckbewehrung bei der Bestimmung des Hebelarms z .

Wenn der Hebelarm unter der Annahme des Dehnungsbereichs III bestimmt wurde, wird keine Druckbewehrung ermittelt, da diese nicht vorausgesetzt wurde. Die Dehnungsbereiche I bis V sind im folgenden Kapitel bei der Bestimmung des Hebelarms beschrieben.

2.5.2 Hebelarm der inneren Kräfte

Es wird stets ein rechteckiger Querschnitt von einem Meter Breite bemessen. Die Bemessung erfolgt direkt mit dem Spannungsblock (siehe EN 1992-1-1, Bild 3.5). Ein iteratives Verfahren wäre aufgrund der Vielzahl an erforderlichen Bemessungen zu zeitaufwendig.

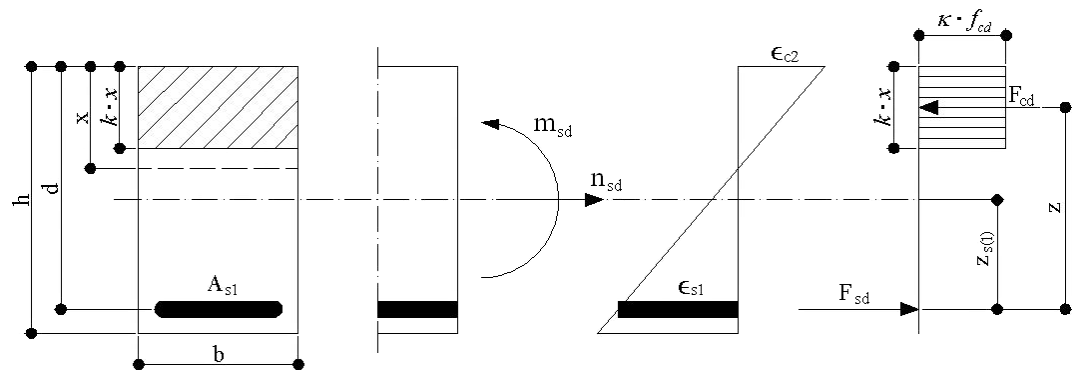


Bild 2.49: Berechnungsparameter der Bemessung

Der gesuchte Hebelarm z bestimmt sich für die obige Abbildung wie folgt.

$$z = d - \frac{k \cdot x}{2} \quad (2.43)$$

Bild 2.49 zeigt einen Dehnungszustand, der sich bei der gleichzeitigen Wirkung von Moment und Normalkraft ergeben kann. Es sind fünf Dehnungszustände möglich (siehe Bild 2.50).

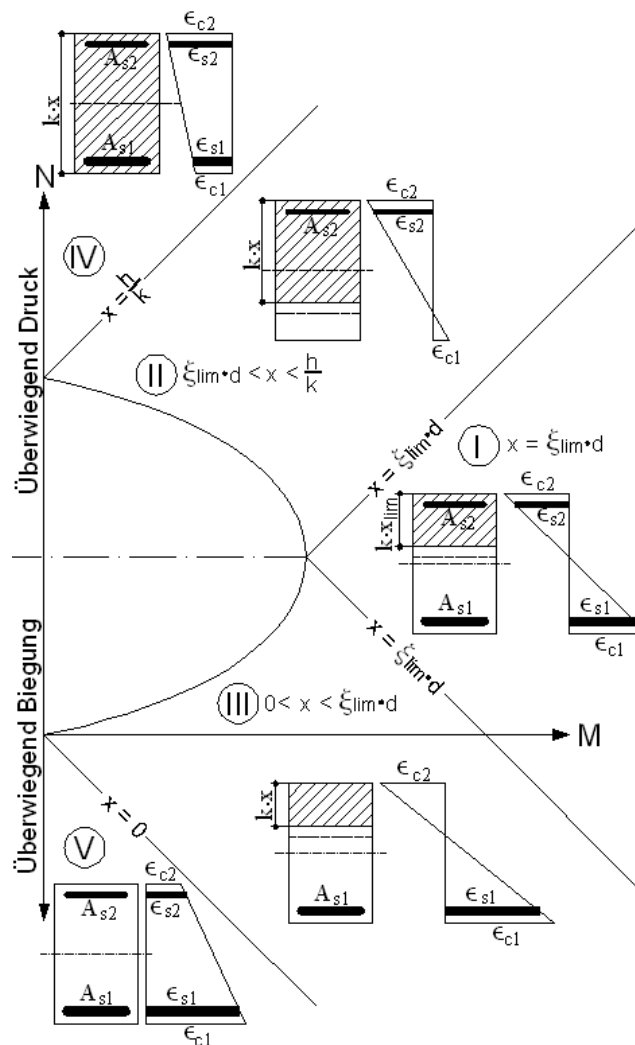


Bild 2.50: Bereiche der Dehnungsverteilung

Bereich I

Es liegt ein stark biegebeanspruchter Querschnitt vor. Die Druckzonenhöhe hat ihren maximalen Wert erreicht ($x = \xi_{lim} \cdot d$). Eine weitere Steigerung des Widerstandsmoments ist nur noch durch das Einlegen einer Druckbewehrung möglich.

Bereich II

In diesem Bereich tritt überwiegend Druck auf. Die Druckzonenhöhe bewegt sich zwischen den Grenzen $\xi_{lim} \cdot d$ und $\frac{h}{k}$.

Bereich III

Das einwirkende Moment ist so gering, dass die Betondruckzone ohne Druckbewehrung in der Lage ist, ein ausreichendes Widerstandsmoment zu liefern. Die Grenzen für die Druckzonenhöhe liegen je nach einwirkendem Moment zwischen 0 und $\xi_{lim} \cdot d$.

Bereich IV

Hier liegt ein vollständig überdrückter Querschnitt vor. Die Druckzonenhöhe ist größer als $\frac{h}{k}$. In diesen Bereich fallen auch ausschließlich druckkraftbeanspruchte Querschnitte.

Bereich V

Dieser Dehnungszustand liegt vor, wenn die Zugkraft einen Querschnitt vollständig aufreißen lässt. In diesen Bereich fallen auch ausschließlich zugkraftbeanspruchte Querschnitte.

Für jeden Dehnungsbereich wird der Hebelarm ermittelt. Damit können dann die Momente der linearen Plattenstatik in Membrankräfte aufgeteilt werden.

Hebelarm Bereich I

Für diesen Bereich ist die Höhe der Druckzone bekannt: Der Beton wird voll ausgenutzt, ehe Druckbewehrung eingelegt wird.

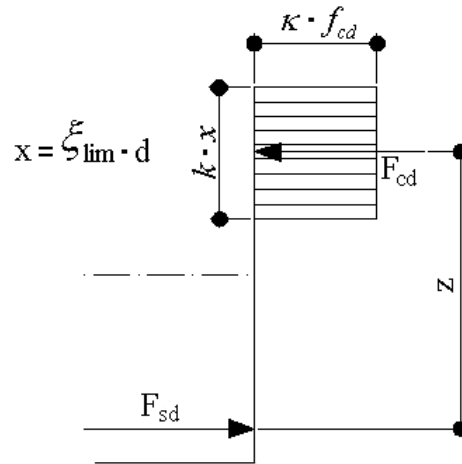


Bild 2.51: Hebelarm z bei maximaler Betondruckzonenhöhe

Für die maximale Höhe der Betondruckzone x ergibt sich die aufnehmbare Betondruckkraft F_{cd} gemäß folgender Gleichung:

$$F_{cd} = \kappa \cdot f_{cd} \cdot k \cdot x_{lim} \cdot b \quad (2.44)$$

Das Grenzwiderstandmoment $m_{sd,lim}$, das der Querschnitt ohne Druckbewehrung aufnehmen kann, bestimmt sich wie folgt:

$$m_{sd,lim} = F_{cd} \cdot \left(d - \frac{k \cdot x_{lim}}{2} \right) \quad (2.45)$$

Mit dem Grenzwiderstandmoment $m_{sd,lim}$ kann das Differenzmoment Δm_{sd} bestimmt werden, das von der Druckbewehrung geliefert werden muss, um ein Gleichgewicht mit dem einwirkenden Moment $m_{sd(1)}$ zu bilden.

$$\Delta m_{sd} = m_{sd(1)} - m_{sd,lim} \quad (2.46)$$

Das einwirkende Moment $m_{sd(1)}$ ist hier bezogen auf den Schwerpunkt der Zugbewehrung. Es bildet sich aus dem einwirkenden Moment m_{sd} , der einwirkenden Normalkraft n_{sd} und dem Abstand $z_{s(1)}$ zwischen Querschnittsschwerachse und Schwerachse der Zugbewehrung.

$$m_{sd(1)} = m_{sd} - n_{sd} \cdot z_{s(1)} \quad (2.47)$$

Mit dem Differenzmoment Δm_{sd} kann nun die erforderliche Druckkraft $F_{sd(2)}$ in einer Druckbewehrung bestimmt werden.

$$F_{sd(2)} = \frac{\Delta m_{sd}}{d - d_2} \quad (2.48)$$

Hierbei ist d die statische Nutzhöhe der Zugbewehrung und d_2 der Schwerpunktabstand der Druckbewehrung vom Rand der Betondruckzone.

Teilt man das auf den Zugbewehrungsschwerpunkt bezogene, einwirkende Moment $m_{sd(1)}$ nun durch die Betondruckkraft F_{cd} und die Kraft in der Druckbewehrung $F_{sd(2)}$, so erhält man den gesuchten Hebelarm z .

$$z = \frac{m_{sd}}{|F_{cd} + F_{sd(2)}|} \quad (2.49)$$

Hebelarm Bereich II

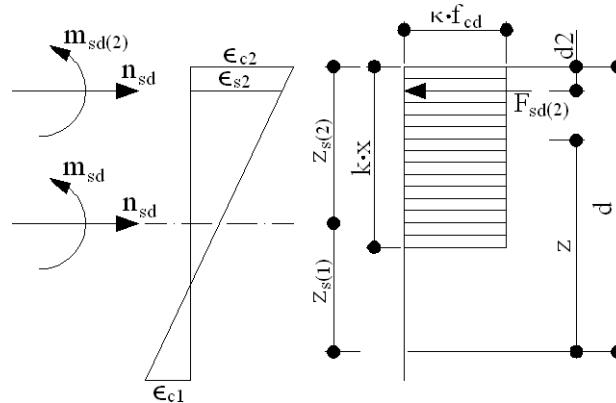


Bild 2.52: Ermittlung des Hebelarms für Bereich II

Um die Höhe der Betondruckzone x bestimmen zu können, wird zunächst das Bemessungsmoment $m_{sd(2)}$ um den Schwerpunkt der Druckbewehrung ermittelt.

$$m_{sd(2)} = m_{sd} + n_{sd} + z_{s(2)} \quad (2.50)$$

Nun wird die Summe der Momente um den Druckbewehrungsschwerpunkt gebildet. Diese Momente müssen sich zu Null ergeben. Auf der Widerstandsseite wird das Moment nur aus der resultierenden Kraft F_{cd} der Betondruckzonen multipliziert mit ihrem Abstand gebildet. Im Bereich II gibt es keine gezogene Bewehrung.

$$\sum m = F_{cd} \cdot \left(\frac{k \cdot x}{2} - d_2 \right) + m_{sd(2)} = 0 \quad (2.51)$$

Auch in der resultierenden Betondruckkraft F_{cd} ist die Höhe x der Betondruckzone enthalten.

$$F_{cd} = \kappa \cdot f_{cd} \cdot k \cdot x \cdot b \quad (2.52)$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Bestimmung von x zu:

$$\begin{aligned} \kappa \cdot f_{cd} \cdot k \cdot x \cdot b \cdot \left(\frac{k \cdot x}{2} - d_2 \right) + m_{sd(2)} &= \frac{\kappa \cdot f_{cd} \cdot k^2 \cdot x^2}{2} - \kappa \cdot f_{cd} \cdot k \cdot x \cdot b \cdot d_2 + m_{sd(2)} = 0 \\ x^2 &= \frac{2 \cdot d_2 \cdot x}{k} + \frac{2 \cdot m_{sd(2)}}{\kappa \cdot f_{cd} \cdot b \cdot k^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{d_2}{k} + \sqrt{\left(\frac{d_2}{k} \right)^2 - \frac{2 \cdot m_{sd(2)}}{\kappa \cdot f_{cd} \cdot b \cdot k^2}} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Mit der Höhe x der Betondruckzone kann der Hebelarm z bestimmt werden, indem man von der statischen Höhe d die halbe Druckzonenhöhe x abzieht, die um den Faktor k reduziert wird:

$$z = d \cdot \frac{k \cdot x}{2} \quad (2.54)$$

Hebelarm Bereich III

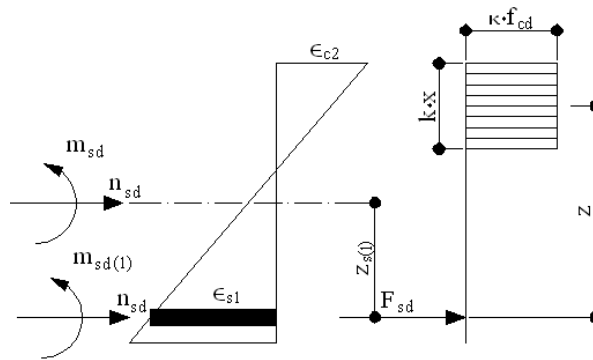


Bild 2.53: Ermittlung des Hebelarms für Bereich III

Um Höhe x der Betondruckzone zu bestimmen, wird zunächst das Bemessungsmoment $m_{sd(1)}$ um den Schwerpunkt der Zugbewehrung ermittelt.

$$m_{sd(1)} = m_{sd} + n_{sd} + z_{s(1)} \quad (2.55)$$

Nun wird die Summe der Momente um den Zugbewehrungsschwerpunkt gebildet. Diese Momente müssen sich zu Null ergeben. Auf der Widerstandsseite wird das Moment nur aus der resultierenden Kraft F_{cd} der Betondruckzone mal ihrem Abstand gebildet. Anschließend wird das Gleichgewicht der Momente um die Lage der Zugbewehrung gebildet.

$$\sum m = F_{cd} \cdot \left(d - \frac{k \cdot x}{2} \right) - m_{sd(1)} = 0 \quad (2.56)$$

Auch in der resultierenden Betondruckkraft F_{cd} ist die Höhe x der Betondruckzone enthalten (siehe Gleichung 2.52).

$$\kappa \cdot f_{cd} \cdot k \cdot b \cdot d \cdot x - \left(\frac{\kappa \cdot f_{cd} \cdot k^2 \cdot b}{2} \right) - m_{sd(1)} = x^2 - \frac{2 \cdot d}{k} \cdot x + \frac{2 \cdot m_{sd(1)}}{\kappa \cdot f_{cd} \cdot k^2 \cdot b} = 0 \quad (2.57)$$

Diese quadratische Gleichung kann wie folgt gelöst werden.

$$x = \frac{d}{k} + \sqrt{\frac{d^2}{k^2} - \frac{2 \cdot m_{sd(1)}}{\kappa \cdot f_{cd} \cdot k^2 \cdot b}} = 0 \quad (2.58)$$

Mit der Höhe x der Betondruckzone kann der Hebelarm z bestimmt werden, indem man von der statischen Höhe d die halbe Druckzonenhöhe x abzieht, die um den Faktor k reduziert wird:

$$z = d - \frac{k \cdot x}{2} \quad (2.59)$$

Falls die Stahldehnung ϵ_s größer ist als die maximal zulässige Stahldehnung ϵ_{ud} , wird x iterativ aus den Gleichgewichtsbedingungen berechnet. Die Umrechnungsfaktoren κ und k für die Betondruckzone werden dabei direkt aus dem Parabel-Rechteck-Diagramm des Betons abgeleitet.

Hebelarm Bereich IV

In einem vollständig überdrückten Querschnitt wird der Hebelarm als der Abstand zwischen den beiden Bewehrungen angenommen.

$$z = d - d_2 \quad (2.60)$$

Für diesen Bereich wird eine maximale Ausnutzung der Bewehrung vorgegeben, d. h. $\epsilon_s = \epsilon_{cu}$.

Bei näherungsweise zentrischem Druck ($e_d/h \leq 0,1$) ist gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 6.1 (5) die mittlere Stauchung auf ϵ_{c2} zu begrenzen.

Hebelarm Bereich V

In einem vollständig aufgerissenen Querschnitt wird der Hebelarm ebenfalls als der Abstand zwischen den beiden Bewehrungen angenommen (siehe Gleichung 2.60).

2.5.3 Ermittlung der Bemessungsmembrankräfte

Es werden die Bemessungsmembrankräfte für das Widerlager einer Brücke ermittelt. Für die nähere Untersuchung wird der Rasterpunkt Nr. 1 in Fläche Nr. 37 ausgewählt.

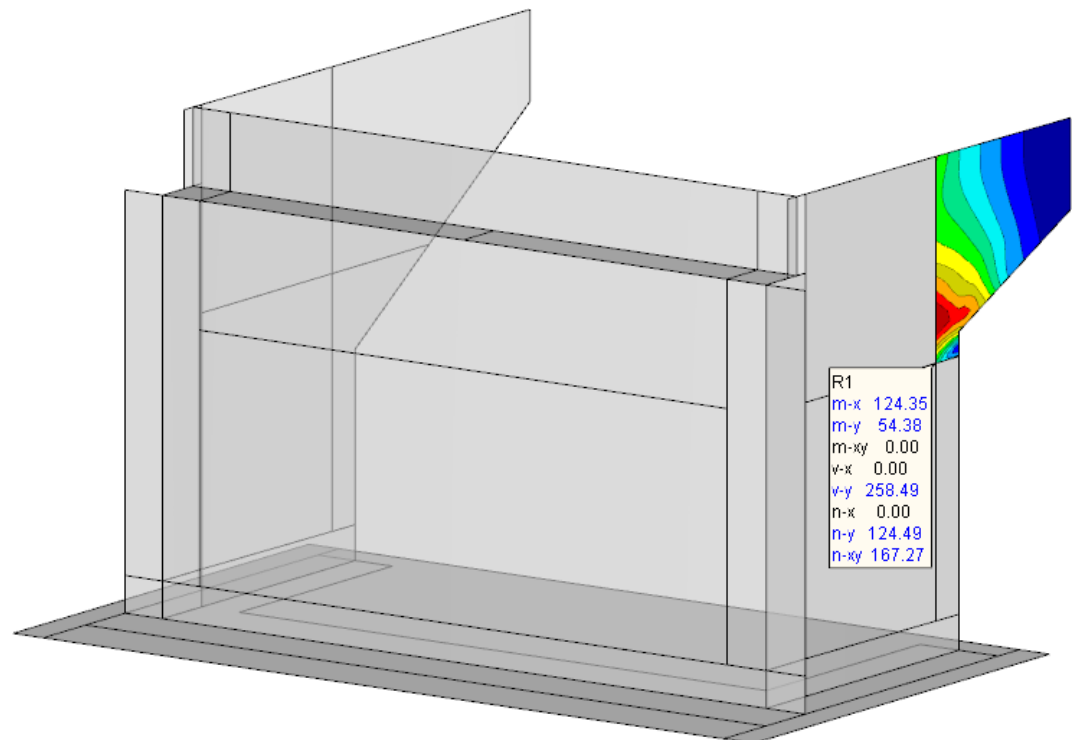
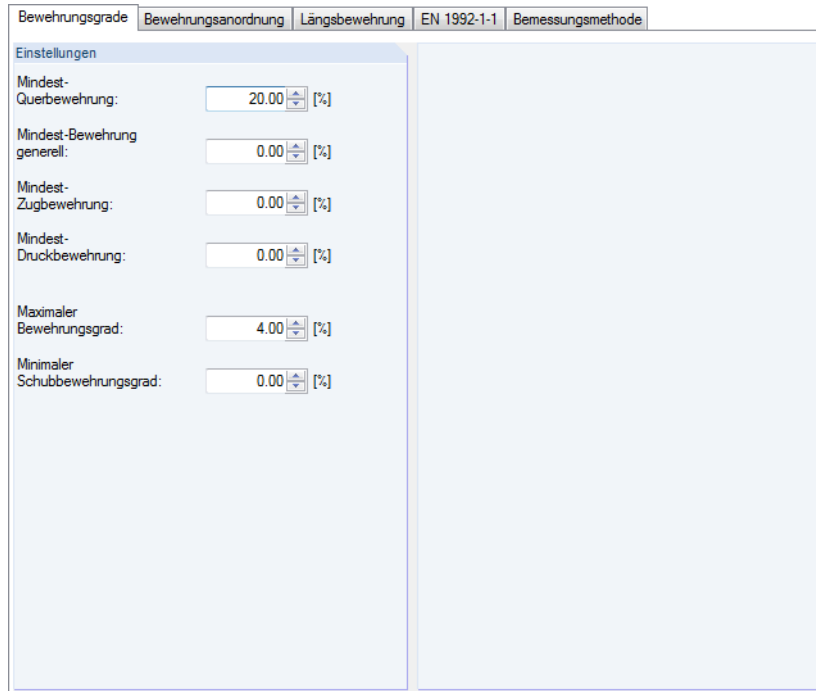


Bild 2.54: Brückenwiderlager – Schnittgrößen im Rasterpunkt R1

Die untersuchte Fläche Nr. 37 hat eine Dicke von **129 cm**.

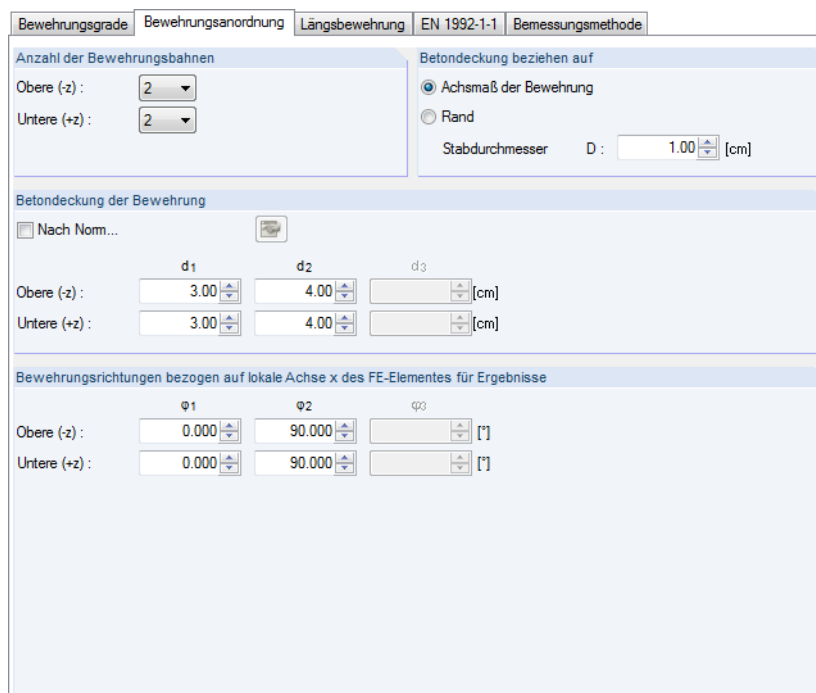
Zur Bemessung nach EN 1992-1-1 werden in RF-BETON Flächen Beton **C30/37** und Bewehrungsstahl **BSt 500 S (B)** gewählt.

Weitere Eingaben in Maske 1.4 *Bewehrung* sind:



Parameter	Value	Unit
Mindest-Querbewehrung:	20.00	[%]
Mindest-Bewehrung generell:	0.00	[%]
Mindest-Zugbewehrung:	0.00	[%]
Mindest-Druckbewehrung:	0.00	[%]
Maximaler Bewehrungsgrad:	4.00	[%]
Minimaler Schubbewehrungsgrad:	0.00	[%]

Bild 2.55: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsgrade*



Parameter	Value	Unit
Anzahl der Bewehrungsbahnen (Obere (-z) / Untere (+z))	2 / 2	
Betondeckung beziehen auf	<input checked="" type="radio"/> Achsmaß der Bewehrung	
Stabdurchmesser D	1.00	[cm]
Betondeckung der Bewehrung (Nach Norm...)		
Obere (-z) d1, d2, d3	3.00, 4.00, []	[cm]
Untere (+z) d1, d2, d3	3.00, 4.00, []	[cm]
Bewehrungsrichtungen bezogen auf lokale Achse x des FE-Elementes für Ergebnisse		
Obere (-z) φ1, φ2, φ3	0.000, 90.000, []	[°]
Untere (+z) φ1, φ2, φ3	0.000, 90.000, []	[°]

Bild 2.56: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung*

Bewehrungsgrade | Bewehrungsanordnung | **Längsbewehrung** | EN 1992-1-1 | Bemessungsmethode

Vorhandene Grundbewehrung

	a _{s1}	a _{s2}	a _{s3}	
Obern (-z):	0.00	0.00	0.00	[cm ² /m]
Unten (+z):	0.00	0.00	0.00	[cm ² /m]

Längsbewehrung für Querkraftnachweis

☐ Erforderliche Längsbewehrung benutzen
☐ Die erforderliche Längsbewehrung automatisch hinzufügen, um die Schubbewehrung zu vermeiden
☒ Ansatz des jeweils größeren Wertes aus erforderlicher oder vorhandener Längsbewehrung (Grund- und Zusatzbewehrung) pro Bewehrungsrichtung.

Bild 2.57: Maske 1.4 Bewehrung, Register Längsbewehrung

Bewehrungsgrade | Bewehrungsanordnung | **Längsbewehrung** | EN 1992-1-1 | Bemessungsmethode

Mindestbewehrung

☒ Mindestlängsbewehrung für Platten nach 9.3.1
☒ Mindestlängsbewehrung für Wände nach 9.6
☒ Mindestschubbewehrung nach 9.3.2

Schubbewehrung

Veränderliche Druckstrebenneigung nach 6.2.3 (NA-Parameter)

- Minimal: 21.801 [°]
 - Maximal: 45.000 [°]

Faktoren

Teilsicherheitsbeiwerte von Stahlbeton und Bewehrung nach 2.4.2.4 (NA Parameter)

	GR	AU	GZG
γ_c :	1.50	1.20	
γ_s :	1.15	1.00	

Reduzierungsfaktoren in Bezug auf Langzeiteffekte nach 3.1.6 (NA Parameter)

	GR	AU	GZG
α_{cc} :	1.00	1.00	
α_{ct} :			

Verschiedenes

☒ Begrenzung der Druckzonenhöhe nach 5.6.3(2)

Bild 2.58: Maske 1.4 Bewehrung, Register EN 1992-1-1

Bewehrungsgrade | Bewehrungsanordnung | **Längsbewehrung** | EN 1992-1-1 | Bemessungsmethode

Bemessungsschnittgrößen

☐ Keine Optimierung der Bemessungsschnittgrößen (empfohlen bei vorwiegend druckbeanspruchten Bauteilen)
☒ Optimierung der Bemessungsschnittgrößen (empfohlen bei vorwiegend biege- oder zugbeanspruchten Bauteilen)

Bild 2.59: Maske 1.4 Bewehrung, Register Bemessungsmethode

2.5.3.1 Bemessungsmomente

Bei den Bemessungsdetails des Rasterpunkts finden sich die aus den FE-Knoten interpolierten Schnittgrößen. Da in den Basisangaben der Modelltyp 3D vorgegeben wurde (siehe [Bild 2.1, Seite 7](#)), liegen in der Fläche sowohl Momente m_x , m_y und m_{xy} als auch Normalkräfte n_x , n_y und n_{xy} vor.

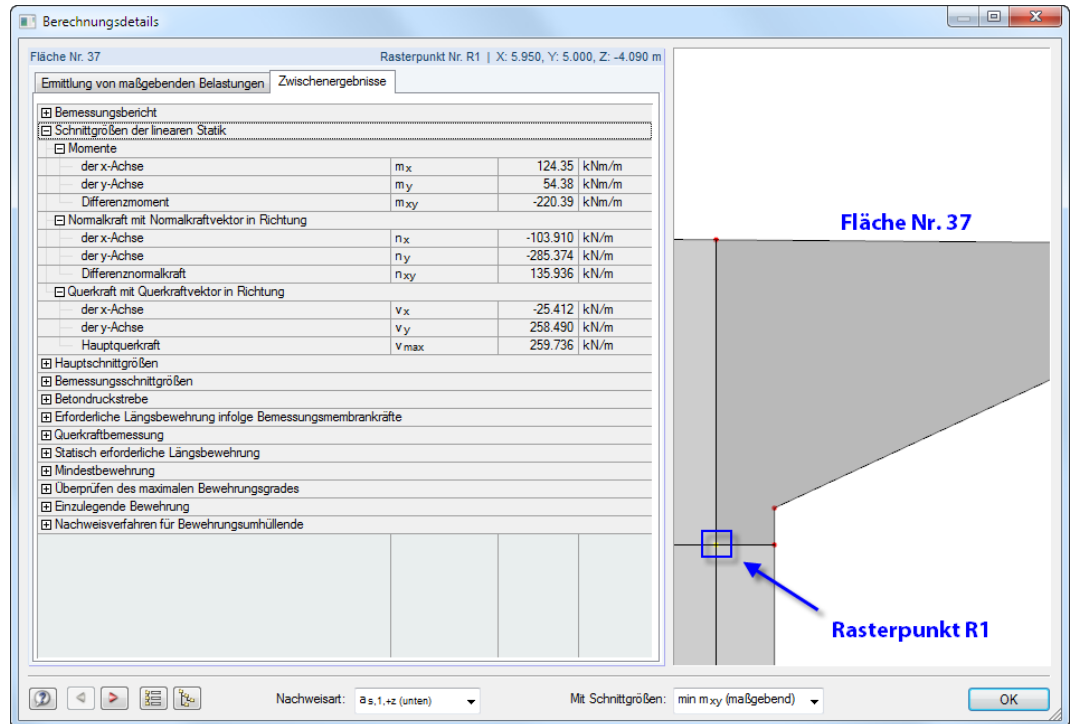


Bild 2.60: Schnittgrößen der linearen Statik

Aus den RFEM-Schnittgrößen der linearen Statik werden die Hauptschnittgrößen bestimmt. Diese ermitteln sich nach den Gleichungen, die in den [Kapiteln 2.3 und 2.4](#) vorgestellt sind.

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Hauptmomente			
Unterseite (+z)			
Erstes Hauptmoment	$m_{I,+z}$	312.51	kNm/m
Zweites Hauptmoment	$m_{II,+z}$	-133.78	kNm/m
Richtung	$\alpha_{m,+z}$	-40.490	°
Oberseite (-z)			
Erstes Hauptmoment	$m_{I,-z}$	133.78	kNm/m
Zweites Hauptmoment	$m_{II,-z}$	-312.51	kNm/m
Richtung	$\alpha_{m,-z}$	49.510	°
Hauptnormalkräfte			
Unterseite (+z)			
Erste Hauptnormalkraft	$n_{I,+z}$	-31.207	kN/m
Zweite Hauptnormalkraft	$n_{II,+z}$	-358.076	kN/m
Richtung	$\alpha_{n,+z}$	28.139	°
Oberseite (-z)			
Erste Hauptnormalkraft	$n_{I,-z}$	-31.207	kN/m
Zweite Hauptnormalkraft	$n_{II,-z}$	-358.076	kN/m
Richtung	$\alpha_{n,-z}$	28.139	°
Hauptquerkraft			
Hauptquerkraft	v_{max}	259.736	kN/m
Richtung	β_m	95.615	°

Bild 2.61: Hauptschnittgrößen

Bei Schalen werden die Hauptnormalkräfte für beide Plattenseiten angegeben, da sie für die Bemessung als Schale erforderlich sind. Die Hauptnormalkräfte an Plattenober- und Plattenunterseite sind – im Gegensatz zu den Momenten – gleich.

Aus den Hauptmomenten $m_{I,+z}$ und $m_{II,+z}$ an Flächenunterseite werden nun die Bemessungsmomente ermittelt. Dazu werden zunächst die Differenzwinkel $\alpha_{m,+z}$ und $\beta_{m,+z}$ zwischen der Richtung $\gamma_{m,+z}$ der ersten Hauptnormalkraft $m_{I,+z}$ an Flächenunterseite und den beiden Bewehrungsrichtungen $\phi_1 = 0^\circ$ und $\phi_2 = 90^\circ$ bestimmt.

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Bemessungsschnittgrößen			
Unterseite (+z)			
Bemessungsmomente			
Hauptmomente			
Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
1. Bewehrungsrichtung	$\Delta\Phi_{+z,1,b}$	40.490	°
2. Bewehrungsrichtung	$\Delta\Phi_{+z,2,b}$	130.490	°
Differenzwinkel nach Baumann			
1. Differenzwinkel	$\alpha_{m,+z}$	40.490	°
2. Differenzwinkel	$\beta_{m,+z}$	130.490	°

Bild 2.62: Differenzwinkel

Es wird nun nach der Richtung eines Moments gesucht, das das zweibahnige Bewehrungsnetz aussteift. Wie schon bei Wänden und Platten gezeigt, kommen als Momentenrichtungen nur die zwei Winkel zwischen den Richtungen der Bewehrungsscharen infrage. Die Untersuchung für die Flächenunterseite liefert diese Richtungen für die angenommenen Betondruckstreben:

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Bemessungsschnittgrößen			
Unterseite (+z)			
Bemessungsmomente			
Hauptmomente			
Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
Differenzwinkel nach Baumann			
Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
Neuer Differenzwinkel	$\gamma_{m,+z,1}$	85.490	°
Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
1. Bemessungsbiegemoment	$m_{\alpha,+z,1}$	344.73	kNm/m
2. Bemessungsbiegemoment	$m_{\beta,+z,1}$	274.76	kNm/m
3. Bemessungsbiegemoment	$m_{\gamma,+z,1}$	-440.77	kNm/m
Druckstrebenrichtung zulässig?	$m_{strebe,+z,1}$	Ja	
Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
Neuer Differenzwinkel	$\gamma_{m,+z,2}$	175.490	°
Bemessungsbiegemomente nach Baumann			
1. Bemessungsbiegemoment	$m_{\alpha,+z,2}$	-96.04	kNm/m
2. Bemessungsbiegemoment	$m_{\beta,+z,2}$	-166.01	kNm/m
3. Bemessungsbiegemoment	$m_{\gamma,+z,2}$	440.77	kNm/m
Druckstrebenrichtung zulässig?	$m_{strebe,+z,2}$	Nein	

Bild 2.63: Richtungen γ der Betondruckstrebe

Nur die Annahme der Richtung $\gamma_{m,+z,1}$ von 85,489° erweist sich als zulässig. Da keine Optimierung dieses Winkels mehr vorgenommen wird, ergeben sich als endgültige Bemessungsmomente $m_{end,+z,\phi_1}$ und $m_{end,+z,\phi_2}$ in Richtung der beiden Bewehrungsscharen:

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Bemessungsschnittgrößen			
Unterseite (+z)			
Bemessungsmomente			
Hauptmomente			
Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,+z}$ und der			
Differenzwinkel nach Baumann			
Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
Energie = Summe der abs(Bemessungsbiegemomente)			
Maßgebende Druckstrebe			
Maßgebende Bemessungsbiegemomente			
Endbemessungsbiegemomente			
in 1. Richtung	$m_{end,+z,\phi_1}$	344.73	kNm/m
in 2. Richtung	$m_{end,+z,\phi_2}$	274.76	kNm/m
in Streberichtung	$m_{end,+z,strebe}$	-440.77	kNm/m

Bild 2.64: Endgültige Bemessungsmomente

2.5.3.2 Bemessungsnormalkräfte

Die Bemessungsnormalkräfte $n_{\text{end},+z,\phi_1}$ und $n_{\text{end},+z,\phi_2}$ ermitteln sich nach dem gleichen Prinzip.

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht			
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsnormalkräfte			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptnormalkräfte			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel zwischen $\alpha_{n,+z}$ und der			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel nach Baumann			
<input checked="" type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Energie = Summe der abs(Bemessungsnormalkräfte)			
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Druckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Bemessungsnormalkräfte			
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung	$n_{+z,\phi 1}$	32.026	kN/m
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung	$n_{+z,\phi 2}$	-149.438	kN/m
<input type="checkbox"/> in Streberichtung	$n_{\text{end},+z,\text{strebe}}$	-271.872	kN/m
<input type="checkbox"/> Streberichtung optimieren?	Strebe opti,n,+z	Nein	
<input checked="" type="checkbox"/> Endbemessungsnormalkräfte			
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung	$n_{\text{end},+z,\phi 1}$	32.026	kN/m
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung	$n_{\text{end},+z,\phi 2}$	-149.438	kN/m
<input type="checkbox"/> in Streberichtung	$n_{\text{end},+z,\text{strebe}}$	-271.872	kN/m

Bild 2.65: Bemessungsnormalkräfte

2.5.3.3 Hebelarm der inneren Kräfte

Mit den Bemessungsschnittgrößen für die Bewehrungsrichtungen $\phi_1 = 0^\circ$ und $\phi_2 = 90^\circ$ kann der Hebelarm der inneren Kräfte bestimmt werden.

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht			
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsnormalkräfte			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> in 1. Bewehrungsrichtung			
<input type="checkbox"/> Bemessungsbiegemoment	$m_{\text{end},+z,\phi 1}$	344.73	kNm/m
<input type="checkbox"/> Bemessungsnormalkraft	$n_{\text{end},+z,\phi 1}$	32.026	kN/m
<input checked="" type="checkbox"/> in 2. Bewehrungsrichtung			
<input type="checkbox"/> Bemessungsbiegemoment	$m_{\text{end},+z,\phi 2}$	274.76	kNm/m
<input type="checkbox"/> Bemessungsnormalkraft	$n_{\text{end},+z,\phi 2}$	-149.438	kN/m

Bild 2.66: Bemessungsschnittgrößen

Wie in Kapitel 2.5.2 ab Seite 46 beschrieben, findet für die beiden Bewehrungsscharen eine Vorbemessung mit den ermittelten Schnittgrößen statt. Diese dient dazu, den Hebelarm der inneren Kräfte zu bestimmen. Der Hebelarm wird aus dem Dehnungszustand infolge der Bemessungsschnittgrößen ermittelt (siehe folgendes Bild).

⊞ Bemessungsbericht		
⊞ Schnittgrößen der linearen Statik		
⊞ Hauptschnittgrößen		
⊞ Bemessungsschnittgrößen		
⊞ Unterseite (+z)		
⊞ Bemessungsmomente		
⊞ Bemessungsnormalkräfte		
⊞ Bemessungsschnittgrößen		
⊞ Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{min,+z}$	1.239 m
⊞ aus Bemessung in 1. Bewehrungsrichtung	$z_{+z, \Phi 1}$	1.250 m
⊞ aus Bemessung in 2. Bewehrungsrichtung	$z_{+z, \Phi 2}$	1.239 m
⊞ Moment um den Zugbewehrungsschwerpunkt	$m_{sd(1),+z,2}$	365.17 kNm/m
⊞ Moment um den Druckbewehrungsschwerpunkt	$m_{sd(2),+z,2}$	184.35 kNm/m
⊞ Maximale Druckzonenhöhe	$x_{lim,+z,2}$	0.563 m
⊞ Grenznormalkraft	$n_{sd,lim,+z,2}$	-9107.140 kN/m
⊞ Grenzmoment	$m_{sd,lim,+z,2}$	9253.03 kNm/m
Grenznormalkraft größer als einwirkende Normalkraft?	$n_{sd,lim,+z,2} > n_{sd,+z,2}$	Nein
⊞ Radikant (Wert unter der Wurzel)	Radikant +z,2	22033.60 cm ²
Radikant kleiner als Null?	Radikant +z,2 < 0	Nein
Rechnerische Höhe der Betondruckzone	$x_{ber,+z,2}$	0.031 m
Rechnerische Höhe der Betondruckzone negativ?	$x_{ber,+z,2} < 0$	Nein
⊞ Vorhandenes Verhältnis Druckzonenhöhe / Nutzhöhe	$\psi_{+z,2}$	0.025
Vorhandenes Verhältnis größer Grenzverhältnis x / d ?	$\psi_{+z,2} > \psi_{lim}$	Nein
Maßgebender Bereich (sh. Handbuch)	Bereich	III
⊞ Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{+z,2}$	1.239 m

Bild 2.67: Hebelarm der inneren Kräfte

Als der kleinere und deshalb maßgebende Hebelarm $z_{min,+z}$ ergibt sich der Wert 1,239 m.

2.5.3.4 Membrankräfte

Mit dem maßgebenden Hebelarm aus der Vorbemessung lassen sich nun die Schnittgrößen der linearen Plattenstatik in Membrankräfte transformieren. Dazu werden die auf [Seite 45](#) vorgestellten Gleichungen benutzt.

$$n_{sx,+z} = \frac{m_x}{z_{min,+z}} + \frac{n_x}{2} = \frac{123,35}{1,239} + \frac{-103,911}{2} = 48,408 \text{ kN/m}$$

$$n_{sy,+z} = \frac{m_y}{z_{min,+z}} + \frac{n_y}{2} = \frac{54,36}{1,239} + \frac{-285,386}{2} = -98,819 \text{ kN/m}$$

$$n_{xy,+z} = \frac{m_{xy}}{z_{min,+z}} + \frac{n_{xy}}{2} = \frac{-135,39}{1,239} + \frac{135,935}{2} = -109,910 \text{ kN/m}$$

Diese Membrankräfte finden sich auch in den Bemessungsdetails.

⊞ Bemessungsbericht		
⊞ Schnittgrößen der linearen Statik		
⊞ Hauptschnittgrößen		
⊞ Bemessungsschnittgrößen		
⊞ Unterseite (+z)		
⊞ Bemessungsmomente		
⊞ Bemessungsnormalkräfte		
⊞ Bemessungsschnittgrößen		
⊞ Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{min,+z}$	1.239 m
⊞ Membrankraft		
⊞ in Richtung der x-Achse	$n_{sx,+z}$	48.414 kN/m
— Moment	m_x	124.35 kNm/m
— Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{min,+z}$	1.239 m
— Normalkraft	n_x	-103.910 kN/m
⊞ in Richtung der y-Achse	$n_{sy,+z}$	-98.796 kN/m
— Moment	m_y	54.38 kNm/m
— Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{min,+z}$	1.239 m
— Normalkraft	n_y	-285.374 kN/m
⊞ Differenzmembrankraft	$n_{xy,+z}$	-109.923 kN/m
— Moment	m_{xy}	-220.39 kNm/m
— Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte	$z_{min,+z}$	1.239 m
— Normalkraft	n_{xy}	135.936 kN/m

Bild 2.68: Membrankräfte

2.5.3.5 Bemessungsmembrankräfte

Aus den Membrankräften $n_{sx,+z}$, $n_{sy,+z}$ und $n_{xy,+z}$, die die Momente m_x , m_y , m_{xy} und Normalkräfte n_x , n_y , n_{xy} der linearen Plattenstatik ersetzen, werden nun die Hauptmembrankräfte $ns_{I,+z}$ und $ns_{II,+z}$ ermittelt.

⊞ Bemessungsbericht
⊞ Schnittgrößen der linearen Statik
⊞ Hauptschnittgrößen
⊞ Bemessungsschnittgrößen
⊞ Unterseite (+z)
⊞ Bemessungsmomente
⊞ Bemessungsnormalkräfte
⊞ Bemessungsschnittgrößen
⊞ Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte
z min,+z
1.239 m
⊞ Membrankraft
⊞ Bemessungsmembrankräfte
⊞ Hauptmembrankräfte
Erste Hauptmembrankraft
ns _{I,+z}
107.100 kN/m
Zweite Hauptmembrankraft
ns _{II,+z}
-157.481 kN/m
Richtung
α _{nsI,+z}
-28.097 °
Quotient k = ns _{II,+z} /ns _{I,+z}
k _{ns,+z}
-1.470

Bild 2.69: Bemessungsmembrankräfte

Aus den Hauptmembrankräften lassen sich die Bemessungsmembrankräfte gemäß [Gleichung 2.5](#) bis [Gleichung 2.7](#) (siehe [Seite 13](#)) bestimmen. Sie werden unter den Bemessungsdetails angegeben.

⊞ Bemessungsbericht
⊞ Schnittgrößen der linearen Statik
⊞ Hauptschnittgrößen
⊞ Bemessungsschnittgrößen
⊞ Unterseite (+z)
⊞ Bemessungsmomente
⊞ Bemessungsnormalkräfte
⊞ Bemessungsschnittgrößen
⊞ Kleinster Hebelarm der inneren Kräfte
z min,+z
1.239 m
⊞ Membrankraft
⊞ Bemessungsmembrankräfte
⊞ Hauptmembrankräfte
⊞ Differenzwinkel zwischen α _{ns,+z} und der
⊞ Differenzwinkel nach Baumann
⊞ Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe
Neuer Differenzwinkel
γ _{ns,+z,1}
73.097 °
⊞ Bemessungsmembrankräfte nach Baumann
1. Bemessungsmembrankraft
ns _{α,+z,1}
158.337 kN/m
2. Bemessungsmembrankraft
ns _{β,+z,1}
11.127 kN/m
3. Bemessungsmembrankraft
ns _{γ,+z,1}
-219.846 kN/m
Druckstrebenrichtung zulässig?
ns _{strebe,+z,1}
Ja
⊞ Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe
⊞ Energie = Summe der abs(Bemessungsmembrankräfte)
⊞ Maßgebende Druckstrebe
⊞ Maßgebende Bemessungsmembrankräfte
⊞ Endbemessungsmembrankräfte
in 1. Richtung
ns _{end,+z,φ1}
158.337 kN/m
in 2. Richtung
ns _{end,+z,φ2}
11.127 kN/m
in Streberichtung
ns _{end,+z,strebe}
-219.846 kN/m

Bild 2.70: Endbemessungsmembrankräfte

Mit den endgültigen Bemessungsmembrankräften $ns_{end,+z,φ1}$ und $ns_{end,+z,φ2}$ werden die erforderlichen Bewehrungsquerschnitte eines zweibahnigen Bewehrungsnetzes für die Flächenseite bestimmt.

Das Bewehrungsnetz wird durch eine Betondruckstrebe ausgesteift. Die Größe der aussteifenden Strebenkraft $ns_{end,+z,strebe}$ kann unter den endgültigen Bemessungsmembrankräften abgelesen werden. Sie beträgt $-219,859$ kN/m.

Analog werden die Bemessungsmembrankräfte und aussteifende Betondruckstrebenkraft für die Plattenoberseite ermittelt.

2.5.4 Nachweis der Betondruckstreben

Die Betondruckstrebe einer Schale wird nachgewiesen, indem sie in drei Ersatzscheiben aufgeteilt wird, die durch die Bemessungsmembrankräfte beansprucht werden.

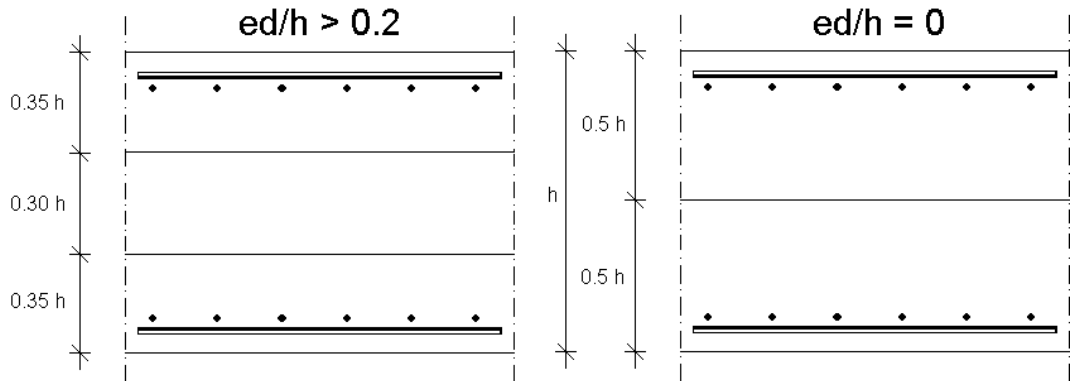


Bild 2.71: Ersatzscheibendicken für überwiegend durch Moment (links) und Druckkraft (rechts) beanspruchte Schalen

Für Schalen, bei denen das beanspruchende Moment relativ groß zur einwirkenden Normalkraft ist ($e_d/h > 0,2$), reduziert sich die Dicke h_E der beiden äußeren Scheiben auf $0,35 \cdot d$. Für annähernd zentrisch gedrückte Schalen wird die Ersatzscheibendicke h_E auf die Hälfte der Plattendicke h erhöht. Liegt die bezogene Exzentrizität der Normalkraft e_d/h zwischen 0 und 0,2, so wird die Ersatzscheibendicke interpoliert.

Für e_d wird der größere Wert der Quotienten von m_x/n_x und m_y/n_y angesetzt.

Für den Nachweis der Betondruckstrebe wird die aufzunehmende Betondruckstrebenkraft $n_{strebe,+z}$ mit der aufnehmbaren Normalkraft der Ersatzscheibe $n_{strebe,d}$ verglichen.

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Bemessungsschnittgrößen			
Betondruckstrebe			
Ersatzscheibendicke	h_E	45.15	cm
Bezogene Lastausmitte	e_d/h	0.928	
Vorwiegende Beanspruchung	Beanspruchung	Druck	
Faktor für Ersatzscheibendicke	f_{hE}	0.350	
Unterseite (+z)			
Bemessungsmembrankraft in Strebenrichtung	$n_{strebe,+z}$	-219.846	kN/m
Aufnehmbare Membrankraft Beton	$n_{strebe,d}$	-7224.000	kN/m
Breite Ersatzscheibe	b	1.000	m
Ersatzscheibendicke	h_E	45.15	cm
Angesetzte Betonfestigkeit	$f_{cd,08}$	16.00	N/mm ²
Einaxiale Betondruckfestigkeit	f_{cd}	20.00	N/mm ²
Grad der maximalen Ausnutzung	ξ_{fod}	0.800	
Versagen der Betondruckstrebe?	$ln_{strebe,d} < ln_{strebe}$	Nein	

Bild 2.72: Betondruckstrebe und Ersatzscheibendicke

Die aufnehmbare Normalkraft $n_{strebe,d}$ hängt von der Dicke h_E der Ersatzscheibe und der angesetzten Betonfestigkeit $f_{cd,08}$ ab.

Die Ersatzscheibendicke wird ermittelt, indem aus den Schnittgrößen der linearen Plattenstatik zunächst die vorhandenen Lastausmitten in x- und y-Richtung bestimmt werden:

$$e_{dx} = \left| \frac{m_x}{n_x} \right| = \left| \frac{124,35}{-103,911} \right| = 1,197 \text{ m}$$

$$e_{dy} = \left| \frac{m_y}{n_y} \right| = \left| \frac{54,36}{-285,386} \right| = 0,190 \text{ m}$$

Als maßgebend erweist sich die größere Lastausmitte in x-Richtung. Mit ihr kann die bezogene Lastausmitte e_d/h bestimmt werden.

$$\frac{e_d}{h} = \frac{1,197}{1,29} = 0,928 > 0,2$$

Da die bezogene Lastausmitte größer als 0,2 ist, liegt eine vorwiegend auf Biegung beanspruchte Schale vor. Der Faktor f_{hE} zur Ermittlung der Ersatzscheibendicke beträgt 0,35.

Die Dicke h_E der Ersatzscheibe ermittelt sich somit wie folgt:

$$h_E = f_{hE} \cdot h = 0,35 \cdot 129 = 45,15 \text{ cm}$$

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit wird den Empfehlungen von SCHLAICH/SCHÄFER (in: Betonkalender 1993/II, S. 378) gemäß auf 80 % abgemindert. Dieser Vorschlag findet sich auch in EN 1992-1-1, Abschnitt 6.5.2, der die Bemessung von Druckstreben in Stabwerksmodellen regelt.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd,08} = 0,8 \cdot 20 = 16 \text{ N/mm}^2$$

Dieser Wert findet sich auch in den Bemessungsdetails (siehe Bild 2.72).

Damit kann die aufnehmbare Betondruckstrebenkraft $n_{strebe,d}$ bestimmt werden.

$$n_{strebe,d} = b \cdot h_E \cdot f_{cd,08} = 100 \cdot 45,15 \cdot 16 = 7224,00 \text{ kN/m}$$

Der Nachweis der Betondruckstrebe für die Flächenoberseite erfolgt analog.

2.5.5 Erforderliche Längsbewehrung

Die an der Flächenunterseite einzulegende Längsbewehrung wird aus den Bemessungsmembrankräften ermittelt. In den Bemessungsdetails erfolgt die Ausgabe getrennt für die beiden Bewehrungsrichtungen.

Bemessungsbericht			
Schnittgrößen der linearen Statik			
Hauptschnittgrößen			
Bemessungsschnittgrößen			
Betondruckstrebe			
Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
Unterseite (+z)			
in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,+z,1}$	3.40	cm ² /m
Bemessungsmembrankraft	$n_{s, end, +z, \phi 1}$	158.337	kN/m
Bemessungsspannung	$\sigma_{s, +z, 1}$	465.93	N/mm ²
in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,+z,2}$	0.24	cm ² /m
Bemessungsmembrankraft	$n_{s, end, +z, \phi 2}$	11.127	kN/m
Bemessungsspannung	$\sigma_{s, +z, 2}$	465.93	N/mm ²

Bild 2.73: Erforderliche Längsbewehrung

$$a_{s,dim,+z,1} = \frac{n_{s, end, +z, \phi 1}}{\sigma_{s, +z, 1}} = \frac{158,344}{465,93} = 3,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$a_{s,dim,+z,2} = \frac{n_{s, end, +z, \phi 2}}{\sigma_{s, +z, 2}} = \frac{11,116}{465,93} = 0,24 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Die Bewehrung für die Flächenoberseite wird analog ermittelt.

2.5.6 Querkraftbemessung

Bei der Querkraftbemessung wird zunächst die angesetzte Zugbewehrung bestimmt.

☐ Querkraftbemessung		
Angesetzte Zugbewehrung ermittelt aus erforderlicher Längsbewehrung.		
Kein Ansatz der definierte Grundbewehrung erforderlich da Längsbewehrung ausreichend.		
☐ Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	1.54 cm ² /m
☐ Unterseite (+z)		
☐ aus 1. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,+z,1}$	0.03 cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim+z,1}$	3.40 cm ² /m
Spannungszustand	Spannung +z,1	Zug
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{+z,1}$	84.385 °
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{+z,1})$	0.010
☐ aus 2. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,+z,2}$	0.24 cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim+z,2}$	0.24 cm ² /m
Spannungszustand	Spannung +z,2	Zug
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{+z,2}$	5.615 °
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{+z,2})$	0.990
☐ Oberseite (-z)		
☐ aus 1. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,-z,1}$	0.02 cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim-z,1}$	2.00 cm ² /m
Spannungszustand	Spannung -z,1	Zug
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{-z,1}$	84.385 °
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{-z,1})$	0.010
☐ aus 2. Bewehrungsrichtung	$a_{sl,-z,2}$	1.26 cm ² /m
Erforderliche Längsbewehrung	$a_{s,dim-z,2}$	1.27 cm ² /m
Spannungszustand	Spannung -z,2	Zug
Differenzwinkel zur Hauptquerkrafttrichtung	$\Delta\Phi_{-z,2}$	5.615 °
Quadrat des Kosinus des Differenzwinkels	$\cos^2(\Delta\Phi_{-z,2})$	0.990

Bild 2.74: Angesetzte Zugbewehrung

Aus allen Bewehrungslagen und -richtungen können insgesamt 1,54 cm²/m Zugbewehrung angesetzt werden. Damit wird die ohne Schubbewehrung aufnehmbare Querkraft $V_{Rd,c}$ ermittelt.

☐ Querkraftbemessung		
Angesetzte Zugbewehrung ermittelt aus erforderlicher Längsbewehrung.		
Kein Ansatz der definierte Grundbewehrung erforderlich da Längsbewehrung ausreichend.		
☐ Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	1.54 cm ² /m
☐ Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung		
☐ Querkrafttragfähigkeit nach Gleichung (6.2.a)		
Sicherheitsfaktor	$C_{Rd,c}$	0.120
☐ Beiwert Maßstabseffekt (Size Effects)	k	1.399
Statische Nutzhöhe	d	1.255 m
☐ Längsbewehrungsgrad	ρ_l	0.000
Angesetzte Längsbewehrung	a_{sl}	1.54 cm ² /m
Stabbreite	b_w	1.000 m
Statische Nutzhöhe	d	1.255 m
Charakteristische Betonfestigkeit	f_{ck}	30.00 N/mm ²
Faktor der Betonlängsspannung	k_1	0.150
☐ Betonlängsspannung	σ_{cp}	0.33 N/mm ²
Normalkraft in Hauptquerkrafttrichtung	n_β	-425.773 kN/m
Bauteilbreite	b_w	1.000 m
Bauteilhöhe	h	129.00 cm
Bauteilbreite	b_w	1.000 m
Statische Nutzhöhe	d	1.255 m
Querkrafttragfähigkeit nach Gleichung (6.2.a)	$V_{Rd,c,6.2a}$	213.271 kN/m
☐ Minimale Querkrafttragfähigkeit nach (6.2.b)		
☐ Beiwert der Druckfestigkeit	v_{min}	0.317
Beiwert Maßstabseffekt (Size Effects)	k	1.399
Charakteristische Betonfestigkeit	f_{ck}	30.00 N/mm ²
Faktor der Betonlängsspannung	k_1	0.150
☐ Betonlängsspannung	σ_{cp}	0.33 N/mm ²
Normalkraft in Hauptquerkrafttrichtung	n_β	-425.773 kN/m
Bauteilbreite	b_w	1.000 m
Bauteilhöhe	h	129.00 cm
Bauteilbreite	b_w	1.000 m
Statische Nutzhöhe	d	1.255 m
Minimale Querkrafttragfähigkeit nach (6.2.b)	$V_{Rd,c,6.2b}$	460.326 kN/m
Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung	$V_{Rd,c}$	460.326 kN/m
☐ Schubbewehrung erforderlich?	Nachweis $V_{Rd,c}$	Nein
Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung	$V_{Rd,c}$	460.326 kN/m
Einwirkende Querkraft	V_{Ed}	259.736 kN/m
Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung ausreichend. Keine weiteren Nachweise.		

Bild 2.75: Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Mit der angesetzten Zugbewehrung wird der Längsbewehrungsgrad ρ_l bestimmt:

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{(b_w \cdot d)} = \frac{1,54}{(100 \cdot 125,5)} = 0,00012 \leq 0,02$$

Bei einem 3D-Modelltyp kann (im Gegensatz zu einer Platte) eine zusätzliche Normalkraft auftreten. Diese muss über die entsprechende Betonlängsspannung berücksichtigt werden:

$$\sigma_{cp} = \frac{n_\beta}{(b_w \cdot h)} = \frac{-425,783}{(100 \cdot 129)} = -0,33 \text{ N/m}^2$$

Der Beiwert k zur Berücksichtigung der Plattendicke berechnet sich wie folgt:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{1255}} = 1,399 \leq 2,0 \quad d \text{ in [mm]}$$

In die Bemessung fließen zudem folgende Beiwerte ein:

$$\text{Faktor der Betonlängsspannung} \quad k_1 = 0,15$$

$$\text{Betondruckfestigkeit für C30/37} \quad f_{ck} = 30,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Sicherheitsfaktor} \quad C_{rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

Damit lässt sich die Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ ohne Querkraftbewehrung gemäß Gleichung (6.2a) bestimmen:

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= \left[C_{rd,c} \cdot k (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = \\ &= \left[0,12 \cdot 1,399 (100 \cdot 0,00012 \cdot 30,0)^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 0,33 \right] \cdot 1000 \cdot 1255 = 212,00 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Der Mindestwert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,c}$ ohne Querkraftbewehrung ermittelt sich gemäß Gleichung (6.2b) aus dem Mindestbewehrungsgrad ν_{min} :

$$\nu_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 1,399^{\frac{3}{2}} \cdot 30,0^{\frac{1}{2}} = 0,317$$

$$V_{Rd,c} = (0,317 \cdot 0,15 \cdot 0,33) \cdot 1000 \cdot 1255 = 459,96 \text{ kN/m}$$

Da die Querkrafttragfähigkeit der Platte $V_{Rd,c} = 459,96 \text{ kN/m}$ größer ist als die einwirkende Querkraft $V_{Ed} = 259,726 \text{ kN/m}$, ist im Beispiel keine Querkraftbewehrung erforderlich.

Falls die Querkrafttragfähigkeit der Platte nicht ausreichend sein sollte, wird zuerst überprüft, ob die maximale Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe $V_{Rd,max}$ ausreichend ist. $V_{Rd,max}$ wird mit der Mindestneigung der Druckstrebe θ ermittelt. Wenn die Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe größer ist als die einwirkende Querkraft V_{Ed} , kann die statisch erforderliche Querkraftbewehrung a_{sw} bestimmt werden. Anschließend wird noch der Nachweis für die Querkraftbewehrung $V_{Rd,sy}$ durchgeführt.

2.5.7 Statisch erforderliche Längsbewehrung

Die Tabelle der Bemessungsdetails fasst die statisch erforderliche Längsbewehrung zusammen.

☐ Bemessungsbericht
☐ Schnittgrößen der linearen Statik
☐ Hauptschnittgrößen
☐ Bemessungsschnittgrößen
☐ Betondruckstrebe
☐ Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte
☐ Querkraftbemessung
☐ Statisch erforderliche Längsbewehrung
☐ Unterseite (+z)
☐ in 1. Bewehrungsrichtung
☐ aus Bemessung
☐ in 2. Bewehrungsrichtung
☐ aus Bemessung
☐ Oberseite (-z)
☐ in 1. Bewehrungsrichtung
☐ aus Bemessung
☐ in 2. Bewehrungsrichtung
☐ aus Bemessung

Bild 2.76: Statisch erforderliche Längsbewehrung

Für jede Bewehrungsrichtung wird angegeben, welche Bemessung für die statisch erforderliche Bewehrung maßgebend ist.

Im Beispiel resultieren alle Längsbewehrungen aus der Biegebemessung als Schale. In anderen Fällen wäre auch eine erforderliche Längsbewehrung zur Vermeidung von Querkraftbewehrung denkbar.

2.5.8 Mindestlängsbewehrung

Die statisch erforderliche Längsbewehrung wird nun mit der Mindestbewehrung verglichen. Leider existieren in keiner der in RF-BETON Flächen verfügbaren Normen Mindestbewehrungsvorschriften für Schalen. Als Kriterium wird deshalb untersucht, bei welcher Konstellation von Moment und Normalkraft es sich eher um eine Wand (vorwiegend druckbeansprucht) oder um eine Platte (vorwiegend biegebeansprucht) handelt. Als Unterscheidungskriterium dient die bezogene Lastausmitte e_d/h im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT):

$$\frac{e_d}{h} = \frac{m}{n} \quad (2.61)$$

mit

- m Moment der linearen Plattenstatik (GZT)
- n Normalkraft der linearen Plattenstatik (GZT)
- h Plattendicke

Da in einem Bemessungspunkt Momente und Normalkräfte sowohl in x-Richtung als auch in y-Richtung vorliegen, ist die bezogene Lastausmitte je Bemessungspunkt der größte Quotient aus Moment durch Normalkraft beider Richtungen.

Einheitlich für alle Normen ist in RF-BETON Flächen festgelegt:

$$\begin{aligned} \frac{e_d}{h} > 3,5 : & \text{ Beanspruchung vorwiegend auf Biegung } \Rightarrow \text{ Bewehrungsvorschriften für } \mathbf{Platten} \\ \frac{e_d}{h} \leq 3,5 : & \text{ Beanspruchung vorwiegend auf Druck } \Rightarrow \text{ Bewehrungsvorschriften für } \mathbf{Wände} \end{aligned}$$

Diese Regelung findet sich in EN 1992-1-1 in den Abschnitten 9.3 Vollplatten und 9.6 Wände. Die Mindestbewehrungen sind in den [Kapiteln 2.3.7](#) ab [Seite 22](#) und [2.4.5](#) ab [Seite 43](#) bei den Bewehrungsvorschriften für Wände und Platte beschrieben.

Für unser Beispiel, in dem eine überwiegende Biegebeanspruchung vorliegt, wird folgende Mindestbewehrung ausgegeben.

▣ Bemessungsbericht			
▣ Schnittgrößen der linearen Statik			
▣ Hauptschnittgrößen			
▣ Bemessungsschnittgrößen			
▣ Betondruckstrebe			
▣ Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
▣ Querkraftbemessung			
▣ Statisch erforderliche Längsbewehrung			
▣ Mindestbewehrung			
▣ Mindestlängsbewehrung			
▣ Grundwert der Mindestbewehrung			
Mindestzugbewehrungsgrad	min ρ_T	0.0	%
Mindestdruckbewehrungsgrad	min ρ_C	0.0	%
Genereller Mindestbewehrungsgrad	min ρ_G	0.0	%
▣ Bezogen auf Querschnitt	A_c	12900.00	cm ²
▣ Unterseite (+z)			
▣ Hauptlängsbewehrung mit Zug dieser Seite	$a_{s,max,+z}$	18.93	cm ² /m
Richtung der Hauptlängsbewehrung	$\varphi_{as,main}$	0.000	°
▣ Statisch erforderliche Bewehrung	$a_{s,stat,+z,1}$	3.40	cm ² /m
▣ Statisch erforderliche Bewehrung	$a_{s,stat,+z,2}$	0.24	cm ² /m
▣ Mindestlängsbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min longi,+z,1}$	18.93	cm ² /m
Spannungszustand	Spannung-z,1	Zug	
Mindestzugbewehrung	$a_{s,minT,+z,1}$	0.00	cm ² /m
Mindestdruckbewehrung	$a_{s,minC,+z,1}$	0.00	cm ² /m
Generelle Mindestbewehrung	$a_{s,minG,+z,1}$	0.00	cm ² /m
Mindestbewehrung für Wände	$a_{s,minW,+z,1}$	6.45	cm ² /m
▣ Mindestlängsbewehrung für duktiles Bauteilverhalten	$A_{s,min,duk}$	18.93	cm ² /m
▣ Erster berechneter Wert der Mindestlängsbewehrung	$A_{s,min,duk,berech1}$	18.93	cm ² /m
▣ Zweiter berechneter Wert der Mindestlängsbewehrung	$A_{s,min,duk,berech2}$	16.32	cm ² /m
▣ Mindestlängsbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min longi,+z,2}$	12.90	cm ² /m

Bild 2.77: Mindestlängsbewehrung

2.5.9 Einzulegende Bewehrung

Die einzulegende Bewehrung wird aus der statisch erforderlichen Bewehrung und der Mindestbewehrung ermittelt.

+ Bemessungsbericht			
+ Schnittgrößen der linearen Statik			
+ Hauptschnittgrößen			
+ Bemessungsschnittgrößen			
+ Betondruckstrebe			
+ Erforderliche Längsbewehrung infolge Bemessungsmembrankräfte			
+ Querkraftbemessung			
+ Statisch erforderliche Längsbewehrung			
+ Mindestbewehrung			
+ Überprüfen des maximalen Bewehrungsgrades			
+ Einzulegende Bewehrung			
+ Unterseite (+z)			
+ in 1. Bewehrungsrichtung		$a_{s,+z,1}$	18.93 cm ² /m
+ Statisch erforderliche Bewehrung		$a_{s,stat,+z,1}$	3.40 cm ² /m
+ Mindestbewehrung		$a_{s,min,+z,1}$	18.93 cm ² /m
+ in 2. Bewehrungsrichtung		$a_{s,+z,2}$	12.90 cm ² /m
+ Statisch erforderliche Bewehrung		$a_{s,stat,+z,2}$	0.24 cm ² /m
+ Mindestbewehrung		$a_{s,min,+z,2}$	12.90 cm ² /m
+ in 3. Bewehrungsrichtung		$a_{s,+z,3}$	0.00 cm ² /m
+ Oberseite (-z)			
+ in 1. Bewehrungsrichtung		$a_{s,-z,1}$	6.45 cm ² /m
+ Statisch erforderliche Bewehrung		$a_{s,stat,-z,1}$	2.00 cm ² /m
+ Mindestbewehrung		$a_{s,min,-z,1}$	6.45 cm ² /m
+ in 2. Bewehrungsrichtung		$a_{s,-z,2}$	12.90 cm ² /m
+ Statisch erforderliche Bewehrung		$a_{s,stat,-z,2}$	1.27 cm ² /m
+ Mindestbewehrung		$a_{s,min,-z,2}$	12.90 cm ² /m
+ in 3. Bewehrungsrichtung		$a_{s,-z,3}$	0.00 cm ² /m

Bild 2.78: Einzulegende Bewehrung

In der Grafik lassen sich die Bewehrungsquerschnitte für den Rasterpunkt Nr. 1 ebenfalls zur Anzeige bringen.

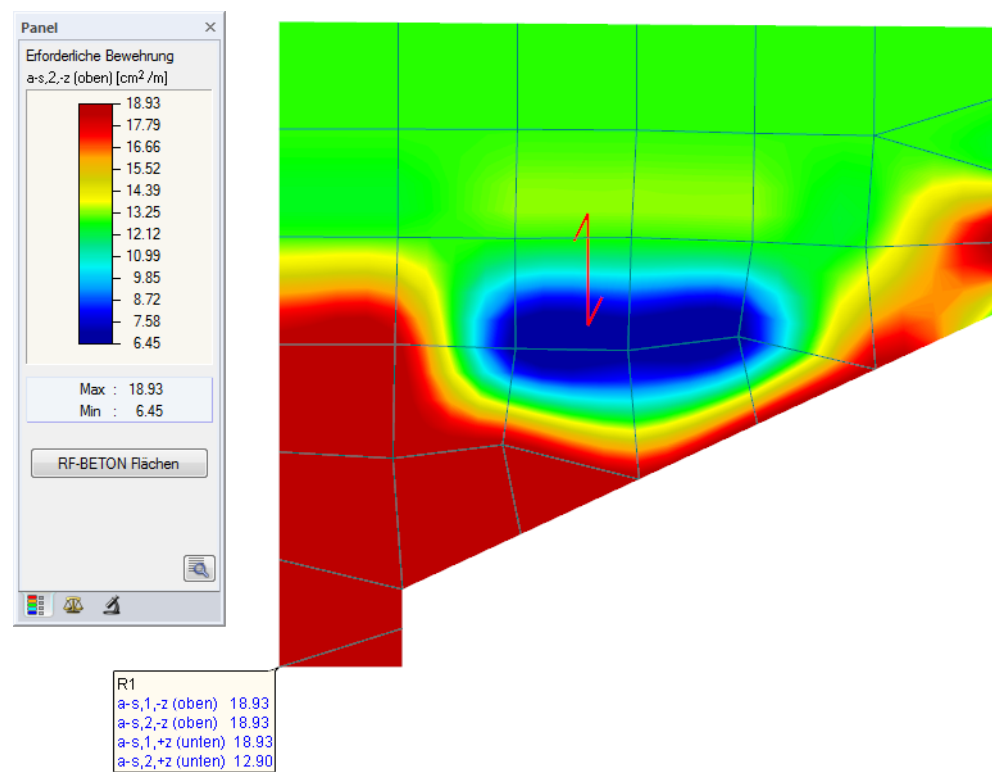


Bild 2.79: Grafik der Bewehrung für Fläche Nr. 37

2.6 Gebrauchstauglichkeit

Die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit bestehen aus verschiedenen Einzelnachweisen. In der folgenden Auflistung sind die relevanten Abschnitte für EN 1992-1-1 angegeben:

- Begrenzung der Spannungen: Abschnitt 7.2
- Begrenzung der Rissbreiten: Abschnitt 7.3
- Begrenzung der Verformungen: Abschnitt 7.4

Die oben angeführten Nachweise sind in den Stahlbetonnormen stets für stabförmige Bauteile beschrieben. Wie im vorherigen Teil dieses Handbuchs erwähnt, wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Bemessungssituation eines Flächenelements über ein Transformationsverfahren in die Bemessung von mehreren stabförmigen Bauteilen in Richtung der einzelnen Bewehrungsbahnen überführt. Auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bedient man sich eines Transformationsverfahrens.

2.6.1 Bemessungsschnittgrößen

Im Gegensatz zum Transformationsverfahren für den Grenzzustand der Tragfähigkeit kann keine rein geometrische Aufteilung der Hauptschnittgrößen in Schnittgrößen in die einzelnen Bewehrungsrichtungen erfolgen. Eine solche Aufteilung setzt ein Dehnungsverhältnis der später eingelegten Bewehrung von 1,0 voraus. Damit beide Bewehrungsscharen eine gleiche Dehnung erfahren, müssten aber bei unterschiedlichen Bemessungskräften in diese Bewehrungsrichtungen jeweils entsprechende Bewehrungsquerschnitte vorgesehen werden. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden jedoch die Bemessungsschnittgrößen für eine vorhandene Bewehrung gesucht.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird keine erforderliche Bewehrung ermittelt, sondern es wird mit der vorhandenen Bewehrung das tatsächlich vorhandene Dehnungsverhältnis bestimmt. In allen Fällen, in denen die eingelegte Bewehrung von der erforderlichen Bewehrung abweicht, entspricht das tatsächlich vorhandene Dehnungsverhältnis der Bewehrungen nicht dem Wert 1,0.

Die Annahme eines identischen Dehnungsverhältnisses ist somit unzulässig. Es muss ein anderes Dehnungsverhältnis gefunden werden, das die daraus resultierenden Bemessungsschnittgrößen bestätigt. Bei der Lösung dieser Aufgabe spielt der geometrische Zusammenhang zwischen Dehnungsverhältnis und Betondruckstrebenrichtung eine große Rolle.

BAUMANN [1] schreibt hierzu: „Vernachlässigt man die Stauchung des Betons, da sie im Allgemeinen klein ist gegenüber der Dehnung der Bewehrung, so erhält man aus Bild 38 als Verträglichkeitsbedingung“

$$\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\sin^2(\beta - \gamma)}{\sin^2(\gamma - \alpha)} \quad (2.62)$$

Die Abbildung auf folgender Seite zeigt das im Zitat erwähnte „Bild 38“ mit der Verträglichkeitsbedingung der Dehnungen bei einem zweibahnigen Bewehrungsnetz.

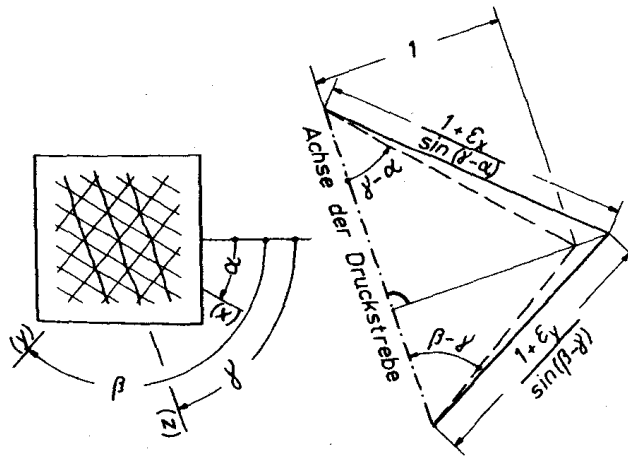


Bild 2.80: Verträglichkeit der Dehnungen

In Gleichung 2.62 sind ϵ_y und ϵ_x die Dehnungen zweier Bewehrungsscharen. Die Winkel α und β stellen die Zwischenwinkel zwischen Hauptkraftrichtung und der Richtung der jeweiligen Bewehrungsschar dar. Der kleinere Zwischenwinkel wird mit α bezeichnet. Der Winkel γ bezeichnet den Differenzwinkel zwischen der Richtung der Betondruckstrebe und der Richtung der ersten Hauptschnittgröße.

Die Winkel α und β sind durch die Wahl der Bewehrungsrichtung nicht veränderbar. Der Winkel γ hingegen ändert sich dann, wenn durch die unterschiedlich steifen Bewehrungsrichtungen eine andere Richtung der Betondruckstrebe notwendig ist, um das Bewehrungsnetz auszusteiern.

Die Bemessungsschnittgrößen in die einzelnen Bewehrungsrichtungen sind von der gewählten Richtung der Betondruckstrebe abhängig. Mit diesen Bemessungsschnittgrößen lassen sich die Spannungen in den Bewehrungen der einzelnen Richtungen bestimmen. Basierend auf diesen Spannungen werden in den diversen Normen Formeln genannt, mit denen die mittleren Dehnungen der Bewehrung gegenüber dem Beton ermittelt werden können. In EN-1992-1-1 geschieht dies nach Gleichung (7.9):

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (2.63)$$

Es kann dann der Quotient aus den Differenzen der Dehnungen zwischen Beton und Betonstahl der zweiten und ersten Bewehrungsrichtung bestimmt werden.

$$Q_\epsilon = \frac{(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{\phi_2}}{(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{\phi_1}} \quad (2.64)$$

Aus Gleichung 2.62 geht ebenfalls ein Quotient der Dehnungen hervor, der sich aus den geometrischen Gesetzmäßigkeiten herleitet.

$$Q_{\epsilon,geo} = \frac{\epsilon_{\phi_2}}{\epsilon_{\phi_1}} = \frac{\sin^2(\beta - \gamma)}{\sin^2(\gamma - \alpha)} \quad (2.65)$$

Bei beiden Quotienten erscheint die Dehnung der zweiten Bewehrungsrichtung im Zähler. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die erste Bewehrungsrichtung mit der ersten Hauptschnittgröße den kleineren Differenzwinkel bildet. Würde die zweite Bewehrungsrichtung mit der ersten Hauptschnittgröße den kleineren Differenzwinkel bilden, so fänden sich die Dehnungen der ersten Bewehrungsrichtung im Zähler des Quotienten wieder.

Beide Quotienten hängen von der gewählten Richtung der Betondruckstrebe ab. Es wird nun versucht, die Richtung der Betondruckstrebe so zu wählen, dass beide Quotienten identisch werden.

$$Q_{\epsilon} = Q_{\epsilon,geo} \quad (2.66)$$

Falls das geometrische Dehnungsverhältnis $Q_{\epsilon,geo}$ nach einem Rechenlauf noch nicht dem tatsächlichen Dehnungsverhältnis entspricht, wird eine neue Druckstrebenrichtung festgelegt und das daraus resultierende geometrische Dehnungsverhältnis bestimmt. Dieser Vorgang wird iterativ so lange durchlaufen, bis sich eine Konvergenz einstellt.

Die Bestimmung der Bemessungsschnittkräfte durch die Wahl der geeigneten Druckstrebenrichtung stellt den anspruchsvollsten Teil des Gebrauchstauglichkeitsnachweises dar. Falls die gewählte vorhandene Bewehrung annähernd der statisch erforderlichen Bewehrung für die untersuchten Gebrauchslastgrößen entspricht, unterscheiden sich die Bemessungsschnittgrößen nur unwesentlich von jenen Schnittgrößen, die sich bei einem vorausgesetzten Dehnungsverhältnis von 1,0 ergeben würden. RF-BETON Flächen bietet deshalb zusätzlich die Möglichkeit, Bemessungsschnittgrößen mit einem vorausgesetzten Dehnungsverhältnis von 1,0 ermitteln zu lassen.



Bemessungsschnittgrößen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden nur dann ermittelt, wenn es durch das Aufreißen des Betons zu einer Aktivierung der Bewehrung kommt. Dazu werden die Betonzugspannungen untersucht, die durch die erste Hauptschnittgröße verursacht werden.

2.6.2 Hauptschnittgrößen

Ist die erste Hauptschnittgröße negativ, wird in diesem Bereich des untersuchten Flächenelements von einem ungerissenen Beton ausgegangen. Für Scheiben wird in einem solchen Fall nur die Größe der Betondruckspannung überprüft. Bei Platten wird zumindest an dieser Flächenseite kein Gebrauchstauglichkeitsnachweis geführt.

Ist bei einer **Wand** die erste Hauptnormalkraft eine Zugkraft, so wird die vorhandene Betonzugspannung nach folgender Gleichung bestimmt.

$$\sigma_{c,I} = \frac{n_I}{A_c} = \frac{n_I}{b \cdot h} \quad (2.67)$$

Ist bei einer **Platte** das erste Hauptmoment ein positives Moment, ermittelt sich die vorhandene Betonzugspannung wie folgt.

$$\sigma_{c,I} = \frac{m_I}{W} = \frac{m_I \cdot 6}{b \cdot h^2} \quad (2.68)$$

Falls diese linear elastisch ermittelte Spannung $\sigma_{c,I}$ größer als der Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} ist, wird von einem aufgerissenen Beton ausgegangen. Erst dann ermittelt RF-BETON Flächen die Bemessungsschnittgrößen für die einzelnen Bewehrungsrichtungen und führt die eingangs des [Kapitels 2.6](#) erwähnten Gebrauchstauglichkeitsnachweise durch.

2.6.3 Vorhandene Bewehrung

Vor den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen überprüft RF-BETON Flächen die vorhandene Bewehrung: Zunächst wird mit den Schnittgrößen der Gebrauchstauglichkeit eine Bemessung wie für den Grenzzustand der Tragfähigkeit durchgeführt. Die so ermittelte statisch erforderliche Bewehrung wird mit der benutzerdefinierten vorhandenen Bewehrung verglichen.

Falls die vorhandene Bewehrung kleiner ist als die statisch erforderliche Bewehrung oder falls sich bei der Bemessung eine Unbemessbarkeit ergibt, unterbleiben die Gebrauchstauglichkeitsnachweise. Die problematischen Bereiche der Flächenelemente werden als unbemessbar gekennzeichnet.

2.6.4 Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Ein Beispiel soll veranschaulichen, wie die verschiedenen Gebrauchstauglichkeitsnachweise in RF-BETON Flächen umgesetzt werden. Es wird eine Rechteckplatte untersucht. Das erste einwirkende Hauptmoment m_1 ist größer null, das zweite einwirkende Moment m_{II} ist gleich null.

Die Bemessung erfolgt nach EN 1992-1-1 mit analytischer Nachweismethode.

2.6.4.1 Eingaben für Beispiel

Geometrische Vorgaben

Plattendicke:	$d = 20 \text{ cm}$	
Rechtwinklige Bewehrung:	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_2 = 120^\circ$
Achsmaß der Betondeckung:	$d_1 = 3,0 \text{ cm}$	$d_2 = 4,2 \text{ cm}$

Material

Beton:	C30/37
Betonstahl:	B 500 S (B)

2.6.4.2 Kontrolle der Hauptschnittgrößen



Zunächst wird überprüft, ob der Beton unter dem Hauptmoment im GZT aufreißt. Unter den Gebrauchstauglichkeits-Bemessungsdetails des relevanten Rasterpunkts ist erkennbar, dass dies der Fall ist:

Schnittgrößen der linearen Statik			
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen			
Unterseite (+z)			
Erstes Hauptmoment	$m_{I,+z}$	-7.16	kNm/m
Erstes Hauptmoment negativ. Keine Untersuchung dieser Plattenseite.			
Oberseite (-z)			
Betonzugspannung	$\sigma_{c,I,-z}$	5.05	N/mm ²
Erstes Hauptmoment	$m_{I,-z}$	33.65	kNm/m
Widerstandsmoment	W	6666.67	cm ³
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
Bauteilhöhe	h	0.200	m
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.90	N/mm ²
Beton reißt an dieser Seite auf und die Bewehrung wird aktiviert.			
Beton reißt an einer Seite auf. Bewehrung wird aktiviert und Nachweis geführt.			

Bild 2.81: Kontrolle der Hauptschnittgrößen

Dabei wird die linear-elastisch ermittelte Spannung $\sigma_{c,I,-z}$ am oberen Betonrand mit dem Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} von 2,9 N/mm² für einen Beton C30/37 verglichen.

$$\sigma_{c,I,-z} = \frac{m_{I,-z}}{W} = \frac{m \cdot 6}{b \cdot h^2} = \frac{33,65 \cdot 6}{1,0 \cdot 0,2^2} = 5,05 \text{ N/mm}^2$$

Die Betonrandspannung $\sigma_{c,I,-z} = 5,05 \text{ N/mm}^2$ übersteigt damit deutlich die Zugfestigkeit f_{ctm} . Deshalb wird die Bewehrung auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit aktiviert.

2.6.4.3 Erforderliche Bewehrung für GZT

Die Bemessung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Plattenoberseite wird mit folgenden Werten durchgeführt:

<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsbericht			
<input checked="" type="checkbox"/> Schnittgrößen der linearen Statik			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptschnittgrößen			
<input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsmomente			
<input checked="" type="checkbox"/> Unterseite (+z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Oberseite (-z)			
<input checked="" type="checkbox"/> Hauptmomente			
<input type="checkbox"/> Erstes Hauptmoment	$m_{I,-z}$	56.08	kNm/m
<input type="checkbox"/> Zweites Hauptmoment	$m_{II,-z}$	11.93	kNm/m
<input type="checkbox"/> Richtung	$\alpha_{b,-z}$	0.000	°
<input type="checkbox"/> Quotient $k = m_{II,-z}/m_{I,-z}$	$k_{m,-z}$	0.213	
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel zwischen $\alpha_{m,-z}$ und der			
<input checked="" type="checkbox"/> Differenzwinkel nach Baumann			
<input checked="" type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Zweite Annahme für die Richtung γ der Betondruckstrebe			
<input checked="" type="checkbox"/> Energie = Summe der abs(Bemessungsbiegemomente)			
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Druckstrebe			
<input type="checkbox"/> Erste Annahme für die Richtung γ	$\gamma_{m,-z,1}$	75.000	°
<input type="checkbox"/> Richtung der Betondruckstrebe	$\Phi_{strebe,m,-z}$	75.000	°
<input checked="" type="checkbox"/> Maßgebende Bemessungsbiegemomente			
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung	$m_{-z,\Phi 1}$	64.16	kNm/m
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung	$m_{-z,\Phi 2}$	42.08	kNm/m
<input type="checkbox"/> in Streberichtung	$m_{end,-z,strebe}$	-38.23	kNm/m
<input type="checkbox"/> Streberichtung optimieren?	$Strebe_{opt,m,-z}$	Nein	
<input checked="" type="checkbox"/> Endbemessungsbiegemomente			
<input type="checkbox"/> in 1. Richtung	$m_{end,-z,\Phi 1}$	64.16	kNm/m
<input type="checkbox"/> in 2. Richtung	$m_{end,-z,\Phi 2}$	42.08	kNm/m
<input type="checkbox"/> in Streberichtung	$m_{end,-z,strebe}$	-38.23	kNm/m

Bild 2.82: Bemessungsschnittgrößen GZT

Endbemessungsbiegemomente:

$$m_{end,-z,\phi_1} = 64,16 \text{ kNm/m}$$

$$m_{end,-z,\phi_2} = 42,08 \text{ kNm/m}$$

$$m_{end,-z,strebe} = -38,23 \text{ kNm/m}$$

Richtung der Betondruckstrebe:

$$\phi_{strebe,m,-z} = 75,0^\circ$$

Aus den Bemessungsschnittgrößen ergibt sich folgende erforderliche Bewehrung für die Oberseite:

2.1 Erforderliche Bewehrung Gesamt										
Fläche Nr.	A Rasterpunkt	B Punkt-Koordinaten [m]			C	D	E Symbol	F Erforderliche Bewehrung	G Grund-Bewehrung	H Zusatzbewehrung
		X	Y	Z						I Erforderlich Vorhanden
1	R4	0.000	0.500	0.000			$\bar{a}_{s,1,-z} \text{ (oben)}$	8.97	11.31	0.00 0.00
1	R4	0.000	0.500	0.000			$\bar{a}_{s,2,-z} \text{ (oben)}$	6.15	11.31	0.00 0.00
1	R6	1.000	0.500	0.000			$\bar{a}_{s,1,+z} \text{ (unten)}$	0.14	0.00	0.14 0.14
1	R6	1.000	0.500	0.000			$\bar{a}_{s,2,+z} \text{ (unten)}$	0.70	0.00	0.70 0.70

Bild 2.83: Erforderliche Bewehrung

2.6.4.4 Vorgabe einer Bewehrung

An der Plattenoberseite wird für beide Richtungen eine Bewehrung aus Bewehrungsstäben mit dem Durchmesser d_s von 12 mm in einem Abstand l_s von 10,0 cm gewählt.

Damit ergibt sich eine vorhandene Bewehrung von:

$$\text{vorh } a_{s1,-z} = \frac{d_s^2}{4} \cdot \pi \cdot \frac{100 \text{ cm/m}}{l_s} = \frac{(1,2 \text{ cm})^2}{4} \cdot \pi \cdot \frac{100 \text{ cm/m}}{10,0 \text{ cm}} = 11,31 \text{ cm}^2/\text{m}$$



Diese Werte sind in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* einzutragen bzw. über die Schaltfläche [Bewehrungsstäbe] auszuwählen (siehe Bild 2.105, Seite 83).

Bild 2.84: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* zur Eingabe von Grund- und Zusatzbewehrung

Mit diesem Bewehrungsdurchmesser ergeben sich folgende Achsmaße der Betondeckung:

Bild 2.85: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung*

Damit ermittelt sich die statische Nutzhöhe für die einzelnen Bewehrungsrichtungen wie folgt:

$$d_{1,-z} = h - d_1 = 20 - 3 = 17 \text{ cm}$$

$$d_{2,-z} = h - d_2 = 20 - 4,2 = 15,8 \text{ cm}$$

2.6.4.5 Kontrolle der vorhandenen Bewehrung für GZG

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird zunächst das Dehnungsverhältnis $\epsilon_{\phi_2}/\epsilon_{\phi_1} = 1,0$ angenommen. Damit werden folgende Werte ermittelt:

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsmomente				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
☑ Differenzwinkel nach Baumann				
1. Differenzwinkel	$\alpha_{m,-z}$	30.000	°	
2. Differenzwinkel	$\beta_{m,-z}$	120.000	°	
☑ Maßgebende Druckstrebe				
Erste Annahme für die Richtung γ	$\gamma_{m,-z,1a}$	75.000	°	
Richtung der Betondruckstrebe	$\phi_{strebe,m,-z}$	75.000	°	
☑ Maßgebende Bemessungsbiegemomente				
in 1. Richtung	m_{-z,ϕ_1}	38.49	kNm/m	
in 2. Richtung	m_{-z,ϕ_2}	25.25	kNm/m	
in Streberichtung	$m_{end,-z,strebe}$	-22.94	kNm/m	
☑ Bemessungsbiegemomente nach Baumann				
in 1. Richtung	$m_{\alpha,-z}$	38.49	kNm/m	
in 2. Richtung	$m_{\beta,-z}$	25.25	kNm/m	
in Streberichtung	$m_{\gamma,-z}$	-22.94	kNm/m	
Streberichtung optimieren?	$Strebe_{opti,m,-z}$	Ja		
☑ Endbemessungsbiegemomente				
in 1. Richtung	$m_{end,-z,\phi_1}$	38.49	kNm/m	
in 2. Richtung	$m_{end,-z,\phi_2}$	25.25	kNm/m	
in Streberichtung	$m_{end,-z,strebe}$	-22.94	kNm/m	

Bild 2.86: Bemessungsmomente im GZG für Dehnungsverhältnis von 1,0

Bemessungsschnittgrößen: $m_{end,-z,\phi_1} = 38,49 \text{ kNm/m}$

$m_{end,-z,\phi_2} = 25,25 \text{ kNm/m}$

Aussteifendes Druckmoment: $m_{end,-z,strebe} = -22,94 \text{ kNm/m}$

Richtung aussteifendes Druckmoment: $\phi_{strebe,m,-z} = 75,0^\circ$

Für diese Bemessungsmomente wird an der Plattenoberseite eine erforderliche Bewehrung von $a_{s,dim,-z,1} = 4,54 \text{ cm}^2/\text{m}$ in die erste Bewehrungsrichtung und von $a_{s,dim,-z,1} = 3,17 \text{ cm}^2/\text{m}$ in die zweite Bewehrungsrichtung ermittelt.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsmomente				
☑ Statisch erforderliche Bewehrung				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,-z,1}$	4.33	cm ² /m	
in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,dim,-z,2}$	3.04	cm ² /m	
☑ Vorhandene Längsbewehrung				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,1}$	11.31	cm ² /m	
in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,2}$	11.31	cm ² /m	

Bild 2.87: Statisch erforderliche Bewehrung für Schnittgrößen im GZG

Die erforderliche Bewehrung für die Schnittgrößen des Gebrauchslastzustandes ist kleiner als die benutzerdefinierte vorhandene Bewehrung. Somit kann der Nachweis fortgesetzt werden.

2.6.4.6 Wahl der Betondruckstrebe

Mit den Bemessungsschnittgrößen $m_{\text{end},-z,\phi_1} = 38,49 \text{ kNm/m}$ und $m_{\text{end},-z,\phi_2} = 25,25 \text{ kNm/m}$ ergeben sich die Dehnungen $\epsilon_{\phi_1} = 0,735\text{‰}$ in die erste Bewehrungsrichtung und $\epsilon_{\phi_2} = 0,527\text{‰}$ in die zweite Bewehrungsrichtung. Damit besteht ein Dehnungsverhältnis $Q_{s,-z}$ von 0,717.

Das angenommene Dehnungsverhältnis von 1,00 stimmt also nicht mit dem tatsächlichen Dehnungsverhältnis überein. Die Neigung des aussteifenden Druckmoments wird deshalb von $75,0^\circ$ auf $79,746^\circ$ erhöht.

Geometrisch kann sich diese Neigung des aussteifenden Druckmoments nur einstellen, wenn das geometrische Verhältnis $Q_{s,\text{geo},-z}$ der Dehnung in die Bewehrungsrichtung ϕ_2 zur Dehnung in die Bewehrungsrichtung ϕ_1 etwa 0,717 beträgt. Dies ist in diesem Beispiel der Fall.

Bei der Ermittlung der Rissbreite w_k wird gezeigt, dass sich mit den Bemessungsmomenten bei der Neigung des aussteifenden Druckmoments von $79,746^\circ$ Dehnungen in die einzelnen Bewehrungsrichtungen ergeben, die zum Dehnungsverhältnis $Q_{s,\text{geo},-z}$ von 0,717 führen.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
☑ Richtung der Betondruckstrebe	$\gamma_{\text{strebe,vorh},2,-z}$	79.746	°	
Richtung der Betondruckstrebe nach Baumann	$\gamma_{\text{strebe,Bau,vorh},2,-z}$	79.746	°	
Dehnungsverhältnis der Bewehrungen	$Q_{s,-z}$	0.717		
Vorausgesetztes geometrisches Dehnungsverhältnis	$Q_{s,\text{geo},-z}$	0.717		
☑ Modifizierte Bemessungsmomente				
in 1. Richtung	$m_{\text{vorh},-z,\phi_1}$	36.74	kNm/m	
in 2. Richtung	$m_{\text{vorh},-z,\phi_2}$	27.33	kNm/m	
in Streberichtung	$m_{\text{vorh},\text{strebe},-z}$	-23.26	kNm/m	
☑ Nachweis der Stahlspannung				
☑ Bestimmen des maximalen Rissabstands				
☑ Bestimmen der Differenz der mittleren Dehnung				
☑ Berechnungsparameter aller Richtungen				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
☑ Differenz der mittleren Dehnung in 1. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}})_{-z,\phi_1}$	0.735	‰	
☑ Stahlspannung in 1. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_1}$	208.18	N/mm ²	
☑ Differenz der mittleren Dehnung in 2. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}})_{-z,\phi_2}$	0.527	‰	
☑ Stahlspannung in 2. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_2}$	167.09	N/mm ²	
☑ Resultierende Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}})_{-z,\text{res}}$	1.291	‰	

Bild 2.88: Richtung der Betondruckstrebe und Dehnungsverhältnisse



Die gewählte Neigung des aussteifenden Druckmoments von $79,746^\circ$ führt zu modifizierten Bemessungsmomenten in die einzelnen Bewehrungsrichtungen. Das entspricht der hier verwendeten Methode zur Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit Berücksichtigung des Verformungsverhältnisses der Längsbewehrung, die im Dialog *Einstellungen für analytische Methode der Gebrauchstauglichkeitsnachweise* gewählt wurde (siehe folgendes Bild).

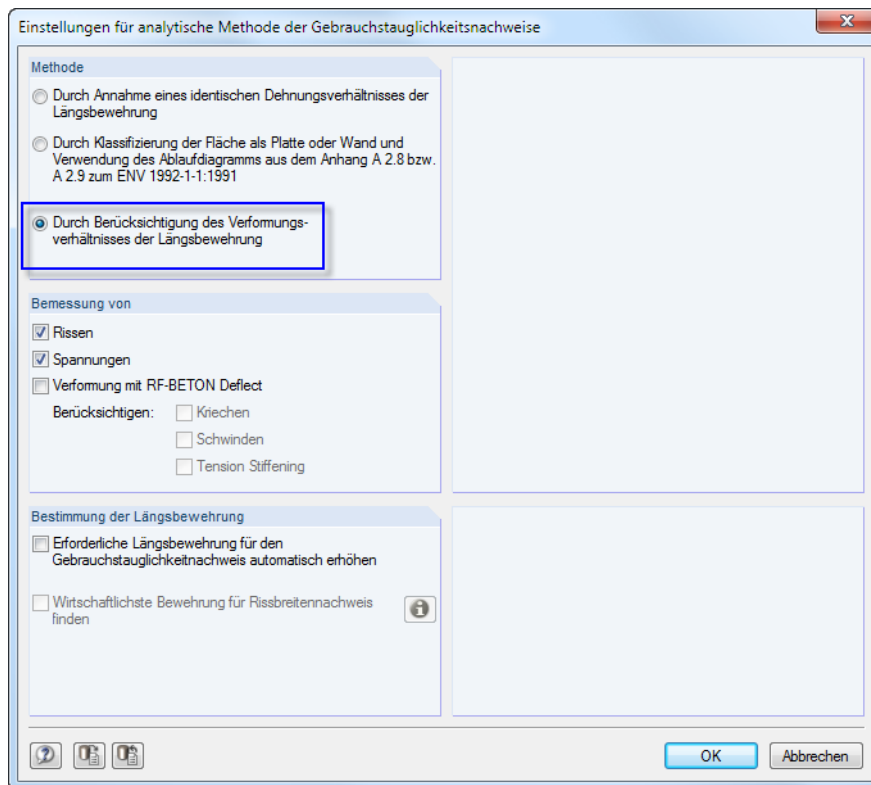


Bild 2.89: Dialog *Einstellungen für analytische Methode der Gebrauchstauglichkeitsnachweise*

2.6.4.7 Begrenzung der Betondruckspannung

In Maske 1.3 *Flächen* wird die Betondruckspannung auf zu $\alpha \cdot \sigma_c = 0,45 \cdot f_{ck}$ begrenzt.

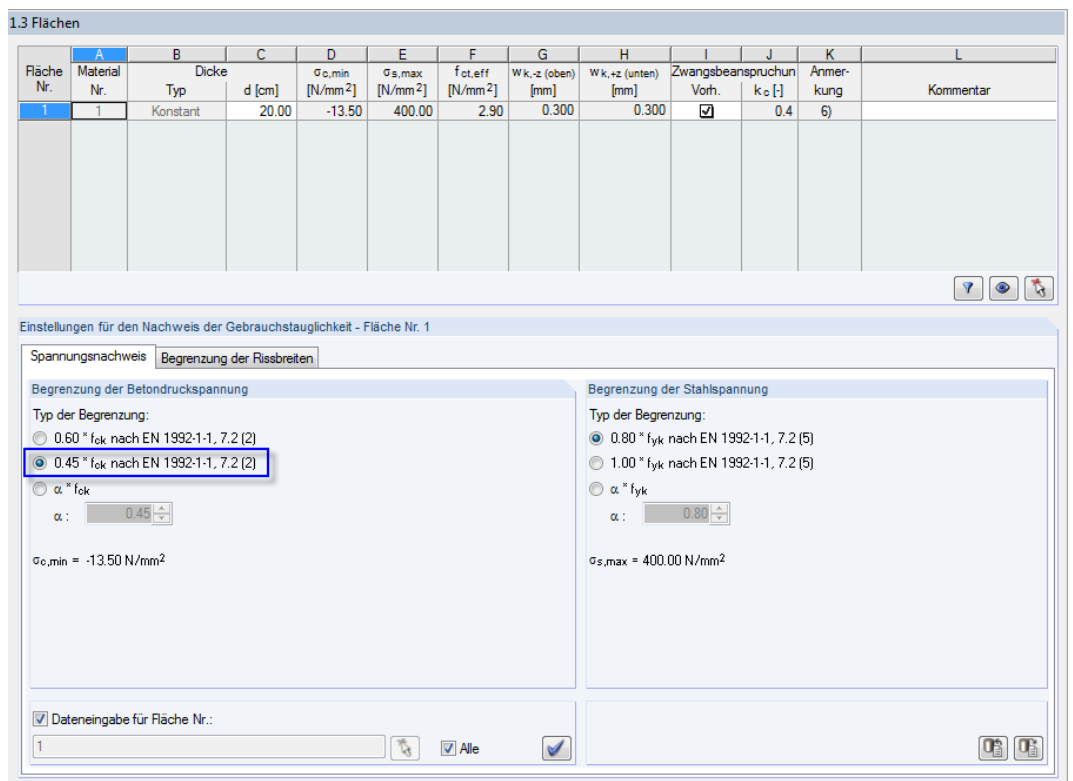


Bild 2.90: Begrenzung der Betondruckspannung in Maske 1.3 *Flächen*, Register *Spannungsnachweis*

Für Beton C30/37 ermittelt sich damit die minimale Betonspannung $\sigma_{c,min}$:

$$\sigma_{c,min} = 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot (-30,0) = -13,5 \text{ N/mm}^2$$

Die vorhandene Betondruckspannung wird unter Annahme eines linearen Spannungsverlaufs ermittelt, da die Vielzahl von Iterationen zur Bestimmung der geeigneten Betondruckstrebenrichtung zu zeitaufwändig wäre. Ein linearer Verlauf ist hinreichend genau, weil im Gebrauchszustand i. d. R. Betonstauchungen von maximal 0,3 bis 0,5‰ vorliegen.

Die minimale Spannung $\sigma_{c,min}$ ist mit der vorhandenen Spannung der Betondruckzone für beide Bewehrungsrichtungen zu vergleichen.

Die vorhandene Betondruckspannung σ_c ermittelt sich wie folgt:

$$\sigma_c = \frac{m_{Ed}}{I_{i,II}} \cdot x \quad (2.69)$$

mit

m_{Ed}

Einwirkendes Moment

$$I_{i,II} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_E \cdot a_s \cdot (d - x)^2$$

Ideelles Trägheitsmoment im Zustand II

b Bauteilbreite (für Platten stets 1 m)

α_E Verhältnis der E-Moduln

a_s Vorhandene Zugbewehrung

d Statische Nutzhöhe

$$x = \frac{\alpha_E \cdot a_s}{b} \cdot \left(-1,0 + \sqrt{1,0 + \frac{2,0 \cdot b \cdot d}{\alpha_E \cdot a_s}} \right)$$

Höhe der Betondruckzone

Für die Bewehrungsrichtung ϕ_1 ergibt sich somit folgende Druckzonenhöhe x_{-z,ϕ_1} :

$$x_{-z,\phi_1} = \frac{6,061 \cdot 11,31}{100} \cdot \left(-1,0 + \sqrt{1,0 + \frac{2,0 \cdot 100 \cdot 17}{6,061 \cdot 11,31}} \right) = 4,19 \text{ cm}$$

Der gleiche Wert und die zugehörigen Zwischenwerte finden sich auch in der Detailtabelle.

☐ Schnittgrößen der linearen Statik				
☐ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☐ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☐ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☐ Bestimmen der Betondruckspannung in die einzelnen Bewehrungsrichtungen				
☐ Unterseite (+z)				
☐ Oberseite (-z)				
☐ Betondruckspannung in 1. Richtung an gegenüberliegender Seite				
Bemessungsmoment in die 1. Bewehrungsrichtung	$m_{d,-z,\phi_1}$	36.74	kNm/m	
☐ Ideales Trägheitsmoment				
Ideales Trägheitsmoment	$I_{i,II,-z,\phi_1}$	13701.00	cm ⁴	
Druckbewehrung aus Bewehrung an gegenüberliegender Seite möglich				
Bauteilbreite	b_w	1.000	m	
☐ Höhe der Betondruckzone				
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_1}	4.19	cm	
Verhältnis des E-Moduls	α_E	6.061		
Zugbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,1}$	11.31	cm ² /m	
Statische Nutzhöhe	d_{-z,ϕ_1}	0.170	m	
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_1}	4.19	cm	
Druckbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,+z,1}$	0.14	cm ² /m	
Betondeckung der Druckbewehrung	c_{-z,ϕ_1}	0.030	m	
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_1}	4.19	cm	
☐ Betondruckspannung in 2. Richtung an gegenüberliegender Seite				
Betondruckspannung in 2. Richtung an gegenüberliegender Seite	$\sigma_{c,+z,\phi_2}$	-9.40	N/mm ²	

Bild 2.91: Höhe der Betondruckzone für 1. Bewehrungsrichtung

Für die Bewehrungsrichtung ϕ_2 ergibt sich die Druckzonenhöhe x_{-z,ϕ_2} :

$$x_{-z,\phi_2} = \frac{6,061 \cdot 11,31}{100} \cdot \left(-1,0 + \sqrt{1,0 + \frac{2,0 \cdot 100 \cdot 15,8}{6,061 \cdot 11,31}} \right) = 4,02 \text{ cm}$$

Dieser Wert und die zugehörigen Zwischenwerte sind ebenfalls bei den Details ablesbar.

Schnittgrößen der linearen Statik			
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen			
Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung			
Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
Bestimmen der Betondruckspannung in die einzelnen Bewehrungsrichtungen			
Unterseite (+z)			
Oberseite (-z)			
Betondruckspannung in 1. Richtung an gegenüberliegender Seite	$\sigma_{c,+z,\phi_1}$	-11.23	N/mm ²
Betondruckspannung in 2. Richtung an gegenüberliegender Seite	$\sigma_{c,+z,\phi_2}$	-9.40	N/mm ²
Bemessungsmoment in die 2. Bewehrungsrichtung	$m_{d,-z,\phi_2}$	27.33	kNm/m
Ideales Trägheitsmoment	$I_{i,II,-z,\phi_2}$	11677.20	cm ⁴
Druckbewehrung aus Bewehrung an gegenüberliegender Seite möglich			
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_2}	4.02	cm
Verhältnis des E-Moduls	α_e	6.061	
E-Modul der Bewehrung	E_s	200000.00	N/mm ²
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	E_{cm}	33000.00	N/mm ²
Zugbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,2}$	11.31	cm ² /m
Druckbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,+z,2}$	0.70	cm ² /m
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
Statische Nutzhöhe	d_{-z,ϕ_2}	0.158	m
Betondeckung der Druckbewehrung	c_{+z,ϕ_2}	0.040	m
Verhältnis des E-Moduls	α_e	6.061	
Zugbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,2}$	11.31	cm ² /m
Statische Nutzhöhe	d_{-z,ϕ_2}	0.158	m
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_2}	4.02	cm
Druckbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,+z,2}$	0.70	cm ² /m
Betondeckung der Druckbewehrung	c_{-z,ϕ_2}	0.040	m
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_2}	4.02	cm

Bild 2.92: Höhe der Betondruckzone für 2. Bewehrungsrichtung

Die ideellen Trägheitsmomente $I_{i,II}$ im Zustand II ermitteln sich für die beiden Bewehrungsrichtungen wie folgt:

$$I_{i,II,-z,\phi_1} = \frac{1}{3} \cdot 100,0 \cdot 4,19^3 + 6,061 \cdot 11,31 \cdot (17 - 4,19)^2 = 13701 \text{ cm}^4$$

$$I_{i,II,-z,\phi_2} = \frac{1}{3} \cdot 100,0 \cdot 4,02^3 + 6,061 \cdot 11,31 \cdot (15,8 - 4,02)^2 = 11678 \text{ cm}^4$$

Für die beiden Bewehrungsrichtungen ϕ_1 und ϕ_2 ergeben sich damit gemäß Gleichung 2.69 folgende Betondruckspannungen σ_c in der Betondruckzone (d. h. an Flächenoberseite):

$$\sigma_{c,o,\phi_1} = \frac{3676 \cdot 4,19}{13701} = -11,24 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,o,\phi_2} = \frac{2733 \cdot 4,02}{11678} = -9,41 \text{ N/mm}^2$$

Diese Werte sind auch in Bild 2.92 ablesbar.

Die vorhandenen Druckspannungen $\sigma_{c,+z,\phi_1}$ und $\sigma_{c,+z,\phi_2}$ sind somit kleiner als die minimale Betonspannung $\sigma_{c,min}$ (siehe Bild 2.90, Seite 74). Der maßgebende Quotient von vorhandener zu zulässiger Betondruckspannung liegt in die Bewehrungsrichtung ϕ_1 vor. Der Nachweis ist erfüllt.

Maximale Betondruckspannung	max σ_c	-11.23	N/mm ²
Zulässige Betondruckspannung			
Nachweis			
Maximale Betondruckspannung	max σ_c	-11.23	N/mm ²
Zulässige Betondruckspannung	zul σ_c	-13.50	N/mm ²
Nachweiskriterium	Kriterium	0.832	

Bild 2.93: Nachweis der Betondruckspannung

2.6.4.8 Begrenzung der Betonstahlspannung

In Maske 1.3 *Flächen* werden gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2(5) die Zugspannungen der Betonstahlbewehrung auf $\sigma_{s,max} = 0,8 \cdot f_{yk}$ begrenzt (siehe Bild 2.90, Seite 74). Für BSt 500 S (B) ermittelt sich damit die maximale Stahlspannung $\sigma_{s,max}$ zu:

$$\sigma_{s,max} = 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ N/mm}^2$$

Die maximale Spannung $\sigma_{s,max}$ ist mit der vorhandenen Zugspannung für beide Bewehrungsrichtungen zu vergleichen.

Die vorhandene Zugspannung σ_s ermittelt sich wie folgt:

$$\sigma_s = \frac{\alpha_E \cdot m_{Ed} \cdot (d - x)}{I_{i,II}} \quad (2.70)$$

mit

α_E Verhältnis der E-Moduln (E_s/E_{cm})

m_{Ed} Einwirkendes Moment

d Statische Nutzhöhe

$x = \frac{\alpha_E \cdot a_s}{b} \cdot \left(-1,0 + \sqrt{1,0 + \frac{2,0 \cdot b \cdot d}{\alpha_E \cdot a_s}} \right)$ Höhe der Betondruckzone

b Bauteilbreite (für Platten stets 1 m)

a_s Vorhandene Zugbewehrung

$I_{i,II} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_E \cdot a_s \cdot (d - x)^2$ Ideelles Trägheitsmoment im Zustand II

Mit den in Kapitel 2.6.4.6 ermittelten Werten lassen sich die vorhandenen Zugspannungen σ_{s,u,ϕ_1} und σ_{s,u,ϕ_2} in die beiden Bewehrungsrichtungen ϕ_1 und ϕ_2 wie folgt bestimmen:

$$\sigma_{s,u,\phi_1} = \frac{6,061 \cdot 3674 \cdot (17 - 4,19)}{13701} = 208,18 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{s,u,\phi_2} = \frac{6,061 \cdot 2733 \cdot (15,8 - 4,02)}{11677} = 167,09 \text{ N/mm}^2$$

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☑ Nachweis der Stahlspannung				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
Beton reißt auf und die Bewehrung wird aktiviert.				
☑ Stahlspannung in 1. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_1}$	208.18	N/mm ²	
Bemessungsmoment in die 1. Bewehrungsrichtung	$m_{d,-z,\phi_1}$	36.74	kNm/m	
☑ Verhältnis des E-Moduls	α_E	6.061		
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	E_{cm}	33000.00	N/mm ²	
☑ Ideales Trägheitsmoment	$I_{i,II,-z,\phi_1}$	13701.00	cm ⁴	
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_1}	4.19	cm	
☑ Stahlspannung in 2. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_2}$	167.09	N/mm ²	
Bemessungsmoment in die 2. Bewehrungsrichtung	$m_{d,-z,\phi_2}$	27.33	kNm/m	
☑ Verhältnis des E-Moduls	α_E	6.061		
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	E_{cm}	33000.00	N/mm ²	
☑ Ideales Trägheitsmoment	$I_{i,II,-z,\phi_2}$	11677.20	cm ⁴	
Höhe der Betondruckzone	x_{-z,ϕ_2}	4.02	cm	
Maximale Stahlspannung	$\max \sigma_s$	208.18	N/mm ²	

Bild 2.94: Maximale Stahlspannungen in 1. und 2. Bewehrungsrichtung

Die vorhandenen Zugspannungen $\sigma_{s,-z,\phi_1}$ und $\sigma_{s,-z,\phi_2}$ sind somit kleiner als die maximale Stahlspannung $\sigma_{s,max}$ (siehe [Bild 2.90, Seite 74](#)). Der maßgebende Quotient von vorhandener zu zulässiger Stahlspannung liegt in die Bewehrungsrichtung ϕ_1 vor. Der Nachweis ist erfüllt.

☐ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☐ Nachweis der Stahlspannung				
☐ Zulässige Stahlspannung				
☐ Nachweis				
Maximale Stahlspannung	max σ_s	208.18	N/mm ²	
Zulässige Stahlspannung	zul σ_s	400.00	N/mm ²	
Nachweiskriterium	Kriterium	0.520		

Bild 2.95: Nachweis der Betonstahlspannung

2.6.4.9 Mindestbewehrung für Begrenzung der Rissbreite

Der Mindestbewehrungsquerschnitt zur Begrenzung der Rissbreite ermittelt sich gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.2 nach Gleichung (7.1).

$$a_{s,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} \quad (2.71)$$

mit

- k_c Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Spannungsverteilung im Querschnitt vor der Erstrissbildung sowie der Änderung des inneren Hebelarms
- k Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Eigenspannungen, die zum Abbau von Zwang führen
- $f_{ct,eff}$ Mittelwert der wirksamen Zugfestigkeit des Betons, der beim Auftreten der Risse zu erwarten ist
- A_{ct} Fläche der Betonzugzone (Teil des Querschnitts oder Teilquerschnitts, der unter der zur Erstrissbildung am Gesamtquerschnitt führenden Einwirkungskombination im ungerissenen Zustand rechnerisch unter Zugspannungen steht)
- σ_s Absolutwert der maximal zulässigen Spannung in der Betonstahlbewehrung unmittelbar nach Rissbildung

Der Grenzdurchmesser σ_s^* wird nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.3 (2) in Abhängigkeit vom tatsächlich vorhandenen Durchmesser σ_s aus der umgestellten Gleichung (7.6N) ermittelt.

$$\sigma_s = \sigma_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c \cdot h_{cr}}{2 \cdot (h - d)} \quad (2.72)$$

mit

- σ_s modifizierter Grenzdurchmesser
- σ_s^* Grenzdurchmesser nach EN 1992-1-1, Tabelle 7.2 (siehe [Bild 2.96](#))
- h Gesamthöhe des Querschnitts
- h_{cr} Höhe der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung unter Berücksichtigung der charakteristischen Werte der Vorspannung und der Normalkräfte unter quasi-ständiger Einwirkungskombination
- d statische Nutzhöhe bis zum Schwerpunkt der außenliegenden Bewehrung

Tabelle 7.2N — Grenzdurchmesser bei Betonstählen ϕ_s^* zur Begrenzung der Rissbreite¹

Stahlspannung ² [N/mm ²]	Grenzdurchmesser der Stäbe [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ 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 2.96: Grenzdurchmesser der Bewehrungsstäbe gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.3



Für das Beispiel wird die Ermittlung der Mindestbewehrung an der Plattenunterseite ausgeschlossen, indem in Maske 1.3 *Flächen*, Register *Begrenzung der Rissbreiten* folgender Dialog aufgerufen wird. Dort sind die Kontrollfelder für die *Untere (+z) Bewehrung* zu deaktivieren.

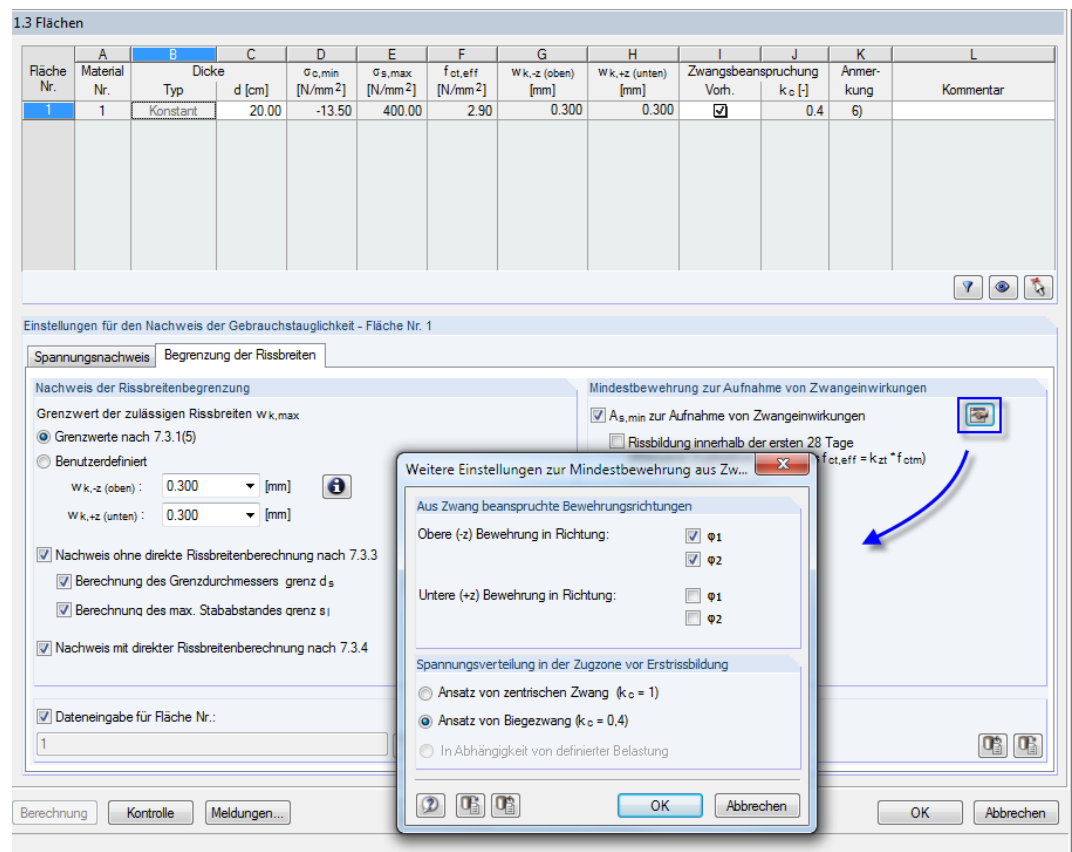


Bild 2.97: Dialog *Weitere Einstellungen zur Mindestbewehrung aus Zwang* in Maske 1.3 *Flächen*

Der Grenzdurchmesser $d_{s,-z,\phi_1}^*$ für die Bewehrungsrichtung ϕ_1 an der Plattenoberseite wird nach Gleichung 2.69 bestimmt.

$$d_{s,-z,\phi_1}^* = 12 \cdot \frac{2,9}{2,9} \cdot \frac{2 \cdot (200 - 170)}{0,4 \cdot 100} = 18,00 \text{ mm}$$

☒ Schnittgrößen der linearen Statik				
☒ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☒ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☒ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☒ Bestimmen der Mindestbewehrung				
☒ Berechnungsparameter aller Richtungen				
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$	0.300	mm	
Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$	0.300	mm	
Faktor für nichtlineare Spannungsverteilung	k	1.000		
Zugrundegelegte Betonzugfestigkeit für Tabelle 7.2	$f_{ct,0}$	2.90	N/mm ²	
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	
☒ Fläche der Betonzugzone	A_{ct}	1000.00	cm ²	
Bauteilbreite	b_w	1.000	m	
Bauteilhöhe	h	0.200	m	
☒ Unterseite (+z)				
☒ Oberseite (-z)				
☒ Mindestbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,1}$	5.02	cm ² /m	
☒ Faktor Spannungsverteilung vor Erstrissbildung	k_c	0.400		
☒ Maßgebende Bemessungskräfte				
Faktor für nichtlineare Spannungsverteilung	k	1.000		
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	
☒ Fläche der Betonzugzone	$A_{ct,-z,\phi 1}$	1000.00	cm ²	
☒ Zulässige Stahlspannung nach Tabelle 7.2	$zul \sigma_{s,-z,\phi 1}$	231.11	N/mm ²	
☒ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi 1}^*$	1.80	cm	
☒ Erster Rechenwert des Grenzdurchmessers	$d_{s,calc1}^*$	1.80	cm	
Vorhandener Stabdurchmesser	$d_{s,min,-z,\phi 1}$	1.20	cm	
Statische Nutzhöhe	$d_{-z,\phi 1}$	0.170	m	
☒ Mindestbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,2}$	5.83	cm ² /m	

Bild 2.98: Grenzdurchmesser für Bewehrungsrichtung ϕ_1

Analog ergibt sich für die Bewehrungsrichtung ϕ_2 der Grenzdurchmesser $d_{s,-z,\phi_2}^*$:

$$d_{s,-z,\phi_2}^* = 12 \cdot \frac{2,9}{2,9} \cdot \frac{2 \cdot (200 - 158)}{0,4 \cdot 100} = 25,20 \text{ mm}$$

☒ Schnittgrößen der linearen Statik				
☒ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☒ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☒ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☒ Bestimmen der Mindestbewehrung				
☒ Berechnungsparameter aller Richtungen				
☒ Unterseite (+z)				
☒ Oberseite (-z)				
☒ Mindestbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,1}$	5.02	cm ² /m	
☒ Mindestbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,2}$	5.83	cm ² /m	
☒ Faktor Spannungsverteilung vor Erstrissbildung	k_c	0.400		
☒ Maßgebende Bemessungskräfte				
Faktor für nichtlineare Spannungsverteilung	k	1.000		
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	
☒ Fläche der Betonzugzone	$A_{ct,-z,\phi 2}$	1000.00	cm ²	
☒ Zulässige Stahlspannung nach Tabelle 7.2	$zul \sigma_{s,-z,\phi 2}$	198.86	N/mm ²	
☒ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi 2}^*$	2.52	cm	
☒ Erster Rechenwert des Grenzdurchmessers	$d_{s,calc1}^*$	2.52	cm	
Vorhandener Stabdurchmesser	$d_{s,min,-z,\phi 2}$	1.20	cm	
Statische Nutzhöhe	$d_{-z,\phi 2}$	0.158	m	

Bild 2.99: Grenzdurchmesser für Bewehrungsrichtung ϕ_2

In Maske 1.3 *Flächen* ist die zulässige Rissbreite $w_{k,max}$ von 0,3 mm vorgegeben (siehe Bild 2.97). Mit den Grenzdurchmessern $d_{s,-z,\phi_1}^* = 18,00\text{mm}$ und $d_{s,-z,\phi_2}^* = 25,20\text{mm}$ kann aus EN 1992-1-1, Tabelle 7.2N (siehe Bild 2.96) die zulässige Spannung σ_s interpoliert werden.

$$\sigma_{s,-z,\phi_1} = 240 + \frac{280 - 240}{16 - 25} \cdot (18,00 - 16) = 231,11 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{s,-z,\phi_2} = 200 + \frac{200 - 160}{25 - 32} \cdot (25,20 - 25) = 198,86 \text{ N/mm}^2$$

Diese zulässigen Stahlspannungen sind auch in Bild 2.98 und Bild 2.99 ausgewiesen.

Die Stahlspannung in Richtung ϕ_2 ist maßgebend.

Die Fläche der Betonzugzone im Querschnitt ermittelt sich wie folgt:

$$A_{ct} = b \cdot \frac{h}{2} = 100 \cdot \frac{20}{2} = 1000 \text{ cm}^2$$

Somit ergibt sich gemäß [Gleichung 2.72](#) auf [Seite 78](#) für die 2. Bewehrungsrichtung folgende Mindestbewehrung:

$$a_{s,min,\phi_2} = \frac{0,4 \cdot 1,0 \cdot 2,9 \cdot 1000}{198,86} = 5,83 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Für diese Bewehrungsrichtung ist die eingelegte Bewehrung größer als die Mindestbewehrung. Damit ergibt sich folgendes Nachweiskriterium:

$$\frac{a_{s,min,-z,2}}{a_{s,exist,-z,2}} = \frac{5,83}{11,31} = 0,516$$

☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☑ Bestimmen der Mindestbewehrung			
☑ Vorhandene Längsbewehrung			
☑ Nachweis			
Mindestbewehrung an der Oberseite (-z) in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,2}$	5.83	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung an der Oberseite (-z) in die 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,-z,2}$	11.31	cm ² /m
Nachweiskriterium	Kriterium	0.516	

Bild 2.100: Nachweiskriterium für Mindestbewehrung

2.6.4.10 Kontrolle des Stabdurchmessers

Der Grenzdurchmesser der Bewehrungsstäbe $\max d_s$ wird nach EN 1992-1-1, Gleichung (7.6N) überprüft (siehe [Gleichung 2.72](#), [Seite 78](#)).

An der Plattenoberseite wird der Grenzdurchmesser $d_{s,-z,\phi_1}^*$ der ersten Bewehrungsrichtung in Abhängigkeit von der Spannung ermittelt, die in diese Richtung vorliegt. Beim Nachweis zur Begrenzung der Stahlspannung wurde diese Spannung mit $\sigma_{s,-z,\phi_1}^* = 208,18 \text{ N/mm}^2$ errechnet. Zusammen mit der gewählten Rissbreite $w_k = 0,3 \text{ mm}$ ergibt sich durch Interpolation in der Tabelle 7.2N folgender Grenzdurchmesser $d_{s,-z,\phi_1}^*$:

$$d_{s,-z,\phi_1}^* = 25 + \frac{25 - 16}{200 - 240} \cdot (208,18 - 200) = 23,16 \text{ mm}$$

☑ Schnittgrößen der linearen Statik			
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen			
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung			
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☑ Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers			
☑ Berechnungsparameter aller Richtungen			
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$	0.300	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$	0.300	mm
☑ Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.90	N/mm ²
Bauteilhöhe	h	0.200	m
Bezugsbetonzugfestigkeit der Tabelle 7.2	$f_{ct,0}$	3.00	N/mm ²
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
☑ Unterseite (+z)			
☑ Oberseite (-z)			
☑ Maximaler Stabdurchmesser in 1. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_1}$	1.54	cm
☑ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi_1}^*$	2.32	cm
Stahlspannung in 1. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_1}$	208.18	N/mm ²
☑ Erster Rechenwert des maximalen Stabdurchmessers	$d_{s,max,calc1}$	1.54	cm
Statische Nutzhöhe	d_{-z,ϕ_1}	0.170	m
Faktor Spannungsverteilung vor Erstrissbildung	k_c	0.400	
Höhe der Betonzugzone	h_{or}	0.100	m
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²

Bild 2.101: Grenzdurchmesser in 1. Bewehrungsrichtung

Analog wird der Grenzdurchmesser für die 2. Bewehrungsrichtung $d_{s,-z,\phi_2}^*$ aus der Zugspannung $\sigma_{s,-z,\phi_2}^* = 167,09 \text{ N/mm}^2$ und der Rissbreite $w_k = 0,3 \text{ mm}$ bestimmt:

$$d_{s,-z,\phi_2}^* = 32 + \frac{32 - 25}{160 - 200} \cdot (167,09 - 160) = 30,76 \text{ mm}$$

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☐ Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers				
☑ Berechnungsparameter aller Richtungen				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
☑ Maximaler Stabdurchmesser in 1. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_1}$	1.54	cm	
☑ Maximaler Stabdurchmesser in 2. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_2}$	1.46	cm	
☑ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi_2}^*$	3.08	cm	
Stahlspannung in 2. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\phi_2}$	167.09	N/mm ²	
☑ Erster Rechenwert des maximalen Stabdurchmessers	$d_{s,max,calc1}$	1.46	cm	
Statische Nutzhöhe	d_{-z,ϕ_2}	0.158	m	
Faktor Spannungsverteilung vor Erstrissbildung	k_c	0.400		
Höhe der Betonzugzone	h_{cr}	0.100	m	
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	

Bild 2.102: Grenzdurchmesser in 2. Bewehrungsrichtung

Mit den Grenzdurchmessern d_s^* für die beiden Bewehrungsrichtungen und den jeweiligen Stahlspannungen werden die maximalen Grenzdurchmesser d_s ermittelt.

$$d_{s,max,-z,\phi_1} = 23,16 \cdot \frac{2,9}{2,9} \cdot \frac{0,4 \cdot 100}{2 \cdot (200 - 170)} = 15,44 \text{ mm}$$

$$d_{s,max,-z,\phi_2} = 30,76 \cdot \frac{2,9}{2,9} \cdot \frac{0,4 \cdot 100}{2 \cdot (200 - 158)} = 14,65 \text{ mm}$$

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☐ Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers				
☑ Berechnungsparameter aller Richtungen				
☑ Unterseite (+z)				
☑ Oberseite (-z)				
☑ Maximaler Stabdurchmesser in 1. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_1}$	1.54	cm	
☑ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi_1}^*$	2.32	cm	
☑ Erster Rechenwert des maximalen Stabdurchmessers	$d_{s,max,calc1}$	1.54	cm	
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	
☑ Maximaler Stabdurchmesser in 2. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_2}$	1.46	cm	
☑ Grenzdurchmesser	$d_{s,-z,\phi_2}^*$	3.08	cm	
☑ Erster Rechenwert des maximalen Stabdurchmessers	$d_{s,max,calc1}$	1.46	cm	
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	

Bild 2.103: Maximale Stabdurchmesser

Für beide Bewehrungsrichtungen sind jeweils Stabdurchmesser $d_s = 12 \text{ mm}$ vorgesehen. Damit ergibt sich als Nachweiskriterium für die maßgebende Bewehrungsrichtung ϕ_1 :

$$\frac{d_{s,exist,-z,\phi_2}}{\max d_{s,-z,\phi_2}} = \frac{12,0}{14,65} = 0,819$$

☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☑ Bestimmen des maximalen Bewehrungsdurchmessers				
☑ Vorhandener Stabdurchmesser				
☑ Nachweis				
Vorhandener Stabdurchmesser an der Oberseite in 2. Bewehrungsrichtung	$d_{s,exist,-z,\phi_2}$	1.20	cm	
Maximaler Stabdurchmesser an der Oberseite in 2. Bewehrungsrichtung	$d_{s,max,-z,\phi_2}$	1.46	cm	
Nachweiskriterium	Kriterium	0.819		

Bild 2.104: Nachweiskriterium für Stabdurchmesser

2.6.4.11 Nachweis des Stababstands



Im Register *Längsbewehrung* der Maske 1.4 *Bewehrung* wurde mit der [Bewehrungsstäbe]-Schaltfläche ein Stababstand von $a = 100 \text{ mm}$ für beide Bewehrungsrichtungen vorgegeben (siehe Bild 2.84, Seite 71).

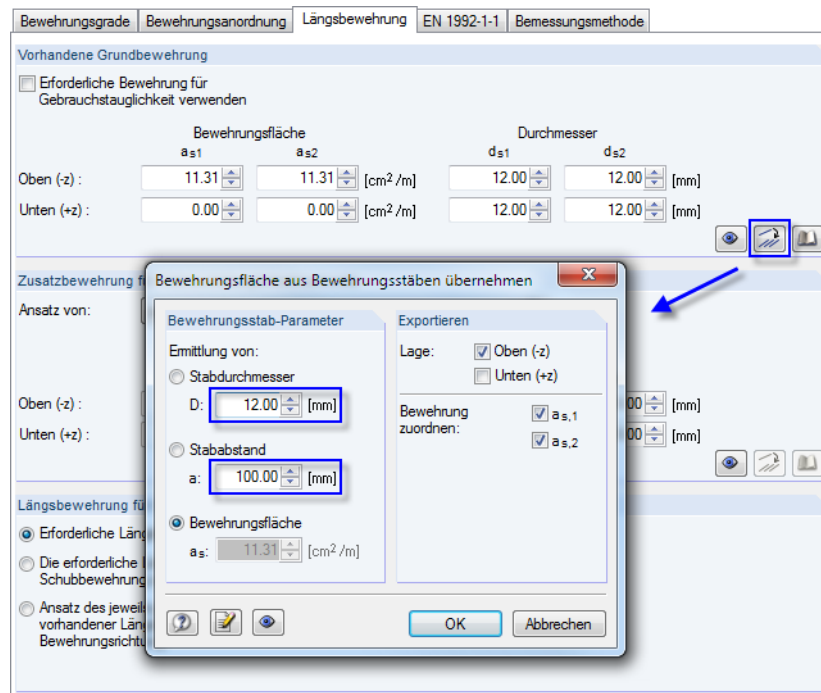


Bild 2.105: Dialog *Bewehrungsfläche aus Bewehrungsstäben übernehmen*

Der maximale Stababstand $\max s_{l,-z,\phi_1}$ wird nach EN 1992-1-1, Tabelle 7.3N für die vorliegende Zugspannung $\sigma_{s,-z,\phi_1} = 208,18 \text{ N/mm}^2$ und die Rissbreite $w_k = 0,3 \text{ mm}$ durch Interpolation ermittelt.

Tabelle 7.3N — Höchstwerte der Stababstände zur Begrenzung der Rissbreiten

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

Bild 2.106: Höchstwerte der Stababstände gemäß EN 1992-1-1, Tabelle 7.3N

$$\max s_{l,-z,\phi_1} = 250 + \frac{250 - 200}{200 - 240} \cdot (208,18 - 200) = 139,8 \text{ mm}$$

Analog wird der maximale Bewehrungsabstand für die Richtung ϕ_2 aus der vorliegenden Zugspannung $\sigma_{s,-z,\phi_2} = 167,09 \text{ N/mm}^2$ zu $\max s_{l,-z,\phi_2} = 291,1 \text{ mm}$ bestimmt.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik			
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen			
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung			
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☑ Bestimmen des maximalen Bewehrungsabstands			
☐ Berechnungsparameter aller Richtungen			
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	W _{k,-z,grenz}	0.300	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	W _{k,-z,grenz}	0.300	mm
☑ Unterseite (+z)			
☑ Oberseite (-z)			
☐ Maximaler Stababstand in 1. Bewehrungsrichtung	s _{l,max,-z,ϕ1}	0.240	m
Stahlspannung in 1. Bewehrungsrichtung	σ _{s,-z,ϕ1}	208.18	N/mm ²
☐ Maximaler Stababstand in 2. Bewehrungsrichtung	s _{l,max,-z,ϕ2}	0.291	m
Stahlspannung in 2. Bewehrungsrichtung	σ _{s,-z,ϕ2}	167.09	N/mm ²

Bild 2.107: Maximale Stababstände in beide Bewehrungsrichtungen

Der für die Bewehrungsrichtung ϕ_1 vorhandene Stababstand $s_{l,exist,-z,\phi_1} = 100$ mm ist kleiner als der maximal zulässige Stababstand $\max s_{l,max,-z,\phi_1} = 240$ mm.

Damit gilt für die Bewehrungsrichtung ϕ_1 folgender Nachweis:

$$\frac{s_{l,exist,-z,\phi_1}}{\max s_{l,max,-z,\phi_1}} = \frac{0,100}{0,240} = 0,417$$

☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☑ Bestimmen des maximalen Bewehrungsabstands			
☑ Vorhandener Stababstand			
☐ Nachweis			
Vorhandener Stababstand an der Oberseite (-z) in 1. Bewehrungsrichtung	s _{l,exist,-z,ϕ1}	0.100	m
Maximaler Stababstand an der Oberseite (-z) in 1. Bewehrungsrichtung	s _{l,max,-z,ϕ1}	0.240	m
Nachweiskriterium	Kriterium	0.417	

Bild 2.108: Nachweiskriterium für Stababstand

2.6.4.12 Nachweis der Rissbreite

Der Rechenwert w_k der Rissbreite wird gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 nach Gleichung (7.8) bestimmt.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (2.73)$$

mit

$s_{r,max}$ maximaler Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild (siehe Gleichung 2.74 bzw. Gleichung 2.75)

ϵ_{sm} mittlere Dehnung der Bewehrung unter maßgebender Einwirkungskombination einschließlich der Auswirkungen aufgebrachtter Verformungen und unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen (nur die zusätzliche, über die Nulldehnung hinausgehende, in gleicher Höhe auftretende Betonzugdehnung wird berücksichtigt)

ϵ_{cm} mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen

Maximaler Rissabstand $s_{r,max}$

Ist der Abstand der im Verbund liegenden Stäbe in der Zugzone nicht größer als $5 \cdot (c + \phi/2)$, darf der maximale Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild nach EN 1992-1-1, Gleichung (7.11) ermittelt werden:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (2.74)$$

Wenn der Abstand der im Verbund liegenden Stäbe in der Zugzone $5 \cdot (c + \phi/2)$ übersteigt oder wenn in der Zugzone keine im Verbund liegende Bewehrung vorhanden ist, darf der Grenzwert für die Rissbreite mit folgendem maximalen Rissabstand ermittelt werden:

$$s_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x) \quad (2.75)$$

Für den Nachweis der Rissbreite ist somit die Druckzonenhöhe x im Zustand II zu berechnen. Sie ermittelt sich mit auf der auf die Bauteilhöhe bezogenen Druckzonenhöhe ξ .

$$x = \xi \cdot h = \frac{0,5 + \alpha_e \cdot \frac{a_{s,exist}}{b \cdot h} \cdot \frac{d}{h}}{1,0 + \alpha_e \cdot \frac{a_{s,exist}}{b \cdot h}} \quad (2.76)$$

☑ Schnittgrößen der linearen Statik			
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen			
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung			
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☑ Nachweis der Stahlspannung			
☑ Bestimmen des maximalen Rissabstands			
☑ Unterseite (+z)			
☑ Oberseite (-z)			
☑ Maximaler Rissabstand in 1. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\phi 1}$	0.177	m
☑ Grenzabstand der im verbundliegenden Bewehrung	$s_{l,grenz,-z,\phi 1}$	0.150	m
Betondeckung der Bewehrung	$c-z,\phi 1$	2.40	cm
Vorhandener Stabdurchmesser	$d_{s,exist,-z,\phi 1}$	0.012	m
☑ Vorhandener Stababstand	$s_{l,exist,-z,\phi 1}$	0.100	m
Vorhandene Bewehrung in die 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,max,-z,1}$	11.31	cm ² /m
Vorhandener Stabdurchmesser	$d_{s,max,-z,\phi 1}$	0.012	m
☑ Vorhandener Stababstand kleiner/gleich Grenzabstand => Formel (7.11)			
Betondeckung der Bewehrung	$c-z,\phi 1$	2.40	cm
Vorhandener Stabdurchmesser	$d_{s,max,-z,\phi 1}$	0.012	m
Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften	k_1	0.800	
Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung	k_2	0.500	
NA-Parameter	k_3	3.400	
NA-Parameter	k_4	0.425	
☑ Effektiver Bewehrungsgrad	$\rho_{eff,-z,\phi 1}$	0.021	
Vorhandene Bewehrung in die 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,max,-z,1}$	11.31	cm ² /m
☑ Wirkungsbereich der Bewehrung (Bild 7.1)	$a_{o,eff,-z,\phi 1}$	527.05	cm ²
Bauteilbreite	b_w	1.000	m
☑ Höhe des Wirkungsbereichs der Bewehrung (Bild 7.1)	$h_{eff,-z,\phi 1}$	0.053	m
☑ Erste rechnerische Höhe des Wirkungsbereichs	$h_{eff,calc1}$	0.075	m
Achsmaßbetondeckung	$d'-z,\phi 1$	3.00	cm
☑ Zweite rechnerische Höhe des Wirkungsbereichs	$h_{eff,calc2}$	0.053	m
Bauteilhöhe	h	0.200	m
☑ Maximaler Rissabstand in 2. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\phi 2}$	0.218	m
☑ Maximaler Rissabstand gemäß Formel (7.15)	$s_{r,max,-z,res}$	0.137	m
Winkel zwischen der Bewehrung und der Rissöffnung	$\phi-z$	40.254	°

Bild 2.109: Maximaler Rissabstand in 1.Bewehrungsrichtung

Zudem wird der maximale Rissabstand gemäß der EN 1992-1-1, Gleichung (7.15) untersucht:

$$s_{r,max} = \frac{1}{\frac{\cos \theta}{s_{r,max,x}} + \frac{\sin \theta}{s_{r,max,y}}} \quad (2.77)$$

mit

θ Winkel zwischen der Bewehrung in x-Richtung und der Hautzugspannung

$s_{r,max,x}$ maximaler Rissabstand in y- bzw. z-Richtung

$s_{r,max,y}$

Diese Gleichung ist von Bedeutung, wenn im Dialog *Einstellungen für analytische Methode der Gebrauchstauglichkeitsnachweise* (siehe Bild 2.89, Seite 74) die erste Methode *Annahme eines identischen Dehnungsverhältnisses der Längsbewehrung* zur Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gewählt ist.

Bei der dritten Methode (*Berücksichtigung des Verformungsverhältnisses der Längsbewehrung*) hingegen wird die Richtung der Druckstrebe nach BAUMANN ermittelt. Dabei wird der Grenzwinkel von 15° ignoriert, da die Rissbreite in diesem Bereich nicht maßgebend ist.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☑ Nachweis der Stahlspannung				
☑ Bestimmen des maximalen Rissabstands				
☐ Unterseite (+z)				
Beton reißt an dieser Seite nicht auf.				
☐ Oberseite (-z)				
☑ Maximaler Rissabstand in 1. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\Phi 1}$	0.177	m	
☑ Maximaler Rissabstand in 2. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\Phi 2}$	0.218	m	
☐ Maximaler Rissabstand gemäß Formel (7.15)	$s_{r,max,-z,res}$	0.137	m	
Winkel zwischen der Bewehrung und der Rissöffnung	Φ_{-z}	40.254	°	

Bild 2.110: Maximale Rissabstände für beide Bewehrungsrichtungen

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

Für den Rechenwert der Rissbreite w_k gemäß Gleichung 2.73 auf Seite 84 ist noch der Faktor ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) für jede Bewehrungsrichtung und für die Richtung der resultierenden Dehnung zu bestimmen.

Die Differenz der mittleren Dehnung von Beton und Betonstahl wird nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 gemäß Gleichung (7.9) ermittelt:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (2.78)$$

Die maximale mittlere Dehnung ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$)_{-z,res} ergibt sich als resultierende mittlere Dehnung der einzelnen Bewehrungsrichtungen zu 1,291‰.

☑ Schnittgrößen der linearen Statik				
☑ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
☑ Überprüfen der vorhandenen Längsbewehrung				
☑ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
☑ Nachweis der Stahlspannung				
☑ Bestimmen des maximalen Rissabstands				
☑ Bestimmen der Differenz der mittleren Dehnung				
☐ Berechnungsparameter aller Richtungen				
Wirksame Zugfestigkeit des Betons	$f_{ct,eff}$	2.90	N/mm ²	
☐ Verhältnis des E-Moduls	α_e	6.061		
E-Modul der Bewehrung	E_s	200000.00	N/mm ²	
Mittelwert des Elastizitätsmoduls	E_{cm}	33000.00	N/mm ²	
Faktor zur Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer	k_t	0.400		
☐ Unterseite (+z)				
☐ Oberseite (-z)				
☑ Differenz der mittleren Dehnung in 1. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,\Phi 1}$	0.735	‰	
☑ Erster Rechenwert der Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{calc1}$	0.735	‰	
☑ Zweiter Rechenwert der Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{calc2}$	0.625	‰	
☑ Stahlspannung in 1. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\Phi 1}$	208.18	N/mm ²	
☑ Differenz der mittleren Dehnung in 2. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,\Phi 2}$	0.527	‰	
☑ Erster Rechenwert der Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{calc1}$	0.527	‰	
☑ Zweiter Rechenwert der Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{calc2}$	0.501	‰	
☑ Stahlspannung in 2. Bewehrungsrichtung	$\sigma_{s,-z,\Phi 2}$	167.09	N/mm ²	
☑ Resultierende Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,res}$	1.291	‰	
☐ Differenzwinkel nach Baumann				
1. Differenzwinkel	$\alpha_{m,-z}$	30.000	°	
2. Differenzwinkel	$\beta_{m,-z}$	120.000	°	
Richtung der Betondruckstrebe nach Baumann	$\gamma_{strebe,Bau,vorh,3,-z}$	79.746	°	

Bild 2.111: Differenz der mittleren Dehnung für beide Bewehrungsrichtungen

Für die gesuchte mittlere Dehnung ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) werden zur Vereinfachung die Bezeichnung s für die Seitenlänge in Bewehrungsrichtung, d für die Teillänge der Druckstreben, l für das Lot auf die Druckstrebe und ϵ eingeführt.

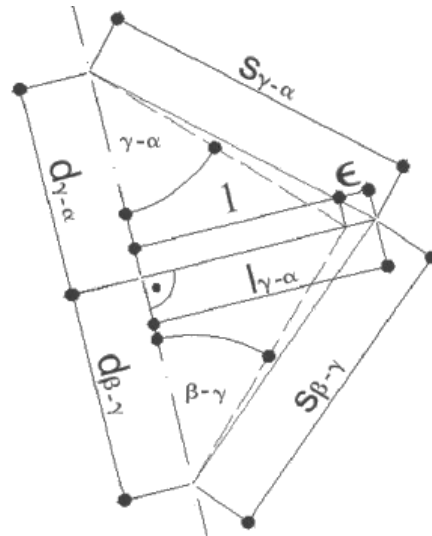


Bild 2.112: mittlere Dehnung ϵ

Die Teillänge $d_{\gamma-\alpha}$ bestimmt sich bei einer gewählten Druckstrebenneigung wie folgt:

$$d_{\gamma-\alpha} = \frac{1}{\tan(\gamma - \alpha)}$$

Die Länge ist einheitenlos (das Lot auf die Druckstrebe ging ohne Einheit in die Formel ein).

Anschließend wird die Länge $s_{\gamma-\alpha}$ ermittelt.

$$s_{\gamma-\alpha} = \frac{1 + \epsilon_{\alpha}}{\tan(\gamma - \alpha)}$$

Wenn die Bewehrungsrichtung θ_1 mit dem Hauptmoment m_1 den kleinsten Differenzwinkel bildet, ist für ϵ_{α} die zuvor ermittelte Differenz der mittleren Dehnungen $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{\theta_1}$ von Beton und Betonstahl einzusetzen:

$$s_{\gamma-\alpha} = \frac{1 + (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{\theta_1}}{\tan(\gamma - \alpha)}$$

Wenn die Bewehrungsrichtung θ_2 mit dem Hauptmoment m_1 den kleinsten Differenzwinkel bildet, ist für ϵ_{α} die zuvor ermittelte Differenz der mittleren Dehnungen $(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{\theta_2}$ von Beton und Betonstahl einzusetzen.

Mit dem Satz des PYTHAGORAS kann aus den Längen $d_{\gamma-\alpha}$ und $s_{\gamma-\alpha}$ der Wert $l_{\gamma-\alpha}$ berechnet werden:

$$l_{\gamma-\alpha} = \sqrt{s_{\gamma-\alpha}^2 - d_{\gamma-\alpha}^2}$$

Da allen Formeln eine Ausgangslänge von 1,0 LE zu Grunde gelegt worden, ermittelt sich die Dehnung ϵ zu:

$$\epsilon = l_{\gamma-\alpha} \cdot -1,0$$

Diese Dehnung $\epsilon = (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ wird erneut über den Zwischenwinkel $(\beta - \gamma)$ kontrolliert.

Für die Ermittlung der GZG-Bemessungsschnittgrößen nach der Methode *Annahme eines identischen Dehnungsverhältnisses der Längsbewehrung* kann das Dehnungsverhältnis der Bewehrungen deutlich vom vorausgesetzten geometrischen Dehnungsverhältnis abweichen. Für die korrekte Ermittlung des resultierenden Dehnungsverhältnisses wird daher die Dehnung der Bewehrung verwendet, die näher zur Hauptwirkung liegt.

Rissbreite w_k

Der Rechenwert der Rissbreite w_k lässt sich nach [Gleichung 2.73](#) auf [Seite 84](#) bestimmen.

☐ Bestimmen des Rechenwert der Rissbreite			
☐ Unterseite (+z)	Ausnutzung	0.000	
Beton reißt an dieser Seite nicht auf.			
☐ Oberseite (-z)	Ausnutzung	0.591	
☐ Rechenwert der Rissbreite in 1. Bewehrungsrichtung	$w_{k,-z,\phi 1}$	0.130	mm
Maximaler Rissabstand in 1. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\phi 1}$	0.177	m
Differenz der mittleren Dehnung in 1. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,\phi 1}$	0.735	‰
☐ Rechenwert der Rissbreite in 2. Bewehrungsrichtung	$w_{k,-z,\phi 2}$	0.115	mm
Maximaler Rissabstand in 2. Bewehrungsrichtung	$s_{r,max,-z,\phi 2}$	0.218	m
Differenz der mittleren Dehnung in 2. Bewehrungsrichtung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,\phi 2}$	0.527	‰
☐ Rechenwert der Rissbreite in Richtung der resultierenden Dehnung	$w_{k,-z,res}$	0.177	mm
Maximaler Rissabstand gemäß Formel (7.15)	$s_{r,max,-z,res}$	0.137	m
Resultierende Differenz der mittleren Dehnung	$(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{-z,res}$	1.291	‰

Bild 2.113: Rechenwert der Rissbreite

In Maske 1.3 *Flächen* wurde die maximal zulässige Rissbreite $\max w_k = 0,3$ mm vorgegeben. Damit ergibt sich als Nachweiskriterium für die maßgebende resultierende Richtung.

☐ Bemessungsschnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit			
☐ Nachweis der Stahlspannung			
☐ Bestimmen des maximalen Rissabstands			
☐ Bestimmen der Differenz der mittleren Dehnung			
☐ Bestimmen des Rechenwert der Rissbreite			
☐ Nachweis			
Rissbreite an der Oberseite (-z) in Richtung der resultierenden Dehnung	$w_{k,-z,res}$	0.177	mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z) laut Benutzervorgabe	$w_{k,-z,grenz}$	0.300	mm
Nachweiskriterium	Kriterium	0.591	

Bild 2.114: Nachweiskriterium für Rissbreite

2.6.5 Maßgebende Beanspruchung

In RFEM lassen sich die unterschiedlichen Belastungen in einzelnen Lastfällen (LF) definieren. Aus diesen Lastfällen können Lastkombinationen (LK) und Ergebniskombinationen (EK) gebildet werden. Die Unterschiede zwischen diesen Kombinationsarten sind in den Kapiteln 5.5 und 5.6 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Während Lastfälle und Lastkombinationen jeweils nur einen Satz von Schnittgrößen liefern, werden bei einer Ergebniskombination je nach Modelltyp bis zu 16 Sätze von Schnittgrößen erzeugt:

- Bei den Modelltypen 2D - XZ ($u_x/u_z/\phi_y$) und 2D - XY ($u_x/u_y/\phi_z$) (Wand bzw. Scheibe) ergeben sich in den Flächen ausschließlich Normalkräfte n_x , n_y und n_{xy} . Deren Kombination liefert sechs Schnittgrößensätze, von denen jeweils eine dieser Normalkräfte ihren maximalen oder minimalen Wert aufweist.
- Beim Modelltyp 2D - XY ($u_z/\phi_x/\phi_y$) (Platte) werden die maximalen und minimalen Werte der Momente m_x , m_y und m_{xy} und der Querkkräfte v_x und v_y ermittelt. Es ergeben sich somit zehn Schnittgrößensätze.
- Der Modelltyp 3D weist alle oben erwähnten Normalkräfte, Momente und Querkkräfte auf und liefert deshalb 16 Schnittgrößensätze.

Der Rechenkern für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit arbeitet die Schnittgrößen der ausgewählten Lastfälle und Lastkombinationen nacheinander ab. Gleiches gilt für die Schnittgrößensätze einer Ergebniskombination. Damit wird deutlich, dass die Bemessung einer Ergebniskombination mit einem deutlich höheren Zeitaufwand verbunden ist.

Die Schnittgrößen bzw. Schnittgrößensätze führen in den meisten Nachweisen für die einzelnen Bewehrungsrichtungen zu einer Beanspruchung. Es wird die größte Beanspruchung aller Bewehrungsrichtungen bestimmt. Ist die Beanspruchbarkeit für die einzelnen Bewehrungsrichtungen unterschiedlich, so wird diejenige Bewehrungsrichtung gesucht, die den größten Quotienten aus Beanspruchung durch Beanspruchbarkeit liefert.

2.7 Verformungsberechnung mit RF-BETON Deflect



Für die Verformungsberechnung ist eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-BETON Deflect** erforderlich.

2.7.1 Material- und Geometrieannahmen

Für die Verformungsberechnung mit RF-BETON Deflect wird ein linear-elastisches Druck- und Zugverhalten vom Bewehrungsstahl angenommen. Dabei wird für Beton ein linear-elastisches Druckverhalten und ein linear-elastisches Verhalten bis zum Erreichen der Zugfestigkeit angesetzt. Dies ist für den Zustand der Gebrauchstauglichkeit ausreichend genau. Falls die vorhandene Spannung die Betonzugfestigkeit überschreitet, tritt eine Schadensentwicklung gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 ein.

Die Berechnung verwendet ein einfaches isotropisches Bruchmechanikmodell, das in die zwei Bewehrungsrichtungen unabhängig definiert ist. Bautechnisch wird in Übereinstimmung mit EN 1992-1-1 die Materialsteifigkeitsmatrix durch Interpolation zwischen dem ungerissenen (Zustand I) und gerissenen Zustand (Zustand II) nach Abschnitt 7.4.3, Gleichung (7.18) berechnet. Dadurch wird der Stahlbeton als orthotropes Material modelliert. Alle Schädigungsentwicklungsgesetze erlauben die Berücksichtigung des Tension-Stiffening-Effekts (Zugversteifung zwischen den Rissen) und von einfachen Langzeiteffekten (Schwinden und Kriechen).

Die Berechnung der Materialsteifigkeitsmatrizen erfolgt für die Modelltypen 2D - XY ($u_z/\phi_x/\phi_y$) und 3D. Beim Modelltyp 3D wird in der Steifigkeitsmatrix zusätzlich der Einfluss der Exzentrizitäten des idealen Schwerpunkts (siehe unten) berücksichtigt.

2.7.2 Bemessungsschnittgrößen

Wie oben erläutert, beruht die Berechnung der Steifigkeiten auf linear-elastischen Annahmen. Die Schnittgrößen werden in die orthogonalen Bewehrungsrichtungen ϕ und auf die beiden Seiten s (oben und unten) transformiert. Die ermittelten Schnittgrößen – Biegemomente $m_{\phi,s}$ und Normalkräfte $n_{\phi,s}$ (Torsionsmomente werden durch eine Transformation in die Bewehrungsrichtungen eliminiert) – sind abhängig von

- (a) dem Modelltyp,
- (b) der Berechnungsart,
- (c) dem Klassifizierungskriterium.

2.7.3 Kritische Oberfläche

Für die Ermittlung der kritischen Oberfläche wird jede Bewehrungsrichtung ϕ gesondert betrachtet. Dabei wird der Spannungszustand an beiden Seiten s – Unterseite (in Richtung der lokalen +z-Achse) und Oberseite (in Richtung der lokalen -z-Achse) – untersucht. Als maßgebende Seite wird diejenige Seite eingestuft, die die größte Zugbeanspruchung im Beton aufweist. Die Schnittgrößen auf der kritischen Seite werden als n_ϕ und m_ϕ bezeichnet.

Die in die Bewehrungsrichtung ϕ transformierte Normalkraft $n_{\phi,s}$ besitzt für beide Seiten s den gleichen Wert ($n_\phi = n_{\phi,\text{oben}} = n_{\phi,\text{unten}}$). Daher sind die Normalkräfte zur Ermittlung der kritischen Seite nicht relevant; zur Findung der maßgebenden Seite werden nur die Momente betrachtet. Die Vorzeichen für die Biegemomente $n_{\phi,s}$ bestimmen sich danach, ob die Momente Zug- oder Druckbeanspruchung auf der jeweiligen Seite s auslösen. Folglich ist diejenige Seite die kritische Oberfläche, an der ein größeres Biegemoment wirkt (d. h. die stärker zugbelastete Seite).

Für die Berechnung der Steifigkeit werden nur die Schnittgrößen n_ϕ und m_ϕ auf der kritischen Seite berücksichtigt. Bisher war die „Unterseite“ auf die lokale Achse +z bezogen, im folgenden Text bezeichnet die „Unterseite“ jedoch die kritische Seite der Fläche.

2.7.4 Querschnittswerte

Die Querschnittseigenschaften werden für die beiden Bewehrungsrichtungen ϕ und die beiden Querschnittszustände c (ungerissen / gerissen) berechnet. Hierbei wird für den Zustand I (ungerissener Querschnitt) ein linear-elastisches Verhalten des Betons auf der Zugseite und für den Zustand II (gerissener Querschnitt) keine Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit angesetzt.

Falls keine Normalkräfte n_ϕ wirken (z. B. bei Modelltyp 2D - XY ($u_z/\phi_x/\phi_y$), ist dieser Teil der Berechnung von den Schnittgrößen unabhängig und eine direkte Berechnung der Querschnittswerte möglich. In den übrigen Fällen erfolgt die Berechnung der Druckzonenhöhe über eine iterative Berechnungsart, der sogenannten „binären Methode“. Aus numerischen Gründen wird hierzu bei jedem Iterationsschritt der Minimalwert für den Bewehrungsgrad $\rho_{\min} = 10^{-4}$ verwendet, d. h. bei fehlender Bewehrung wird eine virtuelle minimale Bewehrungsfläche angesetzt. Dieser kleine Wert hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Ergebnisse (Steifigkeiten).

Die berechneten ideellen Querschnittswerte (bezogen auf den Betonquerschnitt) in eine Bewehrungsrichtung ϕ und dem Risszustand c sind

- (a) das Trägheitsmoment zum ideellen Schwerpunkt $I_{\phi,c}$,
- (b) das Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt $I_{0,\phi,c}$,
- (c) die Querschnittsfläche $A_{\phi,c}$,
- (d) die Exzentrizität des ideellen Schwerpunkts $e_{\phi,c}$.

2.7.5 Berücksichtigung von Langzeitwirkungen

Unter Langzeiteinwirkung ist der Einfluss von Kriechen und Schwinden zu verstehen. Gemäß EN 1992-1-1 sind die Langzeitwirkungen getrennt zu berücksichtigen.

2.7.5.1 Kriechen

Die Kriecheinflüsse werden über eine Abminderung des Elastizitätsmoduls E berücksichtigt, wobei die effektive Kriechzahl ϕ_{eff} nach EN 1992-1-1, Gleichung (7.20) angesetzt wird:

$$E_{cd,\text{eff}} = \frac{E_{cd}}{1 + \phi_{\text{eff}}} \quad (2.79)$$

2.7.5.2 Schwinden

In der Verformungsberechnung nach EN 1992-1-1 gibt es zwei Bereiche, die durch das Schwinden beeinflusst sind.

Abminderung der Materialsteifigkeit

Die Materialsteifigkeit in jede Bewehrungsrichtung ϕ wird durch den sogenannten Einflussbeiwert für Schwinden $k_{sh,\phi,c}$ abgemindert. Für die zwei Risszustände c (gerissen/ungerissen) können die Normalkräfte $n_{sh,\phi,c}$ und Biegemomente $m_{sh,\phi,c}$ aus der freien Schwinddehnung ϵ_{sh} berechnet werden:

$$\begin{aligned} n_{sh,\phi} &= -\epsilon_{sh} \cdot E_s (a_{s1} + a_{s2}) \\ m_{sh,\phi} &= n_{sh} \cdot e_{sh} \end{aligned} \quad (2.80)$$

mit

- $n_{sh,\phi}$ zusätzliche Normalkraft aus Schwinden in Bewehrungsrichtung ϕ
- $m_{sh,\phi}$ Zusatzmoment aus Schwinden im Schwerpunkt des ideellen Querschnitts in Bewehrungsrichtung ϕ
- a_{s1} untere Bewehrungsfläche

- $a_{s,2}$ obere Bewehrungsfläche
- E_s E-Modul des Bewehrungsstahls
- ϵ_{sh} Schwinddehnung
- e_{sh} Exzentrizität der Schwindkräfte (Zustand I und Zustand II) vom Schwerpunkt des ideellen Querschnitts

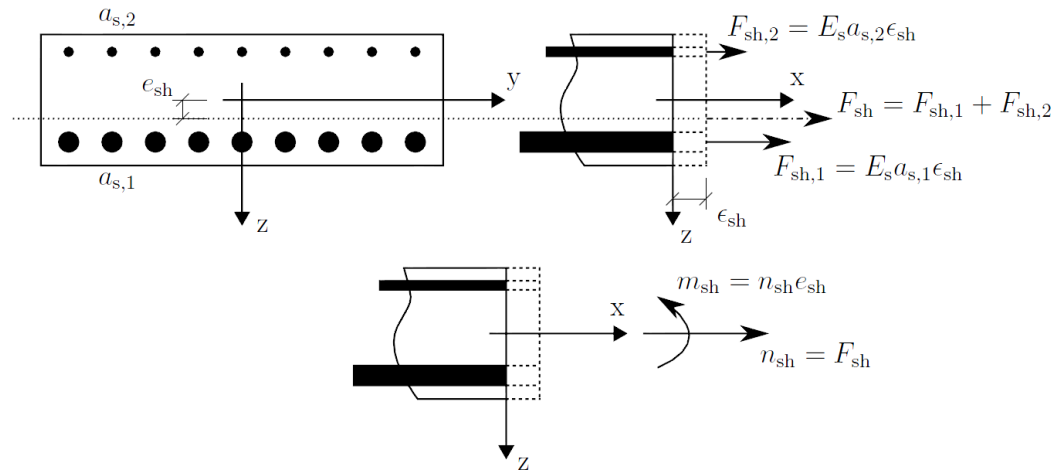


Bild 2.115: Schnittgrößen $n_{sh,\phi}$ und $m_{sh,\phi}$

Mit diesen Schnittkräften aus Schwinden wird die durch das Schwinden induzierte zusätzliche Krümmung $\kappa_{sh,\phi,c}$ im untersuchten Punkt berechnet – ohne Einfluss des umgebenden Modells. Anschließend wird der neue Einflussbeiwert für Schwinden $k_{sh,\phi,c}$ berechnet nach:

$$k_{sh,\phi,c} = \frac{\kappa_{sh,\phi,c} + \kappa_\phi}{\kappa_\phi} \quad (2.81)$$

mit

- κ_ϕ durch äußere Belastung hervorgerufene Krümmung ohne Kriecheinfluss in Bewehrungsrichtung ϕ
- $\kappa_{sh,\phi,c}$ durch Schwinden (und Bewehrungsanordnung) hervorgerufene Krümmung ohne Kriecheinfluss in Bewehrungsrichtung ϕ

Der Einflussbeiwert $k_{sh,\phi,c}$ ist auf das Intervall $k_{sh,\phi,c} \in (1, 100)$ beschränkt: Somit darf $k_{sh,\phi,c}$ die Steifigkeit aus numerischen und physikalischen Gründen nicht mehr als um das 100-fache reduzieren. Zudem bedeutet der Mindestwert $k_{sh,\phi,c} = 1$, dass der Einfluss des Schwindens nicht berücksichtigt werden kann, wenn der Einfluss des Schwindens eine gegensätzliche Orientierung zur belastungsinduzierten Krümmung κ_d aufweist.

Der Einfluss des Schwindens auf die MembranstEIFigkeit wird nicht berücksichtigt.

Berechnung des Verteilungsbeiwerts

Der zweite Einflussbereich des Schwindens liegt in der Berechnung des Verteilungsbeiwerts ζ nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4.3, Gleichung (7.18). In folgendem Kapitel wird der Verteilungsbeiwert näher beschrieben.

2.7.6 Verteilungsbeiwert

Die Berechnung des Verteilungsbeiwerts ζ_d wird für eine Bewehrungsrichtung ϕ aufgezeigt. Zuerst wird die maximale Betonzugspannung $\sigma_{\max,\phi}$ unter Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens berechnet:

$$\sigma_{\max,\phi} = \frac{n_\phi + n_{sh,\phi}}{A_{\phi,I}} + \frac{m_\phi - n_\phi \cdot \left(x_{\phi,I} - \frac{h}{2}\right) + m_{sh,\phi,I}}{I_{\phi,I}} \cdot (h - x_{\phi,I}) \quad (2.82)$$

mit

n_ϕ	Normalkraft aus externer Belastung in Bewehrungsrichtung ϕ
$n_{sh,\phi}$	Zusätzliche Normalkraft aus Schwinden in Bewehrungsrichtung ϕ
m_ϕ	Moment aus externer Belastung in Bewehrungsrichtung ϕ
$m_{sh,\phi,I}$	Zusatzmoment aus Schwinden in Bewehrungsrichtung ϕ im Zustand I
$x_{\phi,I}$	Betondruckzonenhöhe im ungerissenen Zustand in Bewehrungsrichtung ϕ
h	Querschnittshöhe
$A_{\phi,I}$	Ideelle Querschnittsfläche im Zustand I in Bewehrungsrichtung ϕ
$I_{\phi,I}$	Ideeles Trägheitsmoment im Zustand I in Bewehrungsrichtung ϕ

Der Einfluss der Schwindkräfte auf die maximale Betonzugspannung $\sigma_{\max,\phi}$ wird durch die zusätzlichen Schnittgrößen aus Schwinden erfasst.

Die Berechnung des Verteilungsbeiwerts ζ_ϕ hängt davon ab, ob der Einfluss der Zugsteifigkeit („Tension Stiffening“) gemäß EN 1992-1-1 in der Verformungsberechnung berücksichtigt wird.

Verteilungsbeiwert ζ_ϕ mit Berücksichtigung von Tension Stiffening

- für $\sigma_{\max,\phi} > f_{ctm}$:

$$\zeta_\phi = 1 - \beta \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{\sigma_{\max,\phi}}\right)^n$$

- für $\sigma_{\max,\phi} \leq f_{ctm}$:

$$\zeta_\phi = 0$$

(2.83)

mit

β	Parameter für die Belastungsdauer
f_{ctm}	mittlere Betonzugfestigkeit
n	2 für EN 1992-1-1

Verteilungsbeiwert ζ_ϕ ohne Berücksichtigung von Tension Stiffening

- für $\sigma_{\max,\phi} > f_{ctm}$:

$$\zeta_\phi = 1$$

- für $\sigma_{\max,\phi} \leq f_{ctm}$:

$$\zeta_\phi = 0$$

(2.84)

2.7.7 Querschnittswerte für Verformungsberechnung

Für die Materialsteifigkeitsmatrix D zur Verformungsberechnung werden die Querschnittswerte in Abhängigkeit des Risszustandes benötigt, die in jede Bewehrungsrichtung vorliegen. Es sind dies im Einzelnen

- (a) das Trägheitsmoment zum ideellen Schwerpunkt I_ϕ ,
- (b) das Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt $I_{0,\phi}$,
- (c) die Querschnittsfläche A_ϕ ,
- (d) die Exzentrizität des ideellen Schwerpunkts e_ϕ zum geometrischen Schwerpunkt.

Die mittlere Dehnung ϵ_ϕ und mittlere Krümmung κ_ϕ werden nach EN 1992-1-1, Gleichung (7.18) aus gerissenem und ungerissenem Zustand interpoliert:

$$\begin{aligned}\epsilon_\phi &= \zeta_\phi \cdot \epsilon_{\phi,II} + (1 - \zeta_\phi) \cdot \epsilon_{\phi,I} \\ \kappa_\phi &= \zeta_\phi \cdot \kappa_{\phi,II} + (1 - \zeta_\phi) \cdot \kappa_{\phi,I}\end{aligned}\quad (2.85)$$

Die Dehnungen im Rissbild c (Zustand I und Zustand II) werden nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\phi,c} &= \frac{n_\phi}{E \cdot A_{\phi,c}} \\ \kappa_{\phi,c} &= \kappa_{sh,\phi,c} \cdot \frac{m_\phi - n_\phi \cdot e_{\phi,c}}{E \cdot I_{\phi,c}}\end{aligned}\quad (2.86)$$

Der Einfluss des Schwindens wird somit über den Faktor $k_{sh,\phi,c}$ berücksichtigt.

Falls keine Normalkräfte n_ϕ wirken (z. B. bei Modelltyp 2D - XY ($u_z/\phi_x/\phi_y$)), sind nur die ideellen Querschnittswerte relevant, die sich auf den ideellen Schwerpunkt des Querschnitts beziehen:

$$\begin{aligned}A_\phi &= \frac{A_{\phi,I} \cdot A_{\phi,II}}{\zeta_\phi \cdot A_{\phi,I} \cdot k_{sh,\phi,II} + (1 - \zeta_\phi) \cdot A_{\phi,II} \cdot k_{sh,\phi,I}} \\ I_\phi &= \frac{I_{\phi,I} \cdot I_{\phi,II}}{\zeta_\phi \cdot I_{\phi,I} \cdot k_{sh,\phi,II} + (1 - \zeta_\phi) \cdot I_{\phi,II} \cdot k_{sh,\phi,I}}\end{aligned}\quad (2.87)$$

Sind Normalkräfte vorhanden, werden die Querschnittswerte auf den geometrischen Querschnittsmittelpunkt bezogen:

$$\begin{aligned}A_\phi &= \frac{n_\phi}{A \cdot \epsilon_\phi} & \text{mit } \epsilon_\phi &= \frac{m_\phi - \kappa_\phi \cdot E \cdot I_\phi}{n_\phi} \\ I_{\phi,0} &= I_\phi + A_\phi \cdot e_\phi^2 & \text{mit } I_\phi & \text{nach Gleichung 2.87}\end{aligned}\quad (2.88)$$

Im Zuge der Berechnung der Querschnittswerte wird der Anfangswert der Querdehnzahl ν_{init} nach folgender Gleichung abgemindert:

$$\nu = \left(1 - \max_{\phi \in \{1,2\}} (\zeta_\phi)\right) \cdot \nu_{init}\quad (2.89)$$

2.7.8 Materialsteifigkeitsmatrix D

Biegesteifigkeit – Platten und Schalen

Die Biegesteifigkeiten in die Bewehrungsrichtungen ϕ werden wie folgt ermittelt:

$$D_{d,d} = I_{0,d} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad \text{mit } d = \{1,2\}$$

$$D_{d,d} = I_d \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad \text{mit } d = \{1,2\}$$

Der nichtdiagonale Anteil der Materialsteifigkeitsmatrix wird für Platten und Schalen gleich berechnet:

$$D_{1,2} = D_{2,1} = \nu \cdot \sqrt{(D_{1,1} \cdot D_{2,2})}$$

Bei Schalen werden die Unterschiede in den Biegesteifigkeiten infolge der Trägheitsmomente durch die Exzentrizitätskomponenten in der Materialsteifigkeitsmatrix kompensiert.

Torsionssteifigkeit – Platten und Schalen

Der Steifigkeitsmatrixelemente für Torsion errechnen sich für Platten und Schalen wie folgt:

$$D_{3,3} = \frac{1 - \nu}{2} \cdot \sqrt{(D_{1,1} \cdot D_{2,2})}$$

Schubsteifigkeit – Platten und Schalen

Die Steifigkeitsmatrixelemente für Schub werden für die Verformungsberechnung nicht abgemindert. Sie errechnen sich aus dem Schubmodul G des ideellen Querschnitts und der Querschnittshöhe h . Für Platten und Schalen gilt:

$$D_{3+d,3+d} = \frac{5}{6} \cdot G \cdot h \quad \text{mit } d = \{1,2\}$$

Membransteifigkeit – Schalen

Die Membransteifigkeiten in die Bewehrungsrichtungen ϕ werden wie folgt ermittelt:

$$D_{5+d,5+d} = E \cdot \frac{A_d}{(1 - \nu^2)} \quad \text{mit } d = \{1,2\}$$

Der nichtdiagonale Anteil der Materialsteifigkeitsmatrix wird berechnet aus:

$$D_{6,7} = D_{7,6} = \nu \cdot \sqrt{(D_{6,6} \cdot D_{7,7})}$$

Der Schubsteifigkeitsanteil beträgt:

$$D_{8,8} = G \cdot h$$

Exzentrizität – Schalen

Die Steifigkeitsmatrixelemente für die Exzentrizität des Schwerpunkts (ideeller Querschnitt) in Bewehrungsrichtung ϕ werden wie folgt berechnet:

$$D_{d,6} = D_{6,d} = D_{5+d,5+d} \cdot e_d \quad \text{mit } d = \{1,2\}$$

Der nichtdiagonale Anteil der Materialsteifigkeitsmatrix wird berechnet aus:

$$D_{1,7} = D_{7,1} = \frac{\nu}{2} \cdot (e_{\phi_1} + e_{\phi_2}) \cdot \sqrt{(D_{6,6} \cdot D_{7,7})}$$

Der Exzentrizitätsanteile für Torsion berechnen sich wie folgt:

$$D_{3,8} = D_{8,3} = \frac{1}{2} \cdot G \cdot h \cdot (e_{\phi_1} + e_{\phi_2})$$

2.7.9 Positive Definitheit der Materialsteifigkeitsmatrix

Die positive Definitheit der Materialsteifigkeitsmatrix D wird durch das SYLVESTER-Kriterium geprüft, das im Hinblick auf die Null-Blöcke modifiziert wurde. Wenn die Steifigkeitsmatrix D nicht positiv definit ist, so werden die nicht-diagonalen Komponenten der Materialsteifigkeitsmatrix nacheinander zu null gesetzt. Im Extremfall bleiben nur die positiven Komponenten aus der Diagonale übrig.

2.7.10 Beispiel

Die oben beschriebene Ermittlung der Materialsteifigkeitsmatrix D wird an einem einfachen Beispiel vorgestellt. Das Modell enthält ein einziges finites Element und die Fläche wird nur auf einer Seite (oben) bewehrt. Zur Vereinfachung wird die Handrechnung in die Bewehrungsrichtung ϕ_1 durchgeführt.

2.7.10.1 Geometrie

Das Modell mit den Abmessungen $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ und der Dicke $0,20\text{ m}$ ist einseitig eingespannt. Auf der freien Seite wirken das Biegemoment $m_x = -30\text{ kNm/m}$ und die Normalkraft $n_x = -100\text{ kN/m}$. Das automatische Eigengewicht ist nicht berücksichtigt.

Die Längsbewehrung in ϕ_1 beträgt 1000 mm^2 .

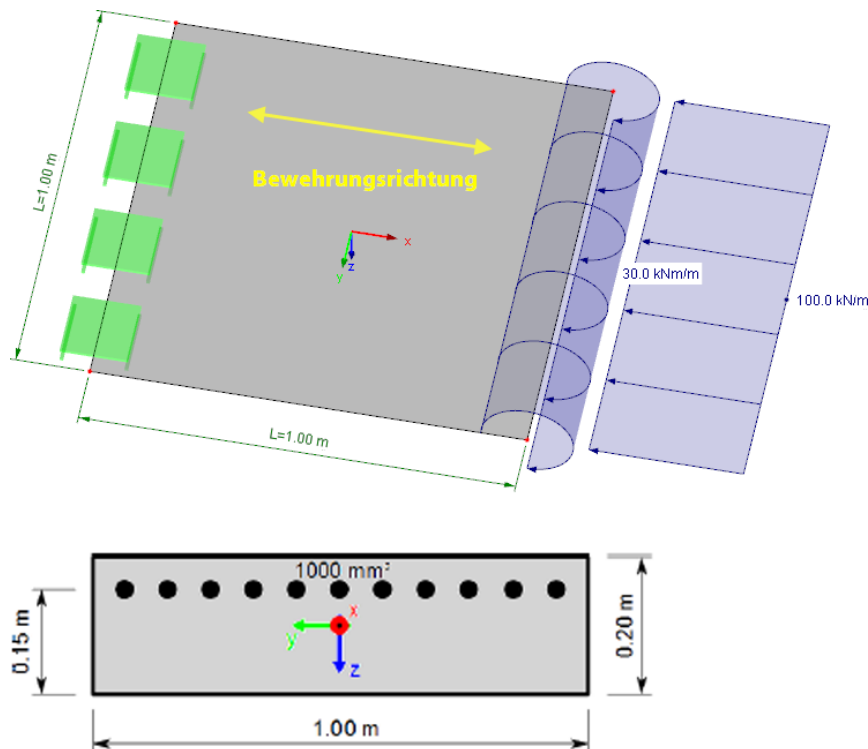


Bild 2.116: Modell mit Belastung und Bewehrung

2.7.10.2 Materialien

Die Materialeigenschaften sind in folgender Tabelle dargestellt.

Schnittgrößen der linearen Statik				
Hauptschnittgrößen				
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
Bemessungsschnittgrößen				
Auswahl der Bemessungsschnittgrößen				
Ermittlung der kritischen Seite				
Materialdaten für Steifigkeitsberechnung				
Beton				
Elastizitätsmodul	E_b	33000.0	MPa	
Schubmodul	G_c	11800.0	MPa	
Querdehnzahl	ν	0.20		
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.9	MPa	
Kriechzahl	ϕ	2.00		
Torsionsbeiwert	Φ	1.00		
Bewehrung				
Elastizitätsmodul	E_s	200000.0	MPa	

Bild 2.117: Materialdaten für Steifigkeitsberechnung

2.7.10.3 Auswahl der Bemessungsschnittgrößen

Zuerst werden die inneren Kräfte in die erste Bewehrungsrichtung ϕ_1 transformiert. Die Biegemomente haben unterschiedliche Werte für die untere (+z) und die obere (-z) Seite; die Normalkräfte besitzen nach der Transformation gleiche Vorzeichen.

$$m_{\phi_1, +z} = -30 \text{ kN}$$

$$m_{\phi_1, -z} = 30 \text{ kN}$$

$$n_{\phi_1, +z} = n_{\phi_1, -z} = -100 \text{ kN}$$

Schnittgrößen der linearen Statik				
Hauptschnittgrößen				
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
Bemessungsschnittgrößen				
Auswahl der Bemessungsschnittgrößen				
in 1. Bewehrungsrichtung				
Bemessungsnormalkraft	$n_{\phi 1}$	-100.0	kN/m	
Bemessungsmoment	$m_{\phi 1}$	30.0	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Unterseite (+z)	$m_{+z, \phi 1}$	-30.0	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Oberseite (-z)	$m_{-z, \phi 1}$	30.0	kNm/m	
in 2. Bewehrungsrichtung				
Bemessungsnormalkraft	$n_{\phi 2}$	0.0	kN/m	
Bemessungsmoment	$m_{\phi 2}$	1.1	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Unterseite (+z)	$m_{+z, \phi 2}$	-1.1	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Oberseite (-z)	$m_{-z, \phi 2}$	1.1	kNm/m	

Bild 2.118: Auswahl der Bemessungsschnittgrößen

2.7.10.4 Ermittlung der kritischen Seite

Die obere Seite (-z) erweist sich als die kritische Seite. Für die weitere Berechnung werden nur das Biegemoment und die Normalkraft dieser Seite berücksichtigt.

$$m_{\phi_1} = m_{\phi_1, -z} = 30 \text{ kN}$$

$$n_{\phi_1} = n_{\phi_1, +z} = -100 \text{ kN}$$

Schnittgrößen der linearen Statik				
Hauptschnittgrößen				
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
Bemessungsschnittgrößen				
Auswahl der Bemessungsschnittgrößen				
Ermittlung der kritischen Seite				
in 1. Bewehrungsrichtung				
Kritische Seite				
Bemessungsmoment an der Unterseite (+z)	$m_{+z, \phi 1}$	-30.0	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Oberseite (-z)	$m_{-z, \phi 1}$	30.0	kNm/m	
in 2. Bewehrungsrichtung				
Kritische Seite				
Bemessungsmoment an der Unterseite (+z)	$m_{+z, \phi 2}$	-1.1	kNm/m	
Bemessungsmoment an der Oberseite (-z)	$m_{-z, \phi 2}$	1.1	kNm/m	

Bild 2.119: Ermittlung der kritischen Seite

2.7.10.5 Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)

Die Querschnittswerte sind abhängig von der maßgebenden Seite und der Bewehrungsrichtung ϕ_1 . Für die Bewehrungsflächen a_{s_2, ϕ_1} , a_{s_1, ϕ_2} und a_{s_2, ϕ_2} werden die Mindestwerte benutzt.

Es sind folgende Querschnittswerte für den ungerissenen und den gerissenen Zustand zu berechnen, um die Steifigkeitsmatrix des Materials **D** aufstellen zu können.

Schwerpunkt

Der Schwerpunktabstand des ideellen Querschnitts von der gedrückten Betonoberfläche wird für den ungerissenen Zustand direkt berechnet.

$$z_{I, \phi_1} = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha \cdot (a_{s_1, \phi_1} \cdot d_{1, \phi_1} + a_{s_2, \phi_1} \cdot d_{2, \phi_1})}{b \cdot h + \alpha \cdot (a_{s_1, \phi_1} + a_{s_2, \phi_1})}$$

$$= \frac{\frac{1000 \cdot 200^2}{2} + 6,061 \cdot (1000 \cdot 150 + 15 \cdot 50)}{1000 \cdot 200 + 6,061 \cdot (1000 + 15)} = 101,4 \text{ mm}$$

Für den gerissenen Zustand ist die Berechnung der Höhe χ_{II, ϕ_1} der gedrückten Zone mit der iterativen Methode notwendig. Dann wird der Abstand des Schwerpunkts des ideellen Querschnitts von der gedrückten Oberfläche für den gerissenen Zustand berechnet.

Ideelle Querschnittsfläche $A_{c,d}$

Die effektive Querschnittsfläche im ungerissenen Zustand ohne Einfluss des Kriechens ist:

$$A_{I, \phi_1} = b \cdot h + \alpha \cdot (a_{s_1, \phi_1} + a_{s_2, \phi_1}) = 1000 \cdot 200 + 6,061 \cdot (1000 + 15) = 2061,5 \text{ cm}^2$$

Die effektive Querschnittsfläche im gerissenen Zustand wird mit dem Einfluss des Kriechens ermittelt.

$$A_{II, \phi_1} = b \cdot \chi_{II, \phi_1} + \alpha \cdot (a_{s_1, \phi_1} + a_{s_2, \phi_1}) = 1000 \cdot 68,3 + 18,182 \cdot (1000 + 15) = 867,19 \text{ cm}^2$$

Der Koeffizient α ist das Verhältnis der E-Moduln von Stahl und Beton mit bzw. ohne Einfluss des Kriechens.

Ideelles Trägheitsmoment zum ideellen Schwerpunkt $I_{c,d}$

Das effektive Trägheitsmoment zum ideellen Schwerpunkt im ungerissenen Zustand ohne Einfluss des Kriechens ist:

$$I_{I, \phi_1} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(z_{I, \phi_1} - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha \cdot a_{s_1, \phi_1} \cdot (d_{1, \phi_1} - z_{I, \phi_1})^2 + \alpha \cdot a_{s_2, \phi_1} \cdot (z_{I, \phi_1} - d_{2, \phi_1})^2$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 200^3 + 1000 \cdot 200 \cdot \left(101,4 - \frac{200}{2} \right)^2 + 6,061 \cdot 1000 \cdot (150 - 101,4)^2 + 6,061 \cdot 15 \cdot (101,4 - 50)^2$$

$$= 68161,30 \text{ cm}^4$$

Das effektive Trägheitsmoment zum ideellen Schwerpunkt im gerissenen Zustand wird mit dem Einfluss des Kriechens ermittelt.

$$I_{II, \phi_1} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot \chi_{II, \phi_1}^3 + b \cdot \chi_{II, \phi_1} \cdot \left(z_{II, \phi_1} - \frac{\chi_{II, \phi_1}}{2} \right)^2 + \alpha \cdot a_{s_1, \phi_1} \cdot (d_{1, \phi_1} - z_{II, \phi_1})^2 + \alpha \cdot a_{s_2, \phi_1} \cdot (z_{II, \phi_1} - d_{2, \phi_1})^2$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 68,3^3 + 1000 \cdot 68,3 \cdot \left(58,5 - \frac{68,3}{2} \right)^2 + 18,182 \cdot 1000 \cdot (150 - 58,5)^2 + 18,182 \cdot 15 \cdot (58,5 - 50)^2$$

$$= 21928,70 \text{ cm}^4$$

Ideelles Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt $I_{0,c,d}$

Das ideelle Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt im ungerissenen Zustand ohne Einfluss des Kriechens ist:

$$I_{0, I, \phi_1} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + \alpha \cdot a_{s_1, \phi_1} \cdot \left(d_{1, \phi_1} - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha \cdot a_{s_2, \phi_1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{2, \phi_1} \right)^2$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 200^3 + 6,061 \cdot 200 \cdot \left(150 - \frac{200}{2} \right)^2 + 6,061 \cdot 15 \cdot \left(\frac{200}{2} - 50 \right)^2$$

$$= 68204,50 \text{ cm}^4$$

Das ideale Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt im gerissenen Zustand wird mit dem Einfluss des Kriechens ermittelt.

$$\begin{aligned}
 I_{0,II,\phi_1} &= \frac{1}{12} \cdot b \cdot \chi_{II,\phi_1}^3 + b \cdot \chi_{II,\phi_1} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{\chi_{II,\phi_1}}{2} \right)^2 + \alpha \cdot a_{s1,\phi_1} \cdot \left(d_{1,\phi_1} - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha \cdot a_{s2,\phi_1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_{2,\phi_1} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 68,3^3 + 1000 \cdot 68,3 \cdot \left(\frac{200}{2} - \frac{68,3}{2} \right)^2 + 18,182 \cdot 1000 \cdot \left(150 - \frac{200}{2} \right)^2 + 18,182 \cdot 15 \cdot \left(\frac{200}{2} - 50 \right)^2 \\
 &= 36881,50 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

Exzentrizität des Schwerpunkts $e_{c,d}$

Die Exzentrizität des ideellen Querschnittsschwerpunkts wird wie folgt bestimmt:

$$e_{c,\phi_1} = z_{c,\phi_1} - \frac{h}{2}$$

- Ungerissener Zustand:

$$e_{\phi_1,I} = 101,4 - \frac{200}{2} = 1,4 \text{ mm}$$

- Gerissener Zustand:

$$e_{\phi_1,II} = 58,5 - \frac{200}{2} = -41,5 \text{ mm}$$

Schnittgrößen der linearen Statik				
Hauptschnittgrößen				
Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen				
Bemessungsschnittgrößen				
Auswahl der Bemessungsschnittgrößen				
Ermittlung der kritischen Seite				
Materialdaten für Steifigkeitsberechnung				
Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)				
in 1. Bewehrungsrichtung				
Geometrie				
Querschnittshöhe	h	200.0	mm	
Wirksame Höhe	d _{1,φ1}	150.0	mm	
Bewehrungsfläche	a _{s,1,φ1}	10.00	cm ²	
Wirksame Höhe	d _{2,φ1}	50.0	mm	
Bewehrungsfläche	a _{s,2,φ1}	0.15	cm ²	
Ungerissener Zustand (Zustand I)				
Höhe der Betondruckzone	x _{I,φ1}	101.4	mm	
Ideale Querschnittsfläche	A _{I,φ1}	2061.52	cm ²	
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt	I _{I,φ1}	68161.30	cm ⁴	
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt	I _{0,I,φ1}	68204.50	cm ⁴	
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen	e _{I,φ1}	1.4	mm	
Gerissener Zustand (Zustand II)				
Höhe der Betondruckzone	x _{II,φ1}	68.3	mm	
Ideale Querschnittsfläche	A _{II,φ1}	867.19	cm ²	
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt	I _{II,φ1}	21928.70	cm ⁴	
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt	I _{0,II,φ1}	36881.50	cm ⁴	
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen	e _{II,φ1}	-41.5	mm	

Bild 2.120: Querschnittswerte in 1. Bewehrungsrichtung

Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)				
in 1. Bewehrungsrichtung				
in 2. Bewehrungsrichtung				
Geometrie				
Querschnittshöhe	h	200.0	mm	
Wirksame Höhe	d _{1,φ2}	139.0	mm	
Bewehrungsfläche	a _{s,1,φ2}	0.14	cm ²	
Wirksame Höhe	d _{2,φ2}	60.0	mm	
Bewehrungsfläche	a _{s,2,φ2}	0.14	cm ²	
Ungerissener Zustand (Zustand I)				
Höhe der Betondruckzone	x _{I,φ2}	100.0	mm	
Ideale Querschnittsfläche	A _{I,φ2}	2001.68	cm ²	
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt	I _{I,φ2}	66692.90	cm ⁴	
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt	I _{0,I,φ2}	66692.90	cm ⁴	
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen	e _{I,φ2}	0.0	mm	
Gerissener Zustand (Zustand II)				
Höhe der Betondruckzone	x _{II,φ2}	9.5	mm	
Ideale Querschnittsfläche	A _{II,φ2}	100.42	cm ²	
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt	I _{II,φ2}	516.86	cm ⁴	
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt	I _{0,II,φ2}	8734.84	cm ⁴	
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen	e _{II,φ2}	-90.5	mm	

Bild 2.121: Querschnittswerte in 2. Bewehrungsrichtung

2.7.10.6 Berücksichtigung von Schwinden

Der Einfluss des Schwindens geht direkt mit dem definierten Wert des freien Schwindens ϵ_{sh} in die Berechnung ein. Somit bleibt der Einfluss struktureller Zwängungen oder Umlagerungen der Schwindkräfte unberücksichtigt.

Im Beispiel wird die Schwinddehnung mit folgendem Wert angesetzt:

$$\epsilon_{sh} = -0,5 \cdot 10^{-3}$$

Die freie Schwinddehnung verursacht zusätzliche Kräfte im Querschnitt:

$$\begin{aligned} n_{sh,\phi_1} &= -E_s \cdot \epsilon_{sh} \cdot (a_{s1,\phi_1} + a_{s2,\phi_1}) \\ &= -200 \cdot 10^9 \cdot (-0,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (1000 + 15) \cdot 10^{-6} \\ &= 101,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die Kräfte wirken für die beiden Risszustände c (gerissen bzw. ungerissen) mit der Exzentrizität zum Schwerpunkt des ideellen Querschnitts:

$$e_{sh,c,\phi_1} = \frac{a_{s1,\phi_1} \cdot d_{1,\phi_1} + a_{s2,\phi_1} \cdot d_{2,\phi_1}}{a_{s1,\phi_1} + a_{s2,\phi_1}} - z_{c,\phi_1}$$

- Ungerissener Zustand:

$$e_{sh,c,\phi_1} = \frac{1000 \cdot 150 + 15 \cdot 50}{1000 + 15} - 101,4 = 47,1 \text{ mm}$$

- Gerissener Zustand:

$$e_{sh,c,\phi_1} = \frac{1000 \cdot 150 + 15 \cdot 50}{1000 + 15} - 58,5 = 90,0 \text{ mm}$$

Das durch die Normalkraft n_{sh,ϕ_1} verursachte Biegemoment für die beiden Risszustände c ist:

$$m_{sh,c,\phi_1} = n_{sh,\phi_1} \cdot e_{sh,c,\phi_1}$$

- Ungerissener Zustand:

$$m_{sh,I,\phi_1} = 101,5 \cdot 10^3 \cdot 0,047 = 4,8 \text{ kNm/m}$$

- Gerissener Zustand:

$$m_{sh,II,\phi_1} = 101,5 \cdot 10^3 \cdot 0,090 = 9,1 \text{ kNm/m}$$

Bei der Bestimmung des Koeffizienten $k_{sh,c,d}$ für die beiden Risszustände c ist zu unterscheiden:

– für $m_{\phi_1} \neq 0$:

$$k_{sh,c,\phi_1} = \frac{m_{sh,c,\phi_1} + m_{\phi_1} - n_{\phi_1} \cdot e_{c,\phi_1}}{m_{\phi_1} - n_{\phi_1} \cdot e_{c,\phi_1}}$$

– für $m_{\phi_1} = 0$:

$$k_{sh,c,\phi_1} = 1 \quad \text{mit } k_{sh,c,\phi_1} \in \{1, 100\}$$

Im Beispiel gilt: $m_{\phi_1} \neq 0$

- Ungerissener Zustand:

$$k_{sh,I,\phi_1} = \frac{4,771 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot 1,4 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot 1,4 \cdot 10^3} = 1,159$$

- Gerissener Zustand:

$$k_{sh,II,\phi_1} = \frac{9,135 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot (-41,5 \cdot 10^3)}{30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot (-41,5 \cdot 10^3)} = 1,354$$

Berücksichtigung von Schwinden				
in 1. Bewehrungsrichtung				
Ungerissener Zustand (Zustand I)				
Freies Schwinden	ε_{sh}	-0.001		
Normalkraft infolge Schwinden	$n_{sh,I,\Phi 1}$	101.5	kN/m	
Moment infolge Schwinden	$m_{sh,I,\Phi 1}$	4.8	kNm/m	
Einflussbeiwert für Schwinden	$k_{sh,I,\Phi 1}$	1.159		
Gerissener Zustand (Zustand II)				
Freies Schwinden	ε_{sh}	-0.001		
Normalkraft infolge Schwinden	$n_{sh,II,\Phi 1}$	101.5	kN/m	
Moment infolge Schwinden	$m_{sh,II,\Phi 1}$	9.1	kNm/m	
Einflussbeiwert für Schwinden	$k_{sh,II,\Phi 1}$	1.354		
in 2. Bewehrungsrichtung				
Ungerissener Zustand (Zustand I)				
Freies Schwinden	ε_{sh}	-0.001		
Normalkraft infolge Schwinden	$n_{sh,I,\Phi 2}$	2.8	kN/m	
Moment infolge Schwinden	$m_{sh,I,\Phi 2}$	0.0	kNm/m	
Einflussbeiwert für Schwinden	$k_{sh,I,\Phi 2}$	1.000		
Gerissener Zustand (Zustand II)				
Freies Schwinden	ε_{sh}	-0.001		
Normalkraft infolge Schwinden	$n_{sh,II,\Phi 2}$	2.8	kN/m	
Moment infolge Schwinden	$m_{sh,II,\Phi 2}$	0.3	kNm/m	
Einflussbeiwert für Schwinden	$k_{sh,II,\Phi 2}$	1.238		

Bild 2.122: Berücksichtigung von Schwinden

2.7.10.7 Berechnung des Verteilungsbeiwerts

Die maximale Spannung im ungerissenen Zustand ist:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max,\phi_1} &= \frac{n_{\phi_1} + n_{sh,\phi_1}}{A_{\phi_1,I}} + \frac{m_{\phi_1} - n_{\phi_1} \left(\chi_{I,\phi_1} - \frac{h}{2} \right) + m_{sh,I,\phi_1}}{I_{\phi_1,I}} \cdot (h - \chi_{I,\phi_1}) \\
 &= \frac{-100 \cdot 10^3 + 101,5 \cdot 10^3}{0,206} + \frac{30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \left(0,101 - \frac{0,200}{2} \right) + 4,778 \cdot 10^3}{6,816 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,200 - 0,101) \\
 &= 5,1 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Es wird eine langfristige Belastung vorausgesetzt:

$$\beta_{\phi_1} = 0,5$$

Mit Berücksichtigung von *Tension Stiffening* wird der Verteilungsbeiwert nach folgender Gleichung berechnet:

– für $\sigma_{\max,\phi_1} > f_{ctm}$:

$$\zeta_d = 1 - \beta_{\phi_1} \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{\sigma_{\max,\phi_1}} \right)^2$$

– für $\sigma_{\max,\phi_1} \leq f_{ctm}$:

$$\zeta_{sh,c,\phi_1} = 0$$

Im Beispiel ist die maximale Zugspannung im Beton größer als die Betonzugfestigkeit.

$$\sigma_{\max,\phi_1} > f_{ctm}$$

$$5,1 > 2,9$$

Somit ist der Verteilungsbeiwert:

$$\zeta_{\phi_1} = 1 - \beta_{\phi_1} \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{\sigma_{\max,\phi_1}} \right)^2 = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{2,9}{5,1} \right)^2 = 0,835$$

☐ Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)				
☐ Berücksichtigung von Schwinden				
☐ Berechnung des Verteilungsbeiwertes				
☐ in 1. Bewehrungsrichtung				
☐ Verteilungsbeiwert	$\zeta_{\phi 1}$	0.835		
Tension Stiffening		Ja		
Maximale Zugspannung im Beton	$\sigma_{c,l,\phi 1}$	5.1	MPa	
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.9	MPa	
Belastungsdauerbeiwert	$\beta_{\phi 1}$	0.500		
☐ in 2. Bewehrungsrichtung				
☐ Verteilungsbeiwert	$\zeta_{\phi 2}$	0.000		
Tension Stiffening		Ja		
Maximale Zugspannung im Beton	$\sigma_{c,l,\phi 2}$	0.2	MPa	
Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit	f_{ctm}	2.9	MPa	
Belastungsdauerbeiwert	$\beta_{\phi 2}$	0.500		
☐ Endquerschnittswerte				

Bild 2.123: Berechnung des Verteilungsbeiwertes

2.7.10.8 Endquerschnittswerte

Die Krümmung für die beiden Risszustände c (ungerissen/gerissen) wird wie folgt berechnet:

$$\kappa_{c,\phi_1} = k_{sh,c,\phi_1} \cdot \frac{m_{\phi_1} - n_{\phi_1} \cdot e_{c,\phi_1}}{E \cdot I_{c,\phi_1}}$$

- Ungerissener Zustand:

$$\kappa_{I,\phi_1} = 1,158 \cdot \frac{30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{11 \cdot 10^9 \cdot 6,816 \cdot 10^{-4}} = 4,655 \cdot 10^{-3}$$

- Gerissener Zustand:

$$\kappa_{II,\phi_1} = 1,353 \cdot \frac{30 \cdot 10^3 - (-100 \cdot 10^3) \cdot (-41,5 \cdot 10^{-3})}{11 \cdot 10^9 \cdot 2,193 \cdot 10^{-4}} = 14,499 \cdot 10^{-3}$$

Die Dehnung für die beiden Risszustände ermittelt sich wie folgt:

$$\epsilon_{c,\phi_1} = \frac{n_{\phi_1}}{E \cdot A_{c,\phi_1}}$$

- Ungerissener Zustand:

$$\epsilon_{I,\phi_1} = \frac{-100 \cdot 10^3}{11 \cdot 10^9 \cdot 0,206} = -4,413 \cdot 10^{-5}$$

- Gerissener Zustand:

$$\epsilon_{II,\phi_1} = \frac{-100 \cdot 10^3}{11 \cdot 10^9 \cdot 0,087} = -10,449 \cdot 10^{-5}$$

Damit kann die mittlere Dehnung bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\phi_1} &= \zeta_{\phi_1} \cdot \epsilon_{II,\phi_1} + (1 - \zeta_{\phi_1}) \cdot \epsilon_{I,\phi_1} \\ &= 0,835 \cdot (-10,449 \cdot 10^{-5}) + (1 - 0,835) \cdot (-4,413 \cdot 10^{-5}) = -9,459 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Die mittlere Krümmung wird wie folgt ermittelt:

$$\begin{aligned} \kappa_{\phi_1} &= \zeta_{\phi_1} \cdot \kappa_{II,\phi_1} + (1 - \zeta_{\phi_1}) \cdot \kappa_{I,\phi_1} \\ &= 0,835 \cdot (14,449 \cdot 10^{-3}) + (1 - 0,835) \cdot 4,655 \cdot 10^3 = 12,885 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Mit der mittleren Krümmung und der Längsdehnung können die Endquerschnittswerte unter Berücksichtigung von Schwinden, Kriechen und *Tension Stiffening* berechnet werden.

Ideelle Querschnittsfläche

$$A_{\phi_1} = \frac{n_{\phi_1}}{E \cdot \epsilon_{\phi_1}} = \frac{-100 \cdot 10^3}{11 \cdot 10^9 \cdot (-9,459 \cdot 10^{-5})} = 958,59 \text{ cm}^2$$

Ideeles Trägheitsmoment zum ideellen Querschnittsmittelpunkt

$$\begin{aligned} I_{\phi_1} &= \frac{I_{I,\phi_1} \cdot I_{II,\phi_1}}{\zeta_{\phi_1} \cdot I_{I,\phi_1} \cdot k_{dh,II,\phi_1} + (1 - \zeta_{\phi_1}) \cdot I_{II,\phi_1} \cdot k_{dh,I,\phi_1}} \\ &= \frac{6,816 \cdot 10^{-4} \cdot 2,193 \cdot 10^{-4}}{0,836 \cdot 6,816 \cdot 10^{-4} \cdot 1,353 + (1 - 0,836) \cdot 2,193 \cdot 10^{-4} \cdot 1,158} \\ &= 18391,50 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Exzentrizität des Schwerpunkts

$$e_{\phi_1} = \frac{m_{\phi_1} - \kappa_{\phi_1} \cdot E \cdot I_{\phi_1}}{n_{\phi_1}} = \frac{30 \cdot 10^3 - 12,855 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \cdot 10^9 \cdot 1,839 \cdot 10^{-4}}{-100 \cdot 10^3} = -39 \text{ mm}$$

Ideeles Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt

$$I_{0,\phi_1} = I_{\phi_1} + A_{\phi_1} \cdot e_{\phi_1}^2 = 1,839 \cdot 10^{-4} + 0,096 \cdot (-0,0393)^2 = 33207 \text{ cm}^4$$

Die Querdehnzahl wird dabei folgendermaßen berechnet:

$$\nu = \left(1 - \max_{d \in \{1,2\}} (\zeta_d)\right) \cdot \nu_{init} = (1 - \max(0, 0,836)) \cdot 0,2 = 0,0328$$

☐ Schnittgrößen der linearen Statik
☐ Hauptschnittgrößen
☐ Überprüfen, ob die einwirkenden Schnittgrößen den Beton aufreißen lassen
☐ Bemessungsschnittgrößen
☐ Auswahl der Bemessungsschnittgrößen
☐ Ermittlung der kritischen Seite
☐ Materialdaten für Steifigkeitsberechnung
☐ Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)
☐ Berücksichtigung von Schwinden
☐ Berechnung des Verteilungsbeiwertes
☐ Endquerschnittswerte
☐ in 1. Bewehrungsrichtung
Ideale Querschnittsfläche
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen Fläche)
☐ in 2. Bewehrungsrichtung
Ideale Querschnittsfläche
Ideales Trägheitsmoment zum idealen Schwerpunkt
Ideales Trägheitsmoment zum geometrischen Querschnittsmittelpunkt
Exzentrizität des Schwerpunktes (Wert positiv in Richtung der kritischen Fläche)

Bild 2.124: Endquerschnittswerte

2.7.10.9 Steifigkeitsmatrix des Materials

Biegesteifigkeit

$$D_{11} = \frac{I_{0,\phi_1} \cdot E}{1 - \nu^2} = \frac{3,322 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^9}{1 - 0,0328^2} = 3656,74 \text{ kNm}$$

$$D_{12} = D_{2,1} = 0,0328 \cdot \sqrt{(3,656 \cdot 10^6 \cdot 7,344 \cdot 10^6)} = 170,58 \text{ kNm}$$

Torsionsteifigkeit

$$D_{33} = \frac{1 - \nu}{2} \cdot \sqrt{D_{1,1} \cdot D_{2,2}} = \frac{1 - 0,0328}{2} \cdot \sqrt{(3,656 \cdot 10^6 \cdot 7,344 \cdot 10^6)} = 2505,84 \text{ kNm}$$

Schubsteifigkeit

$$D_{44} = D_{55} = \frac{5}{6} \cdot G \cdot h = \frac{5}{6} \cdot 11,8 \cdot 10^9 \cdot 0,2 = 1966670 \text{ kN/m}$$

Membransteifigkeit

$$D_{66} = \frac{E \cdot A_{\phi_1}}{1 - \nu^2} = \frac{11 \cdot 10^9 \cdot 0,096}{1 - 0,0328^2} = 1055590 \text{ kN/m}$$

$$D_{67} = D_{76} \cdot \nu \cdot \sqrt{(D_{66} \cdot D_{77})} = 0,0328 \cdot \sqrt{(1055,590 \cdot 10^6 \cdot 2505,84 \cdot 10^6)} = 50210,6 \text{ kN/m}$$

$$D_{88} = G \cdot h = 11,8 \cdot 10^9 \cdot 0,2 = 2360000 \text{ kN/m}$$

Exzentrizität

$$D_{16} = D_{61} = D_{61} \cdot e_{\phi_1} = 1055,590 \cdot 10^9 \cdot 0,0393 = 41499,2 \text{ kNm/m}$$

$$D_{27} = D_{72} = D_{77} \cdot e_{\phi_1} = 0$$

$$\begin{aligned} D_{17} &= D_{71} = \frac{\nu}{2} \cdot (e_{\phi_1} + e_{\phi_2}) \cdot \sqrt{D_{66} \cdot D_{77}} \\ &= \frac{0,0328}{2} \cdot (0,393 + 0) \cdot \sqrt{1055,590 \cdot 10^6 \cdot 2505,84 \cdot 10^6} = 987,0 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$D_{38} = D_{83} = \frac{1}{2} \cdot G \cdot h \cdot (e_{\phi_1} + e_{\phi_2}) = \frac{1}{2} \cdot 11 \cdot 10^9 \cdot 0,2 \cdot (0,393 + 0) = 46390,2 \text{ kNm/m}$$

☐ Querschnittswerte (ungerissener und gerissener Zustand)			
☐ Berücksichtigung von Schwinden			
☐ Berechnung des Verteilungsbeiwertes			
☐ Endquerschnittswerte			
☐ Steifigkeitsmatrix des Materials			
☐ Biegesteifigkeit			
in 1. Bewehrungsrichtung	D ₁₁	3656,74	kNm
in 2. Bewehrungsrichtung	D ₂₂	7344,18	kNm
Quereinfluss	D ₁₂	170,58	kNm
Torsion	D ₃₃	2505,84	kNm
☐ Schubsteifigkeit			
in 1. Bewehrungsrichtung	D ₄₄	1966670,0	kN/m
in 2. Bewehrungsrichtung	D ₅₅	1966670,0	kN/m
☐ Membransteifigkeit			
in 1. Bewehrungsrichtung	D ₆₆	1055590,0	kN/m
in 2. Bewehrungsrichtung	D ₇₇	2204240,0	kN/m
Quereinfluss	D ₆₇	50210,6	kN/m
Torsion	D ₈₈	2360000,0	kN/m
☐ Exzentrizität			
in 1. Bewehrungsrichtung	D ₁₆	41499,2	kNm/m
in 2. Bewehrungsrichtung	D ₂₇	0,0	kNm/m
Quereinfluss	D ₁₇	987,0	kNm/m
Torsion	D ₃₈	46390,2	kNm/m

Bild 2.125: Steifigkeitsmatrix des Materials

2.8 Nichtlineare Nachweismethode

2.8.1 Allgemeines

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) gliedert sich im Allgemeinen in folgende drei Untergruppen:

- 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)

Die Bemessung im Stahlbetonbau basiert in der Regel auf linearen Tragwerksanalysen: Zur Bewehrungsermittlung einschließlich Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden die Schnittgrößen linear ermittelt; anschließend erfolgt der Querschnittsnachweis. Dieses Vorgehen jedoch berücksichtigt die für den Stahlbeton typische Rissbildung mit den entsprechenden nichtlinearen Stahlbetonstoffgesetzen nur auf der Querschnittsebene.

Mit der Erfassung des nichtlinearen Stahlbetonverhaltens bei der Schnittgrößenermittlung erhält man wirklichkeitsnahe Spannungszustände und folglich Schnittgrößenverteilungen, die sich bei statisch unbestimmten Systemen wegen Steifigkeitsumlagerungen deutlich von den linear ermittelten Schnittgrößen unterscheiden. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bedeutet dies, dass für eine realitätsnahe Berechnung von Verformungen, Spannungen und Rissbreiten das nichtlineare Materialverhalten des Stahlbetons berücksichtigt werden muss.

Bleibt die Rissbildung bei der Verformungsberechnung unberücksichtigt, so werden die auftretenden Verformungen unterschätzt. Mit Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden kann sich durchaus die drei- bis achtfache Verformung einstellen – je nach Beanspruchungszustand und Randbedingungen. Das Zusatzmodul **RF-BETON NL** ermöglicht die wirklichkeitsnahe Berechnung der Verformungen, Rissbreiten und Spannungen von Stahlbetonflächen, indem das nichtlineare Materialverhalten bei der Schnittgrößenermittlung berücksichtigt wird.

2.8.2 Gleichungen und Berechnungsnäherungen

2.8.2.1 Theoretische Ansätze

Unter einer „Nichtlinearen Berechnung“ wird die Schnittgrößen- und Verformungsermittlung mit Berücksichtigung des nichtlinearen Schnittgrößen-Verformungs-Verhaltens (physikalisch) verstanden.

Flächentragwerke lassen sich als zweidimensionale Tragwerksstrukturen mit den Zustandsgrößen Flächenlasten, Verformungen, Schnittgrößen und Verzerrungen in den Flächenschwerpunkten beschreiben. Da jedoch für das nichtlineare Stahlbetonmodell Materialeigenschaften erfasst werden müssen, die über die Flächenhöhe variieren, wird eine Erweiterung des 2D-Modells durch eine zusätzliche Erfassung der Querschnittshöhe notwendig. Der Stahlbetonquerschnitt wird in eine gewisse Anzahl von Stahl- und Betonschichten unterteilt – die so genannten „Layer“ (siehe [Bild 2.126](#) auf folgender Seite).

Ausgehend von den Verzerrungen in den Flächenschwerpunkten ergeben sich unter der Annahme der Normalenhypothese je Schicht die Dehnungen, die nach Anwendung eines entsprechenden Stahl- oder Betonstoffgesetzes zu den Spannungen führen. Die resultierenden Spannungen je Schicht lassen sich dann zu den Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts aufintegrieren.

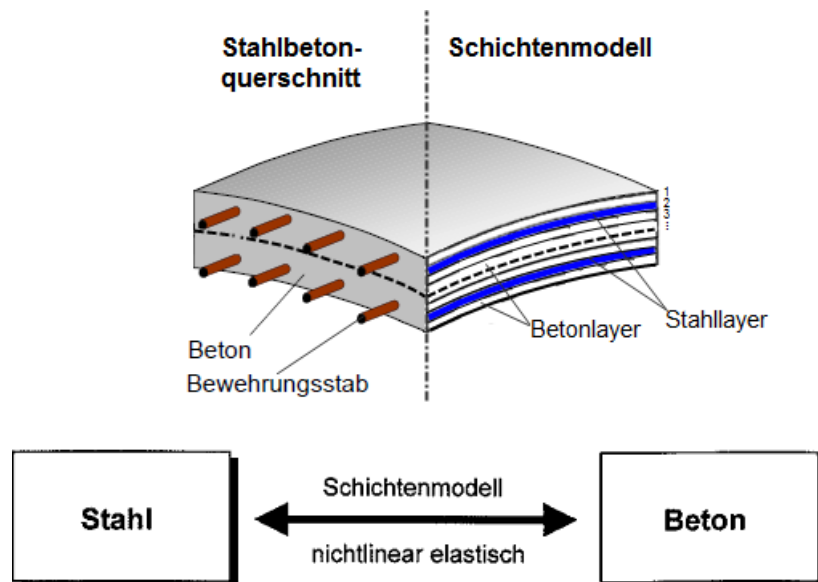


Bild 2.126: Schichtenmodell für Stahlbetonflächen

Wird in einem Punkt des Tragwerks die Zugfestigkeit des Betons erreicht, so entsteht eine Diskontinuität in Form eines Risses. Streng genommen würde diese eine Anpassung der Diskretisierung (*remeshing*) erfordern, damit jeder Riss in seiner tatsächlichen Lage und Ausdehnung in die Berechnung eingeht. Bei mehreren Rissen stiege bei dieser Methode der numerische Aufwand stark an, da jeder Riss eine Erhöhung der Elementanzahl zur Folge hätte. Deshalb werden auftretende Risse innerhalb eines Elements „verschmiert“ und die steifigkeitsmindernden Einflüsse der Risse durch Anpassung des Werkstoffgesetzes bei der Berechnung berücksichtigt.

Erreicht die erste Hauptspannung in einer Betonschicht die Betonzugfestigkeit, so entsteht ein Riss senkrecht zur ersten Hauptspannungsrichtung. Bei einer Laständerung kann sich diese Hauptrichtung verändern. Hierbei kann man die Annahme treffen, dass sich ein entstandener Riss in der Lage und Orientierung nicht ändert (das so genannte *fixed crack model*) oder dass ein Riss immer orthogonal zu den variablen Hauptrichtungen verläuft (*rotation crack model*). RF-BETON NL verwendet das *rotation crack model*.

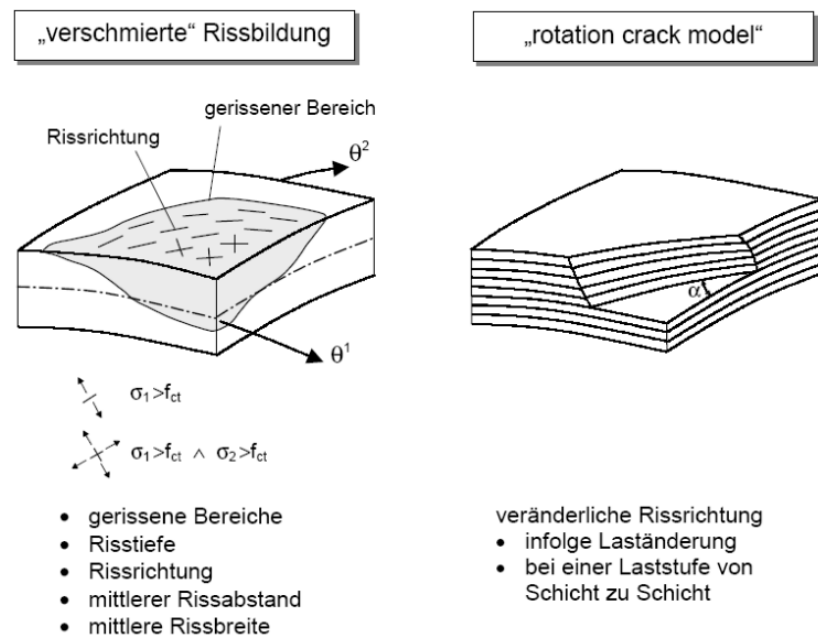


Bild 2.127: Rissmodellierung bei Stahlbeton-Flächenelementen

2.8.2.2 Ablaufdiagramm

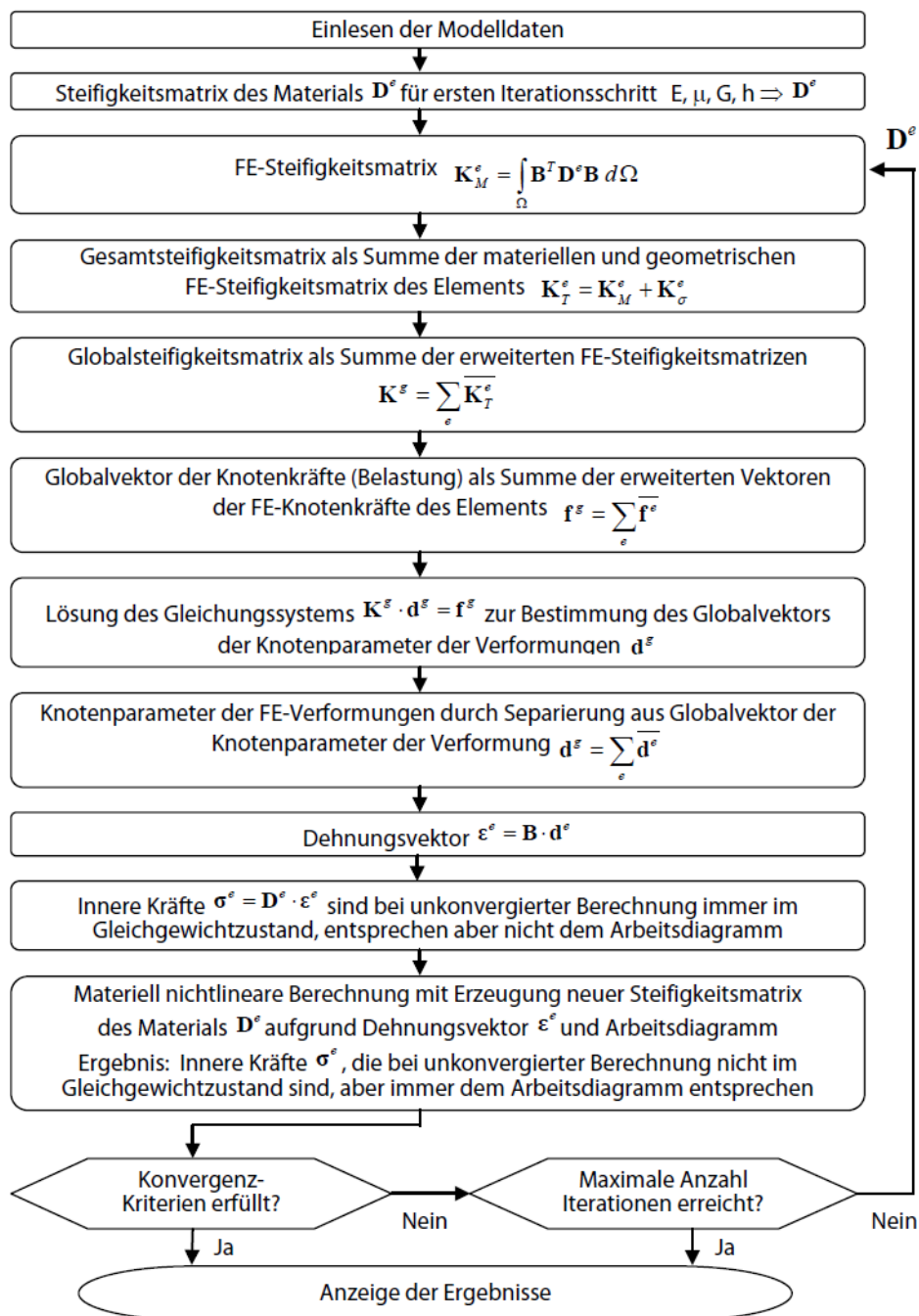


Bild 2.128: Ablaufdiagramm

mit

- D^e Steifigkeitsmatrix des Materials, konstitutive Matrix
- B Matrix aufgrund der Geometrie und des Basistyps der FE-Funktion $\epsilon^e = B \cdot d^e$
- K_M^e Materielle FE-Steifigkeitsmatrix
- K_σ^e Geometrische FE-Steifigkeitsmatrix
- K_T^e FE-Gesamtsteifigkeitsmatrix
- K^g Globale Steifigkeitsmatrix des Gesamtmodells
- f^e FE-Knotenkräftevektor

- f^g Globaler Knotenkräftevektor (Belastung auf Gesamtmodell), Vektor der rechten Seiten
- d^e Knotenparametervektor der FE-Verformung
- d^g Globaler Knotenparametervektor der Verformung, Vektor der Unbekannten
- ϵ^e Dehnungsvektor
- σ^e Vektor der inneren Kräfte

2.8.2.3 Lösungsmethoden für nichtlineare Gleichungen

Der Ansatz der FE-Methode zur Lösung der nichtlinearen Differenzgleichungen führt zu algebraischen Gleichungen, die in folgender Form formuliert werden können:

$$K(d) \cdot d = f \quad (2.90)$$

mit

- K Steifigkeitsmatrix des Modells
- d Vektor der Unbekannten (gewöhnlich der Knotenparameter der Verformung)
- f Vektor der rechten Seiten (gewöhnlich der Knotenkräfte)

Die Matrix K ist die Funktion von d und kann somit ohne Kenntnis des Vektors der Systemwurzeln d nicht bewertet werden. Da dieses nichtlineare System direkt nicht gelöst werden kann, werden Iterationsverfahren eingesetzt, die auf einem fortschreitenden Präzisieren der Lösung basieren.

RF-BETON NL benutzt das Iterationsverfahren nach PICARD. Diese Methode ist auch unter den Bezeichnungen *Direktes Iterationsverfahren* oder *Sekantenmodulverfahren* bekannt.

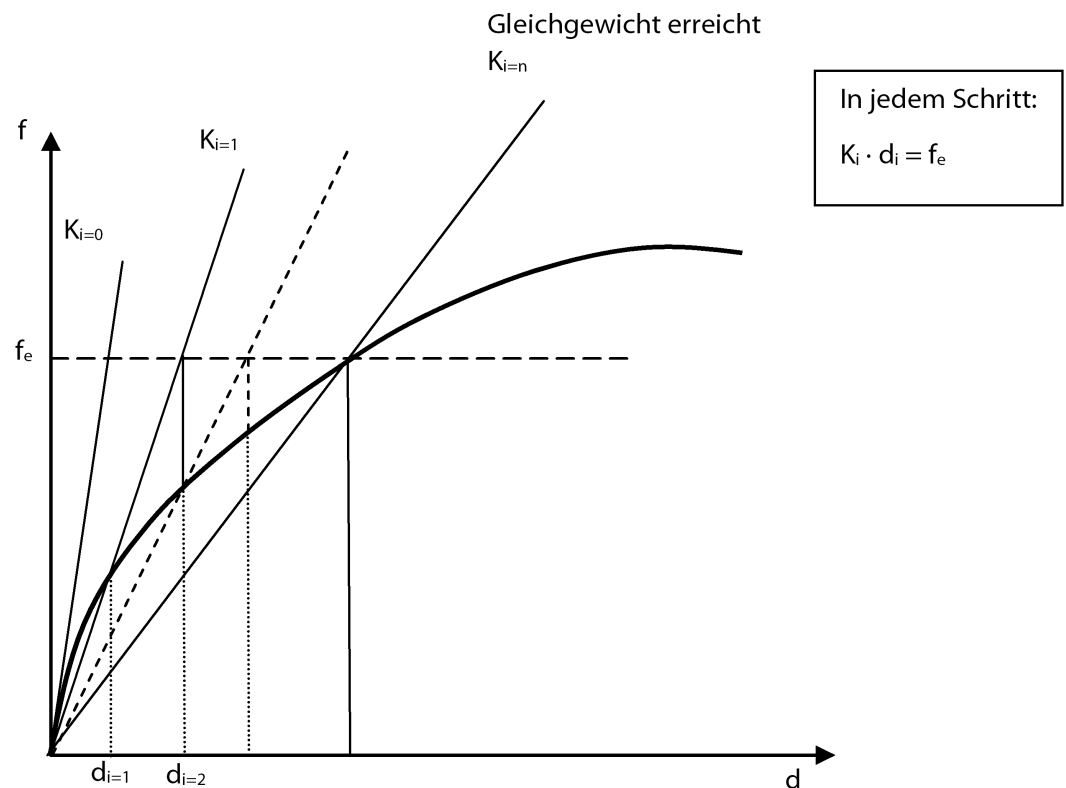


Bild 2.129: Direktes Iterationsverfahren

2.8.2.4 Konvergenzkriterien

Bei der Lösung der nichtlinearen Gleichungen werden zwei Konvergenzkriterien betrachtet. Der Iterationsschritt gilt als abgeschlossen, sobald ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Das erste Konvergenzkriterium verfolgt die Änderung der diagonalen Glieder der Steifigkeitsmatrix des Materials. Wenn sich die Steifigkeitsmatrix des Materials bei allen finiten Elementen stabilisiert hat, ist eine Konvergenz erreicht.

$$D_{tot}^{i-1} = \begin{bmatrix} D_j^{i-1} & & \\ & \dots & \\ & & D_n^{i-1} \end{bmatrix} \quad D_{tot}^i = \begin{bmatrix} D_j^i & & \\ & \dots & \\ & & D_n^i \end{bmatrix} \quad \frac{\sum_{j=1}^n |D_j^i - D_j^{i-1}|}{\sum_{j=1}^n D_j^{i-1}} \leq \epsilon \quad (2.91)$$

mit

- D_{tot}^{i-1} Steifigkeitsmatrix des Materials aus dem vorangegangenen Iterationsschritt
- D_{tot}^i Steifigkeitsmatrix des Materials im aktuellen Iterationsschritt
- ϵ Gewünschte Genauigkeit (für RFEM-Genauigkeit 1 gilt: $\epsilon = 0,05\%$)

Das zweite Konvergenzkriterium verfolgt die Änderung der Größe der maximalen Verformung. Gleichzeitig wird kontrolliert, ob sich der Ort der maximalen Verformung innerhalb der Struktur verändert hat. Da die Verformung in der Regel schneller konvergiert als die Steifigkeitsmatrix, wird das Verformungskriterium erst nach 50 Iterationsschritten (für RFEM-Genauigkeit 1) aktiviert.

$$\frac{d_{\max}^i - d_{\max}^{i-1}}{d_{\max}^{i-1}} < \epsilon \quad \text{mit} \quad N_{\max}^i = N_{\max}^{i-1} \quad (2.92)$$

mit

- d_{\max}^{i-1} Maximale Knotenverschiebung aus dem vorangegangenen Iterationsschritt
- d_{\max}^i Maximale Knotenverschiebung der Struktur im aktuellen Iterationsschritt
- ϵ Gewünschte Genauigkeit (für RFEM-Genauigkeit 1 gilt: $\epsilon = 0,05\%$)
- N_{\max}^{i-1} Nummer des Knotens mit Maximalverschiebung aus vorangegangenem Iterationsschritt
- N_{\max}^i Nummer des Knotens mit Maximalverschiebung aus aktuellem Iterationsschritt



Die Genauigkeit der Konvergenzschranke für die nichtlineare Berechnung und den Zeitpunkt, nach welchem Iterationsschritt das Verformungskriterium zusätzlich betrachtet wird, ist im Register *Globale Berechnungsparameter* des RFEM-Dialogs *Berechnungsparameter* hinterlegt. Dieser Dialog ist auch in RF-BETON Maske 1.1 *Basisangaben* zugänglich:

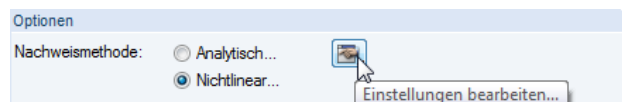


Bild 2.130: Schaltfläche [Einstellungen bearbeiten] in Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Gebrauchstauglichkeit*

Es erscheint der Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* (siehe folgendes Bild).



Über die Schaltfläche [Details] kann dann der RFEM-Dialog *Berechnungsparameter* aufgerufen werden.

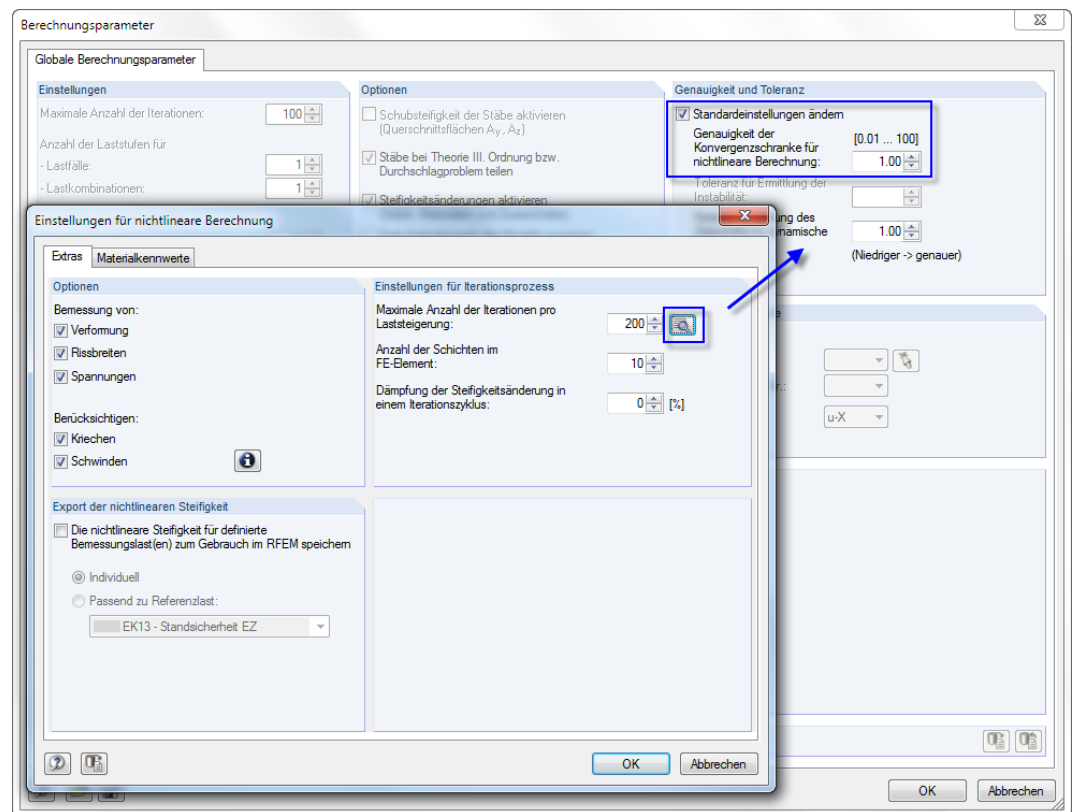


Bild 2.131: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* mit Zugriffsmöglichkeit auf Konvergenzkriterium von RFEM

Der im RFEM-Dialog angegebene Wert für die *Genauigkeit der Konvergenzschranke* („RFEM-Genauigkeit“) beeinflusst die Abbruchschranke ϵ für die physikalisch nichtlineare Berechnung und den Iterationsschritt n_i , ab dem das Verformungskriterium zusätzlich betrachtet wird:

$$\epsilon = \text{„RFEM-Genauigkeit“} \cdot 0,05 \% \quad n_i = \frac{1}{\text{„RFEM-Genauigkeit“}} \cdot 50$$

Der Standardwert der RFEM-Genauigkeit ist 1. Damit liegt die Genauigkeit der Konvergenzschranke für die physikalische Nichtlinearität bei $\epsilon = 0,05\%$ und die zusätzliche Betrachtung des Verformungskriteriums beginnt nach dem 50. Iterationsschritt. Für eine höhere Genauigkeit ist der Wert der RFEM-Genauigkeit zu verringern. Dadurch wird ϵ kleiner und das Verformungskriterium wird zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt.

2.8.3 Materialkennwerte

2.8.3.1 Beton im Druckbereich

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird mit den mittleren Festigkeiten der Materialien gerechnet. Im Druckbereich ist es möglich, zwischen einem parabelförmigen und einem parabel-rechteckförmigen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie zu wählen.

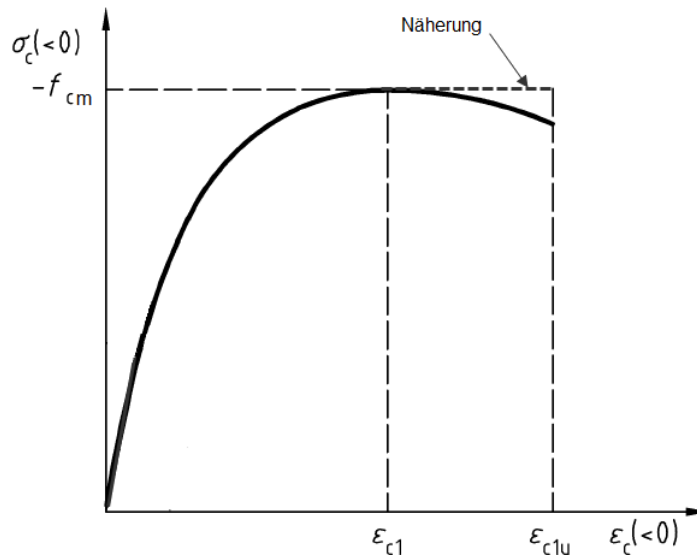


Bild 2.132: Spannungs-Dehnungslinie für Beton im Druckbereich



Die Einstellungen sind im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Materialkennwerte* zu treffen (siehe Bild 3.11, Seite 132). Dieser Dialog ist im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske 1.1 *Basisangaben* über die links dargestellte Schaltfläche zugänglich (siehe Bild 2.130).

2.8.3.2 Beton im Zugbereich

Für die Spannungs-Dehnungslinie des Betons im Zugbereich stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl.

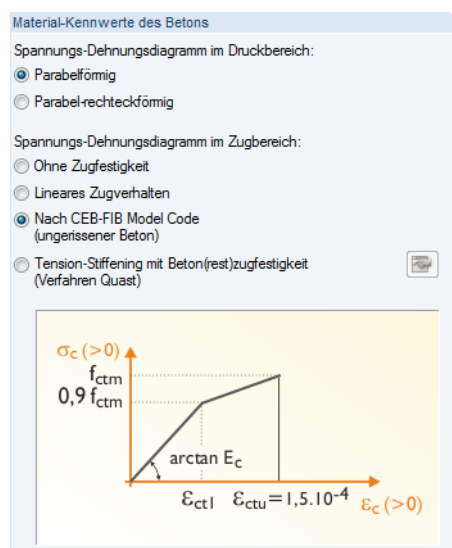


Bild 2.133: Spannung-Dehnungsdiagramme für Zugbereich des Betons

Die Betonzugfestigkeit kann unter anderem gemäß CEB-FIP Model Code 90:1993 berücksichtigt werden. Dabei wird bis zum Erreichen der Betonzugfestigkeit f_{ctm} der im Bild 2.134 dargestellte Verlauf zum Erreichen der Rissdehnung von 0,15‰ angenommen.

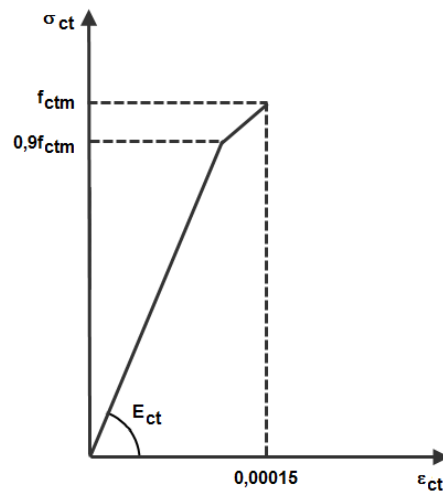


Bild 2.134: Spannungs-Dehnungsline für Beton im Zugbereich gemäß CEB-FIP Model Code 90:1993

Alternativ kann die versteifende Mitwirkung des Betons in der Zugzone (*Tension Stiffening*) angesetzt werden. Dieses Verfahren ist im folgenden Kapitel beschrieben.

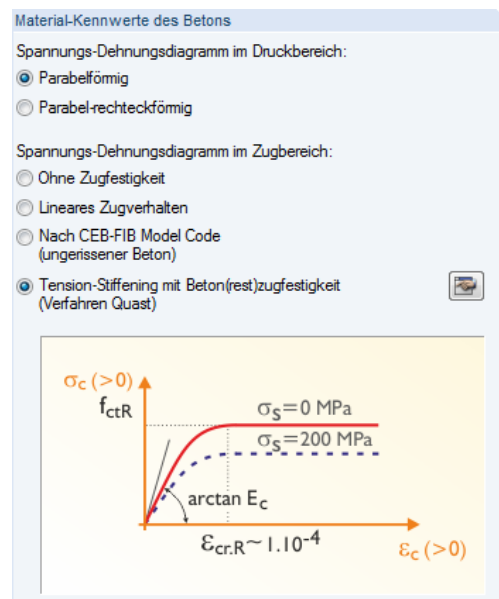


Bild 2.135: Spannungs-Dehnungsdiagramm für *Tension Stiffening*

2.8.3.3 Versteifende Wirkung des Betons in Zugzone

Bei gerissenen Stahlbetonteilen werden die Zugkräfte im Riss allein durch die Bewehrung aufgenommen. Zwischen zwei Rissen werden jedoch Zugspannungen über den (verschieblichen) Verbund in den Beton eingeleitet. Somit beteiligt sich der Beton an der Aufnahme innerer Zugkräfte, was zu einer Erhöhung der Steifigkeit des Bauteils führt. Dieser Effekt wird als versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen oder auch als *Tension Stiffening* bezeichnet.

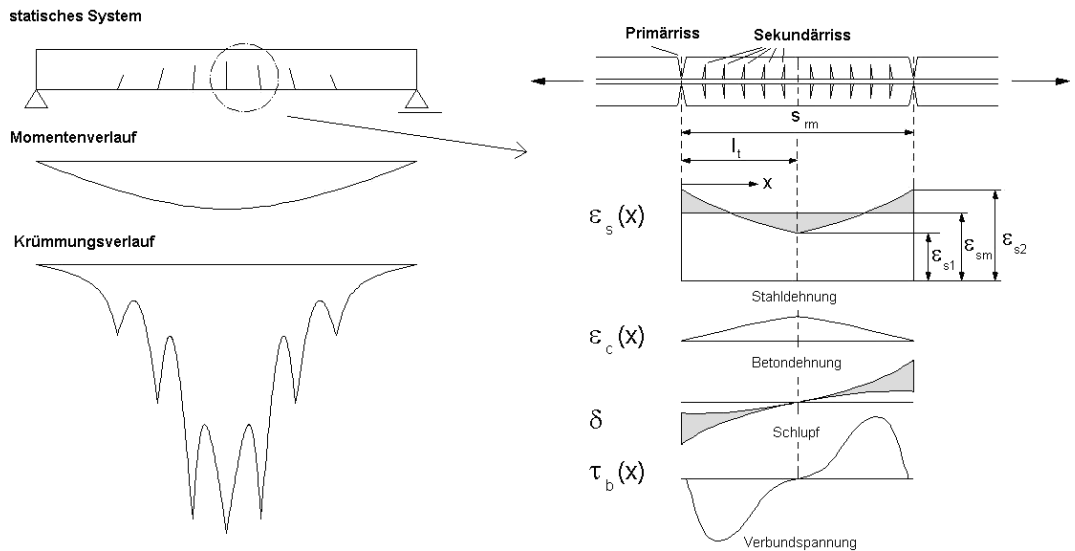


Bild 2.136: Spannungs- und Dehnungsverhalten zwischen zwei Primärrissen

Die Berücksichtigung einer Erhöhung der Bauteilsteifigkeit durch die Zugversteifung kann auf zwei Arten erfolgen:

- Es kann eine verbleibende, konstante Restzugspannung, welche nach der Rissbildung erhalten bleibt, in der Betonarbeitslinie involviert werden. Die Restzugspannung ist dabei deutlich kleiner als die Zugfestigkeit des Betons. Alternativ können auch modifizierte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für den Zugbereich eingeführt werden, die über einen abfallenden Ast nach Erreichen der Zugfestigkeit das Mitwirken des Betons auf Zug zwischen den Rissen beachten.
- Eine weitere Variante stellt die Änderung der „nackten“ Arbeitslinie des Betonstahls dar. Hierbei wird im betrachteten Querschnitt eine verringerte Stahlidehnung ϵ_{sm} , die sich aus ϵ_{s2} und einem Abzugsterm infolge der Zugversteifung ergibt, angesetzt.

RF-BETON NL verwendet für die Berücksichtigung von *Tension Stiffening* den Ansatz über die Modellierung der Betonzugfestigkeit nach QUASt [4]. Dieses Modell basiert auf einer definierten Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Zugbereich (Parabel-Rechteck-Diagramm). Die grundlegenden Annahmen des Ansatzes von QUASt können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Volle Mitwirkung des Betons auf Zug bis zum Erreichen der Rissdehnung ϵ_{cr} bzw. der rechnerischen Betonzugfestigkeit $f_{ct,R}$
- Reduzierte versteifende Mitwirkung des Betons in der Zugzone entsprechend der vorhandenen Betondehnung
- Kein Ansatz von *Tension Stiffening* nach dem Einsetzen des Fließens des maßgebenden Bewehrungsstabes

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die rechnerische Zugfestigkeit $f_{ct,R}$ **keine** fixe Größe ist, sondern sich auf die vorhandene Dehnung in der maßgebenden Stahl(zug)faser bezieht. Die

maximale Zugfestigkeit $f_{ct,R}$ nimmt ab der definierten Rissdehnung ϵ_{cr} bis zum Erreichen der Fließdehnung des Bewehrungsstahls in der maßgebenden Stahlfaser linear auf null ab. Erreicht wird dies durch die in Bild 2.137 gezeigte Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich des Betons (Parabel-Rechteck-Diagramm) und die Ermittlung eines Reduktionsfaktors VMB (Versteifende Mitwirkung des Betons).

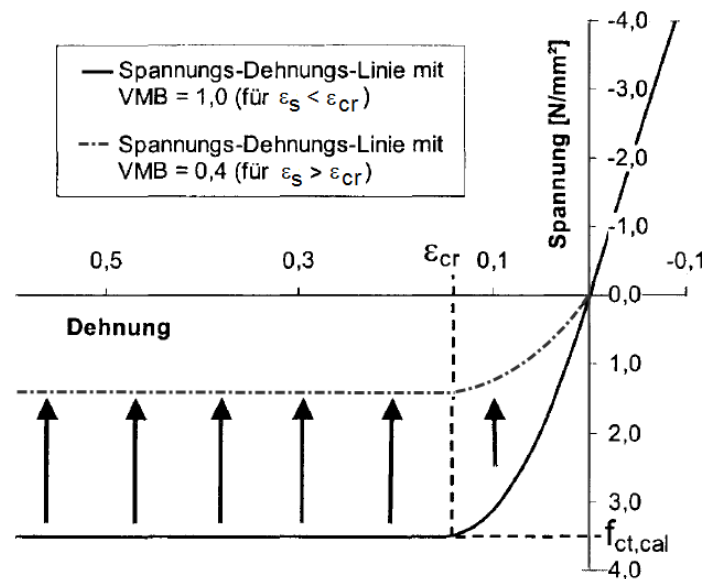


Bild 2.137: Spannungs-Dehnungs-Linie von Beton im Zugbereich mit Reduktionsfaktor VMB = 0,4

Die Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich kann mit folgenden Gleichungen beschrieben werden.

$$\sigma_c = VMB \cdot \left[f_{ct,R} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_{cr}} \right) \right) \right] \quad \text{für } 0 < \epsilon < \epsilon_{cr}$$

$$\sigma_c = VMB \cdot f_{ct,R} \quad \text{für } \epsilon > \epsilon_{cr} \text{ (konstanter Verlauf)} \quad (2.93)$$

Die Völligkeit der Parabel im ersten Abschnitt kann durch den Exponenten n_{PR} gesteuert werden. Der Exponent sollte so angepasst werden, dass der Übergang vom Druck- in den Zugbereich möglichst mit gleichem E-Modul erfolgt.

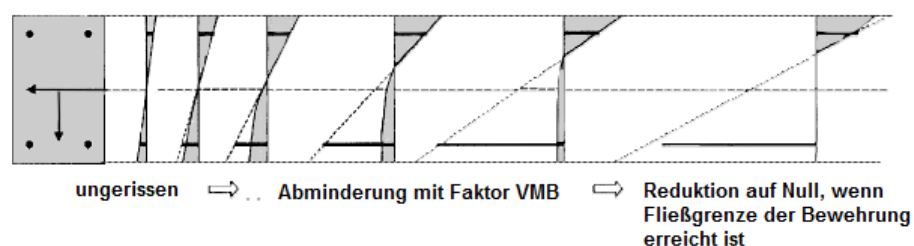
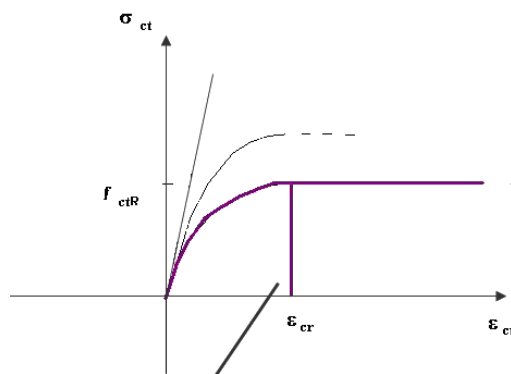


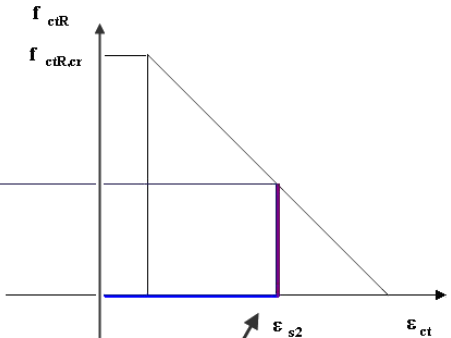
Bild 2.138: Spannungszustände für steigende Beanspruchung mit *Tension Stiffening*

Zur Bestimmung des Reduktionsfaktors VMB wird die Dehnung an der am stärksten gezogenen Stahlfaser verwendet. Die Lage des Referenzpunkts ist in Bild 2.139 dargestellt.

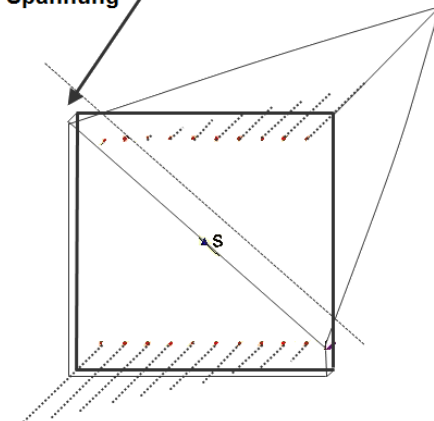
Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Zugbereich



Abminderungsbeiwert in Abhängigkeit zur Stahldehnung in der maßgebenden Faser



Spannung



Dehnung

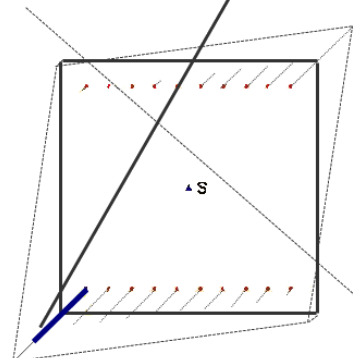


Bild 2.139: Bestimmung der Restzugfestigkeit für Tension Stiffening nach QUAST [4]

Der Abminderungsfaktor VMB nimmt mit steigender Stahldehnung ab. Im Diagramm für den Faktor VMB (siehe folgendes Bild 2.140) ist ersichtlich, dass der Faktor VMB genau zum Fließbeginn der Bewehrung auf null reduziert wird.

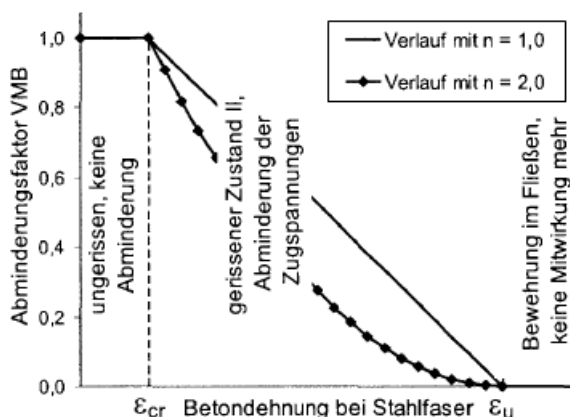


Bild 2.140: Abminderungsfaktor VMB

Der Verlauf für den Abminderungsfaktor VMB im Zustand II ($\epsilon > \epsilon_{cr}$) kann über den Exponenten n_{VMB} gesteuert werden. Erfahrungswerte sind nach PFEIFFER [5] die Werte $n_{VMB} = 1$ (linear) bis $n_{VMB} = 2$ (Parabel) für biegebeanspruchte Bauteile. QUAST [6] benutzt in seinem Modell den Exponenten $n_{VMB} = 1$ (linear) und erzielt damit gute Übereinstimmungen bei der Nachrechnung von Stützenversuchen. Nach PFEIFFER [5] lassen sich mit $n_{VMB} = 2$ reine Zugversuche mit akzeptabler Übereinstimmung abbilden.

Die Annahme eines Parabel-Rechteck-Diagramms für die gerissene Betonzugzone ist als Rechenhilfe zu betrachten. Auf den ersten Blick bestehen große Unterschiede zu experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungslinien auf der Zugseite des reinen Betons.

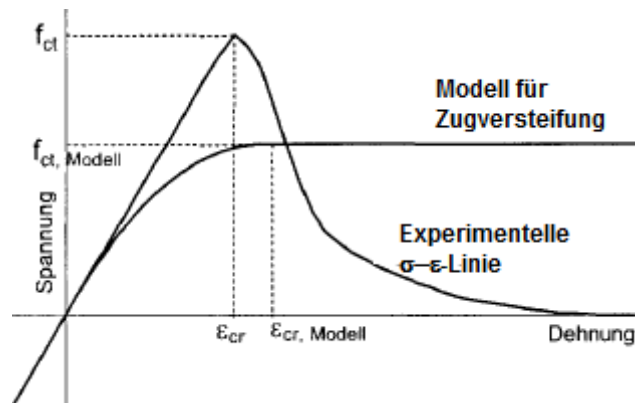


Bild 2.141: Vergleich von Modell und Laborversuch

Bei der Betrachtung der vorhandenen Spannungen im biegebeanspruchten Stahlbetonquerschnitt zeigt sich, dass das Parabel-Rechteck-Diagramm durchaus besser in der Lage ist, die Dehnungen und Spannungen im Mittel zu beschreiben.

Bei einem Biegebalken bildet sich zwischen zwei Rissen ein Betonkörper. Dieser wirkt als eine Art Scheibe, in die durch die Bewehrung allmählich wieder Zugkräfte eingeleitet werden. Dadurch stellt sich ein sehr unregelmäßiger Verlauf von Spannung und Dehnung ein. Im Mittel lässt sich jedoch eine Dehnungsebene mit einem Parabel-Rechteck-Verlauf erstellen, durch den die mittlere Verkrümmung erfasst werden kann.

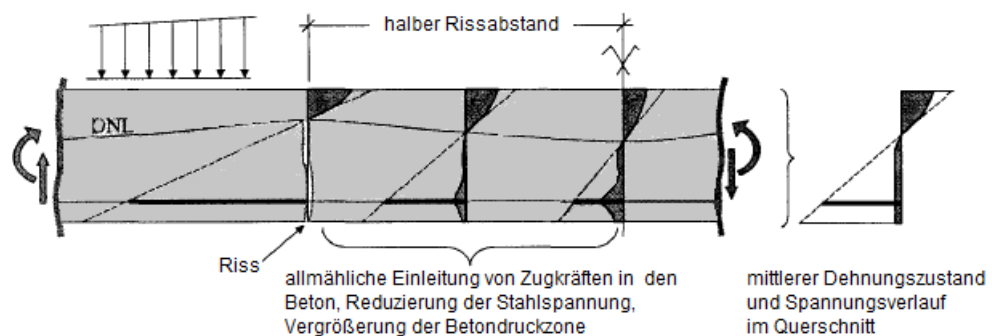


Bild 2.142: Vorhandener Spannungszustand bei Biegung

Die Höhe des anzusetzenden Rechenwertes für die Zugfestigkeit $f_{ct,R}$ und die Rissdehnung $\epsilon_{cr,R}$ für das Modell von QAST hat dieser folgendermaßen vorgeschlagen.

$$f_{ct,R} = \left| \frac{1}{20} \cdot f_{cm} \right| \quad \epsilon_{cr,R} = \left| \frac{1}{20} \cdot \epsilon_{c1} \right| \quad (2.94)$$

Der Rechenwert für die Zugfestigkeit $f_{ct,R}$ ist somit kleiner als die Vorgaben des Eurocodes. Dies ist begründet durch die Beschreibung der Arbeitslinie und der Ermittlung des Reduktionsfaktors VMB, bei der die angenommene Zugspannung und die resultierende Zugkraft nach Überschreitung der Zugdehnung nur langsam abgemindert werden. Bei einer Dehnung von $2 \cdot \epsilon_{cr}$ ergibt sich noch eine wirkende Zugspannung von etwa $0,95 \cdot f_{ct,R}$. Damit kann bei Biegebeanspruchung die Reduzierung der Steifigkeit gut vorhergesagt werden. Bei einer reinen Zugbeanspruchung sind die o. g. Werte für $f_{ct,R}$ zu gering. Hier sollten nach PFEIFFER [5] die Werte aus EC 2 für den Rechenwert der Zugfestigkeit angesetzt werden.

Die von QUAST [6] empfohlenen Werte für $f_{ct,R} = \frac{1}{20} \cdot f_{cm}$ sind durch den Ansatz von 60 % der in EC 2 angegebenen Zugfestigkeiten zu erreichen. Bei dem Ansatz von $f_{ct,R} = 0,6 \cdot f_{ctm}$ wird einerseits das Aufreißen des Querschnittes zu früh vorhergesagt. Andererseits ist aber dadurch eine Reduktion der Zugfestigkeit unter Dauerlast (ca. 70 %) oder eine temporär höhere Last (z. B. das kurzzeitige Aufbringen der seltenen Einwirkungskombination), die zu einer geschädigten Zugzone führt, bereits berücksichtigt.

Die einzelnen Rechenwerte für die Zugzone des Betons lassen sich wie folgt beschreiben:

$$f_{ct,R} = 0,60 \cdot f_{ct, Norm} \quad \text{Rechnerische Zugfestigkeit}$$

$$\nu = \left| \frac{f_{cm}}{f_{ct, Norm}} \right| \quad \text{Verhältniswert, Hilfswert}$$

$$\epsilon_{cr,R} = \left| \frac{\epsilon_{c1}}{\nu} \right| \quad \text{Rechnerische Rissdehnung}$$

$$n_{PR} = 1,1 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad \text{Exponent für allgemeine Parabel (siehe Gleichung 2.93)} \quad (2.95)$$

2.8.3.4 Betonstahl

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird mit den mittleren Festigkeiten der Materialien gerechnet. Die mittleren Betonstahlfestigkeiten wurden vom Ausschuss JCSS im *Probabilistic Model Code* veröffentlicht. Dort wird der Mittelwert der Streckgrenze des Betonstahls mit $f_{ym} = 1,1 \cdot f_{yk}$ vorgegeben.

RF-BETON NL verwendet für die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls einen bilinearen Verlauf.

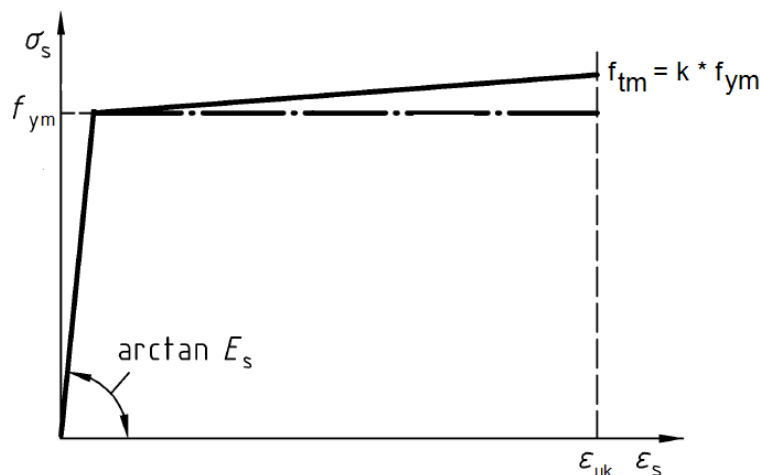


Bild 2.143: Spannungs-Dehnungsline von Betonstahl

Der Benutzer kann wählen, ob der plastische Ast horizontal verläuft oder bis zu f_{tm} ansteigt. Die Einstellungen werden im Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung* getroffen (siehe Bild 3.11, Seite 132). Dieser Dialog ist im Register *Gebrauchstauglichkeit* der Maske 1.1 *Basisangaben* über die links dargestellte Schaltfläche zugänglich.

2.8.4 Kriechen und Schwinden

2.8.4.1 Berücksichtigung von Kriechen

Das Kriechen beschreibt die zeitabhängige Verformung des Betons unter Belastung über einen bestimmten Zeitraum. Die wesentlichen Einflussgrößen ähneln denen des Schwindens (siehe [Kapitel 2.8.4.2](#)). Zusätzlich übt die so genannte „kriecherzeugende Spannung“ einen wichtigen Einfluss auf die Kriechverformungen aus.

Für das Kriechen sind die Dauer der Belastung, der Zeitpunkt der Lastaufbringung sowie die Höhe der Beanspruchung zu beachten. Das Kriechen wird durch die Kriechzahl $\phi(t, t_0)$ zum Zeitpunkt t erfasst.

In RF-BETON Flächen erfolgen die Angaben zur Ermittlung des Kriechbeiwerts in der Maske 1.3 *Flächen*. Dort sind das Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt und zu Belastungsbeginn, die relative Luftfeuchte sowie der Zementtyp zu bestimmen. Aus diesen Angaben wird die Kriechzahl ϕ vom Programm ermittelt.

Bild 2.144: Maske 1.3 *Flächen*, Register *Kriechen*

Die Ermittlung der Kriechzahl ϕ wird kurz gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 vorgestellt. Voraussetzung für nachfolgend beschriebene Gleichungen ist, dass die kriecherzeugende Spannung σ_c der einwirkenden Dauerlast folgenden Wert nicht überschreitet.

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ckj} \quad (2.96)$$

mit

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

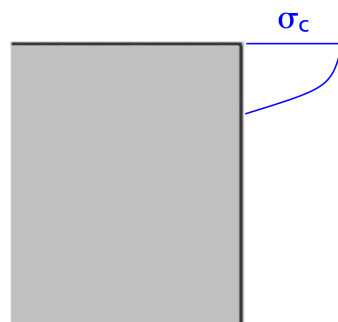


Bild 2.145: Kriecherzeugende Spannung σ_c

Unter Annahme eines linearen Kriechverhaltens ($\sigma_c < 0,45 \cdot f_{ckj}$) kann das Kriechen des Betons durch eine Abminderung des Beton-Elastizitätsmoduls erfasst werden.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1,0 + \phi(t, t_0)} \quad (2.97)$$

mit

E_{cm}	mittlerer Elastizitätsmodul nach EN 1992-1-1, Tabelle 3.1
$\phi(t, t_0)$	Kriechzahl
t	Betonalter zum untersuchten Zeitpunkt in Tagen
t_0	Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen

Gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 darf die Kriechzahl $\phi(t, t_0)$ zum untersuchten Zeitpunkt t wie folgt berechnet werden.

$$\phi(t, t_0) = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta(t, t_0) \quad (2.98)$$

mit

$$\phi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,10 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$$

RH Relative Luftfeuchte [%]

$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$ Wirksame Bauteildicke [mm] (bei Flächen: $h_0 = h$)

A_c Querschnittsfläche

u Querschnittsumfang

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

f_{cm} Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit

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

$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit

$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_{0,eff}^{0,2}}$ Beiwert zur Berücksichtigung des Betonalters

$$t_{0,eff} = t_0 \left[1 + \frac{9}{2 + t_0^{1,2}} \right]^\alpha \geq 0,5 \cdot d$$

$\beta(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0,3}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Belastungsdauer

t Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen

t_0 Betonalter zu Belastungsbeginn in Tagen

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

RH Relative Luftfeuchte [%]

h_0 Wirksame Bauteildicke [mm]

$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5}$ Anpassungsfaktor

Der Einfluss des Zementtyps auf die Kriechzahl des Betons kann berücksichtigt werden, indem das Belastungsalter t_0 mithilfe folgender Gleichung verändert wird.

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 + (t_{0,T})} \right)^\alpha \geq 0,5 \quad (2.99)$$

mit

- $t_0 = t_T$ wirksames Betonalter bei Belastungsbeginn unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur
 α Exponent in Abhängigkeit vom Zementtyp:
 –1 langsam erhärtende Zemente (S) (32,5)
 0 normal oder schnell erhärtende Zemente (N) (z. B. 32,5 R; 42,5)
 1 schnell erhärtende hochfeste Zemente (R) (42,5 R; 52,5)

Rechnerische Berücksichtigung des Kriechens

Sind die Dehnungen zum Zeitpunkt $t = 0$ sowie zu einem späteren Zeitpunkt t bekannt, kann der Kriechbeiwert ϕ zur rechnerischen Berücksichtigung im Modell bestimmt werden.

$$\phi_t = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t=0}} - 1 \quad (2.100)$$

Diese Gleichung wird nach der Dehnung zum Zeitpunkt t umgestellt. Es ergibt sich folgender Zusammenhang, der für konstante Spannungen (vgl. [Gleichung 2.96](#)) Gültigkeit besitzt:

$$\epsilon_t = \epsilon_{t=0} \cdot (\phi_t + 1) \quad (2.101)$$

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

Die Berechnung in RF-BETON NL benutzt eine gängige, für baupraktische Zwecke sinnvolle Lösung. Die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons wird um den Faktor $(1 + \phi)$ verzerrt.

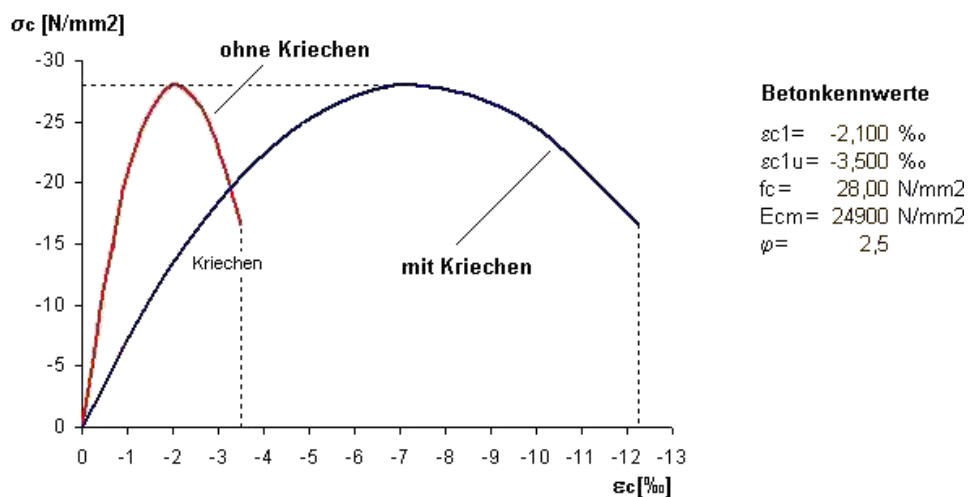


Bild 2.146: Verzerrung der Spannungs-Dehnungslinie zur Erfassung des Kriecheinflusses

Wie im [Bild 2.146](#) ersichtlich, handelt es sich bei der Berücksichtigung des Kriechens um den Fall konstanter kriechezeugender Spannungen über die Belastungszeit. Diese Annahme führt infolge nicht berücksichtigter Spannungsumlagerungen zu einer leichten Überschätzung der Verformung. Der Spannungsabbau ohne eine Dehnungsänderung (Relaxation) wird in diesem Modell 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 $(1 + \phi)$ ebenfalls widerspiegeln. Bei der nichtlinearen Spannungs-Dehnungsbeziehung geht dieser Zusammenhang jedoch verloren.

Damit wird deutlich, dass diese Vorgehensweise als Näherung zu verstehen ist. Eine Verminderung der Spannungen infolge Relaxation sowie nichtlineares Kriechen können somit nicht oder nur näherungsweise abgebildet werden.

2.8.4.2 Berücksichtigung von Schwinden

Als Schwinden wird eine zeitabhängige Änderung des Volumens ohne Einwirkung von äußeren Lasten oder Temperatur bezeichnet. 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 relative Luftfeuchte, wirksame Bauteildicke, Gesteinskörnung, Betonfestigkeit, Wasserzementwert, Temperatur sowie Art und Dauer der Nachbehandlung. Die Größe, durch die das Schwinden erfasst wird, ist die Gesamtschwinddehnung ϵ_{cs} zum betrachteten Zeitpunkt t .

Gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 setzt sich die Gesamtschwinddehnung ϵ_{cs} zusammen aus den Komponenten Trocknungsschwinden ϵ_{cd} und autogenes Schwinden ϵ_{ca} :

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad [7] \text{ Gl. (3.8)} \quad (2.102)$$

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

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad [7] \text{ Gl. (3.9)} \quad (2.103)$$

mit

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,4 \cdot \sqrt{h_0^3}} \quad [7] \text{ Gl. (3.10)} \quad (2.104)$$

t Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen

t_s Betonalter zu Beginn des Schwindens in Tagen

$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$ Wirksame Bauteildicke [mm] (bei Flächen: $h_0 = h$)

A_c Querschnittsfläche

u Querschnittsumfang

k_h Koeffizient gemäß [7] Tabelle 3.3 in Abhängigkeit von der wirksamen Querschnittsdicke h_0

$\epsilon_{cd,0}$ Grundwert gemäß [7] Tabelle 3.2 oder Anhang B, Gl. (B.11):

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

$\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$ Beiwerte zur Berücksichtigung der Zementart (siehe [Tabelle 2.3](#))

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

$f_{cmo} = 10 \text{ N/mm}^2$

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

RH Relative Luftfeuchte der Umgebung [%]

$RH_0 = 100\%$

Zement	Klasse	Merkmal	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5 N	S	Langsam erhärtend	3	0,13
32,5 R; 42,5 R	N	Normal erhärtend	4	0,12
42,5 R; 52,5 N/R	R	Schnell erhärtend	6	0,11

Tabelle 2.3: Beiwerte α_{ds1} und α_{ds2} in Abhängigkeit von der Zementart

Die **autogene Schwinddehnung** ϵ_{ca} ermittelt sich wie folgt.

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty) \quad [7] \text{ Gl. (3.11)} \quad (2.105)$$

mit

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}} \quad [7] \text{ Gl. (3.12)}$$

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad [7] \text{ Gl. (3.13)}$$

t in Tagen

Erfassung des Schwindens in RF-BETON NL (mit Berücksichtigung der Bewehrung)

Die Angaben zur Schwinddehnung erfolgen in Maske 1.3 *Flächen*. Dort sind das Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt und bei Schwindbeginn, die relative Luftfeuchte sowie der Zementtyp anzugeben. Aus diesen Vorgaben ermittelt RF-BETON dann die Schwinddehnung ϵ_{cs} .

Bild 2.147: Maske 1.3 *Flächen*, Register *Schwinden*

Die Schwinddehnung $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ lässt sich auch normenunabhängig manuell vorgeben.

Die Schwinddehnung wird nur auf die Betonlayer angesetzt; die Bewehrungslayer bleiben unberücksichtigt. Somit besteht ein Unterschied zur klassischen Temperaturbelastung, die auch auf die Bewehrungslayer wirkt. Das in RF-BETON NL verwendete Modell für Schwinden berücksichtigt somit die Behinderung der Schwinddehnung ϵ_{sh} , die durch die Bewehrung oder die Querschnittsverkrümmung bei unsymmetrischer Bewehrung ausgeübt wird. Die resultierenden Lasten aus der Schwinddehnung werden automatisch als virtuelle Lasten auf die Flächen aufgebracht und berechnet. Je nach statischem System führt die Schwinddehnung zu zusätzlichen Spannungen (statisch unbestimmtes System) oder zusätzlichen Verformungen (statisch bestimmtes System). RF-BETON NL berücksichtigt den Einfluss der statischen Randbedingungen deshalb in unterschiedlicher Weise für den Ansatz des Schwindens.

Die aus Schwinden resultierenden Lasten werden automatisch der in Maske 1.1 *Basisangaben* definierten Belastung für Gebrauchstauglichkeit zugeordnet und gehen somit in die nichtlineare Berechnung ein.

Das Schwinden hängt von der korrekten Verteilung der Steifigkeit im Querschnitt ab. Daher ist für den Zugbereich des Betons die Berücksichtigung von *Tension Stiffening* (Betonrestzugfestigkeit nach QUAST) und ein kleiner Wert für Dämpfung zu empfehlen.

Das folgende 1D-Modell veranschaulicht, wie das Schwinden im Programm erfasst wird.

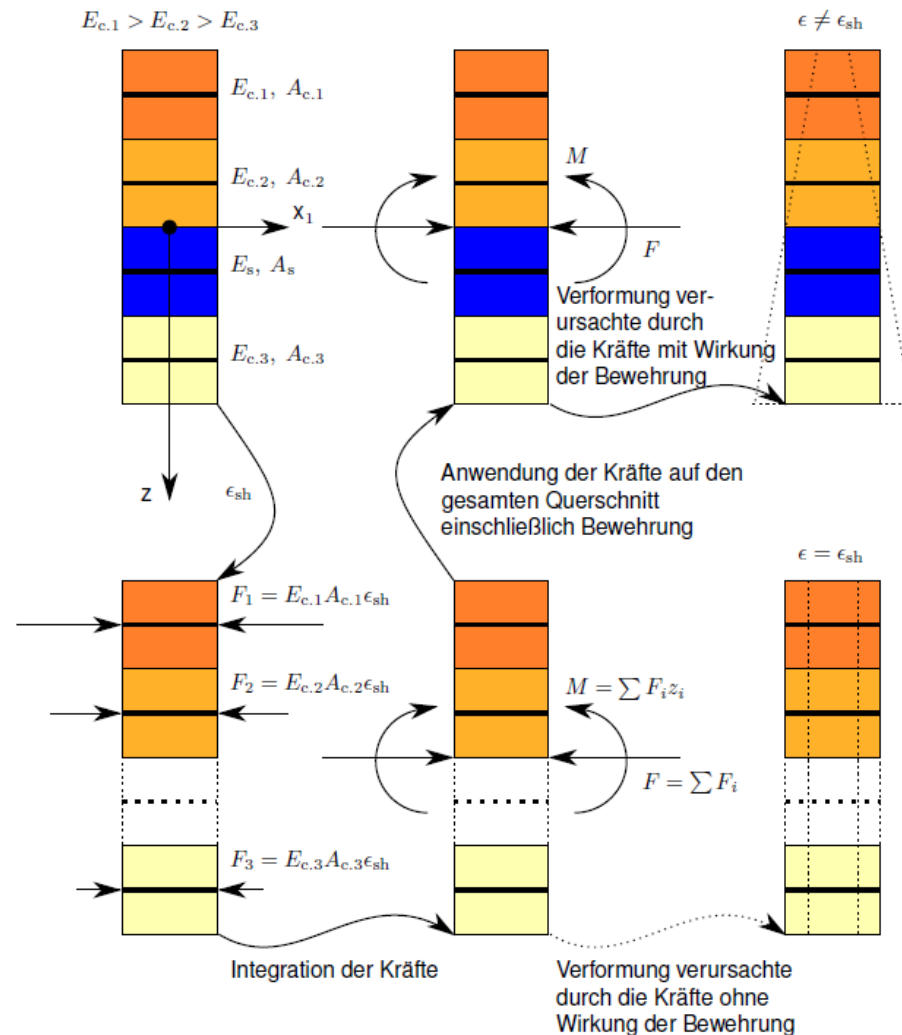


Bild 2.148: 1D-Beispiel für Schwinden

Vereinfacht werden vier Schichten betrachtet: Die dunkelorange Schichten repräsentieren den wenig beschädigten Beton, die hellorange Schichten den stärker beschädigten Beton. Die blaue Schicht entspricht der Bewehrung. Jede Betonschicht wird mit dem tatsächlichen E-Modul $E_{c,i}$ gekennzeichnet, jede Querschnittsfläche mit $A_{c,i}$. Die Bewehrung ist durch den tatsächlichen E-Modul E_s und die Querschnittsfläche A_s charakterisiert. Jede Schicht ist anhand der Koordinate z_i beschrieben.

Erfassung des Schwindens als äußere Last



Die Schwinddehnung kann auch in RFEM als äußere Last aufgebracht werden: Im RFEM-Dialog *Neue Flächenlast* ist über die links dargestellte Schaltfläche der Dialog *Flächenlast infolge Schwinden generieren* zugänglich.

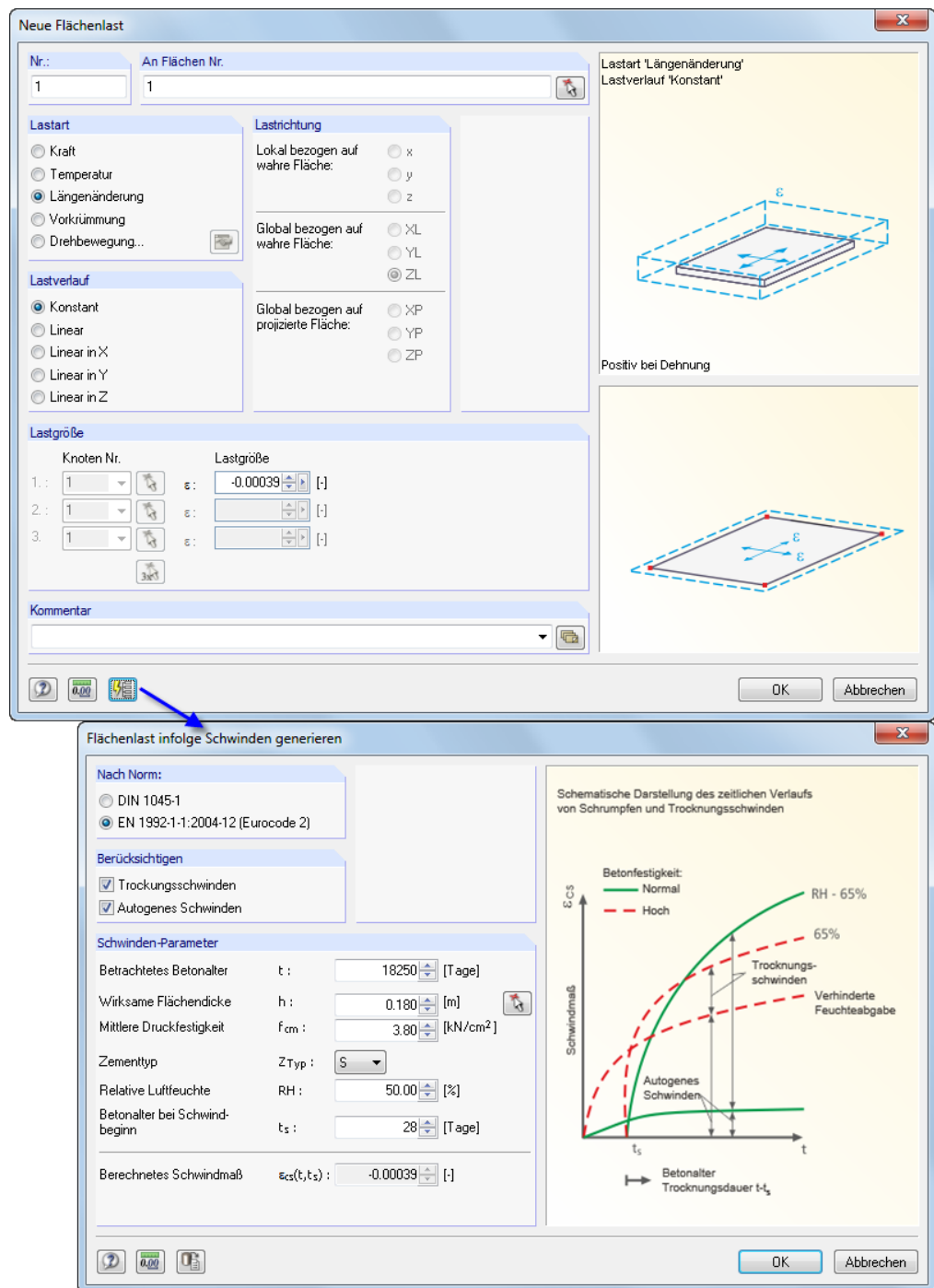


Bild 2.149: RFEM-Dialog *Flächenlast infolge Schwinden generieren*

In diesem Dialog können die Parameter zur Ermittlung der Schwinddehnung eingegeben werden. Mit [OK] wird das ermittelte Schwindmaß dann als Lastgröße in den Ausgangsdialog *Neue Flächenlast* übernommen. Die Lastart wird dabei automatisch auf *Längenänderung* gesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die Schwinddehnung auf den gesamten Querschnitt wirkt und etwaige Behinderungen oder Querschnittsverkrümmungen durch die Bewehrung nicht berücksichtigt werden.

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 187](#)).

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

- Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen
- Materialien
- Flächen
- 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-ALUMINIUM 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.

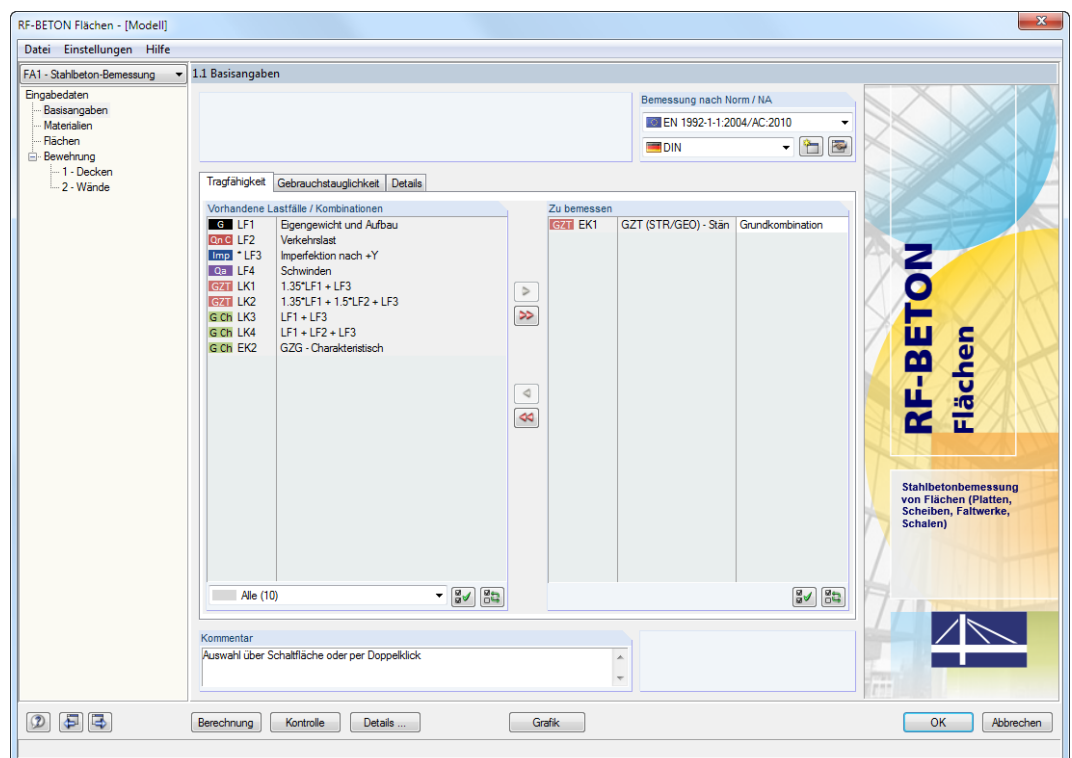


Bild 3.1: Maske 1.1 *Basisangaben*

Bemessung nach Norm / NA

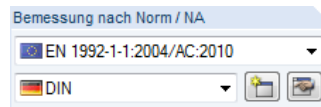


Bild 3.2: Norm und Nationaler Anhang für Stahlbetonbemessung

Norm

Es ist anzugeben, nach welcher Norm die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit erfolgen soll. Folgende Stahlbetonnormen stehen in der Liste zur Auswahl:

- EN 1992-1-1:2004/AC:2010 Europäische Union
- DIN 1045-1:2008-08 Deutschland
- DIN 1045:1988-07 Deutschland
- ACI 318-11 Vereinigte Staaten von Amerika
- SIA 262:2003 Schweiz
- GB 50010-2010 China

Jede Norm kann separat erworben werden.

Nationaler Anhang

Für die Bemessung nach Eurocode (EN 1992-1-1:2004/AC:2010) ist der Nationale Anhang festzulegen, dessen Parameter für die Nachweise gelten.

CEN	EU
BDS	Bulgarien
BS	Vereinigtes Königreich
CSN	Tschechien
CYS	Zypern
DIN	Deutschland
DK	Dänemark
LST	Litauen
NBN	Belgien
NEN	Niederlande
NF	Frankreich
NP	Portugal
PN	Polen
SFS	Finnland
SingaporeS	Singapur
SIST	Slowenien
SR	Rumänien
STN	Slowakei
SvenskS	Schweden
UNE	Spanien
UNI	Italien
ÖNORM	Österreich

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



Über die Schaltfläche [Bearbeiten] können die voreingestellten Werte eingesehen werden.

Parameter des Nationalen Anhangs

Norm: Stahlbeton (EN 1992-1-1)

Ursprünglicher Anhang: DIN EN 1992-1-1

Bezeichnung:

2. Grundlagen für die Tragwerksplanung			
2.4.2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Eigenschaften von Baustoffen			
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ständige, vorübergehende)	γ_c	1.5000	
Teilsicherheitsbeiwert für Stahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ständige, vorübergehende)	γ_s	1.1500	
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Außergewöhnlich)	γ_c	1.3000	
Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Außergewöhnlich)	γ_s	1.0000	
Teilsicherheitsbeiwert für Beton im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	γ_c	1.0000	
Teilsicherheitsbeiwert für Stahl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	γ_s	1.0000	
3. Baustoffe			
3.1 Beton			
Maximal zulässige Betondruckfestigkeitsklasse	C_{max}	C100/115	
Beiwert zur Berücksichtigung Langzeiteinwirkung auf Druckfestigkeit	α_{cc}	0.8500	
Beiwert zur Berücksichtigung Langzeiteinwirkung auf Zugfestigkeit	α_{ct}	0.8500	
3.2 Betonstahl			
Maximalwert für die Streckgrenze	f_{yk}	500.00	N/mm ²
Designwertes der Grenzdehnung Betonstahl	ϵ_{ud}	0.025	
4. Dauerhaftigkeit und Betondeckung			
4.4.1 Mindestbetondeckung für Betonstahl			
Modifikationen der Anforderungsklasse			
Mindestbetondeckung			
Additives Sicherheitselement zur Erhöhung der Mindestbetondeckung			
Abminderungsbeiwert bei Verwendung von rostfreiem Stahl	$\Delta c_{dur,st}$	0.00	mm
Abminderungsbeiwert für Beton mit zusätzlichem Schutz			
Erhöhungswerte bei Verschleißbeanspruchung			
Erhöhungswert	k_1	5.00	mm
Erhöhungswert	k_2	10.00	mm
Erhöhungswert	k_3	15.00	mm
Vorhaltemaß			
Erhöhungswerte bei Betonage gegen unebene Flächen			
Erhöhungswert			
Erhöhungswert			

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 angepasst werden. Hierzu ist zunächst über die Schaltfläche [Neu] eine Kopie des aktuellen Nationalen Anhangs zu erzeugen. In diesem benutzerdefinierten Anhang können die Parameter dann geändert werden.

Kommentar

Kommentar

Tragfähigkeitsnachweis nach NA Deutschland

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

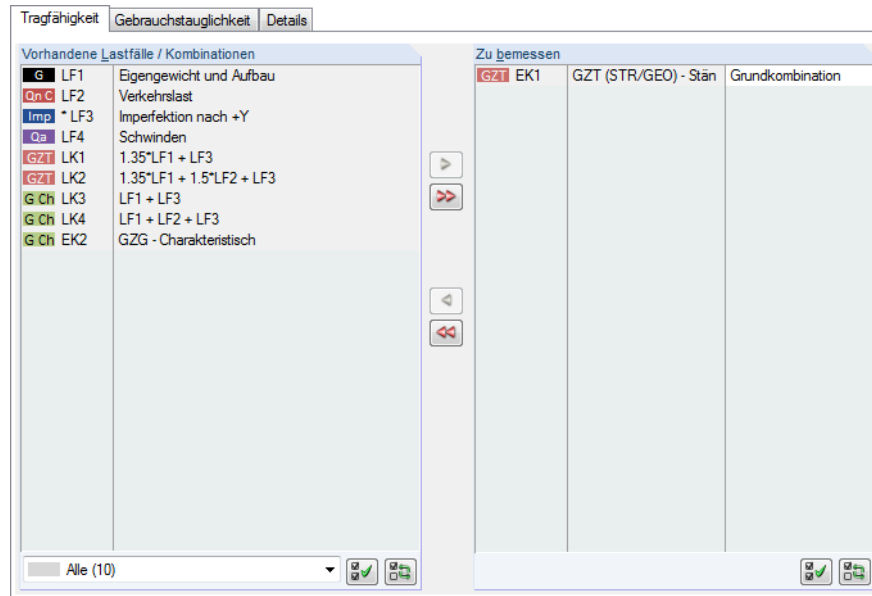


Bild 3.6: Maske 1.1 Basisangaben, Register *Tragfähigkeit*

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

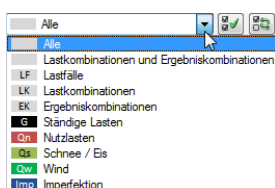
In dieser Spalte sind alle Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die in RFEM angelegt wurden.

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 komplette Liste nach rechts.

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

Falls ein Lastfall mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet ist wie z. B. LF 3 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 mehrere 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 im Register *Lastkombinationen*


Zu bemessen

In der rechten Spalte werden die zur Bemessung gewählten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet. 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:

- *Grundkombination*
- *Außergewöhnlich*

Diese Einteilung steuert die Teilsicherheitsbeiwerte γ_c und γ_s nach EN 1992-1-1, Tabelle 2.1 (siehe Bild 3.4, Seite 126 und Bild 3.37, Seite 154).

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

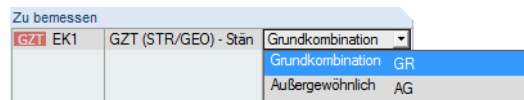


Bild 3.7: Bemessungssituation zuweisen

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

Die Bemessung einer einhüllenden Max/Min-Ergebniskombination verläuft schneller als die aller pauschal übernommenen Lastfälle und Lastkombinationen. Beim Nachweis einer Ergebniskombination ist aber nur schwer erkennbar, welchen Einfluss die enthaltenen Einwirkungen ausüben (siehe auch Kapitel 4.1, Seite 157).

3.1.2 Gebrauchstauglichkeit

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

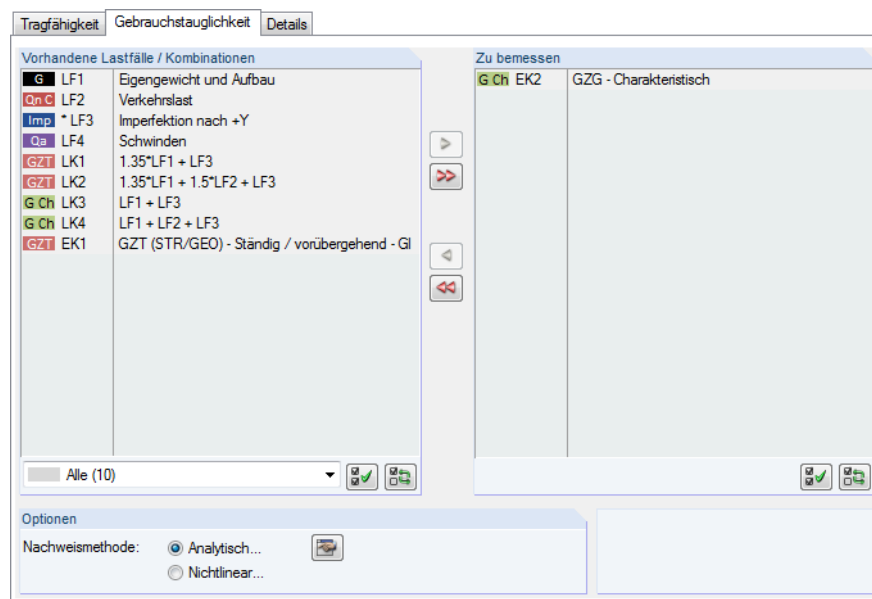


Bild 3.8: Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit

Vorhandene Lastfälle / Kombinationen

In diesen beiden Abschnitten sind alle Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen aufgelistet, die in RFEM angelegt wurden.

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.

Nachweismethode

Die beiden Auswahlfelder steuern, ob die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach analytischer oder nichtlinearer Methode geführt werden.

3.1.2.1 Analytische Nachweismethode

Nachweismethode: ☒ Analytisch...
☐ Nichtlinear...

Für den Nachweis ist die Methode *Analytisch* voreingestellt. Nach diesem Verfahren werden die Gleichungen verwendet, die in den Stahlbetonnormen genannt sind. Diese Methode ist im [Kapitel 2.6](#) des Handbuchs ab [Seite 66](#) beschrieben.



Die Schaltfläche [Einstellungen] öffnet einen Dialog, in dem die Nachweisparameter überprüft und bei Bedarf angepasst werden können.

Einstellungen für analytische Methode der Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Methode

- ☒ Durch Annahme eines identischen Dehnungsverhältnisses der Längsbewehrung
- ☐ Durch Klassifizierung der Fläche als Platte oder Wand und Verwendung des Ablaufdiagramms aus dem Anhang A 2.8 bzw. A 2.9 zum ENV 1992-1-1:1991
- ☐ Durch Berücksichtigung des Verformungsverhältnisses der Längsbewehrung

Einordnungskriterium

☐ Normalkräfte zu Null setzen und Nachweisen einer Fläche ausschließlich als Platte, wenn für alle Bemessungspunkte dieser Fläche gilt:

$$\frac{n_x}{b \cdot h} \text{ und } \frac{n_y}{b \cdot h} \text{ und } \frac{n_{xy}}{b \cdot h} \leq 2.90 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

☐ Momente zu Null setzen und Nachweisen einer Fläche ausschließlich als Wand, wenn für alle Bemessungspunkte dieser Fläche gilt:

$$\frac{6 \cdot m_x}{b \cdot h^2} \text{ und } \frac{6 \cdot m_y}{b \cdot h^2} \text{ und } \frac{6 \cdot m_{xy}}{b \cdot h^2} \leq 2.90 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Bemessung von

- ☒ Rissen
- ☒ Spannungen
- ☐ Verformung mit RF-BETON Deflect

Berücksichtigen:

- ☐ Kriechen
- ☐ Schwinden
- ☐ Tension Stiffening

Bestimmung der Längsbewehrung

- ☐ Erforderliche Längsbewehrung für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis automatisch erhöhen
- ☐ Wirtschaftlichste Bewehrung für Rissbreitennachweis finden

OK Abbrechen

Bild 3.9: Dialog *Einstellungen für analytische Methode der Gebrauchstauglichkeitsnachweise*

Methode

Dieser Abschnitt regelt, welches Dehnungsverhältnis der Bewehrungsscharen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis angesetzt wird.

Die *Annahme eines identischen Dehnungsverhältnisses der Längsbewehrung* geht von einem gleichen Dehnungsverhältnis der eingelegten Bewehrung aus: Alle Bewehrungsstäbe erfahren in die einzelnen Bewehrungsrichtungen die gleiche Dehnung. Dieser Ansatz stellt ein schnelles und genaues Verfahren dar. Dabei spielt die Wahl der Druckstrebenneigung eine entscheidende Rolle. Diese Methode basiert auf einer rein geometrischen Aufteilung (siehe [Kapitel 2.6, Seite 66](#)). Sie ist gültig, wenn die vorhandene Bewehrung in etwa der erforderlichen Bewehrung entspricht.

Die *Klassifizierung der Fläche als Platte oder Wand* bietet eine vereinfachte Lösung, die bei einem nicht gedrehten, orthogonalen Bewehrungsnetz benutzt werden kann: Für jeden Bemessungspunkt wird überprüft, ob die Zugspannungen aus Normalkräften bzw. Biegemomenten eine bestimmte Spannung nicht überschreiten. Der Grenzwert der Spannung ist im Abschnitt *Einordnungskriterium* anzugeben. Damit lässt sich steuern, ob die Fläche als Platte (Normalkräfte werden zu null gesetzt) oder Wand (Momente werden zu null gesetzt) bemessen wird.

Durch die Vernachlässigung kleiner Schnittgrößenanteile ist es möglich, das Ablaufdiagramm des ENV 1992-1-1, Anhang A 2.8 bzw. 2.9 zu benutzen. Die Bemessungsschnittgrößen entsprechen dabei den Werten, die in der RFEM-Tabelle 4.16 ausgewiesen sind (siehe Kapitel 8.16 des RFEM-Handbuchs).

Sollte das Klassifizierungskriterium für einen Bemessungspunkt der Fläche nicht erfüllt sein, erscheint bei der Berechnung eine Fehlermeldung.

Die Option *Berücksichtigung des Verformungsverhältnisses der Längsbewehrung* ist nur bei 2D-Modelltypen zugänglich (siehe [Bild 2.1](#), [Seite 7](#)). Diese Methode erfasst die tatsächlichen Dehnungsverhältnisse, die sich mit der gewählten Bewehrung einstellen und berücksichtigt sie für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Bemessung von

In diesem Abschnitt kann festgelegt werden, ob Spannungen und/oder Risse im Nachweis untersucht werden sollen. Es ist mindestens eines der Kontrollfelder zu aktivieren.

Bei der Bemessung der *Spannungen* erfolgt der Nachweis der Betondruckspannungen σ_c und der Stahlspannungen σ_s . Im Zuge der Analyse von *Rissen* ist es möglich, die Mindestbewehrungen $a_{s,min}$, die Grenzdurchmesser $lim\ d_s$, die maximalen Rissabstände $max\ s_l$ sowie die Rissbreiten w_k nachzuweisen. Die Einstellungen zu den einzelnen Nachweisen können in Maske 1.3 *Flächen* vorgenommen werden (siehe [Kapitel 3.3](#), [Seite 138](#)).

Des Weiteren ist es möglich, die *Verformung mit RF-BETON Deflect* unter Berücksichtigung von Kriechen, Schwinden und Tension Stiffening zu berechnen (siehe [Kapitel 2.7](#) ab [Seite 89](#)). Hierfür wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-BETON Deflect** benötigt.

Bestimmung der Längsbewehrung

Das Kontrollfeld *Erforderliche Längsbewehrung automatisch erhöhen* steuert, ob zur Erfüllung der Gebrauchstauglichkeitsnachweise die Längsbewehrung ausgelegt werden soll. Ist dieses Kontrollfeld deaktiviert, so werden nur die Vorgaben der Maske 1.4, Register *Längsbewehrung* verwendet (siehe [Kapitel 3.4.3](#), [Seite 150](#)): Grundbewehrung, erforderliche Bewehrung aus Tragfähigkeitsnachweis oder Grundbewehrung mit ausgelegter Zusatzbewehrung.

Die Auslegung der Bewehrung für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt durch eine iterative Bewehrungserhöhung. Als Startwert der Iteration wird die erforderliche Tragbewehrung zur Aufnahme der vorgegebenen Gebrauchslast angesetzt. Die Bewehrungsauslegung endet ohne Ergebnis, wenn der Stababstand s_l der angesetzten Bewehrung den Stabdurchmesser d_{sl} erreicht hat. In diesem Fall wird in den Ergebnismasken für diesen Punkt eine Unbemessbarkeit ausgegeben.



Bei der Bemessung nach EN 1992-1-1 besteht die Möglichkeit, die *Wirtschaftlichste Bewehrung für Rissbreitennachweis finden* zu lassen. Über die [Info]-Schaltfläche lassen sich Erläuterungen zu diesem Verfahren anzeigen (siehe folgendes Bild). Im Dialog *Informationen* ist beschrieben, wann der Rissbreitennachweis als erfüllt gilt. Ferner ist in EN 1992-1-1, Abschnitt 7.2 erläutert, unter welchen Bedingungen die Spannungen zu begrenzen sind.



Dies bedeutet, dass nicht alle in Maske 3.1 ausgewiesenen Ausnutzungen kleiner als 1 sein müssen, damit der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ist.

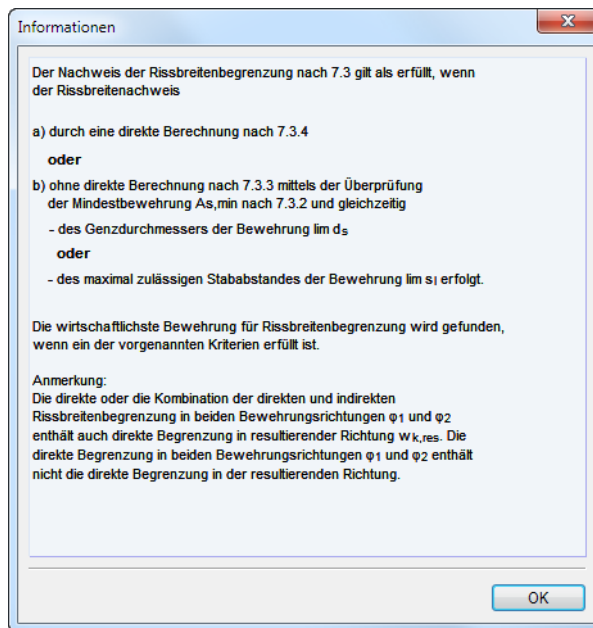


Bild 3.10: Dialog *Informationen* zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Bewehrung

Die Auslegung der Bewehrung im Hinblick auf die Beton- und Stahlspannung, den Grenzdurchmesser und den maximalen Stababstand erfolgt separat für jede Bewehrungsrichtung. Ist jedoch zur Erfüllung des Rissbreitennachweises die resultierende Rissbreite $w_{k,res}$ maßgebend, wird die Bewehrungsmenge bei der Auslegung gleichermaßen für jede Richtung erhöht.

Kriterien des Nachweises, die aus wirtschaftlichen Gründen nicht erfüllt sein müssen, sind in den Gebrauchstauglichkeitsnachweis-Ergebnismasken mit dem Hinweis 236) gekennzeichnet: „Nachweis der Bewehrungslagen muss aus wirtschaftlichen Gründen nicht erfüllt sein“. Der für die wirtschaftlichste Bewehrung maßgebende Rissbreitennachweis ist mit dem Hinweis 235) markiert: „Der Nachweis begrenzt die Bewehrungserhöhung aus wirtschaftlichen Gründen“. Diese Meldung gilt für die Nachweise für $\lim d_s$, $\lim s_1$ und w_k , nicht jedoch für $a_{s,min}$.

Ist das Kontrollfeld *Wirtschaftlichste Bewehrung für Rissbreitennachweis* finden angehakt, kann in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* keine benutzerdefinierte Zusatzbewehrung für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis definiert werden.

Einordnungskriterium

Dieser Abschnitt steht nur bei 3D-Modelltypen zur Verfügung. Die Kontrollfelder steuern, ob kleine *Normalkräfte* und/oder *Momente* vernachlässigt werden dürfen, um Flächen idealisiert als reine Platten (Haken im oberen Feld) oder Wände (Haken im unteren Feld) nachzuweisen. Als Grenzwert ist jeweils der Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} von $2,9\text{N/mm}^2$ eines Beton C30/37 voreingestellt: Es liegt die Annahme zugrunde, dass die Betonzugfestigkeit eine Rissbildung infolge kleiner Zugspannungen kompensiert, sodass diese vernachlässigt werden können.

Wurde links im Abschnitt *Methode* die Klassifizierung als Platte oder Wand gewählt, so muss mindestens eines der beiden Einordnungskriterien aktiviert werden.

3.1.2.2 Nichtlineare Nachweismethode

Nachweismethode: ☐ Analytisch... ☒ Nichtlinear...



Für die Nachweismethode *Nichtlinear* wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-BETON NL** benötigt. Diese Methode ist im [Kapitel 2.8](#) ab [Seite 104](#) beschrieben. Es wird eine physikalische und geometrische nichtlineare Berechnung durchgeführt.

Das nichtlineare Nachweisverfahren geht von einer Interaktion zwischen Modell und Beanspruchung aus, die eine eindeutige Schnittgrößenverteilung erfordert. Deshalb können nur Lastfälle und Lastkombination untersucht werden, keine Ergebniskombinationen (EK). Bei einer Ergebniskombination liegen zwei Werte pro FE-Knoten vor – Maximum und Minimum.

Die Schnittgrößen nach nichtlinearer Nachweismethode werden in der Regel nach Theorie II. Ordnung ermittelt.



Die Schaltfläche [Einstellungen] öffnet einen Dialog, in dem die Nachweisparameter überprüft und bei Bedarf angepasst werden können. Dieser Dialog ist in die beiden Register *Extras* und *Materialkennwerte* unterteilt.

Extras

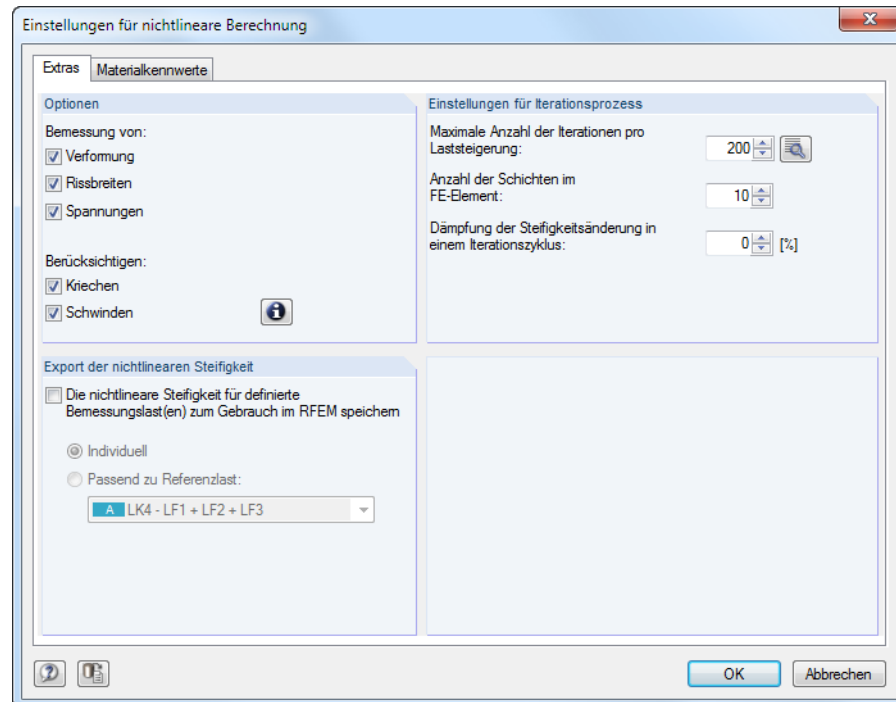


Bild 3.11: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Extras*

Optionen

Dieser Abschnitt steuert, welche Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu führen sind: Verformung, Rissbreiten, Spannungen. Mindestens eines der drei Kontrollfelder muss angehakt sein.

Des Weiteren kann festgelegt werden, ob der Einfluss von Kriechen und Schwinden bei der nichtlinearen Berechnung berücksichtigt werden soll.

Die genauen Vorgaben zu den einzelnen Nachweisen sowie zu Kriechen und Schwinden sind in Maske 1.3 *Flächen* zu treffen (siehe [Kapitel 3.3.2, Seite 141](#)).

Export der nichtlinearen Steifigkeiten

Das Kontrollfeld *Nichtlineare Steifigkeit* speichern steuert, ob die nichtlinear ermittelten Steifigkeiten auch für eine Berechnung in RFEM zur Verfügung stehen.

Die Steifigkeiten lassen sich *Individuell* für jeden bemessenen Lastfall exportieren. Im RFEM-Dialog *Lastfälle und Kombinatorik bearbeiten* kann dann jedem dieser Lastfälle die entsprechende Steifigkeit aus RF-BETON Flächen zugewiesen werden. RFEM ordnet dabei die Lastfälle automatisch zu. Bei der Option *Passend zu Referenzlast* ist in der Liste der maßgebende Lastfall festzulegen. In RFEM kann dann die aus diesen Lasten resultierende Steifigkeit allen Lastfällen zugeordnet werden, die definiert sind.

Die Berücksichtigung nichtlinearer Steifigkeiten in RFEM ist im Kapitel 7.3.1.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Einstellungen für Iterationsprozess

Die Vorgaben in diesem Abschnitt beeinflussen den Ablauf des nichtlinearen Bemessungsverfahrens. Nähere Erläuterungen finden Sie im [Kapitel 2.8.2.4](#) auf [Seite 108](#).



Bei der Änderung der Iterationsgenauigkeit ist darauf zu achten, dass die *Maximale Anzahl der Iterationen* größer ist als die Stelle im Berechnungsablauf, ab der zusätzlich das Verformungskriterium berücksichtigt wird. Über die Schaltfläche [Details] ist der RFEM-Dialog *Berechnungsparameter* zugänglich. Dort kann die Genauigkeit der Konvergenzschranke für die nichtlineare Berechnung angepasst werden.

Bei der nichtlinearen Berechnung wird die Fläche in so genannte *Schichten* (Layer) aufgeteilt (siehe [Kapitel 2.8.2.1](#), [Seite 104](#)). Die empfohlene Anzahl der Schichten liegt bei 10.

Das Konvergenzverhalten kann zudem über die *Dämpfung* beeinflusst werden: Die Dämpfung steuert, wie groß die Steifigkeitsänderung in den nachfolgenden Rechenschritten ist. Ist z. B. eine Dämpfung von 50 % vorgegeben, so kann die Änderung der Steifigkeit zwischen Schritt 2 und 3 höchstens 50 % der Steifigkeitsänderung sein, die sich zwischen Schritt 1 und 2 ergibt.

Materialkennwerte

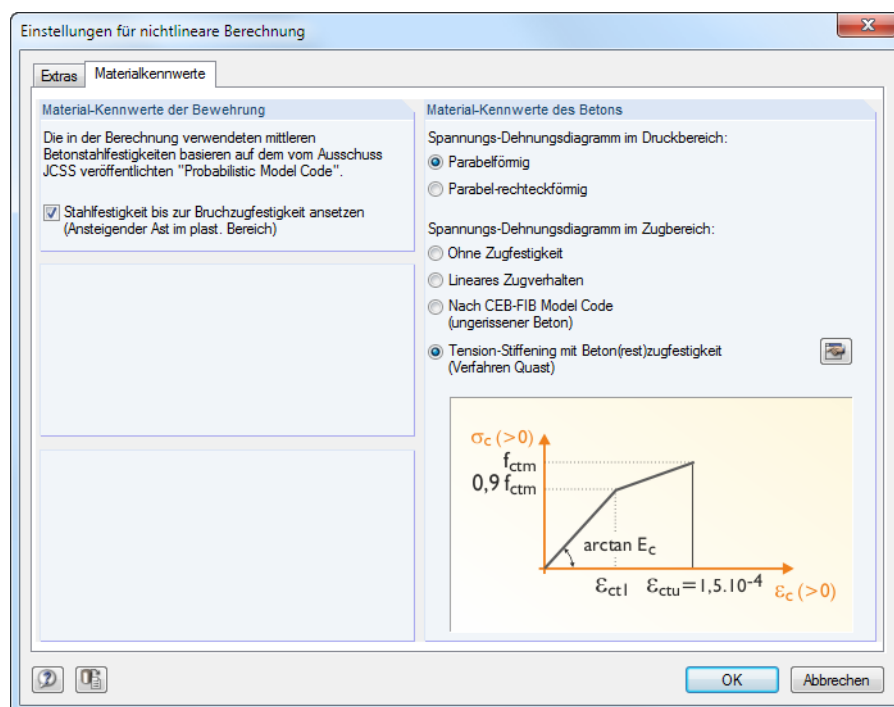


Bild 3.12: Dialog *Einstellungen für nichtlineare Berechnung*, Register *Materialkennwerte*

Material-Kennwerte der Bewehrung

Das Kontrollfeld steuert, ob im plastischen Bereich der Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls mit einem ansteigenden oder mit einem horizontalen Ast gerechnet wird (siehe [Kapitel 2.8.3.4](#), [Seite 116](#)).

Material-Kennwerte des Betons

In diesem Abschnitt sind die Spannungs-Dehnungslinien des Betons festzulegen, die für den *Druckbereich* und den *Zugbereich* gelten. Voreingestellt sind ein parabelförmiger Verlauf für Druck und Tension Stiffening für Betonzugspannungen.



Für *Tension Stiffening* (Berücksichtigung der versteifenden Wirkung des Betons in der Zugzone) können die Parameter zum Ansatz der Betonzugfestigkeit zwischen den Rissen in einem separaten Dialog festgelegt werden. Dieser ist über die Schaltfläche [Bearbeiten] zugänglich.

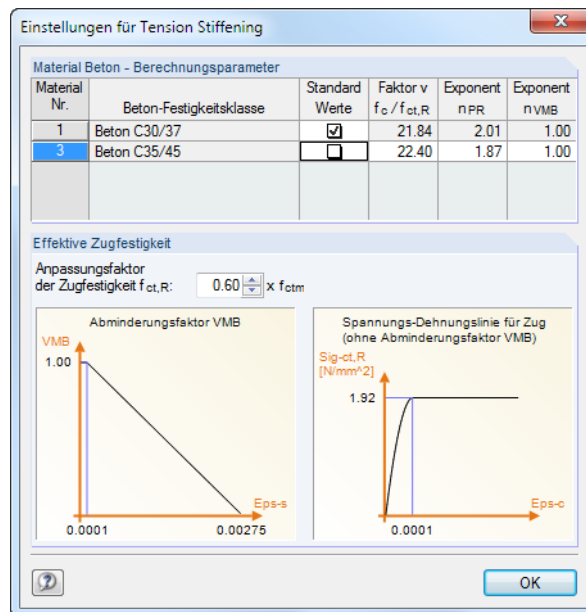


Bild 3.13: Dialog *Einstellungen für Tension Stiffening*

Änderungen bei den Parametern werden in den Diagrammen sofort grafisch dargestellt.

Der Ansatz von *Tension Stiffening* ist im [Kapitel 2.8.3.3](#) ab [Seite 112](#) ausführlich beschrieben.

3.1.3 Details

Dieses Register erscheint, wenn Lastfälle für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ausgewählt wurden und die Norm EN 1992-1-1 oder ACI 318-11 eingestellt ist. Es erübrigt sich für Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach DIN 1045-1, 11.2.4 (2), denn in Gl. (136) ist der Faktor k_t generell mit 0,4 festgelegt.

Details für Gebrauchstauglichkeit			
Nr.	A	B	C
	Lastfall / Kombination Bezeichnung	Dauerlast	Faktor k_t
LF1	Eigen- und Ausbaulasten Widerlager	<input checked="" type="checkbox"/>	0.400
LF3	aktiver Erddruck, Erdaufkast, Auflast Fahrbahn	<input type="checkbox"/>	0.600
LF4	Erddruck/Auflast aus Verkehr, Loks WL	<input type="checkbox"/>	0.600
LF5	Erddruck/Auflast aus Verkehr, Loks Brücke	<input type="checkbox"/>	0.600
LF7	Seitenstoß Flügelwand West	<input type="checkbox"/>	0.600
LF8	Seitenstoß Flügelwand Ost	<input type="checkbox"/>	0.600
LF20	Eigenlast Überbau	<input type="checkbox"/>	0.600
LF21	Vollast, Loks WL	<input type="checkbox"/>	0.600
LF22	Vollast, Loks Brücke	<input type="checkbox"/>	0.600
LF23	Wind aus Westen	<input type="checkbox"/>	0.600
LF24	Wind aus Osten	<input type="checkbox"/>	0.600
LF25	Seitenstoß +Y	<input type="checkbox"/>	0.600
LF26	Seitenstoß -Y	<input type="checkbox"/>	0.600
LF27	Verschleibewiderstand +X	<input type="checkbox"/>	0.600
LF28	Verschleibewiderstand -X	<input type="checkbox"/>	0.600
LF29	Lagenwechsel	<input type="checkbox"/>	0.600
EK13	Standsicherheit EZ		0.583

Bild 3.14: Maske 1.1 *Basisangaben*, Register *Details*

Beim Rissbreitennachweis werden die Differenzen der mittleren Dehnungen von Beton und Betonstahl berechnet (siehe [Kapitel 2.6.4.12](#), [Seite 84](#)). 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* zur Bemessung ausgewählt wurden. Bei Last- und Ergebniskombinationen werden auch alle enthaltenen Lastfälle angegeben.

Dauerlast

Diese Spalte regelt, welche Lastfälle als Dauerlasten anzusetzen sind. Wird ein Eintrag mit einem Häkchen gekennzeichnet, so wird der Faktor k_t in der nächsten Spalte automatisch zu 0,4 gesetzt.

Faktor k_t

Über den Völligkeitsfaktor k_t wird die Belastungsdauer erfasst. Der Faktor k_t beträgt dabei 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.

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

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 Flächen benutzt werden. Im Abschnitt *Materialkennwerte* werden die Eigenschaften des aktuellen Materials angezeigt, d. h. des Materials, dessen Zeile im oberen Abschnitt selektiert ist.

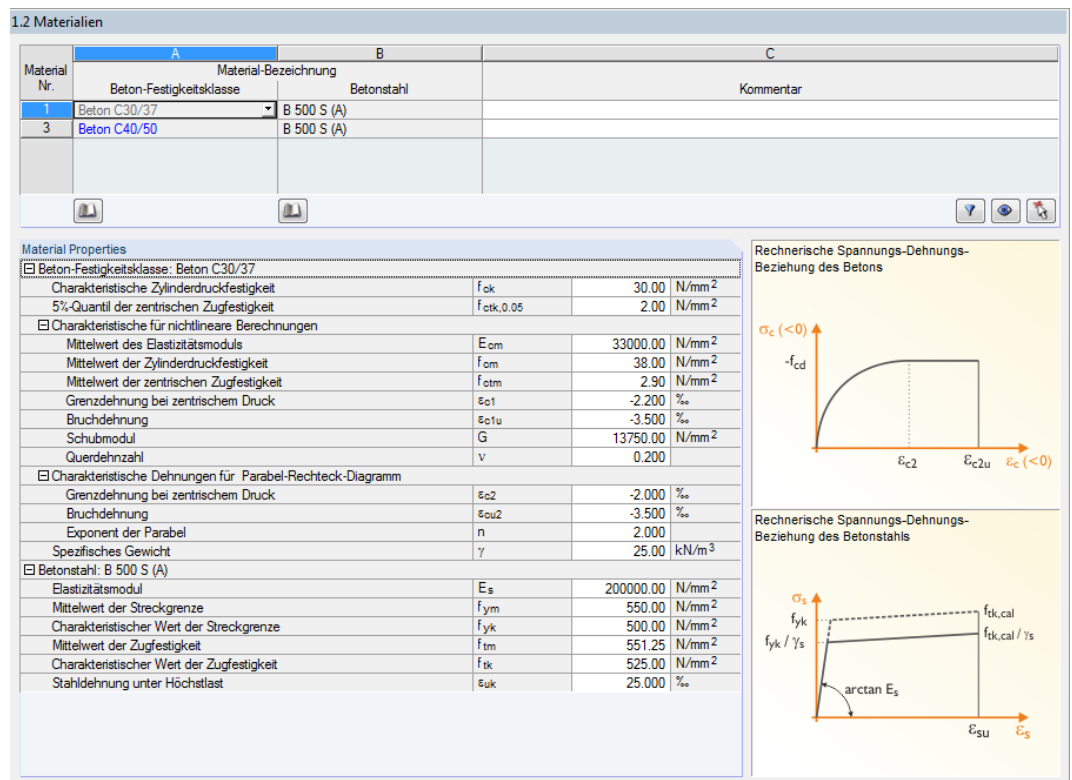


Bild 3.15: Maske 1.2 *Materialien*


Es werden nur Materialien aufgelistet, die bei der Bemessung benutzt werden. 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 Eigenschaften der Materialien gespeichert, die für die Bemessung benötigt werden. Diese 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](#) , [Seite 190](#)).

Materialbezeichnung

Beton-Festigkeitsklasse

Die in RFEM verwendeten Beton-Materialien sind voreingestellt; nicht relevante Materialien werden ausgeblendet. 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.

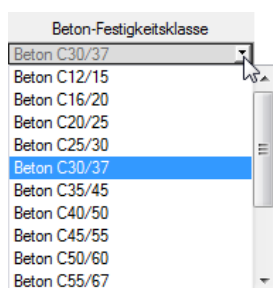


Bild 3.16: Liste der Betonfestigkeitsklassen


Die Liste enthält nur Festigkeitsklassen, die dem Bemessungskonzept der gewählten Norm entsprechen.

Nach der Übernahme werden die bemessungsrelevanten *Materialkennwerte* aktualisiert.

Die Materialeigenschaften sind im Modul RF-BETON Flächen 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 Funktionstaste [F7], um die Liste der Betonstähle zu öffnen.

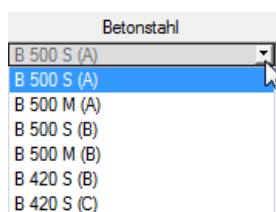


Bild 3.17: Liste der Betonstähle

Wie bei den Betonfestigkeitsklassen enthält die Liste enthält nur normrelevante Stahlgüten.

Nach der Übernahme werden die *Materialkennwerte* aktualisiert.

Materialbibliothek



Viele Materialien sind in einer Datenbank hinterlegt. Die [Bibliothek] lässt sich über die links dargestellte Schaltfläche aufrufen, die für die Betonfestigkeitsklassen und Betonstähle jeweils am Ende der Spalte zur Verfügung steht.

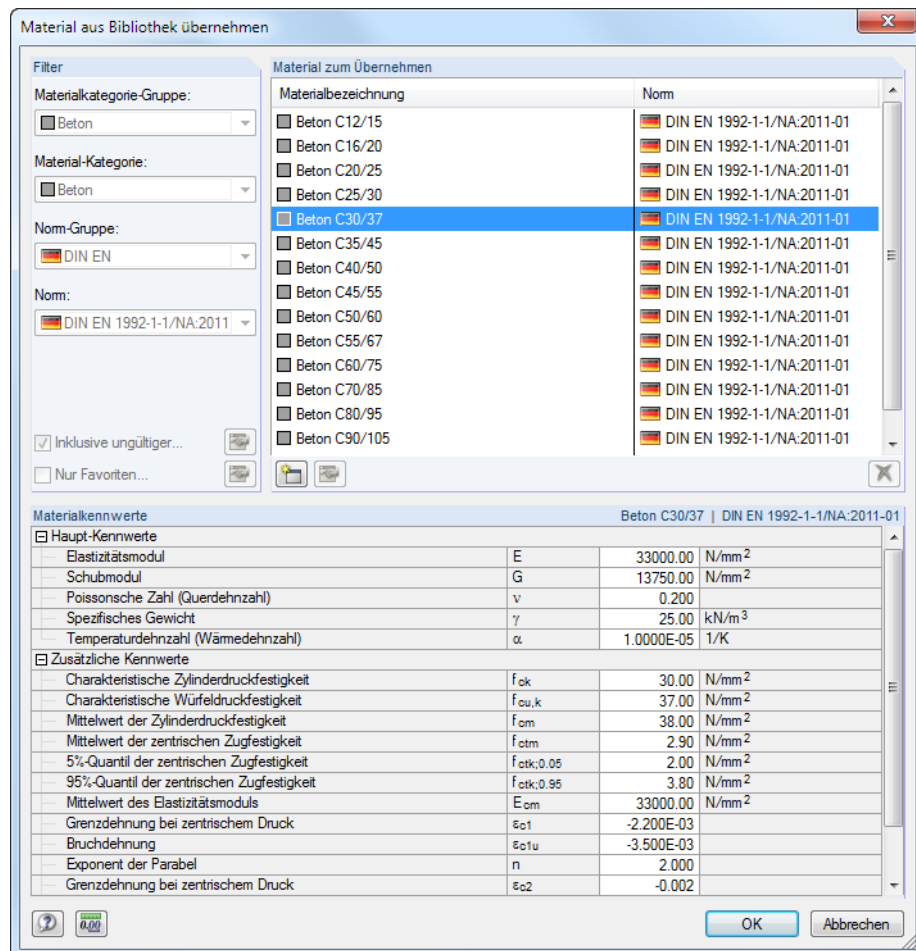
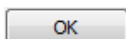


Bild 3.18: Dialog *Material aus Bibliothek übernehmen*

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



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

Das Kapitel 4.3 des RFEM-Handbuchs beschreibt, wie Materialien gefiltert, ergänzt oder neu sortiert werden können.

3.3 Flächen

Diese Maske verwaltet die Flächen, die für die Bemessung infrage kommen.

Das Aussehen der Maske hängt von den Einstellungen in Maske 1.1 *Basisangaben* ab: Wird nur der Tragfähigkeitsnachweis geführt, so sind hier lediglich die Flächen mit ihren Dicken gelistet. Wenn Lastfälle für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis vorgesehen wurden (siehe [Bild 3.8, Seite 128](#)), können hier spezifische Vorgaben getroffen werden. Sie unterscheiden sich je nach gewählter Nachweismethode.

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:




Schaltfläche	Funktion
	Zeigt nur Flächen an, die in Maske 1.4 <i>Bewehrung</i> einem Bewehrungssatz zugewiesen sind (siehe Kapitel 3.4)
	Ermöglicht den Wechsel in das RFEM-Arbeitsfenster, um die Ansicht anzupassen
	Ermöglicht die Auswahl einer Fläche im RFEM-Arbeitsfenster

Tabelle 3.2: Schaltflächen in Maske 1.3 *Flächen*

3.3.1 Analytische Nachweismethode

Nachweismethode: ☐ Analytisch...
☒ Nichtlinear...

Die analytische Methode für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist im [Kapitel 2.6](#) ab [Seite 66](#) ausführlich beschrieben.

Bei Nutzung von RF-BETON Deflect bietet diese Maske zusätzliche Register und Spalten an. Diese werden im [Kapitel 3.3.2](#) Nichtlineare Nachweismethode erläutert.

1.3 Flächen

Fläche Nr.	Material Nr.	Dicke Typ	d [mm]	$\sigma_{c,min}$ [N/mm ²]	$\sigma_{s,max}$ [N/mm ²]	$f_{ct,eff}$ [N/mm ²]	$w_{k,z}$ (oben) [mm]	$w_{k,z}$ (unten) [mm]	Zwangsbeanspruchung Vorh.	Typ	k_c [-]	Anmerkung	Kommentar
1	3	Konstant	200.0	-18.00	400.00	3.50	0.300	0.300	<input checked="" type="checkbox"/>	Innen	var.	6)	Deckenplatte
2	1	Konstant	200.0	-13.50	400.00	2.90	0.300	0.300	<input checked="" type="checkbox"/>	Innen	var.	6)	
3	1	Konstant	200.0	-13.50	400.00	2.90	0.300	0.300	<input checked="" type="checkbox"/>	Innen	var.	6)	
4	1	Konstant	250.0	-13.50	400.00	2.90	0.200	0.200	<input checked="" type="checkbox"/>	Innen	var. 1) 6)		Rückwand
5	1	Konstant	200.0	-13.50	400.00	2.90	0.200	0.200	<input checked="" type="checkbox"/>	Innen	var.	6)	Schale

Einstellungen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit - Fläche Nr. 1-3

Spannungsnachweis Begrenzung der Rissbreiten

Nachweis der Rissbreitenbegrenzung

Grenzwert der zulässigen Rissbreiten $w_{k,max}$

☐ Grenzwerte nach 7.3.1(5)

☒ Benutzerdefiniert

$w_{k,z}$ (oben): [mm]

$w_{k,z}$ (unten): [mm]

☒ Nachweis ohne direkte Rissbreitenberechnung nach 7.3.3

☒ Berechnung des Grenzdurchmessers $g_{renz,d,s}$

☒ Berechnung des max. Stababstandes $g_{renz,s,i}$

☒ Nachweis mit direkter Rissbreitenberechnung nach 7.3.4

☒ Dateneingabe für Fläche Nr.:

Mindestbewehrung zur Aufnahme von Zwangseinwirkungen

☒ $A_{s,min}$ zur Aufnahme von Zwangseinwirkungen

☒ Innere Zwangsbeanspruchung $k = 0.8 \dots 0.5$ (z.B. infolge Abfließens der Hydratationswärme)

☐ Äußere Zwangsbeanspruchung $k = 1.0$ (z.B. Stützensenkung)

☐ Rissbildung innerhalb der ersten 28 Tage (Wirksame Zugfestigkeit des Betons $f_{ct,eff} = k_{zt} \cdot f_{ctm}$)

Abminderungsbeiwert k_{zt} :

Bild 3.19: Maske 1.3 *Flächen* mit Einstellungen für analytische Nachweismethode, Register *Begrenzung der Rissbreiten*

Material Nr.

Für jede Fläche werden die Nummern der Materialien angezeigt, die in Maske 1.2 *Materialien* verwaltet sind.

Dicke

Typ

Die Bemessung ist für konstante und linear veränderliche Dicken-Typen sowie für Flächen mit orthotropen Eigenschaften möglich.

d

In dieser Spalte werden die in RFEM definierten Flächendicken angezeigt. Die Werte können für die Bemessung geändert werden.





Bei geänderten Flächendicken werden die Schnittgrößen von RFEM zur Bemessung benutzt, die sich aus den Steifigkeiten der RFEM-Flächendicken ergeben. Wenn ein statisch unbestimmtes System vorliegt, müssen die in RF-BETON Flächen geänderten Flächendicken auch in RFEM angepasst werden: So wird die Schnittgrößenverteilung korrekt bei der Bemessung berücksichtigt.



Die weiteren Spaltenüberschriften sind von den Einstellungen in den Registern unterhalb abhängig. Diese wiederum lassen sich über den *Einstellungen*-Dialog beeinflussen (siehe [Bild 3.9, Seite 129](#)); in diesem Dialog kann festgelegt werden, ob Spannungen und/oder Risse bemessen werden sollen.



Die Werte in den Spalten werden von den Einträgen in den Registern unterhalb übernommen. Diese Vorgaben gelten standardmäßig für alle Flächen. Es besteht auch die Möglichkeit, die aktuellen Einstellungen nur bestimmten Flächen zuzuordnen: Entfernen Sie das Häkchen vom Kontrollfeld *Alle*. Tragen Sie dann die Nummern der relevanten Flächen ein oder wählen Sie sie mit  grafisch im RFEM-Arbeitsfenster aus. Mit  weisen Sie diesen Flächen die aktuellen Einstellungen zu. Die Zuordnung gilt aber nur für das aktive Register, z. B. *Spannungsnachweis*.

Die beiden folgenden Parameter sind im Register *Spannungsnachweis* zu definieren (siehe [Bild 3.20](#)).

$\sigma_{c,min}$

In dieser Spalte wird der Wert der minimalen Betonspannung zur Begrenzung der Betondruckspannungen angezeigt (siehe [Kapitel 2.6.4.7, Seite 74](#)). Gemäß EN 1992-1-1 gilt für

- Quasi-ständige Einwirkungskombination, falls Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit durch Kriechen wesentlich beeinflusst werden:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck} \quad 7.2 (3)$$

- Seltene (= charakteristische) Einwirkungskombination in Expositionsklassen XD1 bis XD3, XF1 bis XF4, XS1 bis XS3:

$$\sigma_c \leq 0,60 \cdot f_{ck} \quad 7.2 (2)$$

$\sigma_{s,max}$

Dieser Wert stellt die maximale Betonstahlspannung zur Begrenzung der Zugspannungen der Bewehrung dar (siehe [Kapitel 2.6.4.8, Seite 77](#)). Gemäß EN 1992-1-1 gilt für

- Seltene Einwirkungskombination:

$$\sigma_s \leq 0,80 \cdot f_{yk} \quad 7.2 (5)$$

- Reine Zwangeinwirkungen:

$$\sigma_s \leq 1,00 \cdot f_{yk} \quad 7.2 (5)$$

Die übrigen Parameter sind im Register *Begrenzung der Rissbreiten* zu definieren (siehe [Bild 3.19](#)).

$f_{ct,eff}$

In dieser Spalte wird der Wert der wirksamen Zugfestigkeit des Betons angegeben. Dieser wird für die Kontrolle des Stabdurchmessers benötigt (siehe [Kapitel 2.6.4.10](#), [Seite 81](#)).

$w_{k,-z(oben)} / w_{k,+z(unten)}$

Hier handelt es sich um die zulässigen Rissbreiten an den Ober- und Unterseiten der Flächen (siehe [Kapitel 2.6.4.12](#), [Seite 84](#)).

Zwangbeanspruchung

Wenn Beanspruchungen aus Zwang vorliegen, sind sie bei der Ermittlung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite zu berücksichtigen (siehe [Kapitel 2.6.4.9](#), [Seite 78](#)).



Im Register *Begrenzung der Rissbreiten* können über die Schaltfläche [Bearbeiten] Vorgaben für die Mindestbewehrung zur Aufnahme von Zwangseinwirkungen getroffen werden (siehe [Bild 2.97](#), [Seite 79](#)).

Vorhanden

Die Spalte I bzw. das Kontrollfeld im Register *Begrenzung der Rissbreiten* steuert, ob eine Beanspruchung durch Zwang vorliegt.

Typ

Im Register *Begrenzung der Rissbreiten* ist anzugeben, ob eine innere oder eine äußere Zwangbeanspruchung vorliegt. Dies beeinflusst den Beiwert k zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Betonzugspannungen (siehe [Gleichung 2.72](#), [Seite 78](#)).

k_c

Über diesen Beiwert wird die Spannungsverteilung in der Zugzone berücksichtigt (siehe [Gleichung 2.72](#), [Seite 78](#)).

Anmerkung

Es werden Hinweise in Form von Fußnoten angezeigt, die in der Statusleiste näher erläutert sind.

Kommentar

Diese Eingabefelder stehen für benutzerdefinierte Anmerkungen zur Verfügung

3.3.2 Nichtlineare Nachweismethode

Nachweismethode: ☐ Analytisch...
☒ Nichtlinear...

Für die Nachweismethode *Nichtlinear* wird eine Lizenz des Zusatzmoduls **RF-BETON NL** benötigt. Diese Methode für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist im [Kapitel 2.8](#) ab [Seite 104](#) ausführlich beschrieben.

1.3 Flächen

Fläche Nr.	Material Nr.	Dicke Typ	d [mm]	Kriechzahl ϕ [-]	Schwinden ϵ_{os} [-]	$u_{z,max}$ [mm]	$w_{k,-z}$ (oben) [mm]	$w_{k,+z}$ (unten) [mm]	$\sigma_{c,min}$ [N/mm ²]	$\sigma_{s,max}$ [N/mm ²]	Anmerkung	Kommentar
1	3	Konstant	200.0	1.73900	-0.00036	14.000	0.300	0.300	-20.25	400.00		Deckenplatte
2	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	24.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		
3	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		
4	1	Konstant	250.0	2.33910	-0.00036	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00	1)	Rückwand
5	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		Schale

Einstellungen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit - Fläche Nr. 1-3

Kriechen | Schwinden | Verformungsnachweis | Rissbreitennachweis | Spannungsnachweis

Begrenzung der Betondruckspannung

Typ der Begrenzung:

☐ $0.60 \cdot f_{ck}$ nach EN 1992-1-1, 7.2 (2)

☒ $0.45 \cdot f_{ck}$ nach EN 1992-1-1, 7.2 (2)

☐ $\alpha \cdot f_{ck}$

α :

$\sigma_{c,min} = -20.25 \text{ N/mm}^2$

Begrenzung der Stahlspannung

Typ der Begrenzung:

☒ $0.80 \cdot f_{yk}$ nach EN 1992-1-1, 7.2 (5)

☐ $1.00 \cdot f_{yk}$ nach EN 1992-1-1, 7.2 (5)

☐ $\alpha \cdot f_{yk}$

α :

$\sigma_{s,max} = 400.00 \text{ N/mm}^2$

☒ Dateneingabe für Fläche Nr.:

☐ Alle ☒

Bild 3.20: Maske 1.3 Flächen mit Einstellungen für nichtlineare Nachweismethode, Register Spannungsnachweis

Folgende Spalten sind oben im [Kapitel 3.3.1](#) Analytische Nachweismethode beschrieben:

- Material
- Dicke
- $w_{k,-z}(\text{oben}) / w_{k,+z}(\text{unten})$
- $\sigma_{c,min}$
- $\sigma_{s,max}$



Für orthotrope Flächen ist kein Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach nichtlinearer Methode möglich.



Die Werte in den Spalten D bis J werden über die Register unten gesteuert. Die dort getroffenen Vorgaben werden standardmäßig auf alle Flächen angewandt. Es besteht auch die Möglichkeit, die aktuellen Einstellungen nur bestimmten Flächen zuzuordnen: Entfernen Sie das Häkchen vom Kontrollfeld *Alle*. Tragen Sie dann die Nummern der relevanten Flächen ein oder wählen Sie sie mit grafisch aus. Mit weisen Sie diesen Flächen die aktuellen Einstellungen zu. Die Zuordnung gilt nur für das aktive Register, z. B. *Spannungsnachweis*.

Kriechzahl ϕ

Die Parameter für das Kriechen sind im Register *Kriechen* anzugeben (siehe [Bild 2.144](#), [Seite 117](#)). Aus diesen Randbedingungen ermittelt das Programm die Kriechzahl ϕ . Als wirksame Bauteildicke h_0 wird dabei die Flächendicke d angesetzt.

Die Ermittlung der Kriechzahl ist im [Kapitel 2.8.4.1](#) auf [Seite 117](#) beschrieben.

Schwinden ϵ_{cs}

In dieser Spalte wird die Schwinddehnung ausgewiesen. Die relevanten Parameter sind im Register *Schwinden* zu definieren (siehe Bild 2.147, Seite 121). Aus diesen Randbedingungen ermittelt das Programm die Schwinddehnung ϵ_{cs} . Als wirksame Bauteildicke h_0 wird die Flächendicke d angesetzt.



Die Ermittlung der Schwinddehnung ist im Kapitel 2.8.4.2 auf Seite 120 beschrieben. Falls für eine Fläche keine Schwinddehnung angesetzt werden soll, ist im Register *Schwinden* eine benutzerdefinierte Schwinddehnung von null festzulegen und dann der Fläche zuzuweisen.



Bei reinen Platten, die als Modelltyp 2D – XY ($u_z/\phi_x/\phi_y$) definiert sind, kann das Schwinden nicht berücksichtigt werden: Es liegen nur Biegefreiheitsgrade vor.

$u_{z,max}$

Dieser Wert stellt die maximal zulässige Verformung dar, die beim Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehalten werden muss. Die Nachweiskriterien sind im Register *Verformungsnachweis* festzulegen.

1.3 Flächen

Fläche Nr.	Material Nr.	Dicke Typ	Dicke d [mm]	Kriechzahl ϕ [-]	Schwinden ϵ_{cs} [-]	$u_{z,max}$ [mm]	$w_{k,z}$ (oben) [mm]	$w_{k,z}$ (unten) [mm]	$\sigma_{s,min}$ [N/mm ²]	$\sigma_{s,max}$ [N/mm ²]	Anmerkung	Kommentar
1	3	Konstant	200.0	1.91590	-0.00036	14.000	0.300	0.300	-18.00	400.00		Deckenplatte
2	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	24.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		
3	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		
4	1	Konstant	250.0	2.33910	-0.00036	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00	1)	Rückwand
5	1	Konstant	200.0	2.41855	-0.00038	16.000	0.300	0.300	-13.50	400.00		Schale

Einstellungen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit - Fläche Nr. 1-3

Kriechen | **Schwinden** | Verformungsnachweis | Rissbreitennachweis | Spannungsnachweis

Nachweiskriterien

Grenzwert:

☒ Minimale Grenzlinie
 $u_{z,max} : L_{min} / 250$

☐ Maximale Grenzlinie
 $u_{z,max} : L_{max} /$

☐ Benutzerdefiniert relativ
 $u_{z,max} : L_{def} /$ $L_{def} :$ [m]

☐ Benutzerdefiniert absolut
 $u_{z,max} : 14.000$ [mm]

Beziehen auf:

☒ Unverformtes System

☐ Verschiebte Parallelfläche an der Stelle des minimal verformten Knotens

☐ Verschiebte benutzerdefinierte Referenzebene

☒ Dateneingabe für Fläche Nr.: 1-3

Bild 3.21: Maske 1.3 Flächen, Register *Verformungsnachweis*

Grenzwert

Im „üblichen Hochbau“ ist die Gebrauchstauglichkeit z. B. nach EN 1992-1-1, Abschnitt 7.4 gewährleistet, wenn die Durchbiegung in der quasi-ständigen Einwirkungskombination folgende Grenzwerte nicht überschreitet.

- Allgemeiner Fall:
- Bauteile, bei denen übermäßige Verformungen zu Folgeschäden führen können:

$$u_{z,max} = \frac{l_{eff}}{250}$$

$$u_{z,max} = \frac{l_{eff}}{500}$$

Die Auswahlfelder *Minimale Grenzlinie*, *Maximale Grenzlinie* und *Benutzerdefiniert relativ* steuern, welche effektive Länge l_{eff} angesetzt wird. Bei den beiden Grenzlinie-Optionen wird die kleinste bzw. größte Randlinie der jeweiligen Fläche angesetzt.

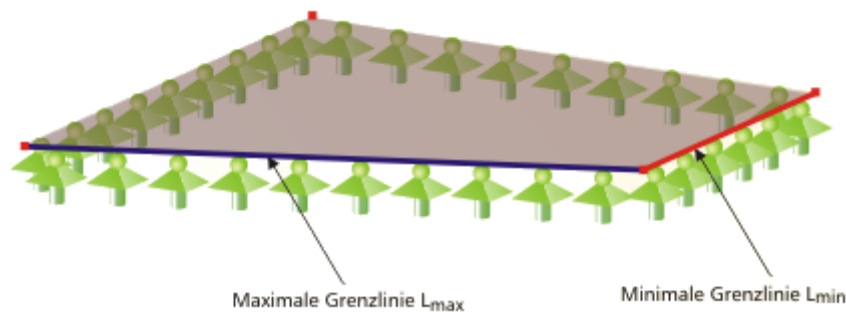



Bild 3.22: Maximale und minimale Grenzlinie für Ermittlung von $u_{z,\text{max}}$



Bei der Option *Benutzerdefiniert relativ* kann die Länge direkt eingetragen oder mit  grafisch zwischen zwei beliebigen Punkten im RFEM-Modell gewählt werden. Bei allen drei Möglichkeiten ist zudem der Divisor anzugeben, durch den die Längen dividiert werden.

Die zulässige Maximalverformung $u_{z,\text{max}}$ kann auch *Benutzerdefiniert absolut* festgelegt werden.

Beziehen auf

Das Nachweiskriterium der Verformung benutzt die Durchbiegung einer Fläche – die vertikale Verformung bezogen auf die geradlinige Verbindung der Unterstützungspunkte. Das Register *Verformungsnachweis* (Bild 3.21) bietet drei Möglichkeiten, wie die im Nachweis angesetzte lokale Verformung $u_{z,\text{lokal}}$ berechnet wird.

- *Unverformtes System:* Die Verformung wird auf das Ausgangssystem bezogen.
- *Verschobene Parallelfäche:* Diese Option ist bei einer nachgiebigen Lagerung der Fläche zu empfehlen. Die Verformung $u_{z,\text{lokal}}$ wird auf eine parallel zum unverformten System verschobene, virtuelle Referenzfläche bezogen. Der Verschiebungsvektor der Referenzfläche ist so lang wie die kleinste Knotenverformung in der Fläche.

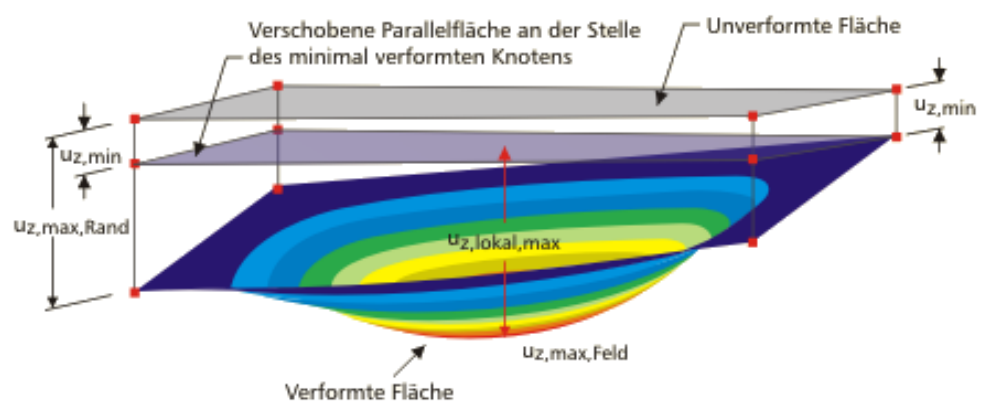


Bild 3.23: Verschobene Parallelfäche (Verschiebungsvektor: kleinste Knotenverformung $u_{z,\text{min}}$)

- *Verschobene Referenzebene:* Wenn sich die Lager einer Fläche stark unterschiedlich verformen, kann eine geneigte Referenzebene für die nachzuweisende Verformung $u_{z, \text{lokal}}$ definiert werden. Diese Ebene ist durch drei Punkte des unverformten Systems festzulegen. Das Programm ermittelt die Verformung der drei Definitionspunkte, legt die Referenzebene durch diese verschobenen Punkte und berechnet dann die lokale Verformung $u_{z, \text{lokal}}$.

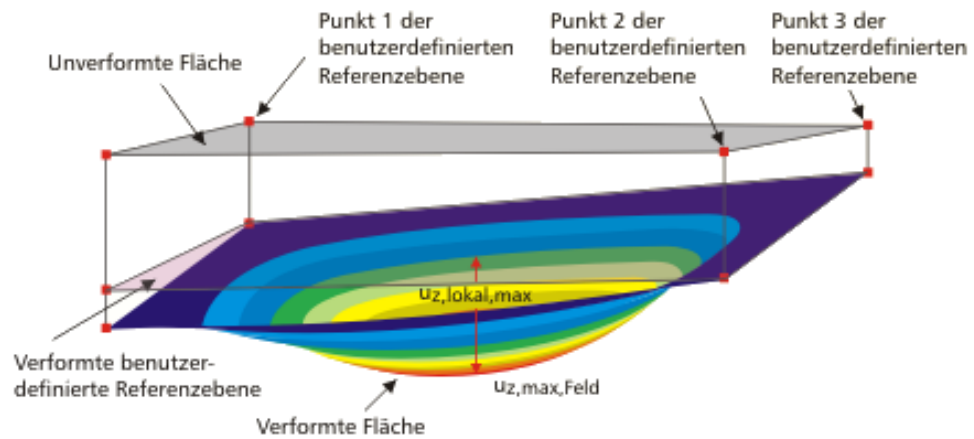


Bild 3.24: Verschobene benutzerdefinierte Referenzebene

3.4 Bewehrung

Diese Maske besteht aus fünf Registern, in denen alle Angaben zur Bewehrung erfasst werden. Da für die nachzuweisenden Flächen nicht immer einheitliche Vorgaben zutreffen, können in jedem RF-BETON Flächen-Fall sogenannte „Bewehrungssätze“ definiert werden. Jeder Bewehrungssatz verwaltet die Parameter der Bewehrung, die für bestimmte Flächen gelten.

Bewehrungssatz



Mit der Schaltfläche [Neu] im Abschnitt *Bewehrungssatz* kann ein neuer Bewehrungssatz angelegt werden. Die Nummer wird automatisch festgelegt. Eine benutzerdefinierte *Bezeichnung* erleichtert den Überblick über die im Bemessungsfall vorhandenen Bewehrungssätze.

Bild 3.25: Maske 1.4 *Bewehrung* mit drei Bewehrungssätzen

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



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

Angewendet auf Flächen

Dieser Abschnitt steuert, für welche Flächen die Parameter des aktuellen Bewehrungssatzes gültig sind. Es sind *Alle* Flächen voreingestellt. Mit dieser Vorgabe kann kein weiterer Bewehrungssatz erstellt werden, denn eine Fläche lässt sich nicht nach verschiedenen Regeln bemessen (dies ist nur in „Bemessungsfällen“ möglich, siehe [Kapitel 8.1, Seite 187](#)). Daher muss das Häkchen vom Kontrollfeld *Alle* entfernt werden, um Bewehrungssätze zu nutzen.



Im Eingabefeld sind die Nummern der Flächen einzutragen oder mit grafisch im RFEM-Arbeitsfenster auszuwählen, für die die Bewehrungsparameter der Register unterhalb gelten. Das Eingabefeld darf nur Flächennummern aufweisen, die noch keinem anderen Bewehrungssatz zugeteilt sind.

3.4.1 Bewehrungsgrade

Bild 3.26: Maske 1.4 Bewehrung, Register *Bewehrungsgrade*

In diesem Register sind die Mindest- und Höchstbewehrungen in Prozentangaben festzulegen. Die *Mindest-Querbewehrung* bezieht sich auf die größte einzulegende Längsbewehrung. Alle weiteren Bewehrungsgrade sind auf die Querschnittsfläche eines Flächenstreifens von 1 Meter Breite bezogen.

Beispiele für Mindest- und Höchstbewehrungen finden Sie in den [Kapiteln 2.3.7, 2.4.5 und 2.5.8](#) dieses Handbuchs.

3.4.2 Bewehrungsanordnung

Bild 3.27: Maske 1.4 Bewehrung, Register *Bewehrungsanordnung*

Dieses Register steuert die geometrischen Vorgaben für die Bewehrung.



Anzahl der Bewehrungsbahnen

Das Bewehrungsnetz kann in Form von zwei oder drei Bewehrungsbahnen für jede Flächenseite ausgeführt werden.



Für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nur ein zweibahniges Bewehrungsnetz zulässig.

Die Definition der „oberen“ und „unteren“ Flächenseite ist unten im Abschnitt *Betondeckung der Bewehrung* beschrieben.

Betondeckung beziehen auf

Die im Abschnitt *Betondeckungen* anzugebenden Betondeckungen können auf das *Achsmaß* oder den *Rand*-Abstand der Bewehrung bezogen werden.

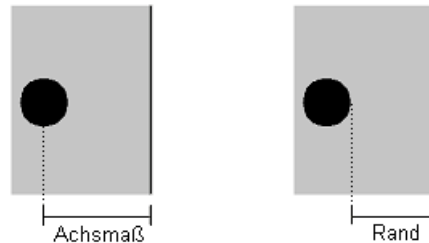


Bild 3.28: Bezug der Betondeckung

Wird die Option *Rand* gewählt, ist beim reinen Tragfähigkeitsnachweis der *Stabdurchmesser* D anzugeben.

Betondeckung der Bewehrung

Für beide Flächenseiten sind die Betondeckungen der *Grundbewehrung* und ggf. der *Zusatzbewehrung* anzugeben. Die Maße stellen entweder die Achsmaße d der einzelnen Lagen oder die Randabstände c_{nom} der Bewehrungen in Richtung ϕ_1 dar. Die Bewehrungsrichtungen sind im Abschnitt unterhalb festzulegen.

Die „obere“ und „untere“ Flächenseite ist wie folgt definiert: Die Unterseite ist in Richtung der positiven lokalen z-Flächenachse zu finden, die Oberseite dementsprechend in Richtung der negativen lokalen z-Achse.

In der RFEM-Grafik werden die xyz-Koordinatensysteme der Flächen eingeblendet, sobald sich der Mauszeiger über einer Fläche befindet. Die Achsen lassen sich auch über das Kontextmenü einer Fläche (durch Anklicken mit der rechten Maustaste) ein- und ausblenden.

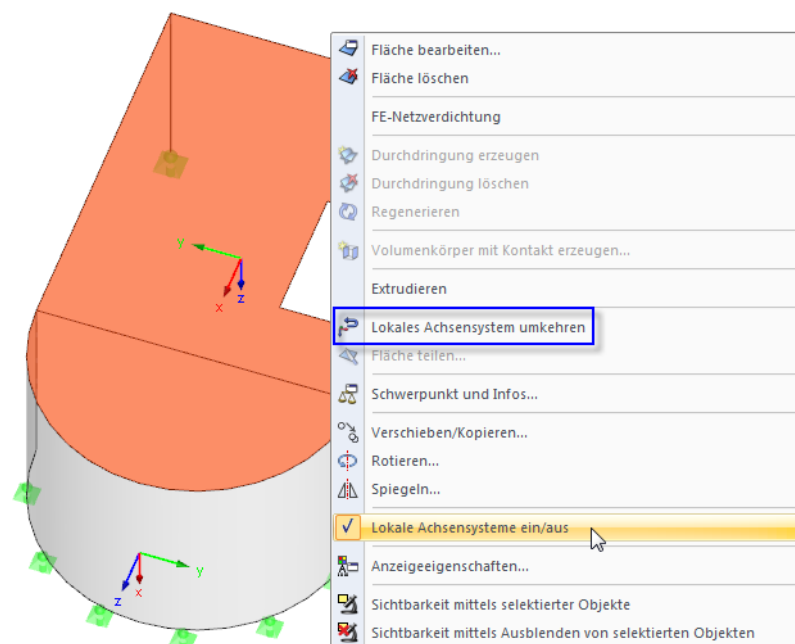
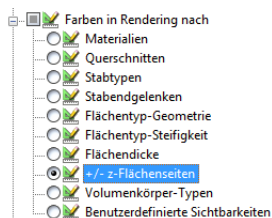


Bild 3.29: RFEM-Kontextmenü einer Fläche



Über den Eintrag *Farben im Rendering nach* → *+/- z-Flächenseiten* im Zeigen-Navigator können die Flächenseiten verschiedenfarbig dargestellt werden (siehe Bild links).

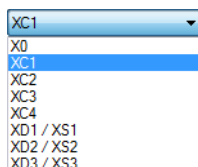
Die Lage der lokalen z-Achse einer Fläche kann über die Kontextmenü-Option *Lokales Achsen-system umkehren* geändert werden (siehe Bild 3.29). Damit lässt sich z. B. die Ausrichtung von Wänden vereinheitlichen, um die oberen und unteren Bewehrungsseiten für vertikale Flächen eindeutig festzulegen.

Bei den Modelltypen Wand 2D — $XZ(u_x/u_z/\phi_y)$ oder Scheibe 2D — $XY(u_x/u_y/\phi_z)$ handelt es sich um ausschließlich auf Druck oder Zug in Bauteilebene beanspruchte Modelle. Hier können keine unterschiedlichen Bewehrungsnetze je Flächenseite erzeugt werden, sodass sich die Eingabemöglichkeiten auf einheitliche Betondeckungen auf beiden Seiten beschränken.



Beim Anhaken des Kontrollfeldes *Betondeckung nach Norm* wird die Schaltfläche [Bearbeiten] zugänglich. Sie ruft folgenden Dialog auf.

Bild 3.30: Dialog Betondeckung nach Norm



Auswahl der Expositions-klasse

Im oberen Abschnitt können die anzusetzenden Parameter (Expositions-klasse, Verschleiß-klasse etc.) gemäß Norm festgelegt werden. RF-BETON Flächen ermittelt daraus die erforderlichen Betondeckungen.

In den beiden Registern sind getrennte Vorgaben für jede Flächenseite möglich.

Bewehrungsrichtungen bezogen auf lokale Achse x des FE-Elements

Die Bewehrungsrichtungen ϕ sind auf die lokalen x-Achsen der finiten Elemente bezogen. Im RFEM-Dialog *Fläche bearbeiten* kann das Ergebnis-Achsensystem der Flächen überprüft und bei Bedarf angepasst werden.

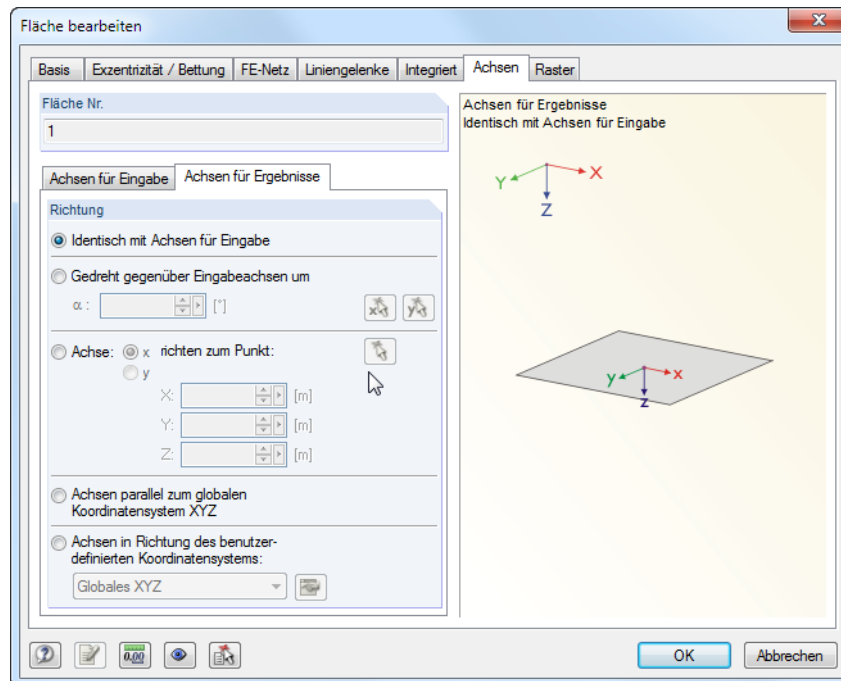


Bild 3.31: RFEM-Dialog *Fläche bearbeiten*, Register *Achsen* und *Achsen für Ergebnisse*

Bei gekrümmten Flächen ist es empfehlenswert, die Achsen der finiten Elemente grafisch zu überprüfen: Haken Sie im *Zeigen-Navigator* von RFEM die Option *FE-Netz* → *An Flächen* → *FE-Achsen-systeme x,y,z* → *Indexe* an (siehe Bild 8.40 im Kapitel 8.14 des RFEM-Handbuchs).

Die Bewehrungsrichtungen sind lagenweise über die Winkel ϕ anzugeben. Es sind nur positive Winkel zulässig. Sie beschreiben jeweils die Drehung der Bewehrungsrichtung im Uhrzeigersinn zur jeweiligen x-Achse.

Bei den Modelltypen *Wand 2D* — *XZ*($u_x/u_z/\phi_y$) oder *Scheibe 2D* — *XY*($u_x/u_y/\phi_z$) können keine unterschiedlichen Bewehrungsnetze je Flächenseite erzeugt werden. Damit beschränken sich die Eingabemöglichkeiten auf einheitliche Richtungen der Bewehrungsscharen auf beiden Seiten.

3.4.3 Längsbewehrung

Bild 3.32: Maske 1.4 Bewehrung, Register Längsbewehrung für Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Die Abschnitte des Registers hängen von den Nachweisen ab, die in Maske 1.1 *Basisangaben* festgelegt wurden: Der reine Tragfähigkeitsnachweis erfordert keine besonderen Bewehrungsangaben. Es ist lediglich zu regeln, welche Längsbewehrung für den Querkraftnachweis herangezogen werden soll. Für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise jedoch müssen Bewehrungsquerschnitte vorgegeben werden.

Hinweise zu Bewehrungsvorgaben für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit finden Sie im [Kapitel 2.6.3](#) auf [Seite 69](#).

Vorhandene Grundbewehrung

Für jede Flächenseite und jede Bewehrungsrichtung kann eine Grundbewehrung festgelegt werden, die für alle Flächen des Bewehrungssatzes vorliegt. Hierzu ist in den Eingabefeldern der *Bewehrungsquerschnitt* und der für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis relevante *Stabdurchmesser* einzutragen.

Wird die Grundbewehrung so gewählt, dass sie größer ist als die erforderliche Bewehrung, so bedarf es keiner zusätzlichen Bewehrung. Es ist jedoch unwirtschaftlich, Flächen mit großen konstanten Grundbewehrungen zu versehen.



RF-BETON Flächen bietet Datenbanken für Bewehrungsstäbe und Bewehrungsmatten an, die die Eingabe der Stahlquerschnitte erleichtern. Die Bibliotheken sind über die beiden links dargestellten Schaltflächen zugänglich; sie sind auf folgender Seite beschrieben.



Bewehrungsstäbe

Bewehrungsfläche aus Bewehrungsstäben übernehmen

Bewehrungsstab-Parameter

Ermittlung von:

- ☐ Stabdurchmesser
- ☐ Stababstand
- ☒ Bewehrungsfläche

D: 10.00 [mm]

a: 150.00 [mm]

a_s: 5.24 [cm²/m]

Exportieren

Lage: ☒ Oben (-z) ☐ Unten (+z)

Bewehrung zuordnen: ☒ a_{s,1} ☐ a_{s,2}

OK Abbrechen

Bild 3.33: Dialog *Bewehrungsfläche aus Bewehrungsstäben übernehmen*

Die drei Auswahlfelder im Abschnitt *Bewehrungsstab-Parameter* wirken interaktiv. In der Regel wird aus dem Stabdurchmesser und Stababstand die Bewehrungsfläche berechnet.

Der Abschnitt *Exportieren* steuert, in welche Eingabefelder des Registers *Längsbewehrung* die ermittelten Bewehrungsflächen übernommen werden. Lage und Bewehrungsrichtung lassen sich gezielt (oder pauschal durch Anhaken aller Kontrollfelder) vorgeben.

Bewehrungsmatten



Bewehrungsfläche aus Bewehrungsmatten-Bibliothek übernehmen

Lieferprogramm

Deutschland - 2008-01-01

Typ

- ☒ Q-Matte
- ☐ R-Matte

Nummer

- Q188A
- Q257A
- Q335A**
- Q424A
- Q524A
- Q636A

Exportieren

Lage: ☒ Oben (-z) ☒ Unten (+z)

Längsbewehrung zuordnen: ☐ a_{s,1} ☒ a_{s,2}

Bewehrungskennwerte

		Q335A	
Gesamtquerschnitt der Längsstäbe pro m	a _{s, längs}	3.35	cm ² /m
Gesamtquerschnitt der Querstäbe pro m	a _{s, quer}	3.35	cm ² /m
Längstabdurchmesser, Innenbereich	d _{s,L1}	8.00	mm
Längstabdurchmesser, Randbereich	d _{s,L2}	8.00	mm
Querstabdurchmesser	d _{s,Q}	8.00	mm
Abstand der Längsstäbe	a _L	150.00	mm
Abstand der Querstäbe	a _Q	150.00	mm
Mattenlänge	L	6.000	m
Mattenbreite	M	2.300	m
Gewicht je Matte	G _{Matte}	74.30	kg
Gewicht je m ²	G	5.38	kg/m ²
Überstände am Mattenrand, längs	p _{s,längs}	75.00	mm
Überstände am Mattenrand, quer	p _{s,quer}	25.00	mm

OK Abbrechen

Bild 3.34: Dialog *Bewehrungsfläche aus Bewehrungsmatten-Bibliothek übernehmen*

Deutschland - 2008-01-01

Deutschland - 2008-01-01

Deutschland - 2001-10-01

Deutschland - 1997-01-01

Österreich - 2002-01-01

Tschechien

Niederlande

Zunächst ist das *Lieferprogramm* in der links dargestellten Liste zu wählen. Ist dann der *Typ* der Matte festgelegt, kann die relevante *Nummer* im Abschnitt rechts ausgewählt werden. Im Abschnitt unterhalb werden zur Kontrolle die *Bewehrungskennwerte* angezeigt.

Der Abschnitt *Exportieren* steuert, in welche Eingabefelder des Registers *Längsbewehrung* die ermittelten Bewehrungsflächen übernommen werden. Lage und Bewehrungsrichtung lassen sich gezielt (oder pauschal durch Anhaken aller Kontrollfelder) vorgeben.

Erforderliche Bewehrung für Gebrauchstauglichkeitsnachweis verwenden

Ideal für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wäre folgendes Vorgehen:

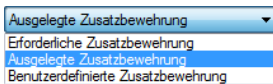
1. Ermitteln der erforderlichen Bewehrung ausschließlich mit der Belastung des Registers *Tragfähigkeit*
2. Erstellen eines Bewehrungsplans mit Bewehrungsmatten und Bewehrungsstäben auf Basis der farbigen Ergebnisverläufe
3. Ggf. Unterteilen der Flächen auf Grundlage des Bewehrungsplans in kleinere Flächen, die in jede Bewehrungsrichtung den gleichen vorhandenen Bewehrungsquerschnitt haben
4. Definieren des vorhandenen Bewehrungsquerschnitts, Stababstands und -durchmessers für jede dieser Flächen in RF-BETON Flächen
5. Erneutes Starten der Berechnung mit der Belastung des Registers *Gebrauchstauglichkeit*

Berechnung

Dieser Ablauf ist aufwändig und steht im Gegensatz zur Konvention, dass mit dem Drücken der Schaltfläche [Berechnung] in einem Zug die Bewehrung ermittelt und die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit geführt werden.

Das Kontrollfeld *Erforderliche Bewehrung für Gebrauchstauglichkeit verwenden* bietet daher die Möglichkeit, schnell eine vorhandene Bewehrung für die einzelnen Flächen zu benutzen: Als anzusetzende Bewehrung wird die erforderliche Bewehrung aus der Tragfähigkeitsbemessung verwendet. Es ist lediglich der Stabdurchmesser vorzugeben.

Zusatzbewehrung für Gebrauchstauglichkeitsnachweis



Bereiche, in denen die statisch erforderliche Bewehrung größer ist als die Grundbewehrung, erfordern eine Zusatzbewehrung. Über die Liste dieses Abschnitts kann festgelegt werden, welche Zusatzbewehrung für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis verwendet werden soll.

Bei der Option *Erforderliche Zusatzbewehrung* wird der tatsächliche $A_{s,erf}$ -Verlauf als Zusatzbewehrung beim GZG-Nachweis angesetzt.

Die *Ausgelegte Zusatzbewehrung* ermittelt sich als Differenz von größter statisch erforderlicher Bewehrung aller Flächen des Bewehrungssatzes und definierter Grundbewehrung:

$$a_{s,Zusatz} = \max a_{s,erf} - a_{s,Grund} \quad (3.2)$$



Die [Info]-Schaltfläche ruft einen Dialog auf, der die gewählte Zusatzbewehrung veranschaulicht (siehe [Bild 3.35](#)).

Für die Auslegung der Zusatzbewehrung ist lediglich der Stabdurchmesser festzulegen.



Der Bewehrungsquerschnitt kann auch *Benutzerdefiniert* vorgegeben werden. Hierzu stehen wie im Abschnitt *Vorhandende Grundbewehrung* Bibliotheken für Bewehrungsstäbe und Bewehrungsmatten zur Verfügung.

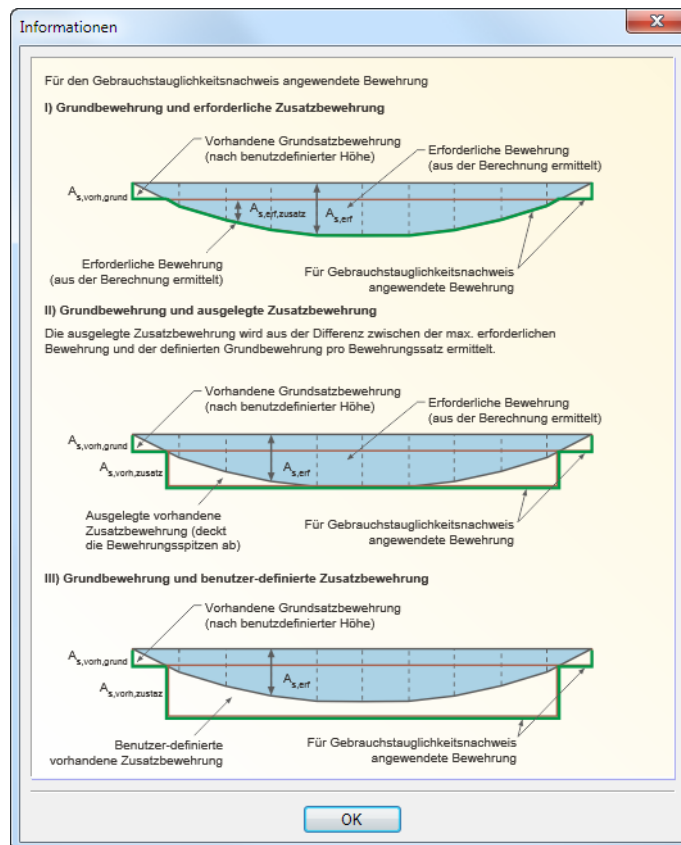


Bild 3.35: Ansatz von Zusatzbewehrung

Längsbewehrung für Querkraftnachweis

Über folgende Möglichkeiten lässt sich steuern, welche Längsbewehrung für den Querkraftnachweis ohne Querkraftbewehrung angesetzt wird.

Längsbewehrung für Querkraftnachweis

☐ Erforderliche Längsbewehrung benutzen

☒ Ansatz des jeweils größeren Wertes aus erforderlicher oder vorhandener Längsbewehrung (Grund- und Zusatzbewehrung) pro Bewehrungsrichtung.

☐ Die erforderliche Längsbewehrung automatisch hinzufügen, um die Schubbewehrung zu vermeiden

Bild 3.36: Längsbewehrung für Querkraftnachweis

• Erforderliche Längsbewehrung benutzen

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird mit der transformierten vorhandenen Zugbewehrung in Hauptquerkrafttrichtung geführt (siehe [Kapitel 2.4.4.1, Seite 36](#)).

• Ansatz des größeren Wertes aus erforderlicher oder vorhandener Längsbewehrung

Für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird entweder die statisch erforderliche oder die benutzerdefinierte Längsbewehrung benutzt (siehe [Kapitel 2.4.4.1, Seite 37](#)).

• Erforderliche Längsbewehrung automatisch hinzufügen, um Schubbewehrung zu vermeiden

Ist die erforderliche Längsbewehrung nicht ausreichend für die Querkrafttragfähigkeit, wird die Längsbewehrung in Hauptquerkrafttrichtung vergrößert, bis der Querkraftnachweis ohne Querkraftbewehrung erfüllt ist (siehe [Kapitel 2.4.4.1, Seite 37](#)).

3.4.4 Norm

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



Im unteren Bereich des Registers stehen zwei Schaltflächen zur Verfügung. [Standard] stellt die Ausgangswerte der aktuellen Norm wieder her, [Als Standard setzen] speichert die getroffenen Eingaben als neue Voreinstellungen ab.

Bild 3.37: Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *DIN EN 1992-1-1*

Mindestbewehrung

Dieser Abschnitt steuert, welche Normvorgaben bezüglich der Mindestbewehrungen bei der Bemessung zu berücksichtigen sind (siehe [Kapitel 2.3.7](#), [Seite 22](#)).



Für Platten und Wände lassen sich über die Schaltfläche [Einstellungen] in weiteren Dialogen die Richtungen der Mindest- bzw. Hauptdruckbewehrung vorgeben.

Platten

Bild 3.38: Dialog *Einstellungen der Mindestbewehrung mit duktilem Verhalten*

Nach EN 1992-1-1, Abschnitt 9.3.1 ist die Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens in die Hauptspannungsrichtung der Platte einzulegen. Da die Hauptspannungsrichtung in der elementweisen Ermittlung der Bewehrung nicht automatisch gefunden werden kann, lässt sich Bewehrungsrichtung, in der die Mindestbewehrung berücksichtigt werden soll, über folgende Auswahlfelder steuern:

- **Bewehrungsrichtung mit Hauptzugkraft im betrachteten Element**

Die Mindestbewehrung wird nur in die Bewehrungsrichtung mit der größten Zugkraft aus allen Bewehrungsrichtungen von Oberseite (-z) und Unterseite (+z) berücksichtigt: Die Mindestbewehrung wird nur in eine Richtung und auf einer Plattenseite eingelegt.

- **Bewehrungsrichtung mit Hauptzugkraft in jeweiliger Bewehrungsseite**

Für jede Bewehrungsseite wird die Bewehrungsrichtung mit der größten Zugkraft gesucht. Die Mindestbewehrung wird dann auf jeder Seite für diese Richtungen ermittelt.

- **Definieren**

Die Bewehrungsrichtung, in der die Mindestbewehrung angesetzt werden soll, kann manuell festgelegt werden.

Wände

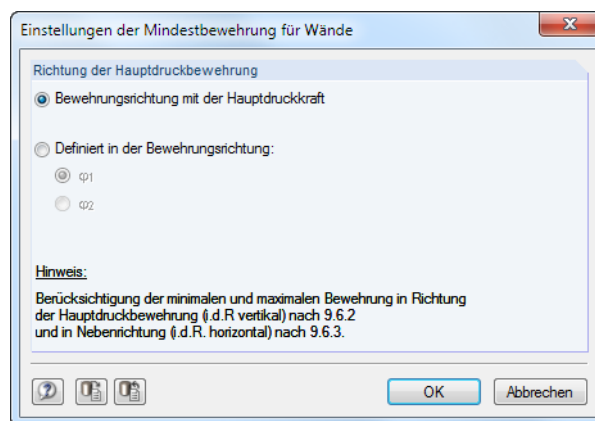


Bild 3.39: Dialog *Einstellungen der Mindestbewehrung für Wände*

Die Richtung der Hauptdruckbewehrung zur Ermittlung der Mindestlängsbewehrung für Wände kann in Richtung der *Hauptdruckkraft* oder *Definiert* vorgegeben werden.

Schubbewehrung

Die beiden Eingabefelder legen den zulässigen Bereich der *Druckstrebenneigung* θ fest. Die Winkel sind gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.3 voreingestellt. Sie können bei Bedarf angepasst werden, dürfen aber nicht außerhalb der Gültigkeitsgrenzen liegen.

Faktoren

Die oberen Eingabefelder steuern die *Teilsicherheitsbeiwerte* für Beton γ_c und für Betonstahl γ_s bei der Bemessung. Es sind die Werte gemäß EN 1992-1-1, Tabelle 2.1 für die verschiedenen Bemessungssituationen voreingestellt.

Über die *Reduzierungsfaktor* α_{cc} bzw. α_{ct} werden Langzeitwirkungen auf die Druck- bzw. Zugfestigkeit des Betons berücksichtigt. Diese Beiwerte sind in EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.6 (1) bzw. 3.1.6 (2) geregelt.

Verschiedenes

Mit dem Kontrollfeld kann eine *Begrenzung der Druckzonenhöhe* gemäß EN 1992-1-1, Abschnitt 5.6.3 (2) vorgenommen 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.

3.4.5 Bemessungsmethode

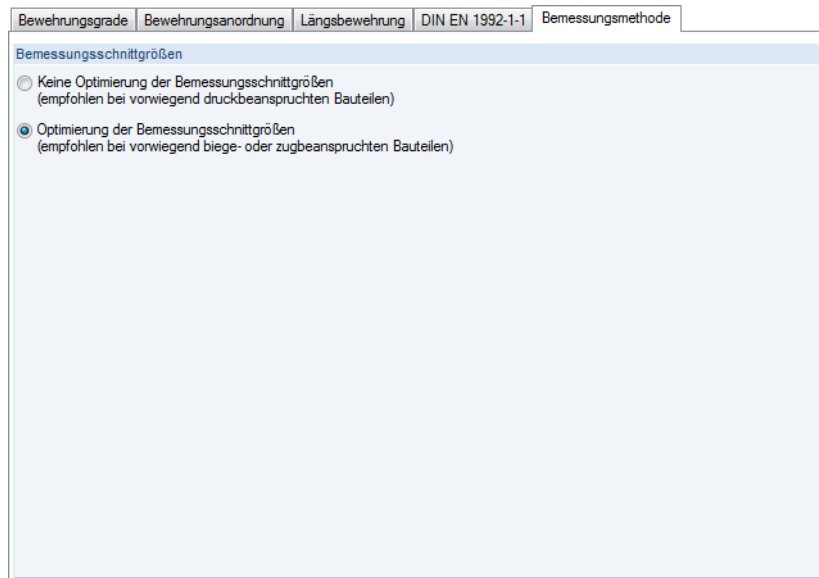


Bild 3.40: Maske 1.4 Bewehrung, Register Bemessungsmethode

Bei der Ermittlung der erforderlichen Bewehrung werden die Hauptschnittgrößen in Bemessungskräfte (in Richtung der Bewehrungen) und in eine sich ausbildende Betondruckstrebenkraft transformiert. Die Größen der Bemessungskräfte sind abhängig vom angenommenen Winkel der Betondruckstrebe, die das Bewehrungsnetz aussteift.

Bei den Belastungssituationen „Zug-Zug“ und „Zug-Druck“ (siehe [Bild 2.18](#), [Seite 18](#)) kann bei einer bestimmten Druckstrebenneigung der Fall eintreten, dass die Bemessungskraft in eine Bewehrungsrichtung negativ wird, d. h. es würden Druckkräfte für die Zugbewehrung vorliegen. Durch eine Optimierung der Bemessungskräfte wird die Richtung der Betondruckstrebe so lange verändert, bis die negative Bemessungskraft zu null wird.

Bei der *Optimierung* der Schnittgrößen wird somit untersucht, welcher Neigungswinkel der Betondruckstrebe zum günstigsten Bemessungsergebnis führt. Die Bemessungsmomente werden iterativ mit angepassten Neigungswinkeln ermittelt, um die energetisch kleinste Lösung mit dem geringsten Bewehrungsbedarf zu finden. Die Optimierung ist im [Kapitel 2.4.1](#) ab [Seite 25](#) anhand eines Beispiels beschrieben.



Bei druckbeanspruchten Betonbauteilen wie Wänden kann die Optimierung zu Unbemessbarkeiten führen, da die Betondruckstrebe versagt. Die Optimierung ist daher für die Belastungssituationen „Druck-Druck“ nicht zu empfehlen.

4 Berechnung

Berechnung

Die [Berechnung] in RF-BETON Flächen erfolgt mit den Schnittgrößen von RFEM. Liegen noch keine Ergebnisse in RFEM vor, so wird die Berechnung der Schnittgrößen automatisch vorgeschaltet.

4.1 Details

Details...

Über die Schaltfläche [Details], die in Maske 1.1 *Basisangaben* zur Verfügung steht, kann die Bemessung von Ergebniskombinationen bzw. mehreren Lastfällen oder Lastkombinationen sowie der Schnittgrößen in Glättungs- und Rippenbereichen gesteuert werden.

Es öffnet sich folgender Dialog.

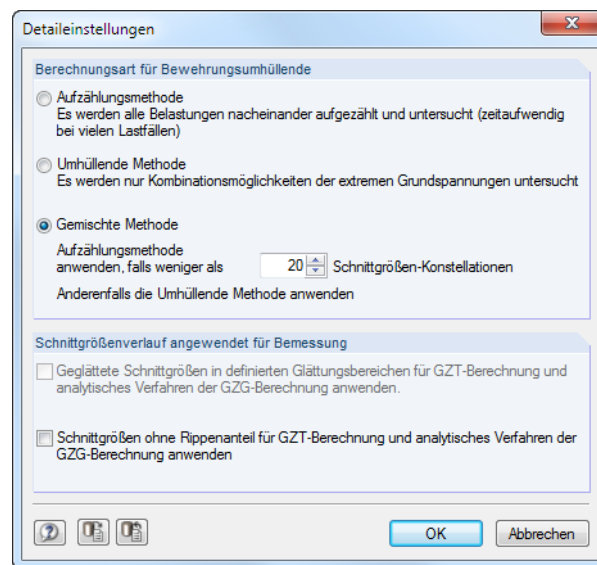


Bild 4.1: Dialog *Detaileinstellungen*

Berechnungsart für Bewehrungsumhüllende

Der Abschnitt steuert, wie die Bemessungsschnittgrößen von Ergebniskombinationen in die Berechnung übergeben werden. Diese Vorgabe gilt auch, wenn mehrere Lastfälle oder Lastkombinationen im Bemessungsfall zu untersuchen sind. Die *Gemischte Methode* ist voreingestellt: Vor der Bemessung wird untersucht, ob die *Aufzählungsmethode* oder die *Umhüllende Methode* den geringeren Rechenaufwand erfordert.

Aufzählungsmethode

Jeder Lastfall und jede Lastkombination, die in Maske 1.1 *Basisangaben* zur Bemessung ausgewählt ist, wird einzeln bemessen. Aus den Ergebnissen wird eine Bewehrungsumhüllende gebildet. Bei Ergebniskombinationen werden 16 Berechnungen für die RFEM-Extremwerte der Grundschnittgrößen $\max/\min m_x$, $\max/\min n_x$, $\max/\min m_y$, $\max/\min n_y$, $\max/\min m_{xy}$, $\max/\min n_{xy}$, $\max/\min v_x$ und $\max/\min v_y$ durchgeführt.

Die Aufzählungsmethode ist sehr präzise, da jede Kombination separat berechnet und danach die umhüllende Bewehrung ermittelt wird. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen beim zeilenweisen Abarbeiten mit der Anzahl der Lastfälle exponentiell anwächst. So werden z. B. bei 50 ausgewählten Lastkombinationen auch 50 Bewehrungsbemessungen durchgeführt. In den Nachweisen sind aber alle möglichen Konstellationen erfasst.

Umhüllende Methode

Aus den in Maske 1.1 *Basisangaben* ausgewählten Lastfällen, Last- und Ergebniskombinationen wird eine Schnittgrößenumhüllende gebildet. Es werden 16 Extremwertkonstellationen untersucht. Dabei besteht folgender Unterschied zur Extremwertausgabe von Ergebniskombinationen in RFEM: Es werden auch Extremwertzustände der Grundspannungen untersucht, die nicht nur auf den maximalen Grundschnittgrößen basieren, sondern auch auf deren Zusammenwirken (z. B. $m_x + m_{xy}$). Mit dieser Umhüllenden aus 16 Extremwertkonstellationen wird anschließend die Bewehrungermittlung gestartet. Somit werden 16 Berechnungsdurchgänge zur Bestimmung der Bewehrung durchgeführt. Bei einer größeren Anzahl von Lastfällen, Last- oder Ergebniskombinationen bleibt der zeitliche Rechenaufwand in einem verträglichen Rahmen.

Da eine Schnittgrößenumhüllende mit 16 Extremwerten gebildet wird, können u. U. die ungünstigsten Konstellationen nicht erfasst werden, die sich beim zeilenweisen Abarbeiten der Lastfälle wie bei der Aufzählungsmethode ergeben würden. Als kritisch erweisen sich Kombinationen mit Lastfällen, deren Wirkrichtungen orthogonal ausgeprägt sind. Hier empfiehlt sich eine Kontrollrechnung nach der Aufzählungsmethode.

Gemischte Methode

Vor der Bemessung wird untersucht, wie viele Bemessungen mit den Maske 1.1 *Basisangaben* ausgewählten Lastfällen, Last- und Ergebniskombinationen je Grenzzustand durchzuführen sind. Wie im Abschnitt *Aufzählungsmethode* erwähnt, wird für jeden Lastfall bzw. jede Lastkombination eine separate Bemessung durchgeführt. Für eine Ergebniskombination sind 16 Berechnungen für die Extremwertkonstellationen der Grundschnittgrößen erforderlich. Sind z. B. eine Ergebniskombination und 5 Lastkombinationen zur Bemessung ausgewählt, so erhält man ein $16 + 5 = 21$ Bemessungsläufe. Da diese Anzahl größer ist als die Voreinstellung von 20 Schnittgrößen-Konstellationen, erfolgt die Bemessung nach der *Umhüllenden Methode*.

Im Eingabefeld kann die Obergrenze der Konstellationen festgelegt werden, die nach der genauen Aufzählungsmethode bemessen werden.

Die *Gemischte Methode* stellt somit einen Kompromiss zwischen Ergebnisgenauigkeit und Bemessungsgeschwindigkeit dar.

Schnittgrößenverlauf für Bemessung

Geglättete Schnittgrößen anwenden

In der Regel werden die flächenweise geglätteten RFEM-Schnittgrößen für die Bemessung benutzt: RF-BETON Flächen transformiert die Momente und Normalkräfte in die Richtungen der Längsbewehrung und führt dann die Nachweise (siehe [Kapitel 2.5.1](#), [Seite 45](#)).

Wenn das Kontrollfeld in diesem Abschnitt angehakt wird, so erfolgt die Bemessung mit den Schnittgrößen, die in den Glättungsbereichen von RFEM vorliegen. Anhand der geglätteten Ergebnisse können Singularitäten abgemindert und lokale Umlagerungseffekte im Modell berücksichtigt werden (siehe [Bild 4.2](#)).

Die Glättungsbereiche sind im Kapitel 9.7.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

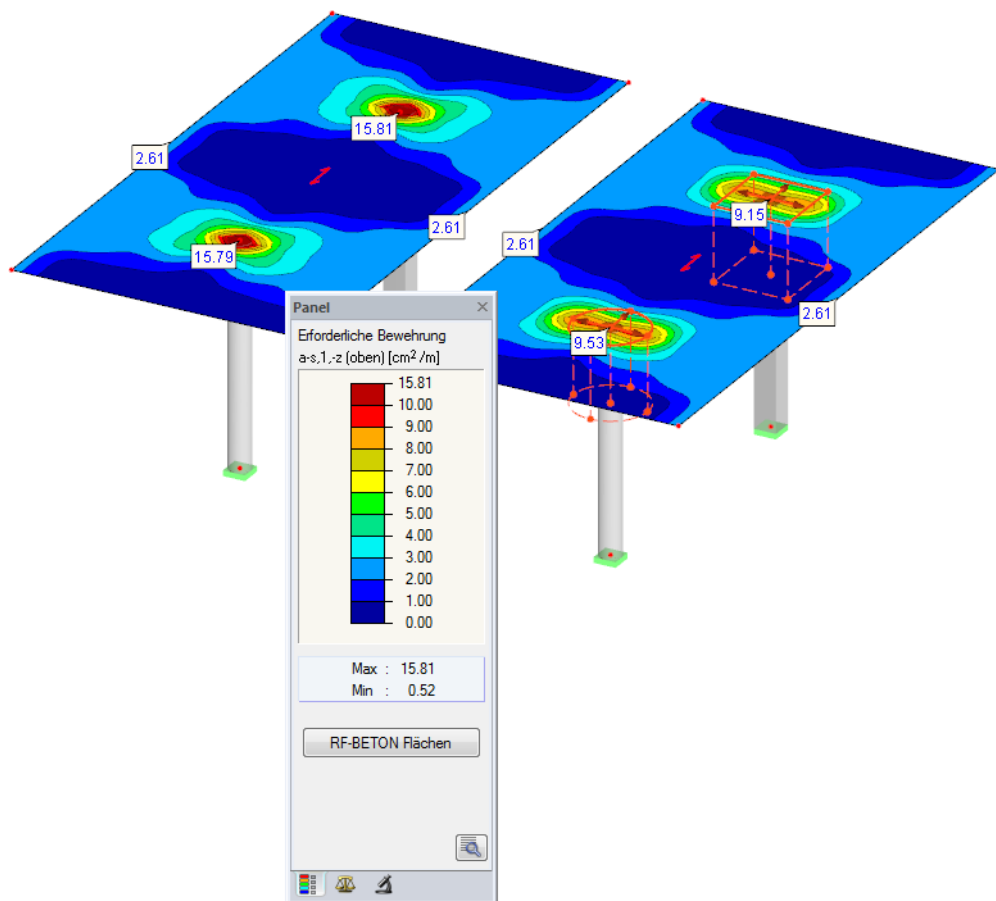


Bild 4.2: Obere Bewehrung für uneglättete Schnittgrößen (links) und Glättungsbereiche über Stützen (rechts)

Schnittgrößen ohne Rippenanteil anwenden

Im RFEM kann ein Plattenbalken durch eine Fläche und einen exzentrisch angeschlossenen Stab des Typs „Rippe“ modelliert werden. Die Schnittgrößen des Plattenbalkens aus Flächenanteil und Stab werden durch Integration der Flächenschnittgrößen als Rippenschnittgrößen ausgegeben.

Das Kontrollfeld in diesem Abschnitt steuert, ob die der Rippe zugerechneten Flächenschnittgrößen in der Flächenbemessung berücksichtigt werden. Die Bemessung mit Rippenanteil ist vor-eingestellt.

4.2 Kontrolle

Kontrolle

Vor der Berechnung empfiehlt es sich, die Eingabedaten auf ihre Richtigkeit hin überprüfen zu lassen. Die [Kontrolle] ist in jeder Eingabemaske von RF-BETON Flächen 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 4.3: Plausibilitätskontrolle

4.3 Start der Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske des Moduls RF-BETON Flächen kann die buttonBerechnung über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

RF-BETON Flächen 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: Der Dialog *Zu berechnen* (Menü *Berechnung* → *Zu berechnen*) listet die Bemessungsfälle der Zusatzmodule wie Lastfälle oder Lastkombinationen auf.

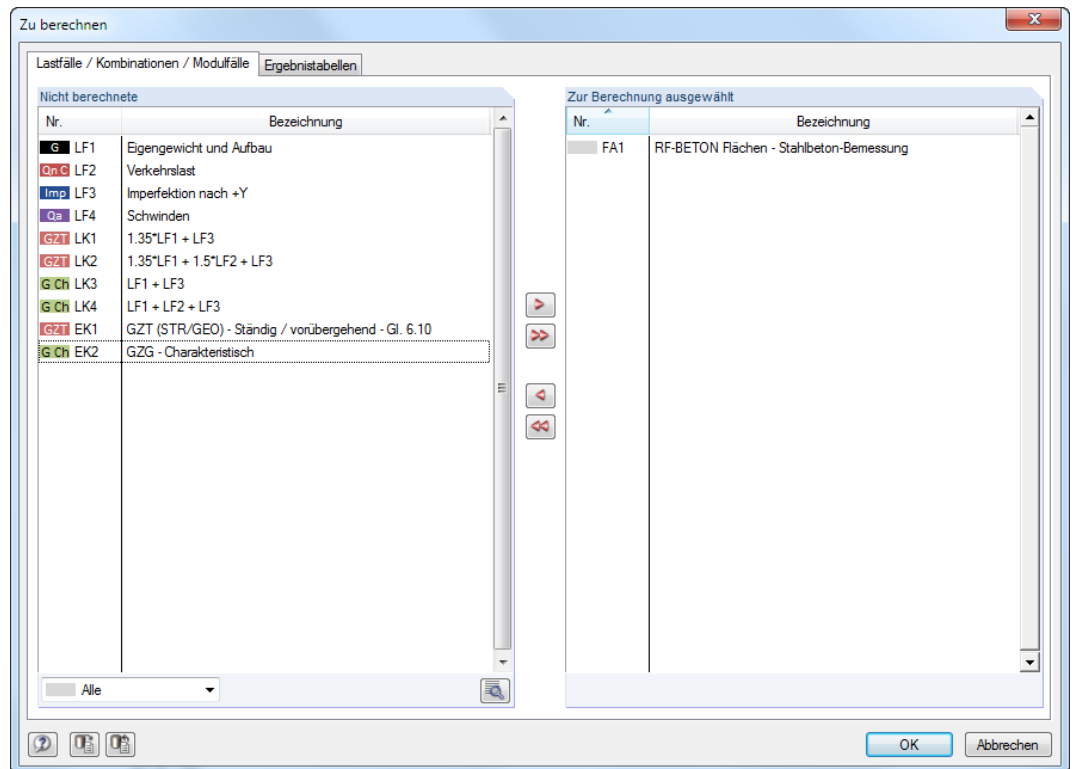
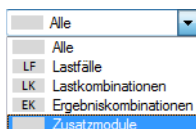


Bild 4.4: Dialog *Zu berechnen*



Falls die RF-BETON Flächen-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 Flächen-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 Flächen-Fall ein und klicken dann die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] an.



Bild 4.5: Direkte Berechnung eines RF-BETON Flächen - Bemessungsfalls in RFEM

Der Ablauf der Bemessung kann anschließend in einem Dialog verfolgt werden.

5 Ergebnisse

Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske 2.1 *Erforderliche Bewehrung Gesamt*.

Fläche Nr.	Punkt Nr.	X	Y	Z	Symbol	Erforderliche Bewehrung	Grund-Bewehrung	Zusatzbewehrung	Erforderlich	Vorhanden	Einheit	Hinweis
5	N1054	9.500	6.000	2.500	as.1.-z (oben)	7.11	2.57	4.54	4.54	cm ² /m		
1	N3	9.500	6.000	0.000	as.2.-z (oben)	6.73	0.00	6.73	6.73	cm ² /m		
5	N3	9.500	6.000	0.000	as.1.-z (unten)	13.99	2.57	11.42	11.42	cm ² /m		
1	N6	5.000	4.000	0.000	as.2.-z (unten)	16.66	2.57	14.09	14.09	cm ² /m		
1	N188	6.890	4.000	0.000	as.w	21.12	-	-	-	cm ² /m ²		

Bild 5.1: Ergebnismaske

Die Tragfähigkeitsnachweise sind in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.3 nach verschiedenen Kriterien sortiert.

Die Masken 3.1 bis 3.3 geben Aufschluss über die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.



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.

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten

Am unteren Ende der Tabellen befinden sich zwei Kontrollfelder. Sie steuern, ob die Ergebnisdaten *In FE-Punkten* oder *In Rasterpunkten* angezeigt werden. Die Ergebnisse der FE-Punkte werden direkt vom Rechenkern ermittelt, die Rasterpunkt-Ergebnisse durch Interpolation der FE-Punkt-ergebnisse bestimmt.

OK

[OK] sichert die Ergebnisse. RF-BETON Flächen wird beendet und es erfolgt die Rückkehr in das Hauptprogramm.

Das [Kapitel 5 Ergebnisse](#) stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Überprüfung der Resultate ist im [Kapitel 6 Ergebnisauswertung](#) ab [Seite 173](#) beschrieben.

5.1 Erforderliche Bewehrung Gesamt

Es werden die maximalen Bewehrungsquerschnitte aller untersuchten Flächen ausgegeben, die sich aus den Schnittgrößen der gewählten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen für den Nachweis der Tragfähigkeit ergeben.

2.1 Erforderliche Bewehrung Gesamt

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Symbol	F Erforderliche Bewehrung	G Grund-Bewehrung	H Zusatzbewehrung Erforderlich	I Vorhanden	J Einheit	K Hinweis
5	N1054	9.500	6.000	2.500	a _{s,1,-z} (oben)	7.11	2.57	4.54	4.54	cm ² /m	
1	N3	9.500	6.000	0.000	a _{s,2,-z} (oben)	6.73	0.00	6.73	6.73	cm ² /m	
5	N3	9.500	6.000	0.000	a _{s,1,+z} (unten)	13.99	2.57	11.42	11.42	cm ² /m	
1	N6	5.000	4.000	0.000	a _{s,2,+z} (unten)	16.66	2.57	14.09	14.09	cm ² /m	
1	N188	6.890	4.000	0.000	a _{sw}	21.12	-	-	-	cm ² /m ²	

☒ In FE-Punkten
 ☐ In Rasterpunkten
 Erfor. Bewehrung für: GZT

Bild 5.2: Maske 2.1 Erforderliche Bewehrung Gesamt

Fläche Nr.

Es werden die Nummern der Flächen angegeben, in denen sich die maßgebenden Punkte befinden.

Punkt Nr.

☒ In FE-Punkten
 ☐ In Rasterpunkten

In diesen FE- bzw. Rasterpunkten wurde die größte erforderliche Bewehrung für jede Lage und Richtung ermittelt. Die Art der Bewehrung wird in Spalte E *Symbol* angegeben.

Die FE-Netzpunkte *N* werden automatisch erzeugt. Die Rasterpunkte *R* hingegen lassen sich in RFEM steuern, denn für Flächen sind benutzerdefinierte Ergebnistraster möglich. Die Funktion ist im Kapitel 8.12 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Punkt-Koordinaten X/Y/Z

Die drei Spalten geben die Koordinaten der jeweils maßgebenden FE- oder Rasterpunkte an.

Symbol

Spalte E weist die Art der Bewehrung aus. Für die vier (bzw. sechs) Längsbewehrungen werden jeweils die Richtung (1, 2 und ggf. 3) und Flächenseite (*oben* und *unten*) angegeben.

Die Bewehrungsrichtungen wurden in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Bewehrungsanordnung* festgelegt (siehe Kapitel 3.4.2, Seite 146).



Obere und Untere Lage

Die obere Bewehrung befindet sich auf der Flächenseite in Richtung der negativen lokalen z-Flächenachse (-z), die untere Bewehrung entsprechend in Richtung der positiven z-Achse (+z). Im Bild 3.29 auf Seite 147 sind die Achsensysteme der Flächen dargestellt.

Die Schubbewehrung ist als a_{sw} gekennzeichnet.

Erforderliche Bewehrung

In dieser Spalte werden die Bewehrungsquerschnitte ausgewiesen, die für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlich sind.

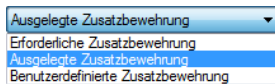
Grundbewehrung

Hier findet sich die benutzerdefinierte Grundbewehrung wieder, die in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* vorgegeben wurde (siehe Kapitel 3.4.3, Seite 150).

Zusatzbewehrung

Beim reinen Tragfähigkeitsnachweis wird in der Spalte *Erforderlich* die Differenz zwischen erforderlicher Bewehrung (Spalte F) und vorhandener Grundbewehrung (Spalte G) angegeben.

Wurden auch die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt, so lassen sich hier die Bewehrungsquerschnitte ablesen, die mit den Vorgaben in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* (siehe Kapitel , Seite 150) zur Erfüllung der Gebrauchstauglichkeitsnachweise benötigt werden. In der Spalte *Vorhanden* wird die Bewehrung ausgewiesen, die gemäß Vorgabe in Maske 1.4 *Bewehrung*, Register *Längsbewehrung* als Zusatzbewehrung für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis vorliegt.



Hinweise

Die letzte Spalte verweist auf Unbemessbarkeiten oder Besonderheiten, die sich im Zuge der Bemessung ergeben haben. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Über die links dargestellte Schaltfläche lassen sich sämtliche [Meldungen] des aktuellen Bemessungsfalls einsehen. Es erscheint ein Dialog mit einer Übersicht.

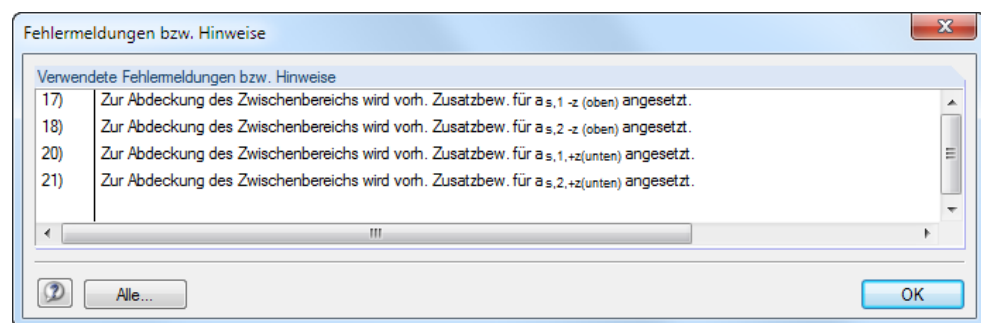


Bild 5.3: Dialog Fehlermeldungen bzw. Hinweise



Die Schaltflächen sind im Kapitel 6 Ergebnisauswertung auf Seite 173 erläutert.

5.2 Erforderliche Bewehrung flächenweise

2.2 Erforderliche Bewehrung flächenweise

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Symbol	F Erforderliche Bewehrung	G Grund- Bewehrung	H Zusatzbewehrung Erforderlich	I Vorhanden	J Einheit	K Hinweis
1	N20	6.000	6.000	0.000	Bs,1.-z (oben)	5.24	0.00	5.24	5.60	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bs,2.-z (oben)	6.73	0.00	6.73	6.73	cm ² /m	
	N169	5.110	4.000	0.000	Bs,1.+z (unten)	9.77	2.57	7.20	7.20	cm ² /m	
	N6	5.000	4.000	0.000	Bs,2.+z (unten)	16.66	2.57	14.09	14.09	cm ² /m	
	N188	6.890	4.000	0.000	Bsw	21.12	-	-	-	cm ² /m ²	
2	N678	9.926	5.785	0.000	Bs,1.-z (oben)	5.60	0.00	5.60	5.60	cm ² /m	
	N678	9.926	5.785	0.000	Bs,2.-z (oben)	6.36	0.00	6.36	6.73	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bs,1.+z (unten)	0.79	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N74	9.500	4.500	0.000	Bs,2.+z (unten)	2.61	2.57	0.04	14.09	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bsw	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
3	N1	0.000	0.000	0.000	Bs,1.-z (oben)	2.00	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N748	0.000	3.000	0.000	Bs,2.-z (oben)	3.71	2.57	1.14	2.91	cm ² /m	
	N717	0.000	0.000	0.500	Bs,1.+z (unten)	2.55	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N2	0.000	6.000	0.000	Bs,2.+z (unten)	2.00	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N1	0.000	0.000	0.000	Bsw	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
4	N4	9.500	0.000	0.000	Bs,1.-z (oben)	2.27	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N110	6.206	0.000	0.000	Bs,2.-z (oben)	5.48	2.57	2.91	2.91	cm ² /m	
	N821	9.500	0.000	0.500	Bs,1.+z (unten)	3.90	2.57	1.33	11.42	cm ² /m	
	N4	9.500	0.000	0.000	Bs,2.+z (unten)	2.00	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
	N1	0.000	0.000	0.000	Bsw	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
5	N1054	9.500	6.000	2.500	Bs,1.-z (oben)	7.11	2.57	4.54	4.54	cm ² /m	
	N821	9.500	0.000	0.500	Bs,2.-z (oben)	3.42	2.57	0.85	2.91	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bs,1.+z (unten)	13.99	2.57	11.42	11.42	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bs,2.+z (unten)	3.97	2.57	1.40	1.40	cm ² /m	
	N3	9.500	6.000	0.000	Bsw	8.76	-	-	-	cm ² /m ²	

☒ In FE-Punkten
 ☐ In Rasterpunkten
 Erfor. Bewehrung für: GZT

Bild 5.4: Maske 2.2 Erforderliche Bewehrung flächenweise

Diese Maske listet die maximalen Bewehrungsquerschnitte auf, die für jede der bemessenen Flächen erforderlich sind. Die Spalten sind im [Kapitel 5.1](#) erläutert.

5.3 Erforderliche Bewehrung punktweise

2.3 Erforderliche Bewehrung punktweise

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Symbol	F Erforderliche Bewehrung	G Grund-Bewehrung	H Zusatzbewehrung Erforderlich	I Vorhanden	J Einheit	K Hinweis
1	N1	0.000	0.000	0.000	$a_{s,1,-z}$ (oben)	0.00	0.00	0.00	5.60	cm ² /m	17)
					$a_{s,2,-z}$ (oben)	0.00	0.00	0.00	6.73	cm ² /m	18)
					$a_{s,1,+z}$ (unten)	0.52	2.57	0.00	0.00	cm ² /m	
					$a_{s,2,+z}$ (unten)	2.61	2.57	0.04	14.09	cm ² /m	
					a_{sw}	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
					$n_{1,-z}$ (oben)	-24.049	-	-	-	kN/m	
					$n_{2,-z}$ (oben)	-25.222	-	-	-	kN/m	
					$n_{1,+z}$ (unten)	11.465	-	-	-	kN/m	
					$n_{2,+z}$ (unten)	11.881	-	-	-	kN/m	
					V_{Ed}	43.721	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,c}$	95.649	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,max}$	623.384	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,s}$	0.000	-	-	-	kN/m	
					Theta	21.801	-	-	-	°	
1	N2	0.000	6.000	0.000	$a_{s,1,-z}$ (oben)	1.23	0.00	1.23	5.60	cm ² /m	
					$a_{s,2,-z}$ (oben)	0.70	0.00	0.70	6.73	cm ² /m	
					$a_{s,1,+z}$ (unten)	2.56	2.57	0.00	7.20	cm ² /m	20)
					$a_{s,2,+z}$ (unten)	1.11	2.57	0.00	14.09	cm ² /m	21)
					a_{sw}	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
					$n_{1,-z}$ (oben)	55.975	-	-	-	kN/m	
					$n_{2,-z}$ (oben)	31.648	-	-	-	kN/m	
					$n_{1,+z}$ (unten)	67.013	-	-	-	kN/m	
					$n_{2,+z}$ (unten)	50.545	-	-	-	kN/m	
					V_{Ed}	60.140	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,c}$	83.487	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,max}$	612.558	-	-	-	kN/m	
					$V_{Rd,s}$	0.000	-	-	-	kN/m	
					Theta	21.801	-	-	-	°	
1	N3	9.500	6.000	0.000	$a_{s,1,-z}$ (oben)	3.53	0.00	3.53	5.60	cm ² /m	
					$a_{s,2,-z}$ (oben)	6.73	0.00	6.73	6.73	cm ² /m	
					$a_{s,1,+z}$ (unten)	3.94	2.57	1.37	7.20	cm ² /m	
					$a_{s,2,+z}$ (unten)	0.79	2.57	0.00	14.09	cm ² /m	21)
					a_{sw}	0.00	-	-	-	cm ² /m ²	
					$n_{1,-z}$ (oben)	160.500	-	-	-	kN/m	

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten
 Erfor. Bewehrung für: GZT

Bild 5.5: Maske 2.3 Erforderliche Bewehrung punktweise

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten

Diese Ergebnismaske listet die maximalen Bewehrungsquerschnitte für alle FE- bzw. Rasterpunkte jeder Fläche auf. Die Spalten sind im [Kapitel 5.1](#) erläutert.

Neben den Längs- und Schubbewehrungen werden bemessungsrelevante Werte der Einwirkungen und Tragfähigkeiten ausgegeben. Für EN 1992-1-1 sind dies:

Symbol	Bedeutung
$n_{1,-z}(\text{oben})$	Normal- bzw. Membrankraft zur Bemessung der Bewehrung in die erste Bewehrungsrichtung an der Flächenoberseite
$n_{2,-z}(\text{oben})$	Normal- bzw. Membrankraft zur Bemessung der Bewehrung in die zweite Bewehrungsrichtung an der Flächenoberseite
$n_{1,+z}(\text{unten})$	Wie $n_{1,-z}(\text{oben})$, jedoch für Flächenunterseite
$n_{2,+z}(\text{unten})$	Wie $n_{2,-z}(\text{oben})$, jedoch für Flächenunterseite
$m_{1,-z}(\text{oben})$ $m_{2,-z}(\text{oben})$	Nur für Modelltyp 2D – XY($u_z/\phi_x/\phi_y$): Moment zur Bemessung der Bewehrung in die erste bzw. zweite Bewehrungsrichtung an der Flächenoberseite
$m_{1,-z}(\text{unten})$ $m_{2,-z}(\text{unten})$	Wie $m_{1,-z}(\text{oben})$ / $m_{2,-z}(\text{oben})$, jedoch für Flächenunterseite
V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
$V_{Rd,c}$	Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung
$V_{Rd,max}$	Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe
$V_{Rd,s}$	Querkrafttragfähigkeit der Querkraftbewehrung
Theta	Neigungswinkel der Betondruckstrebe θ

Tabelle 5.1: Ausgabegrößen in Maske 2.3 für EN 1992-1-1



Mit der Suchfunktion, die über die links dargestellte Schaltfläche aufgerufen wird, lassen sich FE- und Rasterpunkte schnell finden (siehe Bild 6.7, Seite 179).

5.4 Gebrauchstauglichkeitsnachweis Gesamt

Der obere Teil der Maske bietet eine Zusammenfassung der maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise. Im unteren Teil werden die Zwischenergebnisse des aktuellen FE- oder Rasterpunkts (des Punkts, der im oberen Teil markiert ist) mit allen bemessungsrelevanten Parametern ausgewiesen. Die Kapitel lassen sich mit öffnen und mit schließen.

3.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis Gesamt

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Belastung	F Symbol	G Vorh. Wert	H Nachweis Grenzwert	I Einheit	J Ausnutzung	K Hinweis
5	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_c	-4.98	-13.50	N/mm ²	0.37	
5	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_s	322.85	400.00	N/mm ²	0.81	
1	N1	0.000	0.000	0.000	EK2	$a_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	207)
5	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	$lim\ d_s$	10.0	9.9	mm	1.02	211)
5	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	$lim\ s_l$	0.095	0.096	m	0.99	
5	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	w_k	0.282	0.300	mm	0.95	

☒ In FE-Punkten

☐ In Rasterpunkten

Max: 1.16 > 1

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 5 - FE-Netzpunkt Nr. 3

☐ Bestimmen der Betondruckspannung des ausstehenden Betons

☐ Unterseite (+z)

Beton reißt auf und die Bewehrung wird aktiviert.

☐ Betondruckspannung in Druckstrebenrichtung an gegenüberliegender Seite

$\sigma_{c,strebe}$ -1.53 N/mm²

Maßgebende Betondruckstrebenkraft

$n_{druck,+z}$ -160.68 kNm/m

Betonquerschnittsfläche

A_c 1050.00 cm²

☐ Oberseite (-z)

Beton reißt an dieser Seite nicht auf.

☐ Bestimmen der Betondruckspannung in die einzelnen Bewehrungsrichtungen

☐ Unterseite (+z)

☐ Oberseite (-z)

Betondruckspannung in 1. Richtung

$\sigma_{c,z,\phi 1}$ -4.98 N/mm²

Betondruckspannung in 2. Richtung

$\sigma_{c,z,\phi 2}$ 0.00 N/mm²

☐ Zulässige Betondruckspannung

$max\ \sigma_c$ -4.98 N/mm²

☐ Zulässige Betondruckspannung

k_2 0.450

Charakteristische Betonfestigkeit

f_{ck} 30.00 N/mm²

☐ Zulässige Betondruckspannung

$zul\ \sigma_c$ -13.50 N/mm²

☐ Nachweis

Maximale Betondruckspannung

$max\ \sigma_c$ -4.98 N/mm²

Zulässige Betondruckspannung

$zul\ \sigma_c$ -13.50 N/mm²

Nachweiskriterium

Kriterium 0.369

Bild 5.6: Maske 3.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis Gesamt

Bild 5.6 zeigt die Ergebnismaske einer analytischen Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung. Im Kapitel 5.7 auf Seite 170 sind die Ergebnismasken beschrieben, die nach einer nichtlinearen Gebrauchstauglichkeitsberechnung erscheinen.

Die Nachweismethode wird in Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit festgelegt (siehe Bild 3.8, Seite 128).

Fläche Nr.

Es werden die Nummern der Flächen angegeben, in denen sich die maßgebenden Punkte befinden.

Punkt Nr.

In diesen FE- bzw. Rasterpunkten liegen die größten Ausnutzungen für die geforderten Nachweise vor. Die Art des Nachweises wird in Spalte F Typ angegeben.

Die FE-Netzpunkte *N* werden automatisch erzeugt. Die Rasterpunkte *R* lassen sich in RFEM steuern (siehe Kapitel 8.12 des RFEM-Handbuchs).

Punkt-Koordinaten X/Y/Z

Die drei Spalten geben die Koordinaten der maßgebenden FE- oder Rasterpunkte an.

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten

Lastfall

In Spalte E werden die Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen ausgewiesen, deren Schnittgrößen zur größten Ausnutzung beim jeweiligen Gebrauchstauglichkeitsnachweis führen.

Symbol

Spalte F beschreibt die Art des Gebrauchstauglichkeitsnachweises. Bei der analytischen Methode werden bis zu sechs Nachweistypen angezeigt. Diese sind im [Kapitel 2.6.4](#) ab [Seite 69](#) anhand eines Beispiels erläutert.

Die Nachweistypen bedeuten im Einzelnen:

Typ	Nachweis GZG
σ_c	Begrenzung der Betondruckspannung (→ Kapitel 2.6.4.7, Seite 74) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 <i>Flächen</i> (siehe Bild 3.20, Seite 141)
σ_s	Begrenzung der Betonstahlspannung (→ Kapitel 2.6.4.8, Seite 77) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 <i>Flächen</i> (siehe Bild 3.19, Seite 138)
$a_{s,min}$	Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite (→ Kapitel 2.6.4.9, Seite 78) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 <i>Flächen</i> (siehe Bild 2.97, Seite 79)
$\lim d_s$	Begrenzung des Stabdurchmessers (→ Kapitel 2.6.4.10, Seite 81) gemäß Vorgabe in Maske 1.4 <i>Bewehrung</i> (siehe Bild 3.32, Seite 150)
$\lim s_l$	Begrenzung des Stababstands (→ Kapitel 2.6.4.11, Seite 83) gemäß Vorgabe in Maske 1.4 <i>Bewehrung</i> (siehe Bild 3.32, Seite 150)
w_k	Begrenzung der Rissbreite (→ Kapitel 2.6.4.12, Seite 84) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 <i>Flächen</i> (siehe Bild 3.19, Seite 138)

Tabelle 5.2: Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach analytischer Methode

Vorhandener Wert

In dieser Spalte werden die Werte angegeben, die von allen Flächen für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend sind.

Grenzwert

Die Grenzwerte ermitteln sich aus den Normvorgaben und der Belastungssituation. Im [Kapitel 2.6.4](#) ab [Seite 69](#) ist die Ermittlung der Grenzwerte beschrieben.

Ausnutzung

Max: 0.85 ≤ 1

In der Spalte J wird das Verhältnis von vorhandenem Wert (Spalte G) zu Grenzwert (Spalte H) ausgegeben. Bei Ausnutzungen größer 1 ist der Nachweis somit nicht erfüllt. Die Länge des farbigen Balkens stellt die jeweilige Ausnutzung in grafischer Form dar.



Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis müssen nicht sämtliche Nachweistypen erfüllt sein (siehe Erläuterung in [Bild 3.10, Seite 131](#)).

Hinweis

Die letzte Spalte verweist auf Unbemessbarkeiten oder Besonderheiten, die sich im Zuge der Bemessung ergeben haben. Die Nummern sind in der Statusleiste näher erläutert.

Meldungen...

Über die links dargestellte Schaltfläche lassen sich sämtliche [Meldungen] des aktuellen Bemessungsfalls einsehen. Es erscheint ein Dialog mit einer Übersicht (siehe [Bild 5.3, Seite 163](#)).



Die Schaltflächen sind im [Kapitel 6 Ergebnisauswertung](#) auf [Seite 173](#) beschrieben.

5.5 Gebrauchstauglichkeitsnachweis flächenweise

3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis flächenweise

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B Punkt-Koordinaten [m] X	C Y	D Z	E Belastung	F Symbol	G Vorh. Wert	H Nachweis Grenzwert	I Einheit	J Ausnutzung	K Hinweis
1	N195	7.000	3.890	0.000	EK2	σ_c	-3.57	-13.50	N/mm ²	0.27	
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	σ_s	322.60	400.00	N/mm ²	0.81	
	N1	0.000	0.000	0.000	EK2	$a_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	207)
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	lim d _s	9.3	9.9	mm	0.95	
	N6	5.000	4.000	0.000	EK2	lim s _I	0.110	0.117	m	0.94	
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	w _k	0.241	0.300	mm	0.81	
2	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_c	-2.59	-13.50	N/mm ²	0.20	
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_s	0.00	400.00	N/mm ²	0.00	226)
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	$a_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	207) 208)
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	lim d _s	8.8	0.0	mm	0.00	226)

☒ In FE-Punkten
 ☐ In Rasterpunkten
 Max: 1.16 > 1

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 1

☐ Bestimmen der Mindestbewehrung

☐ Unterseite (+z)

Mindestbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,+z,1}$	3.85	cm ² /m
Mindestbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,+z,2}$	4.16	cm ² /m

☐ Oberseite (-z)

Mindestbewehrung in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,1}$	4.04	cm ² /m
Mindestbewehrung in 2. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,-z,2}$	3.97	cm ² /m

☐ Nachweis

Mindestbewehrung an der Unterseite in 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,min,+z,1}$	3.85	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung an der Unterseite (+z) in die 1. Bewehrungsrichtung	$a_{s,exist,+z,1}$	3.35	cm ² /m
Nachweiskriterium	Kriterium	1.150	

Bild 5.7: Maske 3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis flächenweise

Diese Maske listet die maximalen Ausnutzungen jeder bemessenen Fläche auf, die sich bei den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit ergeben. Die Spalten sind im [Kapitel 5.4](#) erläutert.

5.6 Gebrauchstauglichkeitsnachweis punktweise

3.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis punktweise

Fläche Nr.	Punkt Nr.	Punkt-Koordinaten [m]	Belastung	Symbol	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
		X Y Z							
1	N6	5.000 4.000 0.000	EK2	σ_c	-2.14	-13.50	N/mm ²	0.16	
			EK2	σ_s	318.26	400.00	N/mm ²	0.80	
			EK2	$\sigma_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	209) 210)
			EK2	lim d _s	9.3	10.1	mm	0.92	
			EK2	lim s _I	0.110	0.117	m	0.94	
			EK2	w _k	0.237	0.300	mm	0.79	
1	N7	7.000 4.000 0.000	EK2	σ_c	-2.00	-13.50	N/mm ²	0.15	
			EK2	σ_s	318.73	400.00	N/mm ²	0.80	
			EK2	$\sigma_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	209) 210)
			EK2	lim d _s	9.3	10.1	mm	0.93	

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten Max: 1.16 > 1

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 6

☐ Bestimmen des Rechenwert der Rissbreite

	Ausnutzung
<input type="checkbox"/> Unterseite (+z)	0.789
Rechenwert der Rissbreite in 1. Bewehrungsrichtung	0.237 mm
Rechenwert der Rissbreite in 2. Bewehrungsrichtung	0.236 mm
Rechenwert der Rissbreite in Richtung der resultierenden Dehnung	0.233 mm
<input type="checkbox"/> Oberseite (-z)	0.000
Beton reißt an dieser Seite nicht auf.	

☐ Nachweis

	Kriterium
Rissbreite an der Unterseite (+z) in 1. Bewehrungsrichtung	0.237 mm
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z) laut Benutzervorgabe	0.300 mm
Nachweiskriterium	0.789

Bild 5.8: Maske 3.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis punktweise

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten



Diese Ergebnismaske listet die maximalen Ausnutzungen für alle FE- bzw. Rasterpunkte jeder Fläche auf. Die Spalten sind im Kapitel 5.4 erläutert.

Mit der Suchfunktion, die über die links dargestellte Schaltfläche aufgerufen wird, lassen sich FE- und Rasterpunkte schnell finden (siehe Bild 6.7, Seite 179).

5.7 Nichtlineare Berechnung Gesamt

Der obere Teil der Maske bietet eine Zusammenfassung der maßgebenden Gebrauchstauglichkeitsnachweise. Im unteren Teil werden die Zwischenergebnisse des aktuellen FE- oder Rasterpunkts (des Punkts, der im oberen Teil markiert ist) mit allen bemessungsrelevanten Parametern ausgewiesen. Die Kapitel lassen sich mit öffnen und mit schließen.

3.1 Nichtlineare Berechnung Gesamt										
Fläche Nr.	Punkt Nr.	Punkt-Koordinaten [m]			Belastung	Symbol	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung
		X	Y	Z						
1	N154	5.000	3.226	0.000	LK4	$u_{z, \text{lokal}}$	34.477	35.000	mm	0.99
4	N826	6.729	0.000	0.271	LK4	w_k	0.146	0.300	mm	0.49
1	N6	5.000	4.000	0.000	LK4	σ_c	-10.33	-13.50	N/mm ²	0.77
1	N162	5.000	3.890	0.000	LK4	σ_s	303.10	400.00	N/mm ²	0.76

<input checked="" type="radio"/> In FE-Punkten	<input type="radio"/> In Rasterpunkten	Max: 0.99 ≤ 1	
--	--	---------------	--

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 154										
<input type="checkbox"/> Verformungen										
<input type="checkbox"/> Globale Verformungen										
Gesamte Deformation					u		34.871	mm		
In X-Richtung					u _x		-0.469	mm		
In Y-Richtung					u _y		0.725	mm		
In Z-Richtung					u _z		34.860	mm		
<input type="checkbox"/> Lokale Verformungen										
Verformung bezogen auf verschobene Parallelfäche an der Stelle des minimal verformten Knotens										
In z-Richtung					u _{z, lokal}		34.477	mm		
<input type="checkbox"/> Grundschnittgrößen - nichtlinear										
<input type="checkbox"/> Berechnung der Rissbreite										
<input type="checkbox"/> Oberseite (-z)					Ausnutzung		0.000			
<input type="checkbox"/> Unterseite (+z)					Ausnutzung		0.206			
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z)					w _{max, +z, grenz}		0.300	mm		
<input type="checkbox"/> Rissbreite in I. Hauptrichtung					w _{k, I, +z (unten)}		0.062	mm		
Risstiefe					h _{w, I, +z (unten)}		120.352	mm		
Rissabstand					s _{r, I, max, +z (unten)}		68.158	mm		
<input type="checkbox"/> Rissbreite in II. Hauptrichtung					w _{k, II, +z (unten)}		0.000	mm		
<input type="checkbox"/> Berechnung der Spannung										

Bild 5.9: Maske 3.1 Nichtlineare Berechnung Gesamt

Bild 5.9 zeigt die Ergebnismaske einer nichtlinearen Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung. Die Nachweismethode wird in Maske 1.1 Basisangaben, Register Gebrauchstauglichkeit festgelegt (siehe Bild 3.8, Seite 128).

Die Spalten sind im Kapitel 5.4 auf Seite 166 beschrieben.

Die Symbole bezeichnen folgende Nachweise:

Symbol	Nachweis GZG
$u_{z, \text{lokal}}$	Verformung im gerissenen Zustand (→ Kapitel 2.8.2.4, Seite 108) gemäß Vorgaben in Maske 1.3 Flächen
w_k	Begrenzung der Rissbreite (→ Kapitel 2.6.4.12, Seite 84) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 Flächen (siehe Bild 3.19, Seite 138)
σ_c	Begrenzung der Betondruckspannung (→ Kapitel 2.6.4.7, Seite 74) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 Flächen (siehe Bild 3.20, Seite 141)
σ_s	Begrenzung der Betonstahlspannung (→ Kapitel 2.6.4.8, Seite 77) gemäß Vorgabe in Maske 1.3 Flächen (siehe Bild 3.19, Seite 138)

Tabelle 5.3: Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach nichtlinearer Methode



Die Verformungen, Rissbreiten und Spannungen stellen die Ergebnisse im Zustand II dar.

Die Rissbreiten w_k bei den Zwischenergebnissen sind auf die Bewehrungsrichtungen bezogen. So stellt z. B. der Wert für $w_{k,I,-z(\text{oben})}$ die Rissbreite für die erste Bewehrungsrichtung an der Flächenoberseite dar; der Riss verläuft rechtwinklig zur Bewehrungsrichtung 1.

5.8 Nichtlineare Berechnung flächenweise

3.2 Nichtlineare Berechnung flächenweise

Fläche Nr.	Punkt Nr.	Punkt-Koordinaten [m]	Belastung	Symbol	Vorh. Wert	Nachweis	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
		X	Y	Z		Grenzwert			
1	N154	5.000	3.226	0.000	LK4	34.477	35.000	mm	0.99
	N28	1.000	6.000	0.000	LK4	0.130	0.300	mm	0.44
	N6	5.000	4.000	0.000	LK4	-10.33	-13.50	N/mm ²	0.77
	N162	5.000	3.890	0.000	LK4	303.10	400.00	N/mm ²	0.76
2	N81	9.500	3.000	0.000	LK4	10.878	60.000	mm	0.19
	N677	9.876	5.378	0.000	LK4	0.107	0.300	mm	0.36
	N677	9.876	5.378	0.000	LK4	-5.45	-13.50	N/mm ²	0.41
	N705	10.884	4.020	0.000	LK4	93.38	400.00	N/mm ²	0.24
3	N808	0.000	3.987	1.005	LK4	-1.546	40.000	mm	0.04
	N778	0.000	3.483	0.513	LK4	0.042	0.300	mm	0.14

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten Max: 0.99 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 28

☒ Verformungen
☒ Grundschnittgrößen - nichtlinear
☒ Berechnung der Rissbreite

Oberseite (-z)		Ausnutzung	0.002
Maximale zulässige Rissbreite an der Oberseite (-z)		W max, -z, grenz	0.300 mm
Rissbreite in I. Hauptrichtung		W k, I, -z (oben)	0.000 mm
Risstiefe		h w, I, -z (oben)	0.000 mm
Rissabstand		s r, I, max, -z (oben)	0.000 mm
Rissbreite in II. Hauptrichtung		W k, II, -z (oben)	0.000 mm
Unterseite (+z)		Ausnutzung	0.433
Maximale zulässige Rissbreite an der Unterseite (+z)		W max, +z, grenz	0.300 mm
Rissbreite in I. Hauptrichtung		W k, I, +z (unten)	0.130 mm
Risstiefe		h w, I, +z (unten)	142.011 mm
Rissabstand		s r, I, max, +z (unten)	178.273 mm
Rissbreite in II. Hauptrichtung		W k, II, +z (unten)	0.000 mm

☒ Berechnung der Spannung

Bild 5.10: Maske 3.2 Nichtlineare Berechnung flächenweise

☒ In FE-Punkten ☐ In Rasterpunkten

Diese Maske listet die maximalen Ausnutzungen jeder bemessenen Fläche auf, die sich bei den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit ergeben. Die Spalten sind in den [Kapiteln 5.4](#) und [5.7](#) erläutert.

5.9 Nichtlineare Berechnung punktwise

3.3 Nichtlineare Berechnung punktweise

Fläche Nr.	A Punkt Nr.	B X	C Y	D Z	E Belastung	F Symbol	G Vorh. Wert	H Nachweis Grenzwert	I Einheit	J Ausnutzung	K Hinweis
1	N153	4.801	2.999	0.000	LK4	u _{z, lokal}	32.781	35.000	mm	<div><div></div></div> 0.94	
					LK4	w _k	0.057	0.300	mm	<div><div></div></div> 0.20	
					LK4	σ _c	-6.79	-13.50	N/mm ²	<div><div></div></div> 0.51	
					LK4	σ _s	178.83	400.00	N/mm ²	<div><div></div></div> 0.45	
1	N154	5.000	3.226	0.000	LK4	u _{z, lokal}	34.477	35.000	mm	<div><div></div></div> 0.99	
					LK4	w _k	0.062	0.300	mm	<div><div></div></div> 0.21	
					LK4	σ _c	-7.67	-13.50	N/mm ²	<div><div></div></div> 0.57	
					LK4	σ _s	202.42	400.00	N/mm ²	<div><div></div></div> 0.51	
1	N155	4.849	3.241	0.000	LK4	u _{z, lokal}	33.553	35.000	mm	<div><div></div></div> 0.96	
					LK4	w _k	0.060	0.300	mm	<div><div></div></div> 0.21	

☒ In FE-Punkten

☐ In Rasterpunkten

Max:

0.99

 ≤ 1

Zwischenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 153

☐ Verformungen

☐ Grundschnittgrößen - nichtlinear

☐ Berechnung der Rissbreite

☐ Berechnung der Spannung

☐ Beton

☐ Oberseite (-z)

Spannung in I. Hauptrichtung

σ_{c,I,-z} (oben)

-6.79

N/mm²

Dehnung in I. Hauptrichtung

ε_{c,I,-z} (oben)

-0.703

‰

Spannung in II. Hauptrichtung

σ_{c,II,-z} (oben)

1.35

N/mm²

Dehnung in II. Hauptrichtung

ε_{c,II,-z} (oben)

0.039

‰

☐ Unterseite (+z)

Spannung in I. Hauptrichtung

σ_{c,I,+z} (unten)

gerissen

N/mm²

Dehnung in I. Hauptrichtung

ε_{c,I,+z} (unten)

1.478

‰

Spannung in II. Hauptrichtung

σ_{c,II,+z} (unten)

-0.24

N/mm²

Dehnung in II. Hauptrichtung

ε_{c,II,+z} (unten)

-0.024

‰

☐ Bewehrung

☐ Oberseite (-z)

☐ Unterseite (+z)

Bild 5.11: Maske 3.3 Nichtlineare Berechnung punktwise

Diese Ergebnismaske listet die maximalen Ausnutzungen für alle FE- bzw. Rasterpunkte jeder Fläche auf. Die Spalten sind in den [Kapiteln 5.4](#) und [5.7](#) erläutert.



Mit der Suchfunktion, die über die links dargestellte Schaltfläche aufgerufen wird, lassen sich FE- und Rasterpunkte schnell finden (siehe [Bild 6.7](#), [Seite 179](#)).

6 Ergebnisauswertung

Die Bemessungsergebnisse lassen sich auf verschiedene Weise auswerten. Hierzu sind auch die Schaltflächen am Ende der oberen Tabelle hilfreich.

3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis flächenweise

Fläche Nr.	Punkt Nr.	Punkt-Koordinaten [m]			Belastung	Symbol	Vorh. Wert	Nachweis Grenzwert	Einheit	Ausnutzung	Hinweis
		X	Y	Z							
1	N195	7.000	3.890	0.000	EK2	σ_c	-3.57	-13.50	N/mm ²	0.27	
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	σ_s	322.60	400.00	N/mm ²	0.81	
	N1	0.000	0.000	0.000	EK2	$a_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	207
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	lim d_s	9.3	9.9	mm	0.95	
	N6	5.000	4.000	0.000	EK2	lim s_i	0.110	0.117	m	0.94	
	N162	5.000	3.890	0.000	EK2	w _k	0.241	0.300	mm	0.81	
2	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_c	-2.59	-13.50	N/mm ²	0.20	
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	σ_s	0.00	400.00	N/mm ²	0.00	226
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	$a_{s,min}$	3.35	3.85	cm ² /m	1.16	207 208
	N3	9.500	6.000	0.000	EK2	lim d_s	8.8	0.0	mm	0.00	226

☒ In FE-Punkten
 ☐ In Rasterpunkten
 Max: 1.16 > 1

Zwischenenergebnisse - Fläche Nr. 1 - FE-Netzpunkt Nr. 195
☐ Bestimmen der Betondruckspannung des aussteifenden Betons
☐ Unterseite (+z)

Bild 6.1: Schaltflächen zur Ergebnisauswertung

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Bemessungsdetails	Ruft den Dialog <i>Bemessungsdetails</i> auf → Kapitel 6.1, Seite 174
	Sortieren	Ordnet die Ergebnisse nach maximalen Ausnutzungen (Spalte J) oder maximalen Werten (Spalte G) → Kapitel 6.3, Seite 179
	Filter	Ruft den Dialog <i>Punkte filtern</i> auf zur Auswahl von FE- oder Rasterpunkten nach bestimmten Kriterien → Kapitel 6.3, Seite 179
	Bemessbare Ergebnisse	Blendet Zeilen mit Unbemessbarkeiten aus
	Überschreitung	Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzung größer als 1 und damit der Nachweis nicht erfüllt ist
	Suchen	Ruft den Dialog <i>Punkt finden</i> auf zur Suche einer bestimmten Ergebniszeile → Kapitel 6.3, Seite 179
	Flächenauswahl	Ermöglicht die grafische Auswahl einer Fläche, um deren Ergebnisse in der Tabelle anzuzeigen
	Drucken	Druckt die Zwischenergebnisse des aktuellen FE- oder Rasterpunkts in das Ausdruckprotokoll
	Relationsbalken	Blendet die farbigen Bezugsskalen in den Ergebnismasken ein und aus
	Sichtmodus	Ermöglicht den Wechsel in das RFEM-Arbeitsfenster, um die Ansicht zu ändern

Tabelle 6.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken

6.1 Bemessungsdetails



Mit der [Info]-Schaltfläche, die in allen Ergebnismasken zur Verfügung steht, lassen sich die Bemessungsdetails des aktuellen FE- oder Rasterpunkts einsehen, d. h. des Punkts, in dessen Tabellenzeile sich der Cursor befindet.

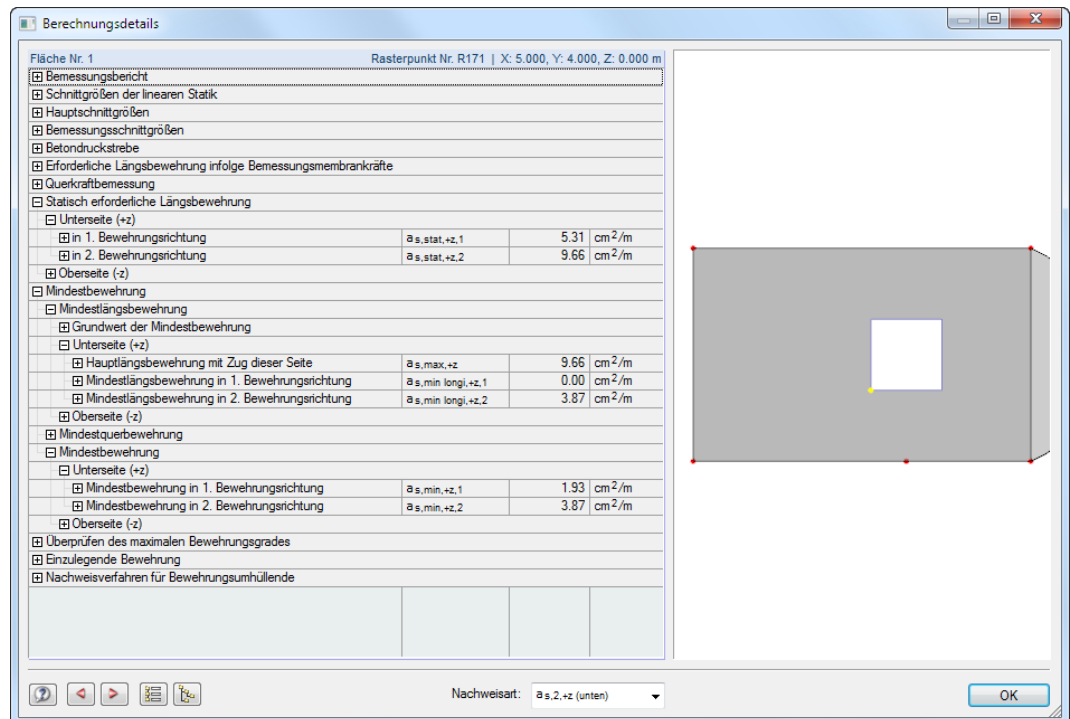


Bild 6.2: Dialog *Bemessungsdetails* für Tragfähigkeitsnachweis

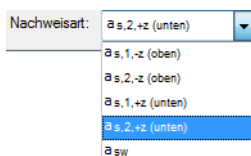


Die Bemessungsdetails sind in einer Baumstruktur aufgelistet. Die Kapitel lassen sich mit öffnen und mit schließen. Die beiden links dargestellten Schaltflächen [Schließen] bzw. [Öffnen] die Unterkapitel im Verzeichnisbaum.

Rechts in der Grafik wird die Lage des Punkts im Modell angezeigt.

Folgende Details werden beim Nachweis der Tragfähigkeit ausgegeben (siehe [Kapitel 2.5](#)):

- Bemessungsbericht
- Schnittgrößen der linearen Statik
- Hauptschnittgrößen
- Bemessungsschnittgrößen
- Betondruckstrebe
- Erforderliche Längsbewehrung
- Querkraftbemessung
- Statisch erforderliche Längsbewehrung
- Mindestbewehrung
- Überprüfen des maximalen Bewehrungsgrades
- Einzulegende Bewehrung
- Nachweisverfahren für Bewehrungsumhüllende



Die Bemessungsdetails sind von der gewählten *Nachweisart* anhängig. Die Steuerung der angezeigten Ergebnisse erfolgt über die Liste unten im Dialog.



Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit werden viele Zwischenergebnisse im unteren Bereich der Masken ausgewiesen (siehe Bild 5.6, Seite 166). Über die [Info]-Schaltfläche ist die ausführliche Liste der Bemessungsdetails zugänglich, die für den aktuellen Punkt vorliegen. Diese Möglichkeit besteht nur für die Ergebnisse nach analytischer Nachweismethode.

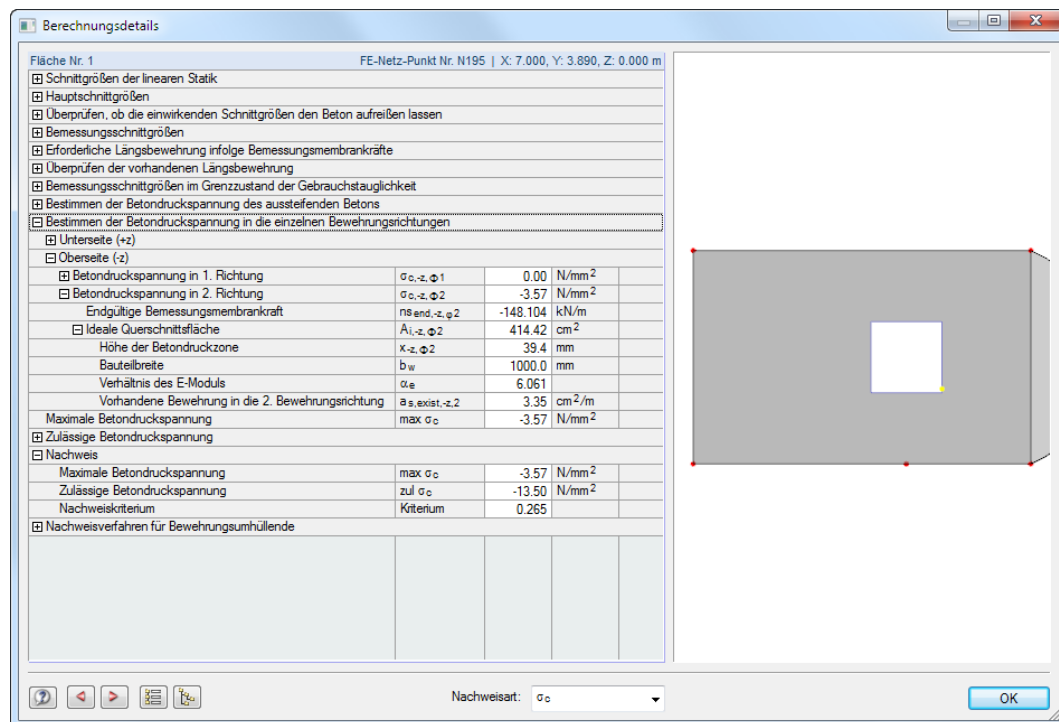
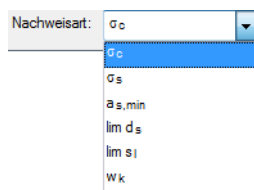


Bild 6.3: Dialog *Bemessungsdetails* für Gebrauchstauglichkeitsnachweis



In einer Baumstruktur sind alle Bemessungsdetails dargestellt, die für jede Nachweisart relevant sind. Die Steuerung der angezeigten Ergebnisse erfolgt über die Liste unten im Dialog.

Nachweismethode	Nachweisart
Analytisch	σ_c
	σ_s
	$a_{s,min}$
	$\lim d_s$
	$\lim s_l$
	w_k

⇒ siehe Tabelle 5.2, Seite 167

Tabelle 6.2: *Nachweisart* für Gebrauchstauglichkeitsnachweise



Mit der Schaltfläche kann zum vorherigen FE- oder Rasterpunkt zurückgeblättert, mit der nächste Punkt eingestellt werden.

6.2 Ergebnisse am RFEM-Modell

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

RFEM-Hintergrundgrafik und Sichtmodus

Das RFEM-Arbeitsfenster im Hintergrund ist hilfreich, um die Lage eines FE- oder Rasterpunkts im Modell ausfindig zu machen: Der in der Ergebnismaske von RF-BETON Flächen selektierte Punkt wird in der Hintergrundgrafik mit einem Pfeil gekennzeichnet; die Fläche ist in der Selektionsfarbe hervorgehoben.

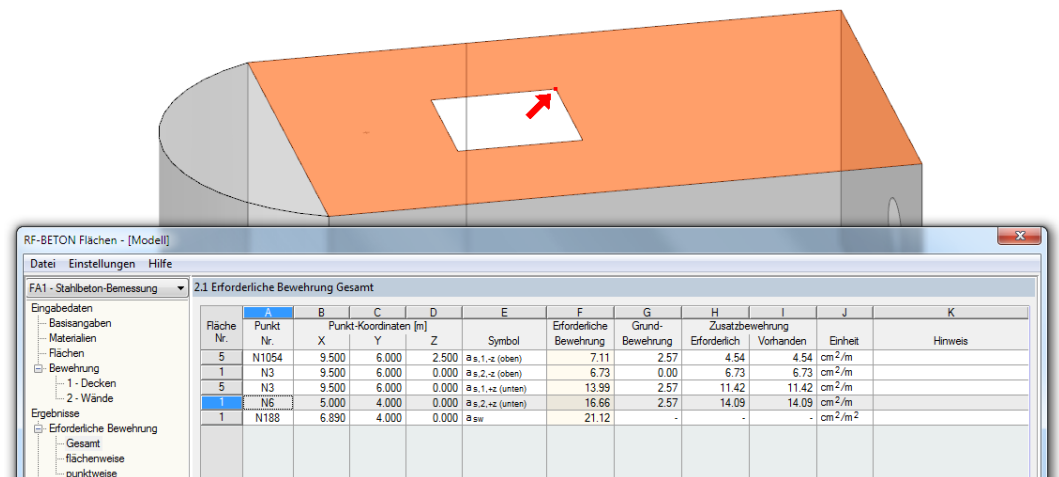
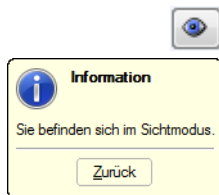


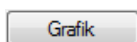
Bild 6.4: Kennzeichnung der Fläche und des aktuellen FE-Punkts im RFEM-Modell



Falls sich die Darstellung durch Verschieben des RF-BETON Flächen-Fensters nicht verbessern lässt, sollte die Schaltfläche [Ansicht ändern] benutzt werden, um den *Sichtmodus* zu aktivieren: Das Fenster wird ausgeblendet, sodass in der RFEM-Arbeitsfläche die Ansicht angepasst werden kann. Im Sichtmodus stehen die Funktionen des Menüs *Ansicht* zur Verfügung, z. B. Zoomen, Verschieben oder Drehen der Ansicht. Der Markierungspfeil bleibt dabei sichtbar.

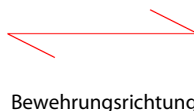
Mit [Zurück] erfolgt die Rückkehr in das Modul RF-BETON Flächen.

RFEM-Arbeitsfenster



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

Ergebnisse-Navigator



Der *Ergebnisse-Navigator* ist an das Modul RF-BETON Flächen angepasst: Es können die Ergebnisse der Längsbewehrungen für jede Bewehrungsrichtung und -lage, der Schubbewehrung, die Bemessungsschnittgrößen oder die Ausnutzungen und Detailergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsnachweise grafisch dargestellt werden.

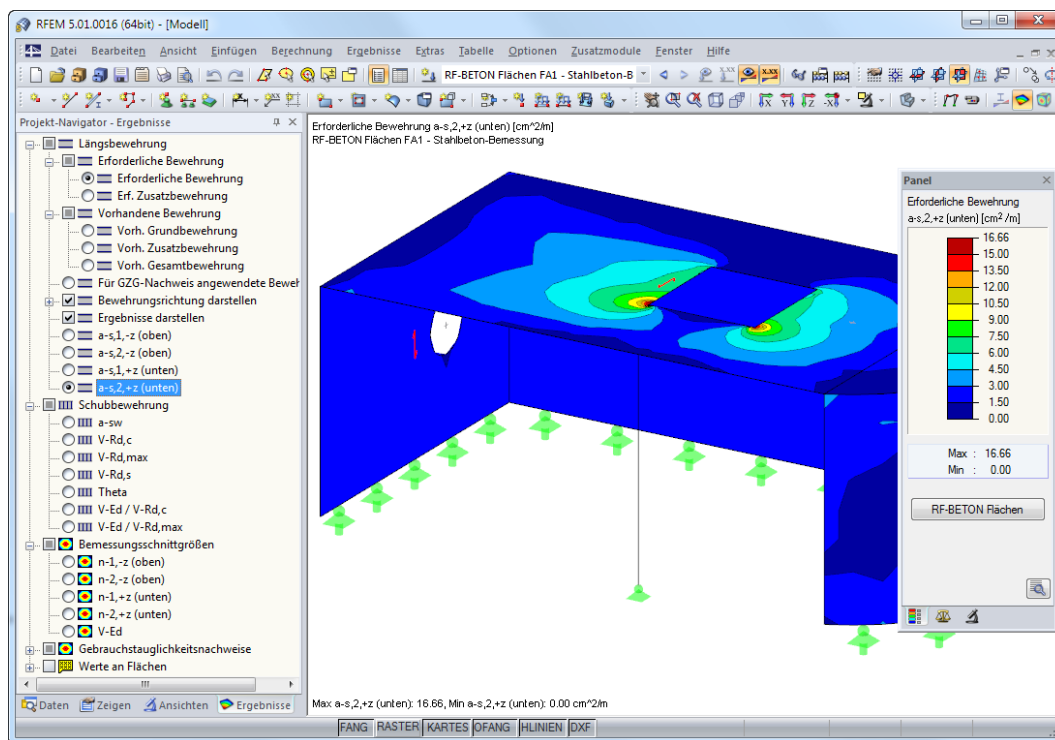


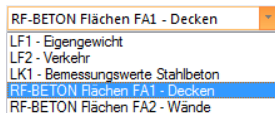
Bild 6.5: RFEM-Arbeitsfenster mit *Ergebnisse*-Navigator für RF-BETON Flächen



Analog zur Schnittgrößenanzeige blendet die Schaltfläche [Ergebnisse anzeigen] die Darstellung der Bemessungsergebnisse ein oder aus.



Da die RFEM-Tabellen für die Auswertung der Bemessungsergebnisse keine Funktion haben, können sie ausgeblendet werden.



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

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 können die *Anzeigefaktoren* für die Bewehrungen, Schnittgrößen oder Ausnutzungen eingestellt werden. Das dritte Register des Panels ermöglicht es, die Ergebnisse ausgewählter Flächen anzuzeigen (siehe Kapitel 9.9.3 des RFEM-Handbuchs).

Werte an Flächen

Es können alle Möglichkeiten von RFEM genutzt werden, um die Ergebniswerte der Bewehrungen und Ausnutzungen an den Flächen darzustellen. Diese Funktionen sind im Kapitel 9.4 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Das folgende Bild zeigt die Gruppe *Untere (+z) Bewehrung*, die zusätzlich zur Grundbewehrung einzulegen ist. Die Werte werden jeweils in die Bewehrungsrichtungen 1 und 2 angetragen.

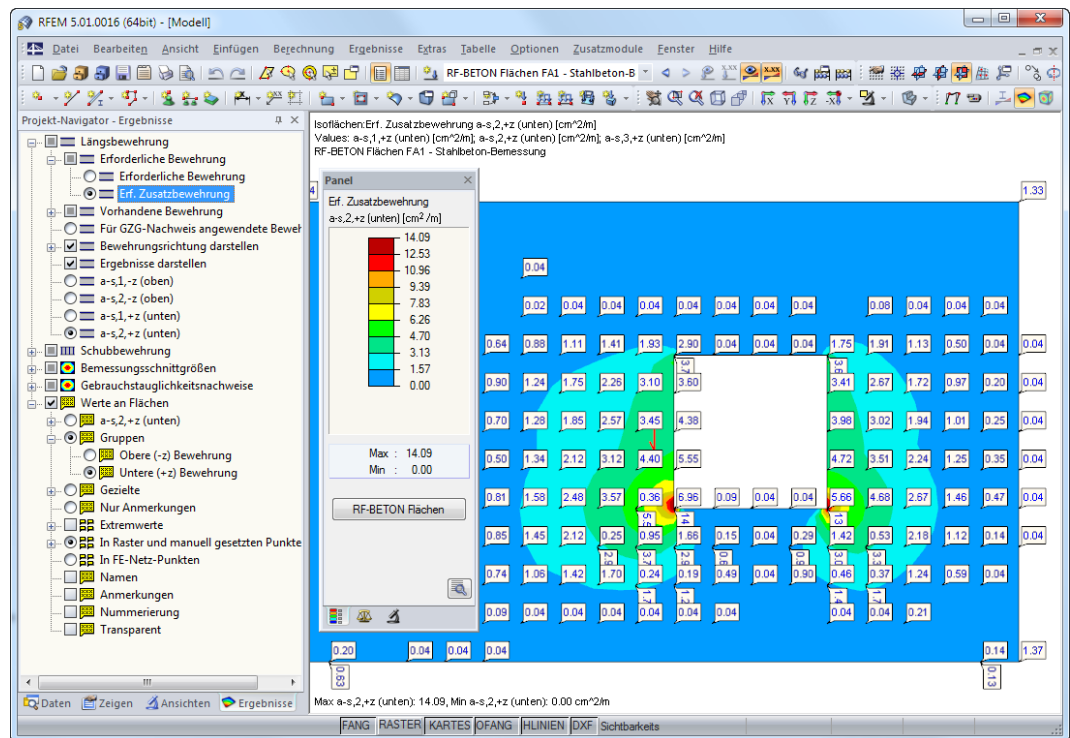


Bild 6.6: Gruppe Untere (+z) Bewehrung für erforderliche Zusatzbewehrung

Die Grafiken der Bemessungsergebnisse können in das Ausdruckprotokoll übergeben werden (siehe [Kapitel 7.2, Seite 185](#)).

RF-BETON Flächen

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

6.3 Filter für Ergebnisse

Die RF-BETON Flächen-Ergebnismasken ermöglichen eine Auswahl nach verschiedenen Kriterien. Zusätzlich stehen die im Kapitel 9.9 des RFEM-Handbuchs beschriebenen Filtermöglichkeiten zur Verfügung, mit denen sich die Bemessungsergebnisse grafisch auswerten lassen.



Auch für RF-BETON Flächen können die Möglichkeiten der *Sichtbarkeiten* genutzt werden (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 9.9.1), um die Flächen für die Auswertung zu filtern.



Ebenso lassen sich *Schnitte* im RFEM-Modell nutzen oder neu erstellen (siehe RFEM-Handbuch, Kapitel 9.6.1), die eine gezielte Auswertung ermöglichen. Dabei können mit der Glättungsfunktion Bewehrungsspitzen umgelagert werden, die auf Singularitäten beruhen.

Punkte suchen



Die Ergebnismasken 2.2 und 2.3 (Bewehrung) und 3.2 und 3.3 (Gebrauchstauglichkeit) bieten eine Suchfunktion für FE- und Rasterpunkte an. Ein Klick auf die links dargestellte Schaltfläche (siehe Bild 6.1, Seite 173) öffnet folgenden Dialog.

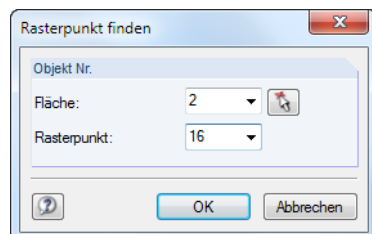



Bild 6.7: Dialog *Rasterpunkt finden*



Zunächst ist die Nummer der Fläche manuell oder über  grafisch festzulegen. Dann kann die Nummer des Rasterpunkts oder FE-Knotens eingetragen oder in der Liste gewählt werden.

Nach [OK] ist in der aktuellen Maske die Ergebniszeile dieses Punkts eingestellt.

Ergebnisse sortieren

In den Masken 3.1 und 3.2 werden die Ergebnisse standardmäßig nach den maximalen Ausnutzungen geordnet angezeigt: Maßgebend ist hierfür die Tabellenspalte J.



Die Ergebnisse lassen sich auch nach den vorhandenen Werten sortieren, die in Spalte G vorliegen. Die größte Ausnutzung der Verformung beispielsweise muss nicht zwangsläufig die Maximalverformung sein, da die Grenzwerte je nach Fläche unterschiedlich definiert werden können. Mit der Schaltfläche [Sortieren] wird zwischen den beiden Anordnungsarten gewechselt.

Punkte filtern



Die links dargestellte Schaltfläche steht in den Ergebnismasken 2.2 und 2.3 (Bewehrung) und 3.2 und 3.3 (Gebrauchstauglichkeit) zur Verfügung. Sie ruft folgenden Dialog auf.

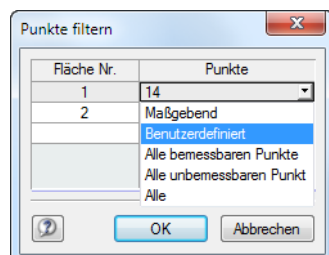
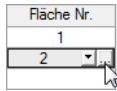



Bild 6.8: Dialog *Punkte filtern*



In Spalte *Fläche Nr.* ist die gewünschte Flächennummer einzutragen oder grafisch im RFEM-Arbeitsfenster auszuwählen. Diese Funktion über die Schaltfläche  ist nach einem Klick in das Feld zugänglich.

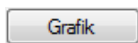
Die Spalte *Punkte* bietet mehrere Filterkriterien an. Neben allen bemessbaren oder unbemessbaren Punkten lassen sich nur die Punkte selektieren, die *Maßgebend* sind: In diesen Punkten liegen die größten Bewehrungsquerschnitte oder Ausnutzungen für die jeweiligen Nachweisarten vor. Punktnummern können auch *Benutzerdefiniert* eingetragen werden.

Nur bemessbare bzw. unbemessbare Ergebnisse anzeigen



Die beiden links dargestellten Schaltflächen ermöglichen es, nur bemessbare Ergebnisse bzw. nur Unbemessbarkeiten in den Masken darzustellen. So lassen sich z. B. Unbemessbarkeiten aufgrund von Singularitäten ausblenden oder die Ursachen von Bemessungsproblemen näher untersuchen.

Ergebnisse im Arbeitsfenster filtern



Die Bewehrungen und Ausnutzungen lassen sich als Filterkriterium im RFEM-Arbeitsfenster nutzen, das über die Schaltfläche [Grafik] zugänglich ist. Hierfür muss das Panel angezeigt werden. Sollte es nicht aktiv sein, kann es eingeblendet werden über das RFEM-Menü



Ansicht → Steuerpanel

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

Das Panel ist im Kapitel 3.4.6 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Die Filtereinstellungen für die Ergebnisse sind im ersten Panel-Register (Farbskala) vorzunehmen.

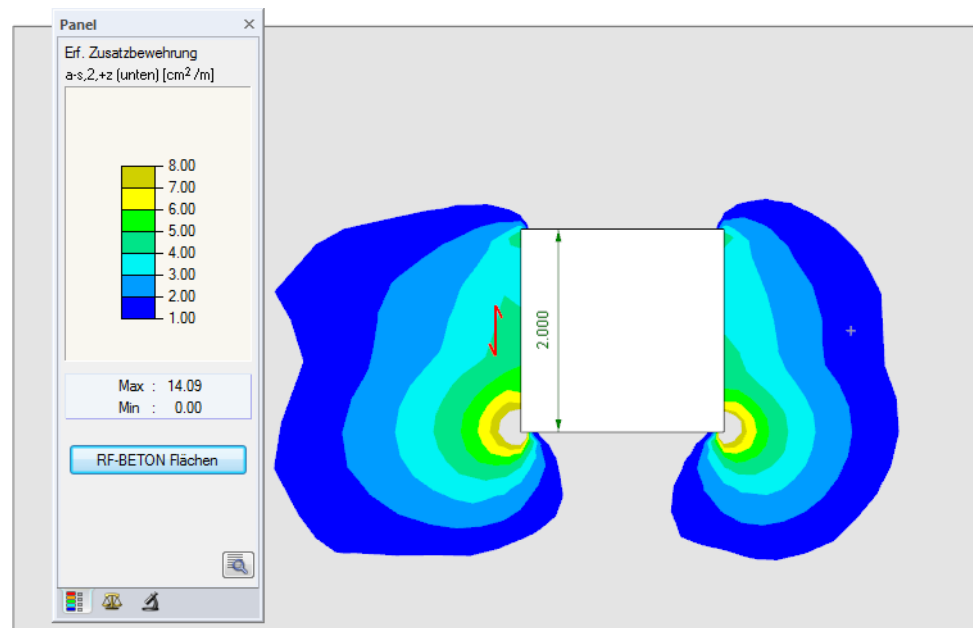


Bild 6.9: Filtern der Zusatzbewehrung mit angepasster Farbskala

Wie das Bild oben zeigt, kann die Werteskala des Panels so eingestellt werden, dass nur Bewehrungen größer als $1,00\text{cm}^2/\text{m}$ dargestellt werden. Die Farbskala ist so bearbeitet, dass ein Farbbereich $1,00\text{cm}^2/\text{m}$ abdeckt und mit dem Maximalwert von $8,00\text{cm}^2/\text{m}$ Auswirkungen von Singularitäten unterdrückt werden.

Im folgenden [Kapitel 6.4](#) ist erläutert, wie die Farb- und Wertespektren an die Durchmesser und Abstände der Bewehrungsstäbe angepasst werden können.

Für die Anzeige der Rasterpunkt- oder FE-Knotenwerte in der Grafik bestehen die in RFEM üblichen Steuerungsmöglichkeiten. Diese sind im Kapitel 9.4 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Flächen im Arbeitsfenster filtern



Im Register *Filter* des Steuerpanels können die Nummern ausgewählter Flächen angegeben werden, um deren Ergebnisse gefiltert anzuzeigen. Diese Funktion ist im Kapitel 9.9.3 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

Erforderliche Bewehrung a-s, 2, +z (unten) [cm²/m]
RF-BETON Flächen FA1 - Stahlbeton-Bemessung

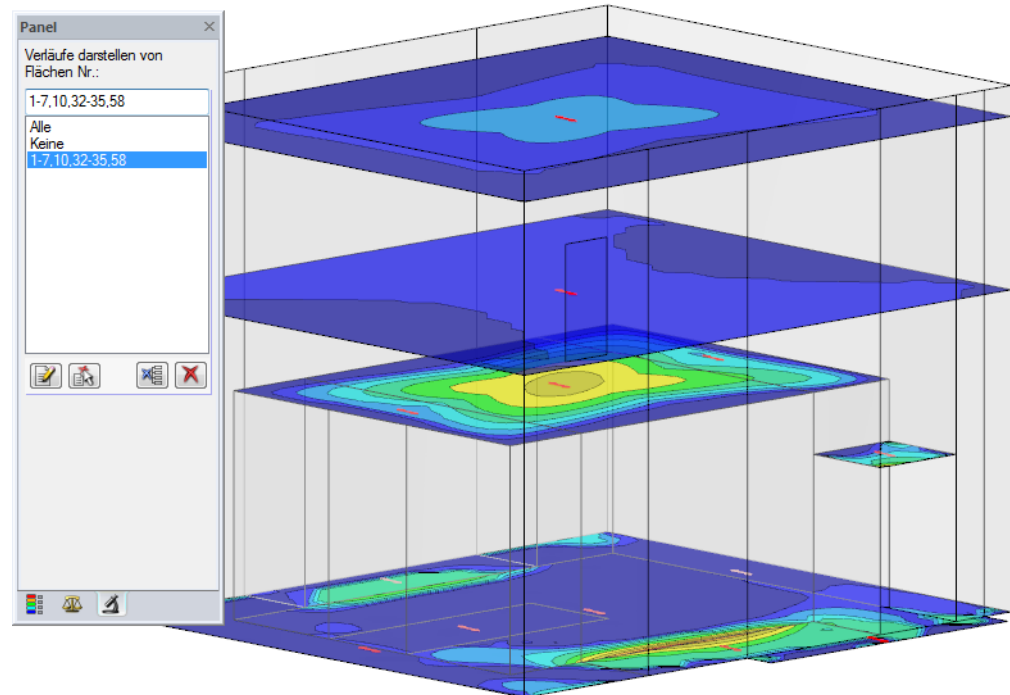


Bild 6.10: Flächenfilter für Bewehrung von Bodenplatte und Decken

Im Unterschied zur Ausschnittfunktion wird das Modell vollständig mit angezeigt. Das Bild oben zeigt die Bewehrung der horizontalen Flächen eines Gebäudes. Die übrigen Flächen werden im Modell dargestellt, sind in der Anzeige jedoch ohne Bewehrungen.

6.4 Panel konfigurieren

Die Bewehrungsergebnisse können grafisch als Isoflächen oder Isolinien dargestellt werden. Dabei wird standardmäßig ein 12-stufiges Wertespektrum zwischen Minimal- und Maximalwert benutzt. Dieses Wertespektrum kann auch im Hinblick auf die Bewehrungsdefinition angepasst werden, um z. B. die grafischen Ergebnisse für einen Bewehrungsplan aufzubereiten.



Das Panel lässt sich per Doppelklick auf eine der Farben anpassen. Alternativ wird die Schaltfläche [Einstellungen] im Panel benutzt: Im folgenden *Einstellungen*-Dialog ist über die Schaltfläche [Bearbeiten] ebenfalls der Dialog zum Ändern der Farb- und Wertebereiche zugänglich.



Im Dialog *Werte- und Farbskalen bearbeiten* kann dann mit der Schaltfläche [Bearbeiten] der Dialog *Wertespektrum mit Bewehrungsdefinition bearbeiten* aufgerufen werden.

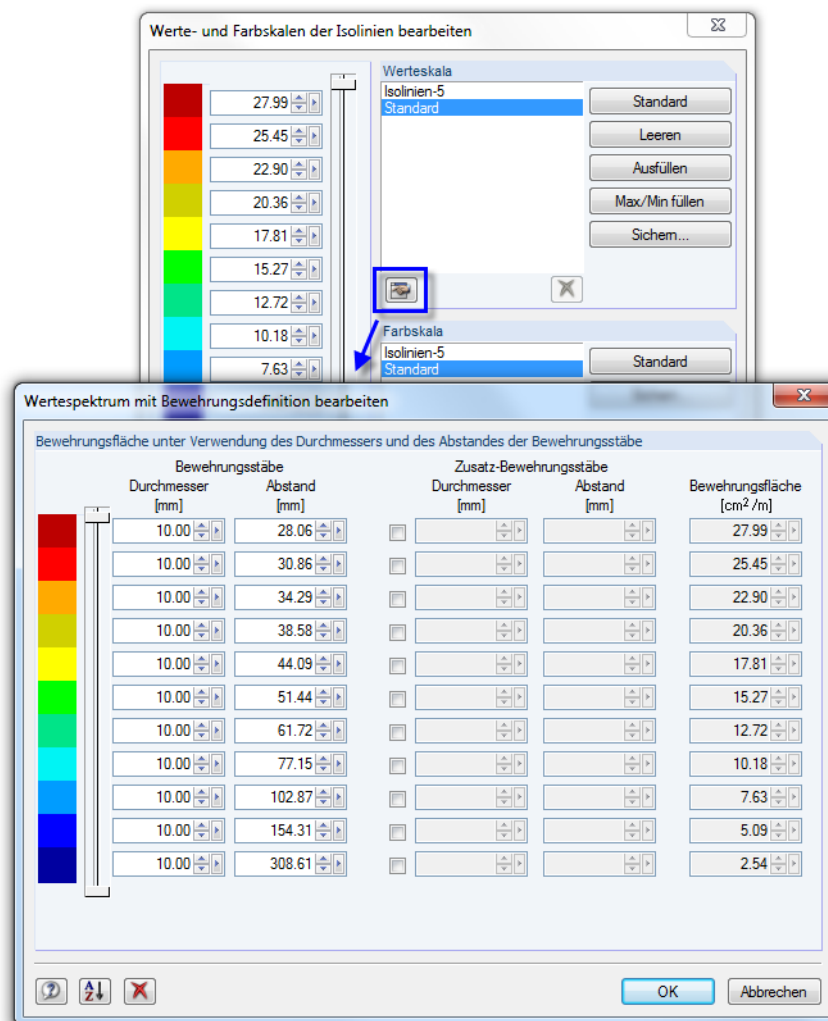


Bild 6.11: Dialoge *Werte- und Farbskalen bearbeiten* und *Wertespektrum mit Bewehrungsdefinition bearbeiten*

Dieser Dialog ermittelt aus dem *Durchmesser* und dem *Abstand* von Bewehrungsstäben die Bewehrungsfläche, die pro Meter vorliegt. In den Spalten *Weitere Bewehrungsstäbe* können zusätzliche Stabdurchmesser und -abstände zugewiesen werden (siehe Bild 6.12). Damit sind benutzerdefinierte Bewehrungsvorgaben möglich, die für einen Bewehrungsplan genutzt werden können.

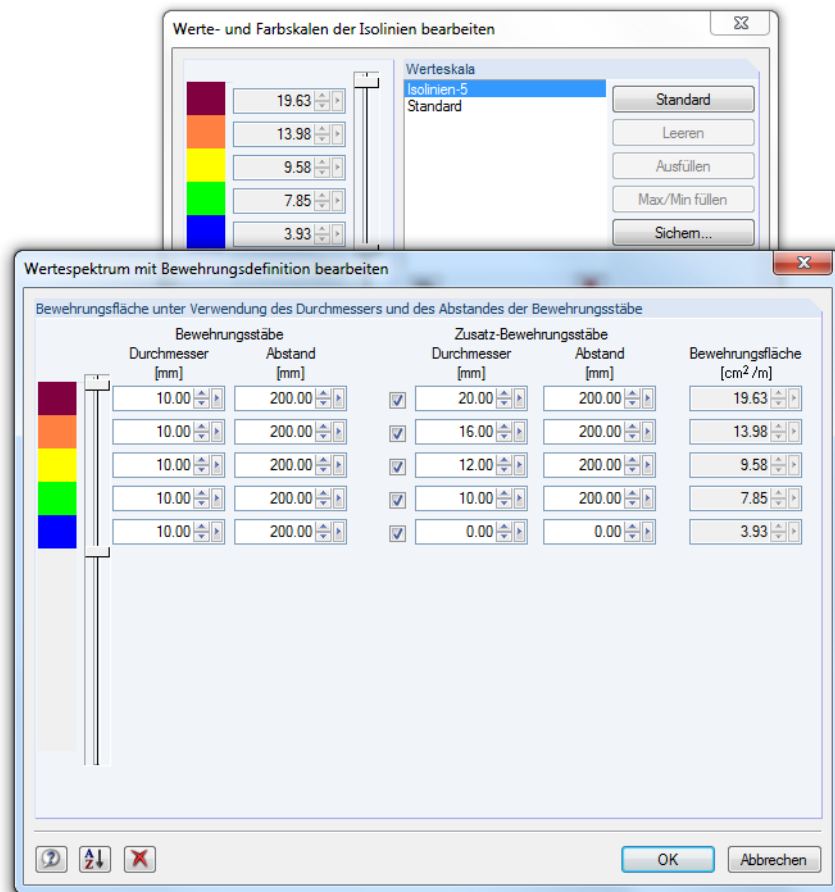


Bild 6.12: Dialog Wertespektrum mit Bewehrungsdefinition bearbeiten mit Stabdurchmessern und -abständen

Nach [OK] werden die Bewehrungsflächen, die sich aus den definierten Stabdurchmessern und Stababständen ergeben, in den Dialog Werte- und Farbskalen bearbeiten übernommen.

Im Panel erscheinen die Durchmesser der Bewehrungsstäbe mit den zugehörigen Abständen, die in den einzelnen Wertebereichen vorzusehen sind.

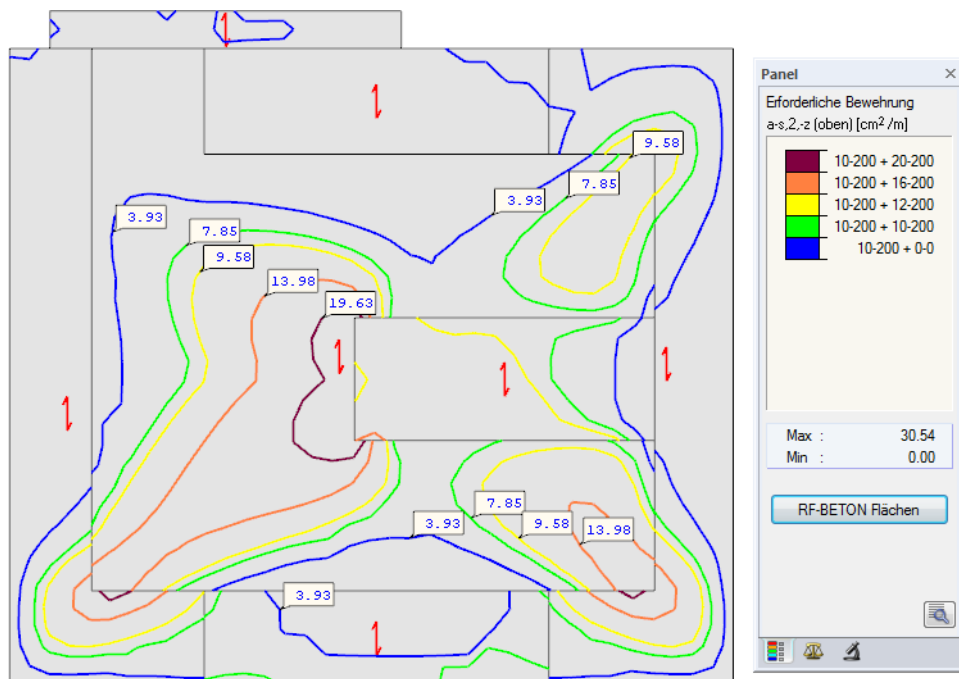


Bild 6.13: Grafik und Panel mit benutzerdefinierten Bewehrungsbereichen

7 Ausdruck

7.1 Ausdruckprotokoll

Für die Daten des Moduls RF-BETON Flächen wird – wie in RFEM – ein Ausdruckprotokoll generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Die Selektion im Ausdruckprotokoll steuert, welche Daten des Bemessungsmoduls schließlich im Ausdruck erscheinen.



Das Ausdruckprotokoll ist im RFEM-Handbuch beschrieben. Das Kapitel 10.1.3.4 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* erläutert, wie die Ein- und Ausgabedaten von Zusatzmodulen für den Ausdruck aufbereitet werden können.

Eine besondere Selektionsmöglichkeit besteht für die Zwischenergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach analytischer Methode. In der Spalte *Punkte* lassen sich neben allen bemessbaren oder unbemessbaren Punkten nur die Punkte selektieren, die *Maßgebend* sind: In diesen Punkten liegen die größten Bewehrungsquerschnitte oder Ausnutzungen vor. Punktnummern können auch *Benutzerdefiniert* eingetragen werden.

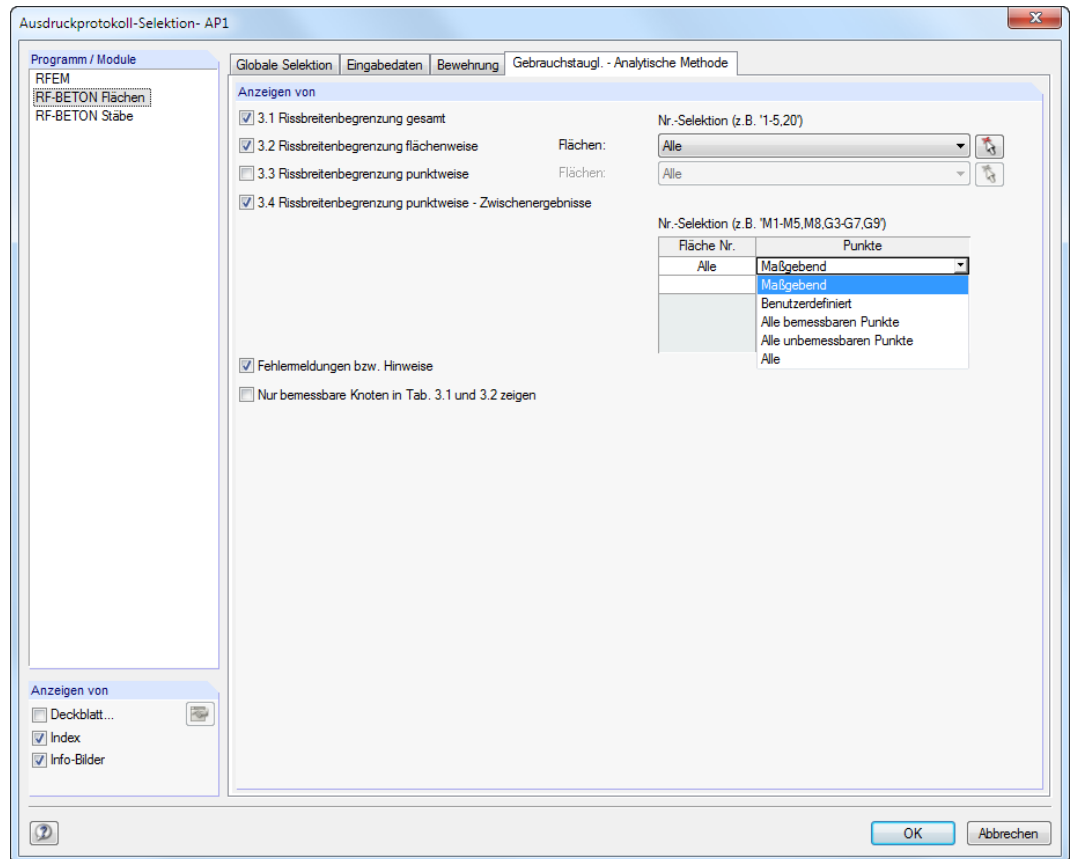


Bild 7.1: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Gebrauchstauglichkeit - Analytische Methode*

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 Ausnutzungen für den Ausdruck aufbereiten.



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

Nachweise am RFEM-Modell



Die aktuelle Grafik der Ausnutzungsgrade kann gedruckt werden über Menü

Datei → Grafik Drucken

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

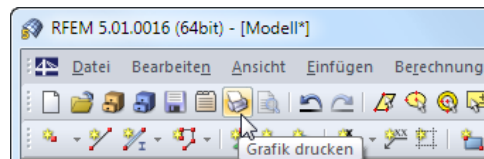


Bild 7.2: Schaltfläche *Drucken* in RFEM-Symbolleiste

Es wird folgender Dialog angezeigt.

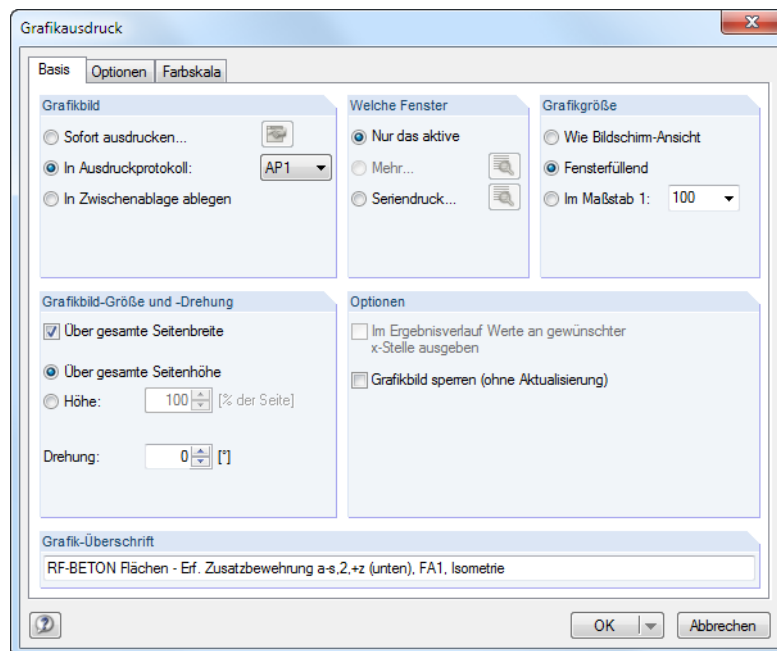
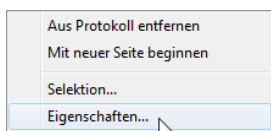


Bild 7.3: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben. Eine Grafik kann im Ausdruckprotokoll wie gewohnt per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.

Um eine Grafik nachträglich im Ausdruckprotokoll anzupassen, führen Sie einen Rechtsklick auf den entsprechenden Eintrag im Protokoll-Navigator aus. Die Option *Eigenschaften* im Kontextmenü ruft wieder den Dialog *Grafikausdruck* auf, in dem Sie die Anpassungen vornehmen können.



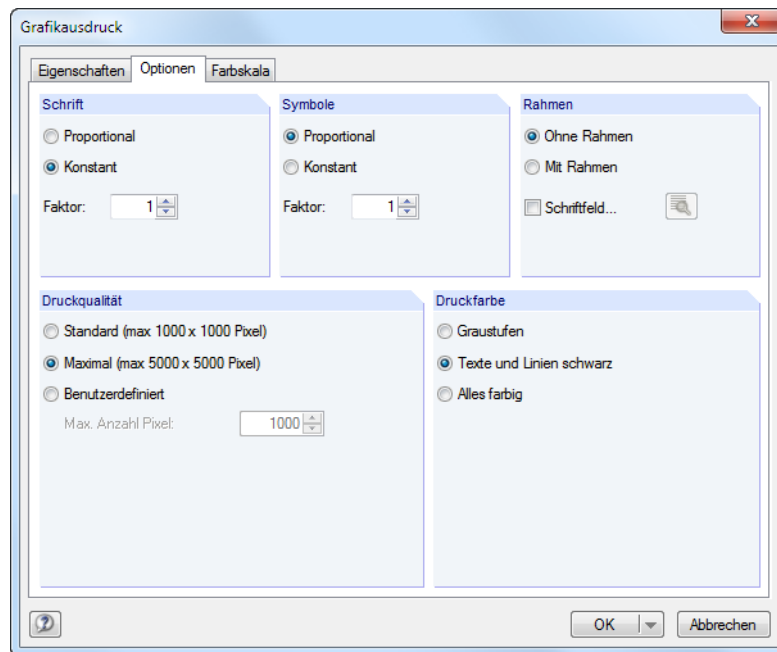


Bild 7.4: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*

8 Allgemeine Funktionen

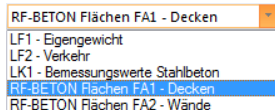
Dieses Kapitel beschreibt nützliche Menüfunktionen und stellt Exportmöglichkeiten für die Nachweise vor.

8.1 Bemessungsfälle

Bemessungsfälle ermöglichen es, Flächen für die Nachweise zu gruppieren oder in Bemessungsvarianten (z. B. geänderte Materialien oder Bewehrungsvorgaben, nichtlineare Analyse) zu behandeln.

Es bereitet kein Problem, eine Fläche in verschiedenen Bemessungsfällen zu untersuchen.

Die Bemessungsfälle von RF-BETON Flächen sind auch in RFEM über die Lastfall-Liste der Symbole zugänglich.



Neuen Bemessungsfall anlegen

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

Datei → **Neuer Fall**.

Es erscheint folgender Dialog.

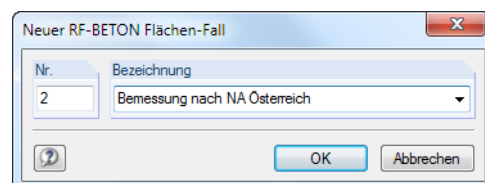


Bild 8.1: Dialog Neuer RF-BETON Flächen-Fall

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 Flächen-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der Bemessungsdaten.

Bemessungsfall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalles wird geändert über das RF-BETON Flächen-Menü

Datei → **Fall umbenennen**.

Es erscheint folgender Dialog.

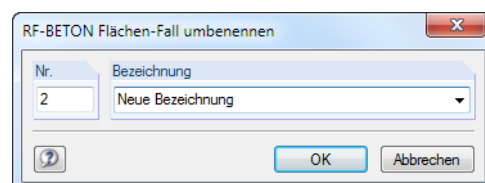


Bild 8.2: Dialog RF-BETON Flächen-Fall umbenennen

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 Flächen-Menü

Datei → **Fall kopieren**.

Es erscheint folgender Dialog.

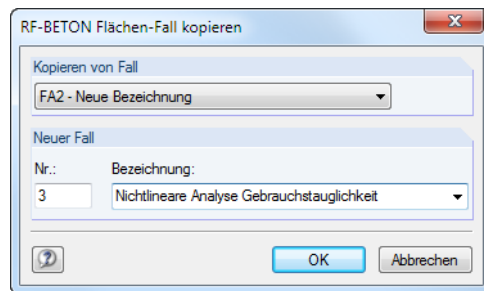


Bild 8.3: Dialog RF-BETON Flächen-Fall kopieren

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

Bemessungsfall löschen

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

Datei → **Fall löschen**.

Es erscheint folgender Dialog.

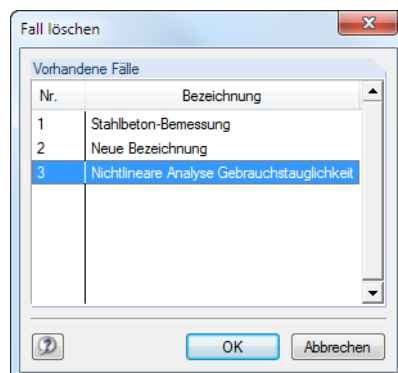


Bild 8.4: Dialog Fall löschen

Der Bemessungsfall kann in der Liste *Vorhandene Fälle* ausgewählt werden. Mit [OK] erfolgt der Löschvorgang.

8.2 Einheiten und Dezimalstellen

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

Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.

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

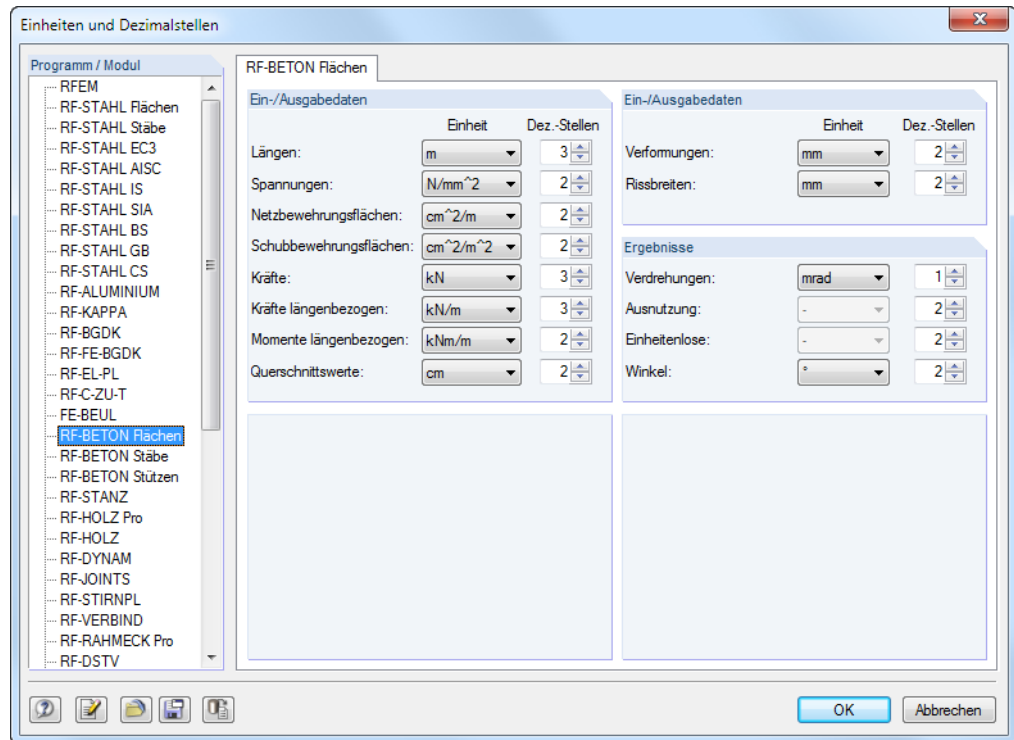


Bild 8.5: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



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.

8.3 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von RF-BETON Flächen 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 dabei unberücksichtigt.

Ausdruckprotokoll

Die Daten von RF-BETON Flächen können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe [Kapitel 7.1, Seite 184](#)) und dort exportiert werden über Menü

Datei → Export in RTF.

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

Excel / OpenOffice

RF-BETON Flächen ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel, OpenOffice.org Calc oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über das Menü

Datei → Tabellen exportieren.

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

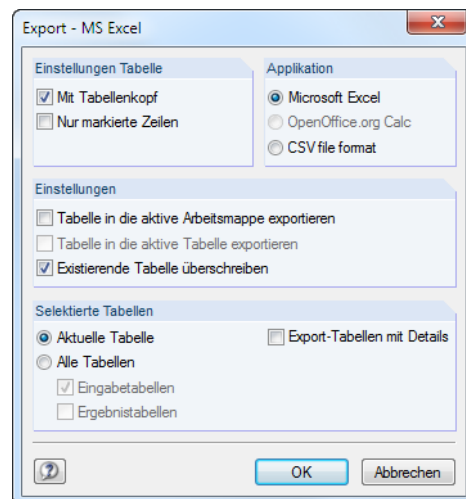


Bild 8.6: Dialog *Export - MS Excel*

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden. Excel bzw. OpenOffice werden automatisch aufgerufen, d. h. die Programme brauchen nicht zuvor geöffnet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Fläche Nr.	Punkt Nr.	X	Y	Z	Symbol	Erforderliche Bewehrung	Grund-Bewehrung	Zusatzbewehrung Erforderlich	Vorhanden	Einheit	Hinweis
3	1	N20	6,000	6,000	0,000	a _{s,1-z} (oben)	5,24	0,00	5,24	5,60	cm ² /m	
4		N3	9,500	6,000	0,000	a _{s,2-z} (oben)	6,73	0,00	6,73	6,73	cm ² /m	
5		N169	5,110	4,000	0,000	a _{s,1-z} (unten)	9,77	2,57	7,20	7,20	cm ² /m	
6		N6	5,000	4,000	0,000	a _{s,2-z} (unten)	16,66	2,57	14,09	14,09	cm ² /m	
7		N188	6,890	4,000	0,000	a _{sw}	21,12	-	-	-	cm ² /m ²	
8	2	N678	9,926	5,785	0,000	a _{s,1-z} (oben)	5,60	0,00	5,60	5,60	cm ² /m	
9		N678	9,926	5,785	0,000	a _{s,2-z} (oben)	6,36	0,00	6,36	6,73	cm ² /m	
10		N3	9,500	6,000	0,000	a _{s,1-z} (unten)	0,79	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
11		N74	9,500	4,500	0,000	a _{s,2-z} (unten)	2,61	2,57	0,04	14,09	cm ² /m	
12		N3	9,500	6,000	0,000	a _{sw}	0,00	-	-	-	cm ² /m ²	
13	3	N1	0,000	0,000	0,000	a _{s,1-z} (oben)	2,00	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
14		N748	0,000	3,000	0,000	a _{s,2-z} (oben)	3,71	2,57	1,14	2,91	cm ² /m	
15		N717	0,000	0,000	0,500	a _{s,1-z} (unten)	2,55	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
16		N2	0,000	6,000	0,000	a _{s,2-z} (unten)	2,00	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
17		N1	0,000	0,000	0,000	a _{sw}	0,00	-	-	-	cm ² /m ²	
18	4	N4	9,500	0,000	0,000	a _{s,1-z} (oben)	2,27	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
19		N110	6,206	0,000	0,000	a _{s,2-z} (oben)	5,48	2,57	2,91	2,91	cm ² /m	
20		N821	9,500	0,000	0,500	a _{s,1-z} (unten)	3,90	2,57	1,33	11,42	cm ² /m	
21		N4	9,500	0,000	0,000	a _{s,2-z} (unten)	2,00	2,57	0,00	0,00	cm ² /m	
22		N1	0,000	0,000	0,000	a _{sw}	0,00	-	-	-	cm ² /m ²	
23	5	N1054	9,500	6,000	2,500	a _{s,1-z} (oben)	7,11	2,57	4,54	4,54	cm ² /m	
24		N821	9,500	0,000	0,500	a _{s,2-z} (oben)	3,42	2,57	0,85	2,91	cm ² /m	
25		N3	9,500	6,000	0,000	a _{s,1-z} (unten)	13,99	2,57	11,42	11,42	cm ² /m	
26		N3	9,500	6,000	0,000	a _{s,2-z} (unten)	3,97	2,57	1,40	1,40	cm ² /m	
27		N3	9,500	6,000	0,000	a _{sw}	8,76	-	-	-	cm ² /m ²	

Bild 8.7: Ergebnis in Excel

CAD-Anwendungen

Die in RF-BETON Flächen ermittelten Bewehrungsquerschnitte lassen sich auch in CAD-Anwendungen nutzen. In RFEM sind Schnittstellen zu folgenden Programmen enthalten:

- Nemetschek (FEM-Format für Allplan *.asf)
- Glaser (Format *.fem)
- Strakon (Format *.cfe)

Die Exportfunktion wird aufgerufen über das RFEM-Menü

Datei → Exportieren.

Es öffnet sich der Dialog *Export*, in dem die geeignete Schnittstelle ausgewählt werden kann. Dieser Dialog ist im Kapitel 12.5.2 des RFEM-Handbuchs beschrieben.

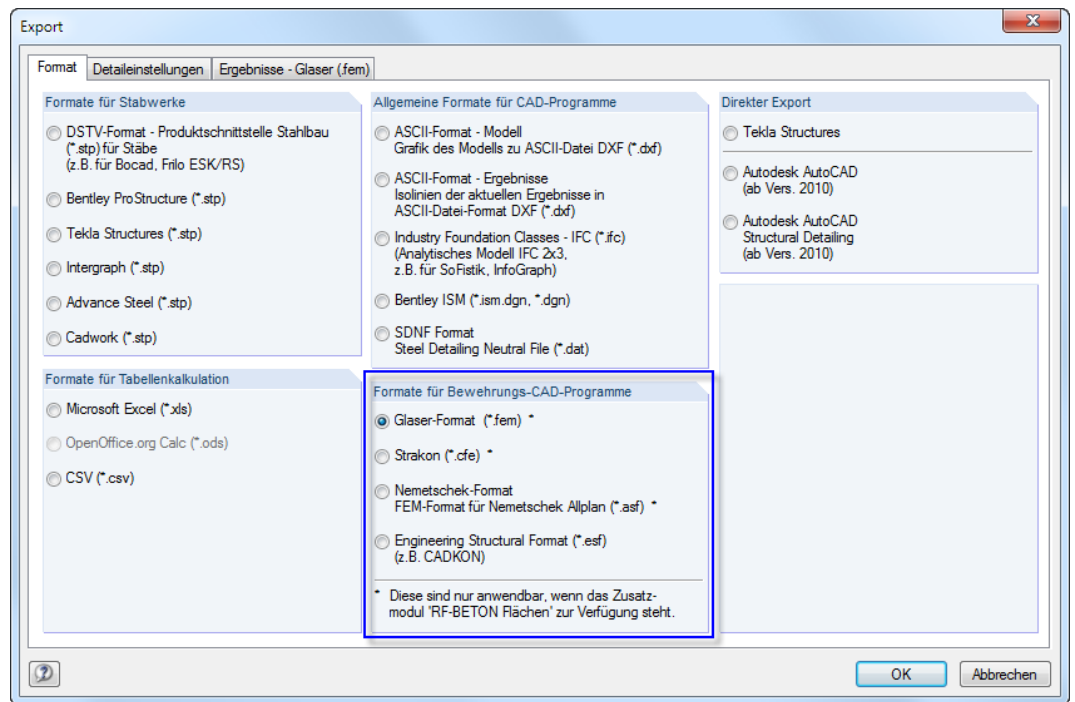


Bild 8.8: RFEM-Dialog Export, Register Format

Je nach Schnittstelle sind in weiteren Registern Einstellungen möglich, die den Export der Bewehrungen steuern.

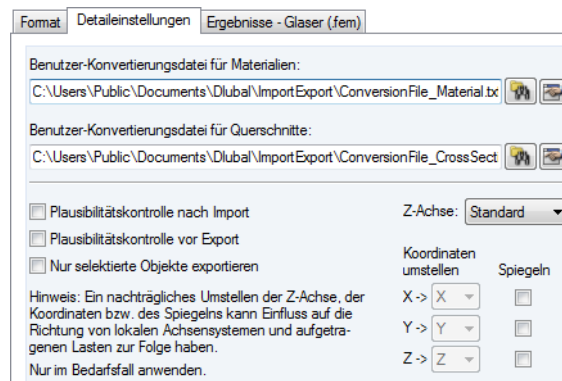


Bild 8.9: RFEM-Dialog Export, Register Detaileinstellungen

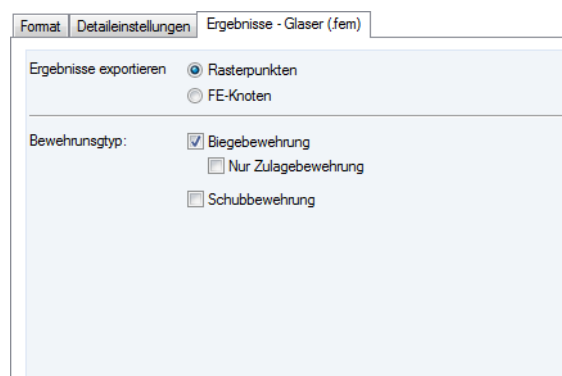


Bild 8.10: RFEM-Dialog Export, Register Ergebnisse - Glaser (.fem)

Literatur

- [1] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 217: Tragwirkung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächentragwerken aus Stahlbeton (von Theodor BAUMANN).* Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1972.
- [2] Jörg Schlaich und Kurt Schäfer. Konstruieren im stahlbetonbau. *Betonkalender*, 1993.
- [3] *Deutscher Beton-Verein e.V.: Beispiele zur Bemessung von Betontragwerken nach EC2.* Bauverlag, Wiesbaden/Berlin, 1994.
- [4] QUAST Ulrich. Zur mitwirkung des betons in der zugzone. *Beton- und Stahlbetonbau*, Seiten 247-250, 1981.
- [5] PFEIFFER Uwe. *Die nichtlineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingten Achsendehnung.* Cuviller Verlag, Göttingen, 2004.
- [6] QUAST Ulrich. Zum nichtlinearen berechnen im stahlbeton- und spannbetonbau. *Beton- und Stahlbetonbau*, Seiten 250-253, 1994.
- [7] *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.
- [8] Beton und stahlbeton, bemessung und ausführung. In *DIN 1045 (07.88)*. Beuth, Berlin, Wien, Zürich, 1988.
- [9] *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion.* Beuth, 2001.
- [10] *DIN V ENV 1992-1-1 (Eurocode 2): Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992.
- [11] REYMENTD Jörg. *DIN 1045 neu, Anwendung und Beispiele.* Papenberg Verlag, Frankfurt, 2001.
- [12] AVAK Ralf. *Stahlbetonbau in Beispielen, DIN 1045 und Europäische Normung, Teil 2: Konstruktion-Platten-Treppen-Fundamente.* Werner Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [13] AVAK Ralf. *Stahlbetonbau in Beispielen, DIN 1045 und Europäische Normung, Teil 2: Bemessung von Flächentragwerken, Konstruktionspläne für Stahlbetonbauteile.* Werner Verlag, Düsseldorf, 2. Auflage, 2002.
- [14] SCHNEIDER Klaus-Jürgen. *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen.* Werner Verlag, Düsseldorf, 15. Auflage, 2002.
- [15] LANG Christian, MEISWINKEL Rüdiger und WITTEK Udo. Bemessung von stahlbetonplatten mit dem nichtlinearen verfahren nach din 1045-1. *Beton- und Stahlbetonbau 95*, Seiten 270-278, 2000.
- [16] MEISWINKEL Rüdiger. Nichtlineare nachweisverfahren von stahlbeton-flächentragwerken. *Beton- und Stahlbetonbau 96*, Seiten 27-34, 2000.
- [17] RAHM Heiko. *Modellierung und Berechnung von Alterungsprozessen bei Stahlbeton-Flächentragwerken.* Universität Kaiserslautern, 2002.
- [18] SCHNEIDER Klaus-Jürgen. *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen.* Werner Verlag, Düsseldorf, 20. Auflage, 2012.

Index

1D-Bauteil	8	Bewehrungsschar	11
2D-Bauteil	8	Bewehrungsstab	182
A		Bewehrungsstäbe	151
Abbruchschranke	109	Bewehrungsumhüllende	157
Ablaufdiagramm	130	Blättern in Masken	124
Achsensystem	149	C	
Achsmaß	147	CAD-Export	191
Analytische Nachweismethode	129	D	
Anmerkung	140	Dämpfung	133
Anzeigefaktoren	177	Dauerlast	135
Aufzählungsmethode	157	Dehnung	86, 104, 119
Ausdruckprotokoll	184, 185	Dehnungsverhältnis	129
Außergewöhnlich	127	Details	134, 157
Ausgelegte Zusatzbewehrung	152	Dezimalstellen	136, 189
Ausnutzung	167	Dicke	139
Autogenes Schwinden	120, 121	Drucken	173, 185
B		Druckstrebenneigung θ	39, 155
Basisangaben	7, 124	Druckzone	155
Beanspruchung	88	Druckzonenhöhe	47, 155
Beenden von RF-BETON Flächen	124	E	
Belastungssituationen	19	Einheiten	136, 189
Bemessungsdetails	173, 174, 175	Einordnungskriterium	131
Bemessungsfall	177, 187, 188	Elastizitätsmodul	118
Bemessungsmethode	156	Erforderliche Bewehrung	152
Bemessungsschnittgrößen 9, 26, 45, 66, 89, 130, 165		Ergebnisauswertung	161, 163, 167, 173
Bemessungssituation	127	Ergebniskombination .. 88, 127, 131, 135, 157, 167	
Benutzerprofil	189	Ergebnismasken	161
Berechnung	157	Ergebnisse-Navigator	176
Berechnung starten	160	Ergebniswerte grafisch	177
Beton-Festigkeitsklasse	136	Eurocode	134
Betonalter	118, 120	Excel	190
Betondeckung	71, 147	Export	132, 190
Betondruckspannung	75, 139, 167, 170	Expositionsklasse	148
Betondruckstrebe	9, 14, 30, 39, 41, 59, 156	Extras	132
Betondruckzone	49, 50	F	
Betonstahl	133, 136	Faktor k_t	135
Betonstahlspannung	77, 139, 167, 170	Farbskala	180
Betonzugfestigkeit	111	FE-Punkt	161, 162, 165, 166, 169, 172, 179
Betonzugspannung	133	Filter	166, 173, 179, 180, 181
Bewehrung	145, 161, 162, 163, 164	Fläche	138, 145, 164, 168, 171
Bewehrungsanordnung	146	Fließen	112
Bewehrungsbahn	146	G	
Bewehrungsgrad	146	Gebrauchstauglichkeit .. 66, 104, 116, 128, 138,	
Bewehrungsmatten	151		
Bewehrungsquerschnitt	150		
Bewehrungssatz	145		

- 152, 163, 166, 170, 175
 Ge glättete Schnittgrößen 158
 Gemischte Methode 158
 Gerissener Zustand 114, 170
 Glättungsbereichen 158
 Glaser 191
 Grafik 176
 Grafikausdruck 185
 Grenzdurchmesser 78, 81, 167
 Grenzlinie 143
 Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit . 66, 104, 128, 138, 166, 167, 170
 Grenzzustand Tragfähigkeit 34, 127, 163
 Grundbewehrung 147, 150, 163
 Grundkombination 127
- H**
 Hauptnormalkraft 18
 Hebelarm 46, 49, 50
 Hintergrundgrafik 176
 Höchstbewehrung 146
- I**
 Installation 5
 Iterationen 133
 Iterationsverfahren 107
- K**
 Kommentar 126, 140
 Kontrolle 159
 Konvergenzkriterien 108
 Koordinaten 166
 Kriechen 90, 117, 119, 132
 Kriechzahl ϕ 117, 119, 141
- L**
 Längsbewehrung 33, 36, 60, 130, 150
 Langzeitwirkung 90
 Langzeitwirkungen 155
 Lastfall 88, 127, 128, 167
 Lastkombination 127, 135
 Layer 104, 133
 Luftfeuchte 118, 120
- M**
 Maßgebende Punkte 180, 184
 Masken 124
 Material 133, 135
 Materialbezeichnung 136
 Materialbibliothek 137
 Materialkennwerte 136
 Methode 129
- Mindestbewehrung 22, 23, 24, 63, 78, 146, 154, 167
 Modelltyp 7
- N**
 Nachweisart 175
 Nachweismethode 141
 Nationaler Anhang 125
 Navigator 124
 Nemetschek 191
 Nichtlineare Berechnung 104
 Nichtlineare Methode 131, 170
 Nichtlineare Nachweismethode 141
 Nichtlineare Steifigkeiten 132
 Norm 4, 125
 Nutzhöhe 48
- O**
 Obere Bewehrung 147, 163
 OpenOffice 190
 Optimierung 156
 Orthotropie 139, 141
- P**
 Panel 6, 177, 180, 182
 Parallelfäche 143
 Platte 7, 22, 25, 63, 68, 129, 142, 154
 Plausibilitätskontrolle 159
 Programmaufruf 5
 Punkt-Koordinaten 162, 166
- Q**
 Querbewehrung 146
 Querkraftbemessung 34, 61
 Querkraftbewehrung 155
 Querkraftnachweis 153
 Querkrafttragfähigkeit 34, 39, 41, 62
 Querschnittswerte 90, 93
- R**
 Randabstand 147
 Rasterpunkt 162, 165, 166, 169, 172, 179
 Reduktionsfaktors VMB 113, 115
 Reduzierungsfaktor α 155
 Referenzebene 144
 Relationsbalken 173
 RF-BETON Deflect 89, 130, 138
 RF-BETON NL 104, 121, 131, 141
 RFEM-Arbeitsfenster 176
 RFEM-Grafik 185
 Rippe 159
 Riss 115, 130

Rissabstand	84	Tension Stiffening	92, 112, 133
Rissbildung	105	Tragfähigkeit	127, 162, 163, 174
Rissbreite	80, 84, 88, 140, 167, 170	Trocknungsschwinden	120
Rissdehnung	112		
S		U	
Schale	22, 45	Umhüllende Methode	158
Schaltflächen	173	Unbemessbarkeit	163, 167, 173
Scheibe	7, 11, 17, 148	Untere Bewehrung	147, 163
Schichten	133	Unverformtes System	143
Schnitt	179		
Schnittgrößen	88, 104, 160	V	
Schubbewehrung	37, 163	Verformung	89, 104, 132, 142, 170
Schwinddehnung	120, 121, 123, 142	Verformungsnachweis	143
Schwinden	90, 120, 132	Verkrümmung	115
Selektion Ausdruck	184	Verschleißklasse	148
Sichtbarkeiten	179	Verschobene Referenzebene	144
Sichtmodus	173, 176	Verteilungsbeiwert	92
Singularität	158, 179, 180	Völligkeitsfaktors	134
Sortieren	173, 179	Vorhandene Bewehrung	71
Spannungen	130, 132		
Spannungs-Dehnungslinie	110, 115, 133	W	
Stababstand	83, 167	Wand	7, 11, 22, 23, 68, 129, 148, 155, 156
Stabbstand	182	Wandartiger Träger	23
Stabdurchmesser	150, 152, 182	Wertespektrum	182
Starten von RF-BETON Flächen	5	Winkel ϕ	21, 27, 38, 149
Statisches System	121	Wirtschaftlichste Bewehrung	130
Steifigkeit	132		
Steuerpanel	180	Z	
Strakon	191	Zementart	120
Suchfunktion	179	Zementtyp	119
Symbol	162, 165, 167, 170, 175	Zugfestigkeit Beton	140
		Zusatzbewehrung	147, 152, 163
T		Zustand II	114, 170
Teilsicherheitsbeiwert Beton	155	Zwang	140
Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl	155	Zwischenablage	190
		Zwischenergebnisse	166, 170