Nachweise am Stahlbeton-Querschnitt

Diese Dokumentation beinhaltet zusätzliche Informationen zu unserem Programm Stahlbetonbemessung B2/B2+ bzw. zu weiteren FRILO-Stahlbetonprogrammen.

Inhaltsverzeichnis

Normen und verwendete Kurzbezeichnungen **2**

Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit **3**

Bemessung für Biegung und Längskraft 3
Bemessungsgrundlagen 3
Bemessung für ein gegebenes Bewehrungsverhältnis 7
Hebelgesetz 7
Bemessung nach kd-Verfahren 8
Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile 9
Mindestbewehrung für Druckglieder 9
Biegetragfähigkeit 10
Schubbemessung 10
Tragfähigkeit ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung 10
Tragfähigkeit mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung 13
Querkraft zweiachsig für Rechteckquerschnitte 16
Schubkraftübertragung in Fugen 18
Torsion 20
Schubbemessung für Elementdecken mit Gitterträgern 23

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit **24**

Spannungsnachweis nach EN 1992-1-1 24
Rissbreitennachweis nach EN 1992-1-1 25
Nachweis unter Lastbeanspruchung 26
Mindestbewehrung infolge Zwang 28

Ermittlung der effektiven Steifigkeit **29**

Grenzzustand der Tragfähigkeit 29
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 30

Außergewöhnliche Bemessungssituation Brand **32**

Grundlagen 32
Äußere Schnittkräfte 32
Innere Schnittkräfte 33
Bemessung 33
Ermittlung der effektiven Steifigkeit 33
Validierungsbeispiele (NA-D) 34

Normen und verwendete Kurzbezeichnungen

EN: Originaleurocode mit NDP entsprechend den empfohlenen Werten
EN 1992-1-1:2004 /A1:2014
EN 1992-1-2:2004 /AC:2008

Aktuelle Versionen der nationalen Anhänge (NA) mit den national festgelegten NDP:

NA-D: Deutschland
DIN 1992-1-1/ NA:2015-09
DIN EN 1992-1-2/NA:2015-09

NA-A: Österreich
ÖNORM B 1992-1-1:2018
ÖNORM B 1992-1-2:2011

NA-GB: Großbritannien
NA to BS EN 1992-1-1 A2:2015-07, BS8500-1:2015
NA to BS EN 1992-1-2:2004

NA-I: Italien
UNI EN 1992-1-1/NTC:2018
EN 1992-1-2:2004 /AC:2008

NTC: die Anwendung des Eurocode in Italien ist in den „Norme tecniche per le costruzioni" und dem ergänzende Rundschreiben "CIRCOLARE 21 gennaio 2019" geregelt.

NA-PN Polen
PN EN 1992-1-1:2008/NA:2010
PN-EN 1992-1-2:2008/NA:2010

NA-B Belgien
NBN EN 1992-1-1 ANB:2010 + NBN B 15-001:2024
NBN EN 1992-1-2 ANB:2010-08

NA-NL Niederlande
NEN EN 1992-1-1+C2:2011/NB:2016+A1:2020
NEN En 1992-1-2 [2011-11] NB

NA-CZ Tschechien
CSN EN 1992-1-1 [2011-12] NA+ Z2-2011+ Z3-2016+ Z4-2019
CSN EN 1992-1-2 [2007-07] NA

NA-F Frankreich
NF EN 1992-1-1/NA:2016 + NF EN 206/CN
NF EN 1992-1-2/NA:2007-10

Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Bemessung für Biegung und Längskraft

Bei der Stahlbetonbemessung wird für gegebene Schnittkräfte entsprechend einer Bewehrungsanordnung die Bewehrungsmenge für den zum Versagen führende Dehnungszustand ermittelt, wo innere und äußere Schnittkräfte im Gleichgewicht stehen.

Daraus ergeben sich zwei, bei Doppelbiegung drei nichtlineare Gleichungen, wobei die inneren Schnittkräfte Funktionen der Randdehnungen und Neigungswinkels der Nulllinie (Doppelbiegung) sind. Die Lösung erfolgt iterativ mit Hilfe des Newtonverfahrens.

Bei schwach beanspruchten Querschnitten kann die Einhaltung der Mindestbewehrung (Druck/Biegung) maßgebend werden. Außerdem wird ggf. eine Überschreitung der zulässigen Höchstbewehrung angezeigt

Bemessungsgrundlagen

Spannungsdehnungslinie des Betons (Parabel Rechtecklinie nach Bild 3.3)

Spannungsmaximum f_{cd}	$\mathbf{f_{cd} = \alpha_{cc*} \cdot f_{ck}/\gamma_c}$ f_{ck}: char. Zylinderdruckfestigkeit nach Tab 3.1 α_{cc}, γ_c: NDP
Grenzstauchung Beton ε_{cu2}	ε_{cu2} = 3.5 ‰ , > C50 betonabhängig Tab.3.1, Leichtbeton siehe Tabelle 11.3.1
Stauchung Ende Parabelbereich ε_{c2}	ε_{c2} = 2.0 ‰ , > C50 betonabhängig Tab.3.1 Leichtbeton siehe Tabelle 11.3.1
Exponent n	n = 2, > C50 betonabhängig Tab.3.1 Leichtbeton siehe Tabelle 11.3.1

α_{cc} Beiwert für Langzeitwirkung NDP

NDP	Normalbeton 3.1.6	Leichtbeton 11.3.5	Unbewehrt 12.3.1
EN	1,0	0,85	0,85
NA-A	=EN		
NA-PN			
NA-NL			
NA—CZ			
NA-D	0,85	0,75	0,7
NA-GB	0,85	= EN	= EN
NA-I	0,85	=EN	=EN
NA-B	0,85	0,85	0,8
NA-NF	1,0	0,85	0,8

γc Teilsicherheitsbeiwerte für Beton NDP

	Ständig/vorübergehend	Außergewöhnlich	Erdbeben
EN	1,5	1,2	1,5
NA-CZ	=EN		
NA-GB			
NA-B			
NA-NL			
NA-D	= EN	1,3	1,5
NA-A	= EN	= EN	=1,3
NA-I	= EN	1,0	=EN
NA-PN	1,4	=EN	1,4
NA-NF	1,5	1,2	1,3

Mögliche Reduzierung nach Anhang A

	A2.1 reduzierte geometrische Abweichungen durch Kontrolle $\gamma c,Red1$	A2.2 (1) gemessene geometrische Daten $\gamma c,Red2$	A2,2 (2) Variations-koeffizient der Festigkeit < 10 % $\gamma c,Red3$	A2.3 Betonfestigkeit im Betonwerk bestimmt Abminderung Faktor η	A2.3 Minimum γc ($\gamma c,Red4$)
EN	1,4	1,45	1,35	0,85	1,30
NA-GB	= EN				
NA-CZ					
NA-B					
NA-A					
NA-I	1,4	entfällt	entfällt	entfällt	1,4
NA-D	entfällt	entfällt	entfällt	0,9	1,35
NA-PN	1,35	entfällt	entfällt	entfällt	1,35
NA-NL	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	1,5
NA-NF	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt	1,5

Für Normalbeton mit ε_{c2} = 2 $^{o/oo}$ und Exponent = 2 können die inneren Schnittkräfte bei Rechteck- und Kreisquerschnitt über geschlossene Formeln ermittelt werden ([1]).

Für alle anderen Fälle (höherfester Beton >C50/60, Plattenbalken- und Schichtenquerschnitte) erfolgt eine näherungsweise Berechnung durch Aufteilung der Betondruckzone in dünne Schichten.

Bei Ortbetonergänzung werden für Fertigteil und Ortbeton die der jeweiligen Betonfestigkeit entsprechenden Arbeitslinien berücksichtigt.

Für hochbewehrte Querschnitte oder bei hochfesten Beton sollte die vom Stahl in der Druckzone verdrängte Betonfläche (Nettoquerschnitt) berücksichtigt werden. (Option → B2: Konfiguration Bemessung) / B2+)

Spannungsdehnungslinie Betonstahl (bilineare Linie nach Bild 3.8):

E_s: E-Modul	200000 N/mm² oder entsprechend Zulassung [2], [3], [4], [5]: 160000 N/mm² [6] 150000 N/mm² [7] 180000 N/mm²
f_{yd}: Bemessungswert der Streckgrenze	f_{yk}/γ_s
ε_{yd}: Dehnung am Bemessungswert der Streckgrenze	f_{yd}/E_s
ε_{uk}: charakteristischer Wert der Grenzdehnung	entsprechend Duktilität
ε_{ud}: Bemessungswert der Grenzdehnung	NDP
f_{td} : Bemessungswert der Zugfestigkeit bei ε_{uk}	$K \cdot f_{yk}/\gamma_s$ K entsprechend Duktilität
$f_{td,cal}$: Bemessungswert der Zugfestigkeit bei ε_{ud}	ermittelt entsprechend ε_{ud}

f_{yk} Charakteristischer Wert der Streckgrenze

f_{tk} $k \cdot f_{yk}$ charakteristische Zugfestigkeit

Duktilitätsklasse A: k= 1,05 ε_{uk}= 25 o/oo

Duktilitätsklasse B: k= 1,08 ε_{uk}= 50 o/oo

Duktilitätsklasse C: k= 1,15 ε_{uk}= 75 o/oo

ε_{ud}: Grenzdehnung NDP

	Ständig/vorübergehend 2.4.2.4
EN	0,9* ε_{uk}
NA-GB	=EN
NA-A	
NA-I	
NA-PL	
NA-NL	
NA-NF	
NA-CZ	
NA-B	0,8* ε_{uk}
NA-D	25 o/oo

γs: Teilsicherheitsbeiwerte für Betonstahl NDP

	Ständig/vorübergehend 2.4.2.4	Außergewöhnlich 2.4.3.4	Erdbeben
EN	1,15	1,0	1,15
NA-D	=EN		
NA-GB			
NA-I			
NA-PL			
NA-CZ			

NA-B			
NA-NL			
NA-A	= EN	= EN	=1,0
NA-NF			1,0

Mögliche Reduzierung nach Anhang A

	A2.1 reduzierte geometrische Abweichungen durch Kontrolle γs,Red1	A2.2 (1) gemessene oder verminderte geometrische Daten γc,Red2
NA-EN	1,10	1,05
NA-GB	=EN	
NA-A		
NA-PL		
NA-CZ		
NA-B		
NA-D	entfällt	entfällt
NA-I	entfällt	entfällt
NA-NL	entfällt	entfällt
NA-NF	entfällt	entfällt

Die Neigung des oberen Astes der Arbeitslinie des Betonstahles wird berücksichtigt, sofern dies nicht unter Konfiguration bzw. den Optionen (B2 / B2+) abgestellt wurde.

Für Zug und Druck darf ein gleiches Verhalten angenommen werden, sofern z.B. im nationalen Anhang oder der Zulassung nichts anderes gesagt ist.
NA-NL: Die anrechenbare Druckspannung ist auf 435 N/mm^2 begrenzt

Hochfester Stahl SAS 670 [8]

Zum Erreichen der Streckgrenze ist eine Dehnung von 2,91 ‰ erforderlich. Das führt insbesondere bei einer Druckbewehrung dazu, dass die hohe Stahlfestigkeit nicht ausgenutzt werden kann

Grenzdehnungen nach Bild 6.1:, die zum Versagen des Querschnittes führen

Dehnungsgrenze des Betonstahles	ε_{ud}
Stauchungsgrenze des Betons	ε_{cu2} *1)
Stauchungsgrenze des Betons bei reiner Normalkraft	ε_{c2} *2)

*1): Nach 6.1. (5) ist die Stauchung in der Plattenmitte gegliederter Querschnitte auf ε_{c2} nach Tab. 3.1 zu begrenzen. Dies ist mit Ausnahme von Kreisring- Rechteckhohl- und polygonalen Querschnitten implementiert.

*2): NA-D: Bei geringen Ausmitten ed/h < 0,1 kann ε_{c2} mit 2,2 ‰ angenommen werden.
Dies ist mit Ausnahme von Kreisring-, Rechteckhohl- und polygonalen Querschnitten implementiert.
Bei diesen Querschnitten wird immer mit ε_{c2} nach Tab.9,10 gerechnet.

Mindestmoment: Nach 6.1 (4) gilt M > N · max(2 cm, h/30)
NA-D:
Nicht erforderlich bei Berechnung nach Theorie II. O.

Bemessung für ein gegebenes Bewehrungsverhältnis

Dient vorzugsweise der Bemessung für Druckkraft mit geringer Ausmitte, kann aber auch universell eingesetzt werden, z.B. bei mehrachsiger Beanspruchung und bei Kreisquerschnitten. Die Ermittlung des Bruchzustandes erfolgt iterativ unter Vorgabe einer Bewehrungsanordnung (zweiachsige Beanspruchung) bzw. des Verhältnisses von gezogener zur gedrückter Bewehrung (einachsige Beanspruchung).

Durch Wahl eines bestimmten Bewehrungsverhältnisses oder Anordnung kann die erforderliche Stahlmenge reduziert werden.

Hebelgesetz

Falls die Resultierende Längszugkraft innerhalb der Bewehrungslagen liegt, ergibt sich keine Betondruckzone. Vereinfachend gilt die Annahme, dass die Bewehrung oben und unten die Fließgrenze erreicht. Die Größe der Bewehrung ist dann nur noch vom auf den Querschnittsschwerpunkt bezogenen Bewehrungsabstand und der Ausmitte der Resultierenden abhängig und kann nach dem Hebelgesetz ermittelt werden.

Mindestbewehrung

Bei Druckgliedern (ed/h < 3,5) wird automatisch überprüft, ob eine Bemessung der Mindestbewehrung maßgebend wird.

Bei den Bemessungstypen einachsige Bemessung Plattenbalken, Rechteck und Schichtenquerschnitt wird außerdem geprüft, ob die erforderliche Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile maßgebend wird.

Bei den Bemessungstypen zweiachsige Bemessung Rechteckquerschnitt und Kreisquerschnitt bleibt diese Mindestbewehrung z.Zt. unberücksichtigt.

Die Berücksichtigung beider Mindestbewehrungen ist optional deaktivierbar
→ B2 / B2+

EN 1992-1-1

NA-D:	Tafeln für einachsige Beanspruchung in [9] (fck <= 50 N/mm²)
	Kreis- und Rechteckquerschnitte mit d1/h = 0,05 ...0,20
NA-A:	Tafeln für einachsige Beanspruchung in [10] (fck <= 50 N/mm²)
	Kreis- und Rechteckquerschnitte mit d1/h = 0,05 ...0,20
NA-GB:	Tafeln für einachsige Beanspruchung in [11] (fck <= 50 , fck = 90 N/mm²)
	Kreis- und Rechteckquerschnitte mit d1/h = 0,05 ...0,20
NA-I:	eine exemplarische Tafel für einachsige Beanspruchung in [12] (fck=30 N/mm²) Rechteckquerschnitt mit d1/h = 0,1
NA-PL	exemplarische Tafeln für einachsige Beanspruchung in [13](fck<=50 N/mm²) Rechteckquerschnitt

Bemessung nach kd-Verfahren

Das Verfahren dient der Bemessung für einachsig beanspruchte Querschnitte und ist vorzugsweise für Biegung und Längskraft mit großer Ausmitte geeignet .

$k_d = \frac{d[cm]}{\sqrt{\frac{M_s[kNm]}{b[m]}}}$ ist dabei das Maß der Querschnittsbeanspruchung.

Zunächst wird nur von der Anordnung einer Zugbewehrung ausgegangen. Über das Gleichgewicht der Momente bzgl. der Bewehrungslage wird das für einen Dehnungszustand aufnehmbare Moment ermittelt. Soll die Bewehrung voll ausgenutzt werden, ergibt sich der Dehnungszustand mit dem maximal möglichen Moment mit der Betongrenzstauchung auf der Druckseite und der Fließdehnung in Höhe der Stahllage. Liegt das aufzunehmende Moment unter diesem, ergibt sich der Bruchzustand aus der iterativen Herstellung des Gleichgewichtes der Momente und Normalkräfte. Liegt das aufzunehmende Moment über dem Grenzmoment, wird der oben beschriebenen Dehnungszustand angenommen. Das Differenzmoment wird durch eine Druckbewehrung abgedeckt.

Für den Fall, dass sich keine Betondruckspannungen ergeben, erfolgt die Bemessung nach dem Hebelgesetz.

Besonderheiten bei linear elastischer Berechnung von Durchlaufträgern ohne Schnittkraftumlagerung

Das Kriterium für die Ermittlung einer Druckbewehrung ist hier das Überschreiten der bezogenen Druckzonenhöhe, die sich nach 5.5 (4) mit δ=1.0 (keine Umlagerung) ergibt.

$\frac{x}{d} = \frac{\delta - k1}{k2}$ bzw. $\frac{x}{d} = \frac{\delta - k3}{k4}$ für $f_{ck} > 50$ N/mm²

	K1	K2	x/d <=C50/60	K3	K4	x/d (C90)
EN	0.44	k2 = 1,25 (0,6 + 0,0014 / εcu2)	0.448	0.54	k4 = 1,25 (0,6 + 0,0014 /εcu2)	0.33
NA-A	=EN					
NA-IT						
NA-PL						
NA-CZ						
NA-B						
NA-NL						
NA-NF						
NA-D	0.64	0.8	0.45	0.72	0.8	0.35 *a)
NA-GB	0.4	k2 = (0,6 + 0,0014/ εcu2)	0.6	0.4	k4 = (0,6 + 0,0014/ εcu2)	0.53

NA-D *a): gilt auch für Leichtbeton

Mindestbewehrung

Bei Druckgliedern (ed/h < 3,5) wird automatisch überprüft, ob eine Bemessung der Mindestbewehrung maßgebend wird.

Bei den Bemessungstypen einachsige Bemessung Plattenbalken, Rechteck und Schichtenquerschnitt wird außerdem geprüft, ob die erforderliche Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile maßgebend wird.

Die Berücksichtigung beider Mindestbewehrungen ist optional deaktivierbar
→ B2 / B2+

Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile

Der Mindestwert einer auf Zug beanspruchten Längsbewehrung nach 9.2.1.1. ist ein NDP

	Asmin
EN	$= 0{,}26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d > 0{,}0013 \cdot b_t \cdot d$
NA-GB	= EN
NA-A	
NA-I	
NA-PL	
NA-CZ	
NA-B	
NA-NF	
NA-NL	$A_{s,min}(N_{Ed,min}, M_{Ed,min}) < 1{,}25 * As$ reine Biegung: $N_{Ed,min} = 0$; $M_{Ed,min==} f_{ctm} * W$ Biegung mit Längsdruckkraft: $N_{Ed,min} = fctm * Ac * 1/(\eta-1)$; $M_{Ed,min==} f_{ctm} * W * \eta /(\eta-1)$; Biegung mit Längszugkraft: $N_{Ed,min} = fctm * Ac * 1/(\eta+1)$; $M_{Ed,min==} f_{ctm} * W * \eta /(\eta+1)$ $\eta = e * Ac/W$ $e = M_{Ed}/N_{Ed}$
NA-D	$= \frac{M_{cr}}{(f_{yk} \cdot z)} + N) / f_{yk}$ mit $M_{cr} = (f_{ctm} + \frac{N}{A_c}) \cdot W_c$ und $z = 0{,}9 \cdot d$ siehe [14]

Mindestbewehrung für Druckglieder

Als Druckglieder eingestuft werden – entsprechend der Definition in DIN EN 1992-1-1/NA (NCI zu 1.5.2)– auf Druck beanspruchte Querschnitte mit einer bezogenen Lastausmitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit von ed/h <= 3,5. Bei zweiachsiger Beanspruchung muss das Kriterium wenigstens in einer Richtung erfüllt sein.

As,min	Stützen (9.5.2(2))	Wände (9.6.2 (1))
EN	$= 0.10 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} > 0.002 \cdot Ac$	$= 0.002 \cdot Ac$
NA-PL	=EN	
NA-CZ		
NA-B		
NA-GB		
NA-NF		
NA-D	$= \frac{0.15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}}$	$= 0.15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$ <0.003 * Ac >0,0015* Ac
NA-A	$= 0.13 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} > 0.0026 \cdot Ac$	= EN
NA-NL	=EN	0

Biegetragfähigkeit

Symmetrische Querschnitte mit einachsiger Beanspruchung:

Für eine gewählte obere und untere Bewehrung und ggf. eine Längskraft kann das vom Querschnitt aufnehmbare Moment MRd ermittelt werden. Die Tragfähigkeit ist gegeben, wenn MRd > MEd (MEd > 0) bzw. MRd < MEd (MEd < 0), andernfalls muss die Bewehrung erhöht werden.
Optional kann ein N/M Diagramm des Querschnittes zwischen der maximalen Längszugkraft und der maximalen Längsdruckkraft ermittelt werden. Befindet sich die Beanspruchung innerhalb der Kurve, ist die Tragfähigkeit gegeben.

Querschnitte mit zweiachsiger Beanspruchung
Für die Ermittlung eines aufnehmbaren Momentes muss neben der einwirkenden Längskraft und dem Moment in die andere Richtung die Gesamtbewehrung der entsprechenden Bewehrungsanordnung (umlaufend, seitenverteilt, Punktbewehrung) bekannt sein.

Schubbemessung

Querkraft

Die Querkrafttragfähigkeit wird über ein Fachwerkmodell mit Betondruckstreben und Stahlzugpfosten (Bügel) nachgewiesen. Ein Minimum an Bügeln ergibt sich mit der flachest möglichen Druckstrebenneigung.

Durch eine flachere Neigung reduziert sich jedoch die Druckstrebentragfähigkeit.

Außerdem erhöhen sich auch die Kräfte im Zuggurt, was seinen Niederschlag in der Erhöhung des Versatzmaßes findet.
Die Schubbemessung erfolgt eine für vertikale Schubbewehrung (Bügel) und setzt die Verwendung gerippten Betonstahles voraus.

VEd Bemessungswert der Querkraft (GZT)

Tragfähigkeit ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

VRd,c Die Querkrafttragfähigkeit ergibt sich für den gerissenen Zustand nach Gleichung 6.2 bzw. 11.6.2 für Leichtbeton
VRdc= max(VRdc(6.2s), VRdc(6.2b))

$$V_{Rd,c(6.2a)} = C_{Rdc} \cdot \eta 1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho l \cdot f_{ck})^{1/3} + k1 \cdot \sigma cp) \cdot b_w \cdot d$$

CRdc: Kalibrierfaktor nach 6.2.2. (1)

K1: empirischer Spannungsbeiwert

NDP	k1	CRdc Normalbeton	ClRdc Leichtbeton
EN	0,15	0,18/γc	0,15/γc
NA-A	=EN		
NA-I			
NA-PL			
NA-CZ			
NA-NL			
NA-NF			
NA-GB	0,15	0,18/γc, > C50 Test oder wie C50	
NA-B	=EN	0,18/γc	0,18/γc

	z.Zt. keine Vergrößerung bei kontinuierlich gelagerten Platten		
NA-D	0,12	0,15/γc	0,15/γc

η1 Korrekturbeiwert Leichtbeton

K =1+√(200/d) <= 2 [d in mm]

Maßstabsfaktor, kleiner mit wachsender Nutzhöhe

ρl =Asl/(bw · d) < 0,02

Zugbewehrung Asl, die mit lbd+d über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird

σcp= NEd/Ac < 0,2 · fcd

Spannung (Druck negativ)

bw: kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Nutzhöhe

VRd,c (6.2b)= (vmin+k1 · σcp) · bw · d

vmin	Normalbeton	Leichtbeton
EN	0,035 · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$	0,028 · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$
NA-A	=EN	
NA-PL		
NA-CZ		
NA-NL		
NA-I	0,035 · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$	0,030 · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$
NA-B	0,035 · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$	0,030 · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$
	z.Zt. keine Vergrößerung bei kontinuierlich gelagerten Platten	
NA-D	0,0520/γc · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$ (d < 600) 0,0375/γc · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$ (d > 800)	0,0520/γc · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$ (d < 600) 0,0375/γc · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$ (d > 800)
NA-GB	0,035 · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$	0,028 · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$
	fck<= 50 N/mm2 oder Zusatzoption „keine Abminderung	
NA-NF	0,035 · $k^{3/2}$ · $fck^{1/2}$	0,028 · $k^{3/2}$ · $flck^{1/2}$
	günstigere Faktoren für Platten und Wände z.Zt. nicht berücksichtigt	

Für vorgespannte statisch bestimmt gelagerte Bauteile ist optional eine Berechnung nach Gleichung 6.4 möglich, wenn die Betonrandspannungen kleiner als fctd sind. (siehe B2 / B2+)

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^{\ 2} + \alpha_l \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}$$

I: Trägheitsmoment

S: Statisches Moment im maßgebenden Schnitt

b_w: Breite im maßgebenden Schnitt

σ_{cp}: Längsspannung im maßgebenden Schnitt

a_l: Beiwert für Vorspannung mit sofortigem Verbund im Bereich der Eintragungslänge, sonst immer 1.0

f_{ctd}: Rechenwert der Betonzugfestigkeit

$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk}\ 0.05 / \gamma_c$

γ_c: Teilsicherheitsbeiwert (siehe Bemessungsgrundlagen)

f_{ctk} 0.05: unterer charakteristischer Wert der Betonzugfestigkeit

α_{ct}:	Dauerstandsbeiwert	1.0	Leichtbeton	0.85
	NA-D:	0.85		0.85

NA-D: nicht zulässig für vorgespannte Elementdecken (AbZ)

Bei Anwendung von Gleichung 6.4 ist zu beachten, dass im Falle veränderlicher Querschnittsbreite oder nicht konstanter Längsspannungen der maßgebende Schnitt nicht im Schwerpunkt des Querschnittes liegt und iterativ gefunden wird. Das bedeutet, dass VRdc auch abhängig von der eingegebenen Längskraft (Minimum maßgebend) und dem eingegebenen Biegemoment (Maximum maßgebend) ist.

Tragfähigkeit mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Cot Θ Druckstrebenwinkel

Bemessungsziel ist ein Minimum an Schubbewehrung, d.h. gesucht ist der flachest mögliche Druckstrebenwinkel (Max Cot Θ), für den die Druckstrebentragfähigkeit noch gegeben ist. Bei gleichzeitiger Torsionsbeanspruchung kann diese maßgebend für den zu wählenden Druckstrebenwinkel werden.

Optional kann der Druckstrebenwinkel auch vom Nutzer vorgegeben werden (→ B2-Bemessungsoptionen / B2+) z.B. wenn weitere Schnitte mit dem am maßgebenden Schnitt geltenden Druckstrebenwinkel nachgewiesen werden sollen. Dieser darf aber nicht flacher als der erforderliche sein.

NDP	Max Cot Θ	Min Cot Θ	Bemerkung
EN	2,5	1,0	Bestimmung von Θ aus V_{Ed}= $V_{Rd,max}$
NA-NL	=EN		
NA-I			
NA-GB	= EN bei externen Zug 1,25	= EN	
NA-A	1,6 generell 2,5 wenn Querschnitt überdrückt	= EN	
NA-PL	2.0	=EN	
NA-NF	2,5 bei Zug: $2{,}5 * sqrt\left(1+\frac{\sigma ct}{fctm}\right)$	1,0 bei Zug: $1{,}0 * sqrt\left(1+\frac{\sigma ct}{fctm}\right)$	
NA-CZ	1,75 2,5 …Signifikant Druck 1,0 Signifikant Zug	1,0	Bestimmung von Θ aus V_{Ed}= $V_{Rd,max}$ Signifikant Druck bzw. Zug: NEd >= Coeff* Ac* fcd Coeff= 0,1 (CSN 731201)
NA-B	2.0 bei Druck bis 3.0	=EN	Bestimmung von Θ aus V_{Ed}= $V_{Rd,max}$ $\cot\theta_{max} = \left(2+\frac{k_1.\sigma_{cp}.b_w.d.s}{A_{sw}.z.f_{ywd}}\right) \le 3$
NA-D	3,0 Normalbeton 2,0 Leichtbeton	0,58	Druckstrebenwinkel nach Gl.6.7aDE mit Rissreibungskriterium nach Gl.6.7bDE

NA-D:

Cot Θ <= (1,2 - 1,4 · σcd/fcd) / (1-VRd,cc/VEd) Gl. 6.7aDE

VRd,cc: Rissreibungskraft VRd,cc = ßct · 0,1 · $fck^{1/3}$ · (1 - 1,2 · σcd/fcd) · bw · z Gl.6.7.bDE

z Hebelarm

Hebelarm des angenommenen Fachwerkmodelles entsprechend Biegebemessung (näherungsweise für reine Biegung einachsig z= 0,9 · d bzw. bei Kreisquerschnitten z= 0,55 · d)

NA-D: Begrenzung z < d - 2 · cv,l > d- cv,l- 3 cm (cv,l = nomc , optional cv,l= d2- ϕ/2)

Der Hebelarm kann auch nutzerdefiniert vorgegeben werden
(→ B2-Bemessung Ergebnisse).

aswV rechnerisch erforderliche Schubbewehrung

Die rechnerisch erforderliche Schubbewehrung ergibt sich nach Gl. 6.8, durch die Wahl des Druckstrebenwinkels auch unter dem Kriterium der Einhaltung von VRdmax ist Gl. 6.12 nachgewiesen.

Bei Kreisquerschnitten wird in Anlehnung an [17] ein die erforderliche Schubbewehrung vergrößernder Wirksamkeitsfaktor für Rundbügel ermittelt. Dieser berücksichtigt, dass die angreifende Schubkraft i.d.R. nicht parallel zur aufnehmbaren Kraft des Rundbügels verläuft. Je nach betrachteten Schnitt verläuft diese in einem anderen Winkel zur Senkrechten.

MinAsw Mindestschubbewehrung

Es wird geprüft, ob eine Mindestschubbewehrung nach 9.2.2 (5) für Balken bzw. 9.3.1.4 (NA-D) für Platten maßgebend wird. Diese wird für eine mittlere Stegbreite ermittelt (beim Kreisquerschnitt bwS= Ac/Da).

Min asw/s= $\rho \cdot bw \cdot \sin \alpha$

	ρ (Balken) nach 9.2.2	ρ (Platten) nach 9.3.2	Bemerkung
EN	0,08 · √fck/fyk	0	Gl. 9.5N
NA-GB	=EN		
NA-PL			
NA-CZ			
NA-B			
NA-NL			
NA-NF			
NA-I	=EN	=EN	Keine Angaben im NTC, nach Entwurf NA
NA-A	0,15 · fctm/fyd	=EN	
NA-D	0,16 · fctm/fyk	0 wenn VEd < VRdc Sonst 0.6 *ρ	Übergangsbereich 4 < b/h < 5: Interpolation zwischen 0 und einfachen Wert (VEd < VRdc) bzw. zwischen 0,6 und einfachen Wert (VEd > VRdc)

VRd,max Druckstrebentragfähigkeit

Es ist an jeder Stelle des Bauteiles bis einschließlich dem Auflagerrand nachzuweisen, dass VRd,max > VEd ist, VEd ist die nicht abgeminderte Querkraft.
Das Maximum von VRd,max ergibt sich für einen Druckstrebenwinkel von 45°. Ist VRd,max kleiner als der Bemessungswert der Querkraft, ist der Querschnitt oder die Betonklasse zu erhöhen

$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot \alpha_{cw} \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \cot\Theta/(1+\cot^2\Theta)$

ν_1 Abminderungsbeiwert für Schubrisse

	ν_1 Normalbeton	ν_1 Leichtbeton
EN	0,6 · (1-fck/250)	0,5 * η_1· (1-fck/250)
NA-A	=EN	
NA-GB		
NA-PL		
NA-CZ		
NA-B		
NA-NL		
NA-NF		
NA-I	0.5 [1]	0,5 ·η_1 (1-fck/250) [4]
NA-D	< C55: 0,75 0,75* (1,1-fck/500)	< C55 0,75 ·η_1 0,75* ·η_1* (1,1-fck/500)

von der Erhöhung durch den Ansatz von nur 80 % Bügeltragfähigkeit nach Gl. 6.10a und 6.10b wird z.Zt. nicht Gebrauch gemacht

α_{cw} Beiwert für Spannungszustand im Druckgurt

Allgemein: $\alpha_{cw} = 1,0$
Erhöhung bei Längsdruckkraft infolge Vorspannung:
$0 < \sigma_{cp} \le 0,25 * f_{cd}$ $\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd})$
$0,25 * f_{cd} < \sigma_{cp} \le 1.0 * f_{cd}$ $\alpha_{cw} = 1,25$
$0,5 * f_{cd} < \sigma_{cp} \le 1.0 * f_{cd}$ $\alpha_{cw} = 2,5 * (1 - \sigma_{cp} / f_{cd})$

NA-D: $\alpha_{cw} = 1,0$
NA-NF: Reduzierung bei Längszug $\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{ctm})$

bw maßgebende Breite

Die Breite bw entspricht bei Plattenbalken der Stegbreite b0, bei Schichtenquerschnitten der geringsten Breite im Querschnitt.
Bei Kreisquerschnitten entspricht bw der geringsten Breite zwischen Druck- und Zugresultierender. Bei unbekannter Lage der Resultierenden (Moment und Normalkraft sind Null) wird unter der sicheren Annahme eines Abstandes der Druckresultierenden von Da/40 gerechnet.

fcd Betondruckfestigkeit

EN: nach Gl. 3.15
NA-GB: darf mit α_{cc}=1,0 ermittelt werden
Option „Erhöhtes fcd nach PD 6687:2006“ siehe B2 / B2+
> C50/60: mit fck= 50 N/mm²
oder Zusatzoption „keine Abminderung“ siehe B2 / B2+
NA-B: darf mit α_{cc}=1,0 ermittelt werden

sl,max maximaler Bügelabstand nach 9.2.2 (6)

	sl,max (NDP nach 9.2.2 (6))
EN	0,75 · d · (1+cot α)
NA-GB	=EN
NA-I	
NA-PL	
NA-CZ	
NA-B	
NA-NL	0,75 · d · (1+cot α) < 300 mm
NA-A	0,75 · d · (1+cot α) <= 250 mm
NA-NF	0,75 · d · (1+cot α) h< 250 mm: 0,9 · d · (1+cot α)
NA-D	Differenziert nach Querkraftausnutzung VEd/VRdmax VRdmax darf nach [14] mit θ= 40 Grad angenommen werden. Ausn < 0.3: sMax = 0,7 · h (< 30 cm, C50/60 < 20 cm) Ausn < 0.6 sMax = 0,5 · h (< 30 cm, C50/60 < 20 cm) Ausn > 0.6 sMax = 0,25 · h (< 20 cm)

Querkraft zweiachsig für Rechteckquerschnitte

Mit einem in [18] beschriebenen Verfahren wird der Nachweis über Anpassungsfaktoren bezüglich der Druckstreben- und Bügeltragfähigkeit auf den einachsigen Fall zurückgeführt.

Der Grenzfall 1 ist die einachsige Beanspruchung mit α_v = 0, der **Grenzfall 2** die zweiachsige Beanspruchung mit einem Lastangriff der Resultierenden genau über Eck, d.h. α_v = 1.

Die Kraft im Bügel ist für Fall 2

$2 \cdot V_z = 2 \cdot \frac{V_{Ed}}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}}$, also um den Faktor $\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}}$ größer als bei Fall 1.

Die größte Beanspruchung der Betondruckstrebe ergibt sich im Fall 2 an Stelle der Einleitung der Druckstrebe in den Zuggurt, wo sich die Breite b_{eff} auf konserativ abgeschätzte 0,6 · b einschnürt. Bei Annahme eines gleichen Hebelarmes ergibt sich gegenüber Fall 1 eine um den Faktor b/b_{eff} höhere Druckstrebenbeanspruchung.

Zwischen diesen beiden Fällen erfolgt nun eine Interpolation, entsprechend der vorhandenen Neigung α_v mit Hilfe der folgenden Beziehungen:

V_{Ed}: resultierende Querkraft $\sqrt{V_{Edy}^2 + V_{Edz}^2}$

α_v: bezogene Querkraftneigung $\frac{|V_{Edy}| \cdot h}{|V_{Edz}| \cdot b}$

h: Seitenlänge in z-Richtung

b: Seitenlänge in y-Richtung

wenn 0 <= α_v <= 1,

dann Tragfähigkeitsnachweis mit b_w = b,

sonst $\alpha_v = 1/\alpha_v$ und Tragfähigkeitsnachweis mit b_w = h,

Interpolationsfaktor Schubbewehrung

$$k_{asw} = 1 + \left(\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}} - 1 \right) \cdot \alpha_v^{1/2}$$

$$V_{Rd,sy} = V_{Ed} = \frac{A_{sw}}{sw} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot\theta \cdot \frac{1}{k_{asw}}$$

Interpolationsfaktor Druckstrebentragfähigkeit

$$k_{vmax} = \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{b \cdot 0{,}6} - 1 \right) \cdot \alpha_v^{1/2}}$$

$$V_{Rd,max} = b \cdot z \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{cd}}{\cot\theta + 1/\cot\theta} \cdot k_{vmax}$$

z Hebelarm der inneren Kräfte, d.h. der Abstand zwischen Zug- und Druckresultierender der inneren Schnittkräfte, wie er sich aus der Biegebemessung ergibt.

Bei unbekanntem Hebelarm erfolgt eine Interpolation zwischen z = 0,9 · (h-d1) für α_v = 0 und z = 0,9 · (h-d1+b-b1)/2 für α_v = 1,0 bzgl. dem vorhandenen α_v.

NA_D: z < d - 2 · nomc

Diese Begrenzung soll sicherstellen, dass der Abstand der Druckresultierenden vom Druckrand nicht kleiner 2 · nomc ist.
d ist demzufolge der Abstand der Zugresultierenden vom Druckrand in Richtung des Hebelarmes.

V_{Rdc} wird näherungsweise mit b_w = 0,6 · b_w (Fall1) und d = z ermittelt

Schubkraftübertragung in Fugen

Bei Querschnitten mit Ortbetonergänzung ist die Tragfähigkeit der Ortbetonfuge nachzuweisen
vEdi < vRdi Gl. 6.23

vEdi Zu übertragende Schubkraft je Längeneinheit in der Fuge

vEdi = ß · VEd / (z · bi) Gl. 6.24

VEd: Bemessungswert der Querkraft

z: Hebelarm der inneren Kräfte,
siehe Nachweis Querkraftragfähigkeit

NA-D: Falls VRd,c > VEd, entfällt die Hebelarmbegrenzung mit cv.

ß: Verhältnis Normalkraft im Ortbeton/Gesamtdruckkraft (Annahme 1,0)

vRdi Bemessungswert des Schubkraftwiderstandes der Fuge

$vRdi = c \cdot fctd + \mu \cdot \sigma n + \rho \cdot fyd \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) < 0{,}5 \cdot \nu \cdot fcd$
(Gl. 6.25, Leichtbeton mit fctd= flctd und ν= νl und fcd= flcd)
NA-D:
$vRdi = c \cdot fctd + \mu \cdot \sigma n + \rho \cdot fyd \cdot (1{,}2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) < 0{,}5 \cdot \nu \cdot fcd$

fcd, flcd Bemessungswert der Betondruckfestigkeit (siehe Kap. Biegung)

ν Festigkeitsabminderungsbeiwert nach 6.2.2 (6)
EN: Normalbeton $0{,}6 \cdot (1\text{-}fck/250)$
Leichtbeton $0{,}5 \cdot * \eta 1 * (1\text{-}fck/250)$

NA-D:

NCCI	sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
Normalbeton	0,0	0,2	0,5	0,7
> C50	0,0	* (1,1-fck/500)	* (1,1-fck/500)	* (1,1-fck/500)
Leichtbeton	0,0	* η1	* η1	* η1

σn Normalspannung senkrecht zur Fuge mit $\sigma ND = nEd/bi < 0{,}6 \cdot fcd$

nEd: Bemessungswert (Druck: unterer, Zug: oberer) der Normalkraft senkrecht zur Fuge je Längeneinheit, Druck negativ.

bi: Wirksame Fugenbreite, ggf. durch aufliegende Fertigteilschalung reduzierte Gesamtbreite.

c Rauhigkeitsbeiwert entsprechend Oberflächenbeschaffenheit

sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
0,1	0,20	0,40	0,50

fctd, flctd Bemessungswert der Betonzugfestigkeit
Normalbeton $f_{ctd} = \alpha_{ct} * f_{ctk;0.05}/\gamma_c$
Leichtbeton $f_{lctd} = \alpha_{lct} * f_{lctk;0.05}/\gamma_c$

$f_{ctk;0.05}$, $f_{lctk;0.05}$, 5% Quantilwert der Betonzugfestigkeit
α_{ct}, α_{lct} Beiwert für Langzeitwirkungen
EN: Normalbeton $\alpha_{ct} = 1{,}0$
Leichtbeton $\alpha_{lct} = 0{,}85$
NA-D $\alpha_{ct} = \alpha_{lct} = 0{,}85$

μ Reibungsbeiwert entsprechend Oberflächenbeschaffenheit nach Tabelle 13

sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
0,5	0,6	0,7	0,9

ρ Schubbewehrungsgrad der Fuge

ρ = Asw / Ai = asw / bi

asw Die Fuge kreuzende erforderliche Bügelbewehrung damit vRdi = vEdi

vrdi0 = c · fctd + $\mu \cdot \sigma$n Tragfähigkeit ohne Fugenbewehrung

asw = bi · (vEdi – vRdi0) / (fyd · k · μ · sin α + cosα)

NA-A:

asw > Min = ρ_{min}* b

Platten: $\rho_{min} = 0.12 \cdot f_{ctm} / f_{yk} > 0.0005$

Balken: $\rho_{min} = 0.20 \cdot f_{ctm} / f_{yk} > 0.001$

Der im Nationalen Anhang geforderte Nachweis der Verankerung wird zurzeit nicht geführt, seine Erfüllung aber vorausgesetzt, da die Berechnung von asw mit fyd ohne Abminderung erfolgt.

Torsion

Die Torsionsbemessung erfolgt über einen Ersatzhohlquerschnitt. Bei gegliederten Querschnitten wird näherungsweise nur der Stegquerschnitt angesetzt.

tef,i: effektive Wanddicke

tef,I = A / U

< 2 · d1 doppelter Abstand der Bewehrung

< ba tatsächliche Wanddicke bei Hohlquerschnitten

Das Erfordernis, anstelle einer Mindestbewehrung die Torsionstragfähigkeit explizit nachzuweisen, ergibt sich aus der Interaktionsgleichung 6.31, die für NA-D abweichend geregelt ist.

NA-A, NA-GB:

TEd/TRdc + VEd/VRd,c < 1 Gl.6.31

TEd: Bemessungswert des Torsionsmomentes

TRdc: Allein durch die Betonzugfestigkeit fctd aufnehmbares Torsionsmoment

TRdc= fctd · t · 2 · Ak nach [19] S.6-13

Wt: Widerstandsmoment nach [9] S.309

NA-D:

TEd < VEd · bw/4,5 Gl. 6.31aDE

VEd · (1+ (4,5 · TEd) / (VEd · bw)) <= VRdct Gl. 6.31bDE

Cot Θ Bemessungsziel ist ein Minimum an Schubbewehrung, d.h. gesucht ist der flachest mögliche Druckstrebenwinkel (Max Cot Θ), für den die Druckstrebentragfähigkeit noch gegeben ist.

Damit ergibt sich aber nicht zwangsläufig ein Bewehrungsminimum, da der Anteil der Torsionslängsbewehrung mit flacheren Druckstreben stark steigt.

Bei gleichzeitiger Querkraftbeanspruchung kann die Interaktion aus Querkraft und Torsion maßgebend für die Bemessung werden.

Vereinfachend darf die Torsion alleine unter der Annahme Cot Θ = 1,0 (45 Grad) nachgewiesen werden (siehe B2 / B2+).

NA-D:

Ermittlung des Druckstrebenwinkels nach [20], S. 173 ff.

Cot Θ <= (1,2 - 1,4 · σcd/fcd) /(1-VRd,cc/VEd, T+V) entspr. Gl. 6.7.aDE

VEd, T+V: Resultierende Beanspruchung

VEd,T+V = VEd,T + VEd,V · teff,I / bw

VEd,V: Beanspruchung aus Querkraft

VEd,T: Beanspruchung aus Torsion
VEd,T = Ted · zi / (2 · A)

VRd,cc: Rissreibungskraft entspr. Gl.6.7.bDE

VRd,cc = ßct · 0,1 · $fck^{1/3}$ · (1 - 1,2 · σcd/fcd) · tef,i · z

TRd,max Bemessungswert des aufnehmbaren Torsionsmomentes nach Gl. 6.30 bzw. äquivalent in Abhängigkeit von cot Θ alleine zu:

TRd,max= 2 · ν · αcw · fcd · Ak · tef,I · cot θ (1 + cot² θ)
Ak: Fläche, die von den Wandmittellinien eingeschlossen wird

NDP	**ν (6.2.2. (6))**	Bemerkung
EN	ν = 0,6 · (1-fck/250) ν = 0,5 · η1 · (1-fck/250)	Analog Querkraft Normalbeton Leichtbeton
NA-PL	=EN	
NA-CZ		
NA-B		
NA-NL		
NA-NF		
NA-A		
NA-GB		
NA-D (NCCI)	ν = 0,525 * (1,1-fck/500) * η1	gegenüber Querkraft abgemindert Normalbeton > C50 Leichtbeton
NA-I (NCCI)	ν=0,5 ν= 0,5·η1· (1-fck/250) [4] S.63	Analog Querkraft Normalbeton Leichtbeton

αcw: Beiwert analog VRd,max

Das Maximum von TRd,max ergibt sich für einen Druckstrebenwinkel von 45 Grad. Ist TRd,max kleiner als der Bemessungswert des Torsionsmomentes, ist der Querschnitt oder die Betonklasse zu vergrößern.

aswT Die erforderliche Bügelbewehrung infolge Torsion ergibt sich z.B. nach

aswT* = TEd/(2 · Ak · fyd · cot θ) [9] S. 283

Die Mindestschubbewehrung wird maßgebend, falls aswV+ aswT < aswMin

Die erforderliche Schubbewehrung aswT wird auf den Gesamtquerschnitt bezogen angegeben. Da aswT vom Programm nur für eine Wand des Hohlquerschnittes ermittelt wird, erfolgt die Ausgabe also mit dem doppelten Wert (aswT= = 2*aswT*). Hintergrund ist die einfachere Überlagerung mit einer Querkraftbeanspruchung.
Siehe Zehetmayer,Zilch: “Bemessung im konstruktiven Betonbau“, Springerverlag, Berlin 2010, 2. Auflage, S. 308

AsL Die zusätzliche Längsbewehrung infolge Torsion

Asl = TEd · cot θ · Uk/(2 · Ak · fyd) Gl. 6.28

Uk: Umfang der Fläche Ak

Bei kombinierter Querkraft- und Torsionsbeanspruchung ist folgende Interaktionsbedingung einzuhalten:

TEd/TRd,max + VEd/VRd,max < 1 Gl. 6.29

NA-D und NA-A:

Für Kompaktquerschnitte gilt

$(T_{Ed}/T_{Rd,max})^2 + (V_{Ed}/V_{Rd,max})^2 < 1$ NA-D: Gl. NA.6.29.1 / NA-A: Gleichung (9)

Der Bügelquerschnitt ergibt sich zu asw(V+T)= aswV+ aswT.

Schubbemessung für Elementdecken mit Gitterträgern

Der Nachweis für DIN EN 1992-1-1/NA ist auf der Basis von Zulassungen möglich.

Gitterträger sind Fachwerkträger bestehend aus Druckgurt, Zuggurt und Streben.

Die Streben können entweder die Form gleichschenkliger Dreiecke haben
(Neigungswinkel 45° <= α < 90° z.B. [21], [22], [23] im folgenden System „gleichschenkliges Dreieck" genannt)
oder bestehen aus einem vertikalen Pfosten und einer geneigten Diagonale
(Neigungswinkel 45° <= α1 < 90° z.B. [24], [25], [26] im folgenden System „Pfosten/Diagonale" genannt).

Es gelten folgende Einschränkungen:

- zulässig nur für Platten (b/h $\geq$ 5 bzw. Option „wie Platte")
- Mindestdicke 4 cm
- Betone < C50/60 bzw. < LC50/55 mit Rohdichteklasse D1.2
- System „gleichschenkliges Dreieck" nur für vorwiegend ruhende Verkehrslasten

Bemessung für die Querkraft:

VRdc Abweichend dürfen Längsdruckspannungen nicht berücksichtigt werden

Cot Θ Abweichend gilt als untere Begrenzung Cot Θ >= 1,0

Abweichend dürfen Längsdruckspannungen nicht berücksichtigt werden

aswQ Die rechnerisch erforderliche Schubbewehrung wird nach Gl. 6.13 entsprechend des Neigungswinkels α der Streben ermittelt. Für das System Pfosten/Diagonale wird angenommen, dass Diagonale (α=α1) und Pfosten (α=90 Grad) jeweils 50% der Beanspruchung übernehmen.

Werden die Streben aus glattem Betonstahl B 500 A+G hergestellt, so darf nur fyd= 365 N/mm² in Rechnung gestellt werden.

VRd,max Die Ermittlung von VRd,max erfolgt nach Gl. 6.14 entsprechend des Neigungswinkels α der Streben, abweichend gilt VRd,max,GT= 1/3* VRd,max nach Gl. 6.14.

Beim System Pfosten/Diagonale wird wegen der unterschiedlichen Neigungen der Streben der Nachweis mit einer Interaktionsgleichung Σ(VRdsy, α_i / VRdmax, α_i) <= 1,0 geführt. (siehe [14] Gl. H.6-7)

VRdsy, α_i: Tragfähigkeitsanteil der Strebe mit dem Winkel α_i

VRdmax,α_i: Druckstrebentragfähigkeit bei Annahme eines Strebenwinkels α_i

Ist der Nachweis nicht eingehalten, so ist der Querschnitt oder die Betonklasse zu erhöhen.

sl,max Maximaler Abstand der Diagonalen in Stützrichtung

smax= (cot θ + cot α) · z <= 20 cm

Schubkraftübertragung in der Fuge:

Abweichend zum Nachweis nach Kapitel 6.2.5 gilt zusätzlich eine Begrenzung von vRdi,max für Normal- und Leichtbeton gemäß Zulassung ([21] … [26])

Ergibt sich beim Nachweis der Querkraft VEd < VRdc, entfällt für die Ermittlung von vEd die Hebelarmbegrenzung z < max.(d- 2* cvl, d- cvl- 3 cm).

(siehe [14]zu 6.2.5 (1))

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Spannungsnachweis nach EN 1992-1-1

Beton, seltene Kombination

σc < k1 · fck

Ziel ist die Verhinderung der Zerstörung des Betongefüges. Alternativ ist dies auch durch Erhöhung der Betondeckung oder Umschließung der Druckzone mit Bewehrung möglich.

Beton, quasi- ständige Kombination

σc < k2 · fck

Grenzwert, bei dessen Überschreitung nicht mehr von einem linearen Kriechen ausgegangen werden kann. Ggf. ist eine erhöhte Kriechzahl nach Gl. 3.7 zu berücksichtigen.

Betonstahl seltene Kombination

σs < k3 · fyk

Während der Nachweis der Rissbreite für Stahlbeton unter der quasi - ständigen Kombination geführt wird, soll auch unter der seltenen Kombination ein Fließen der Bewehrung verhindert werden.

bei Zwang: σs < k4 · fyk

	k1	k2	k3	k4	Bemerkung
EN	0.6	0.45	0.8	1.0	k1: Bei Expositionsklassen XD, XS oder XF empfohlen.
NA-GB	=EN				
NA-A					
NA-PL					
NA-CZ					
NA-NF					
NA-NL	=EN	=EN	entfällt	=EN	Kein Nachweis der Stahlspannung erforderlich
NA-I	=EN	=EN	=EN	=EN	k1: 20 % reduziert, wenn h <= 50 mm
NA-D	=EN	=EN	=EN	=EN	k1: kann bei nicht vorgespannten Bauteilen im üblichen Hochbau entfallen, wenn der Grad der Umlagerung < 15 % beträgt.
NA-B	0.6 0.5	=EN	=EN	=EN	Millieuklasse EI sonst

Die Ermittlung der Stahlspannungen mit Eceff = Ecm/(1+φ(t0, ∞)) durchzuführen, da diese nach den Kriechumlagerungen vom Beton auf den Stahl ihr Maximum erreichen.

Für die Ermittlung der Betonspannungen sind dementsprechend frühe Zeitpunkte maßgebend, d.h. die Berechnung erfolgt mit der Annahme φ= 0.

NA-A: Betonstahlspannungen seltene Lastkombination:

werden mit $\varphi_{eff}(t0,\infty) = \varphi(t0,\infty) \cdot \frac{M_{qp,k}}{M_{E0,k}}$ berechnet

$M_{qp,k}$: Biegemoment quasi- ständige LK $M_{E0,k}$: Biegemoment seltene LK

Berechnung der Betonspannungen mit seltener Lastkombination mit $\varphi eff(t0,t)$

mit t= Beginn der Nutzung möglich, z.Zt. wegen Geringfügigkeit nicht berücksichtigt

Rissbreitennachweis nach EN 1992-1-1

Maßgebende Einwirkungskombination und zulässige Rissbreite nach Tab. 7.1 (NDP)

Anforderungen an Stahlbetonbauteile nach Tab.7.1

	X0, XC1	XC2/XC3/XC4	XS1-3, XD1-3	Bemerkung
EN	0,4 + Qk	0,3 + Qk	0,3 + Qk	Tab. 7.1N
NA-D	= EN			Tab. 7.1DE
NA-A				Tab. 8
NA-PN				
NA-CZ				Tab. 7.1N
NA-GB	0,3 + Qk	=EN	=EN	
NA- I	AO 0,3 + Qk 0,4 + Hk	AA 0,2 + Qk 0,3 + Hk	AM 0,2 + Qk 0,2 + Hk	A0,AO,AA,AM nach NTC Tab. 4.1. III
NA-NL	0,4 + Hk	0,3 + Hk	0.2+ Hk	Tab. 7.1N modifiziert
NA-NF	0,4 + Qk	0,3 + Qk	0,2+ Qk	Tab. 7.1NF
	EI	EE1, EE2, EE3	EE4, ES1-ES4	
NA-B	0,4 + Qk	0,3 + Qk	0,3 + Qk	Tab. 7.1N-ANB

Spannbeton im Verbund (Dek: Nachweis der Dekompression):

	X0, XC1	XC2- XC4	XS1-3, XD1-3	Bemerkung
EN	0,2 + Hk	0,2+ Hk Dek. Qk	Dek. Hk	Tab. 7.1N
NA-GB	= EN			
NA-PN				
NA-CZ				
NA-B				
NA-NF				
NA-D	=EN	=EN	nachträglicher Verbund: 0,2+ Hk und Dek. Qk Sofortiger Verbund 0,2 + Sk und Dek. Hk	Tab. 7.1DE
NA-A	=EN	=EN	nachträglicher Verbund: 0,2+ Hk und Dek. Qk Sofortiger Verbund 0,2 + Sk und Dek. Hk	
NA-I	AO 0,3 + Qk 0,2 + Hk	AA 0,2 + Hk Dek.+ Qk	AM Dek. + Qk Sigt + Sk	A0,AO,AA,AM nach NTC Tab. 4.1. III
NA-NL	0,3 + Hk	0,2 + Hk	0,1 + Hk	Tab. 7.1N modifiziert

Nachweis unter Lastbeanspruchung

$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ Rissformel Gl. 7.8

Die Rissbreite ergibt sich für eine äußere Belastung entsprechend der maßgebenden Einwirkungskombination und für eine gewählte Bewehrung entsprechend der oben angegebenen Rissformel aus dem maximalen Rissabstand *sr,max* und der mittleren Dehnungsdifferenz $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ zwischen Beton und Stahl.
Im Programm wird der maximale Grenzdurchmesser ermittelt, für den die zulässige Rissbreite eingehalten ist.

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$: mittlere Dehnungsdifferenz zwischen Stahl und Beton (Gl.7.9)

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

k_t : 0,6 kurzzeitige Lastwirkung (im Programm nicht berücksichtigt)
0,4 langfristige Lastwirkung

σs : Stahlspannung im Zustand II
Ermittlung mit $E_{ceff} = E_{cm}/(1 + \varphi (t=\infty))$

α_e = E_s / E_{ceff}

ρ_{eff} : Bewehrungsgrad in der effektiven Zugzone
$\rho_{eff} = (A_s + A_p * \xi 1^2) / A_{ceff}$
A_s: Betonstahlfläche innerhalb A_{ceff}
A_p: Spannstahlfläche innerhalb A_{ceff}
ξ: Faktor für Verbundeigenschaften Spannstahl

A_{ceff} : Fläche der effektiven Zugzone
$A_{ceff} = h_{eff} \cdot b_{eff}$

h_{eff} $2{,}5 \cdot D1 < (h\text{-}X0II)/2$
X0II: Druckzonenhöhe im Zustand II
falls keine Bewehrung mit Abstand < heff
vorhanden gilt $h_{eff} = (h\text{-}X0I)/2$

b_{eff} wirksame Zugzonenbreite bei Plattenbalken
NA-D:
entsprechend der zulässigen Auslagerungsbreite der Zugbewehrung
$b_{eff} <= \sum(0{,}5 \cdot b_{eff,i}(Z.I)) + bw <= bf$ (NCI zu 9.2.1.2 (2))
Eingabe: siehe B2-Steuerung des Rissbreitennachweises / B2+

sr,max: maximaler Rissabstand:

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

k_1: Beiwert Bewehrung Verbundeigenschaften
0,8 gute Verbundeigenschaften
1,6 schlechte Verbundeigenschaften

k_2: Beiwert für Dehnungsverteilung
Biegung: 0,5

Zug 1,0

Biegung + Zug $(\varepsilon 1 + \varepsilon 2) / (2 \cdot \varepsilon 1)$

NA-D und NA-A:

k1 * k2= 1

c: Betondeckung Längsbewehrung

ϕ: mittlerer Durchmesser der Zugbewehrung

NDP	k_3	k_4	Bemerkung
EN	3,4	0,425	
NA-GB	=EN		
NA-I			
NA-PL			
NA-B			
NA-NL	=EN	=EN	srmax <= max(50-0,8*fck*ϕ;15*ϕ)
NA-CZ	3,4* $(25/c)^{2/3}$ <= 3,4	=EN	
NA-NF	3,4* $(25/c)^{2/3}$ <= 3,4	=EN	
NA-A	0	1/3,6	srmax =ϕ/(3,6* ρeff) <= σs*ϕ/(3,6* fcteff)
NA-D	0	1/3,6	srmax =ϕ/(3,6* ρeff) <= σs*ϕ/(3,6* fcteff)

Grenzdurchmesser:
Der Grenzdurchmesser ergibt sich durch Umstellung der Rissformel nach ϕ. Der in einigen nationalen Anhängen nach oben begrenzte und vom Durchmesser abhängige Rissabstand wird iterativ ermittelt.

Verglichen mit Tabelle 7.2 können sich günstigere (größere) Grenzdurchmesser ergeben, da die der Tabelle zu Grunde liegenden Vereinfachungen entfallen. Ergibt sich ein nicht realisierbarer Grenzdurchmesser, ist in der Regel die gewählte Bewehrung zu erhöhen.

Kreisquerschnitte:

Bei Kreisquerschnitten wird ρeff = $A_s/A_{c,eff}$ in Anlehnung an [27] wegen der kontinuierlich verteilten Bewehrung bezogen auf einen Kreisring mit der Dicke h_{eff} ermittelt, allerdings hier genauer mit $A_{c,eff} = \pi (D \cdot h_{eff} - h_{eff}^2)$. Bei Kreisringquerschnitten gilt zusätzlich $A_{c,eff} <= A_c$.

Die Ergebnisse stimmen mit denen in [27] gut überein, sofern man die dortige Annahme von n = 10 durch Ansatz geringer Kriechzahlen einhält. Für t = ∞ ergeben sich infolge der dann höheren Kriechzahlen allerdings ungünstigere Ergebnisse.

Gitterträger nach AbZ

Bei Gitterträgern nach bauaufsichtlicher Zulassung [21] … [26]) mit glattem Betonstahl im Gurt sind reduzierte Verbundspannungen zu berücksichtigen. Entsprechend den z.B. noch in DIN 1045 /78 angegebenen Verbundspannungen glatter Stäbe ergibt sich ein auf der sicheren Seite liegender Faktor von 1/0,388 für den Rissabstand.

Mindestbewehrung infolge Zwang

Mit dem Programm kann eine Mindestbewehrung nach 7.3.2 für Biegezwang oben und unten ermittelt werden, wenn die entsprechende Option aktiviert wurde (B2-Steuerung Rissbreitennachweis / B2+).

Für Plattenbalken wird die Mindestbewehrung für Steg und Gurt gesondert ermittelt, wobei der Steg das über die Querschnittshöhe verlaufende Rechteck umfasst, der Gurt nur die abliegenden Teile der Platte. Für Steg- und Gurt können differenzierte Stabdurchmesser berücksichtigt werden.

$A_{s,min} \cdot \sigma s = kc \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}$ (Gl.7.1)

k Beiwert bei nichtlinear verteilten Eigenspannungen

1,0 (h <= 300 mm)... 0,65 (h >= 800 mm)

h: Steghöhe bzw. Gurtbreite

NA-D: kleinerer Wert des Teilquerschnittes

bei inneren Zwang gilt k=· 0,8

$f_{ct,eff}$ Zugfestigkeit, f_{ctm} (t <= 28d)

NA-D: >= 2,9 N/mm² wenn t >= 28 d

k_c Beiwert zur Spannungsverteilung

$kc = 0{,}4 \cdot (1 - \sigma c / (k_1 \cdot f_{ct,eff} \cdot h/h'))$

σc: Betonspannung (Zustand I) unter Rissschnittkräften im Schwerpunkt des Teilquerschnittes

Gurte Hohlkasten, T-Querschnitte, für Rissschnittkräfte vollständig unter Zug

$kc = 0{,}9 \cdot F_{cr} / (A_{ct} \cdot f_{ct,eff}) >= 0{,}5$

Fcr: Zugkraft im Gurt unter Rissschnittkräften (Zustand I)

σs: Tab. 7.2N mit Ds1, Herleitung siehe [28] S.7-6

$D_{s1} = D_s \cdot f_{ct0} / f_{ct,eff} \cdot 2 \cdot (h-d)/ (k_c \cdot h_{cr})$

NA-D, NA-A:

Mit $Fs = F_{cr} = k \cdot k_c \cdot f_{cteff} \cdot A_{ct}$ wird As direkt ermittelt.

$F_{cr} < F_{cre} = A_{ceff} \cdot f_{cteff}$

$$As = \sqrt{\frac{ds \cdot (1 - \beta t) \cdot Fs \cdot Fs}{3.6 \cdot Es \cdot wk \cdot fcteff}}$$

sonst

$$As = \sqrt{\frac{ds \cdot Fcre \cdot (Fs - \beta t \cdot Fcre}{3.6 \cdot Es \cdot wk \cdot fcteff}}$$

Ermittlung der effektiven Steifigkeit

Es wird der Dehnungszustand gesucht, wo zwischen äußeren Schnittkräften und inneren Schnittkräften ein Gleichgewicht herrscht.

Daraus ergeben sich drei nichtlineare Gleichungen, bei denen 3 Randdehnungen die Unbekannten darstellen. Die Lösung erfolgt iterativ mit Hilfe des Newtonverfahrens.

Die effektive Steifigkeit bei Biegung ergibt sich dann aus den Dehnungen zu
Ely,eff= My · H / (ε1- ε3) und

Elz,eff= Mz · B / (ε1- ε2) .

H,B: Abmessungen des umschließenden Rechteckes des Querschnittes

ε1: Dehnung mit maximalen Druck

ε2: Dehnung in der benachbarten Ecke in x-Richtung

ε3: Dehnung in der benachbarten Ecke in y-Richtung

Hinweis für polygonale Querschnitte:

Bei allgemeinen Querschnitten können durch einachsige Beanspruchung auch Krümmungen in die Richtung entstehen, wo das Moment Null ist. Aus diesem Grunde sollten bei Verformungsberechnungen nicht die effektiven Steifigkeiten, sondern die Krümmungen zum Ansatz kommen.

Äußere und innere Schnittkräfte

Optional ist einstellbar, ob die effektive Steifigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) oder im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) ermittelt werden soll (→ siehe B2 / B2+).

Die inneren Schnittkräfte ergeben sich entsprechend den Arbeitslinien für Beton und Stahl.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

Arbeitslinie Stahl

bilineare Arbeitslinie nach Bild 3.8 mit Bemessungswerten f_{yd} und f_{td} .

Zusatzoption “Mittelwerte der Baustoffgrößen”:

$f_y = f_{yk}$ und $f_t(\varepsilon_{uk}) = f_y \cdot k\ (\varepsilon_{uk})$ k nach Anhang C)

NA-D: Bild 3.8.1, NCI zu 5.7

$f_y = 1{,}1 \cdot f_{yk}$ und $f_t(\varepsilon_{uk}) = fy \cdot k\ (\varepsilon_{uk}$, k nach Anhang C)

Betonarbeitslinie

Falls die Spannungsdehnungslinie zur Schnittgrößenermittlung aktiviert ist (→ siehe B2 / B2+), gilt die Betonarbeitslinie nach Bild 3.2 und 5.8.6 (3) mit f_c und $k = E_{cm} / \gamma_{cE} \cdot \varepsilon_{c1} / f_c$,

E_{cm}, ε_{c1} und ε_{c1u} nach Tab.3.1 bzw. Tab. 11.3.1,

EN: fc= fcd $\gamma_{cE} = 1,2$

NA-D: fc= fcm/γ_c $\gamma_{cE} = 1,5$

Zusatzoption “Mittelwerte der Baustoffgrößen“ nach 5.7 (6) für Schnittkräfte mit summarischen Sicherheitsbeiwert: $f_c = 0,85 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$ $k = E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1} / f_c$

andernfalls das Parabel-/Rechteckdiagramm nach Bild 3.3 und Parametern nach Tabelle 3.1 bzw. 11.3.1

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Arbeitslinie Stahl	Bilineare Spannungsdehnungslinie, Materialbeiwerte zu 1,0
Betonarbeitslinie	lineare Arbeitslinie mit E_{cm}
Schnittkräfte	Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Bemessungsschnittkräfte des Grenzzustandes der Tragfähigkeit GZT mit einem in der Konfiguration definierten Faktor dividiert oder die Schnittkräfte der quasi-ständigen Lastkombination verwendet → siehe B2 / B2+.

Kriechen und Schwinden

Falls in → B2 / B2+ aktiviert, werden bei der Steifigkeitsermittlung Kriechen und Schwinden wie folgt berücksichtigt:

Kriechen :

Bei nichtlinearer Spannungsdehnungslinie des Betons (i.d.R. GZT) erfolgt nach 5.8.6 (4) bei der Ermittlung der inneren Schnittkräfte des Betons eine Modifikation der Dehnungen
$\varepsilon = \varepsilon/(1+\varphi)$ mit $\varphi = \varphi(t0,\infty)$ nach Anhang B
Eine Berücksichtigung der abgeminderten Kriechzahl φeff nach 5.8.4. ist durch deren manuelle Eingabe möglich

Bei linearer Spannungsdehnungslinie und bei der Ermittlung der Krümmungen im Zustand I erfolgt eine Reduzierung des Elastizitätsmoduls des Betons nach Gl. 7.20 mit
$E_{ceff} = E_{cm}/(1+\varphi)$

Schwinden im Zustand I:

Das Schwinden wird über eine zusätzliche Krümmung

$1/r_S = \varepsilon_{cs} \cdot E_s/E_{ceff} \cdot S/I$ (Gl. 7.21)

ε_{cs}: Schwindmaß nach 3.1.4 und Anhang B

S: statisches Moment der Bewehrung bezogen auf die Schwerachse (Zust. I) bzw. Nulllinie (Zust. II)

I: Trägheitsmoment des Querschnittes (Zust. I)

Schwinden im Zustand II:

Die Berücksichtigung des Schwindens erfolgt nach [15] S.18 über eine negative Druckvordehnung in Höhe von εcs bei der Ermittlung der inneren Schnittkräfte des Stahles.

Zugversteifung

Falls in → B2 / B2+ aktiviert, wird die Zugversteifung oder Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen über eine Modifizierung der Arbeitslinie des Betonstahles berücksichtigt. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Stahlspannung unter Last im Zustand II zur Stahlspannung unter Rissschnittgrößen reduziert sich die Stahldehnung infolge Zugversteifung nach [14] Bild H.5-11 zu ε_{sm}.

Bauteilsteifigkeit: nur bei Querschnittstypen Rechteck 1-achsig, Plattenbalken und Schichtenquerschnitt.

Nach Gl. 7.18 erfolgt mit dem Verteilungsbeiwert ζ eine Wichtung zwischen den Krümmungen im Zustand II $1/r_{II} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / h)$ und

Krümmungen im Zustand I $1/r_I = M /(Ii \cdot E_{ceff}) + 1/r_S$

zu einer mittleren Krümmung $1/r_m = 1/r_{II} \cdot \zeta + (1-\zeta) \cdot 1/r_I)$

$\zeta = 1 - ß \cdot (\sigma s/\sigma sr)^2$ Gl. 7.19

σsr: Stahlspannung Zustand II unter Rissschnittgrößen ermittelt mit $f_{ctk0,05}$ (Standard) bzw. f_{ctm} (Option)
→ siehe B2 / B2+

σs: Stahlspannung Zustand II unter der Last, für die die Steifigkeit ermittelt wird (Standard) bzw. in der seltenen Lastkombination (Option)
→ siehe B2 / B2+

Kurzzeitbeanspruchung: ß = 1,0 (GZT)

Langzeitbeanspruchung: ß = 0,5 (GZG)

Eleff = $M_y/(1/r_m)$

Querschnittssteifigkeit: Die effektive Steifigkeit ergibt sich aus den Krümmungen im Zustand II über den Faktor $k\zeta = (\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{c2}) / (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{c2})$ zu
$E_{leff} = M/ (k\zeta \cdot 1/r_{II})$ (vgl. [16]/ S. 303)

Außergewöhnliche Bemessungssituation Brand

Die Bemessung oder Ermittlung der Steifigkeit ist im Modul B2+ für Rechteckquerschnitte mit 1,3 und 4-seitigen Brandangriff und für Kreisquerschnitte möglich.
Da die genaue Lage der Stähle von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis ist, muss die Bewehrung als Punktbewehrung definiert sein.

Grundlagen

Die Nachweisführung erfolgt entsprechend den Anforderungen an ein allgemeines Berechnungsverfahren. Sie beinhaltet eine FEM basierte Temperaturanalyse entsprechend den in den nationalen Anhängen definierten Parametern (Modul TA erforderlich) sowie eine mechanische Analyse in Form der Ermittlung der inneren Schnittkräfte mit den Spannungs- Dehnungslinien von Beton und Stahl nach EN 1992-1-2 und der Ermittlung des Gleichgewichtes zu den äußeren Schnittkräften unter Berücksichtigung der thermischen Dehnungen.

NA-D:

Randbedingungen für die Temperaturanalyse
Bauteilfeuchte, Dichte und thermische Leitfähigkeit sind Parameter, die das Ergebnis der Temperaturanalyse beeinflussen.

Die Annahmen für Dichte und Bauteilfeuchte sind im allgemeinen von den Bedingungen im spezifischen Projekt abhängig, die thermische Leitfähigkeit ist ein NDP.
Die Werte der gewählten Kurve können zwischen den Kurven für den oberen (λo) und den unteren Grenzwert (λu) liegen, auf einer mittleren Kurve (λm) oder einer Kurve, die über eine Stufe vom oberen zum unteren Grenzwert übergeht (λou).

	thermische Leitfähigkeit	**Bemerkung**
EN	λu	Entspricht Anhang A
NA-PL	=EN	
NA-CZ		
NA-D	λo	
NA-B	λm λu	Quarzitischen Zuschläge Kalkhaltige Zuschläge
NA-NL	λo λu	Quarzitische Zuschläge Kalkhaltige Zuschläge
NA-NF	λou	
NA-A	λu	Normaler Beton
NA-GB	λo	Hochfester Beton

Mit den Temperaturprofilen in EN 1992-1-2 Anhang A vergleichbare Temperaturen erhält man mit einer Bauteilfeuchte von 1,5% und einer Dichte von 2300 kg/m³.
NA-D:
Bei den Validierungsbeispielen CC4.8, CC4.9 und CC4.10 in DIN EN 1991-1-2/NA wurden die Temperaturen mit einer Bauteilfeuchte von 3% und einer Dichte von 2400 kg/m³ ermittelt.

Äußere Schnittkräfte

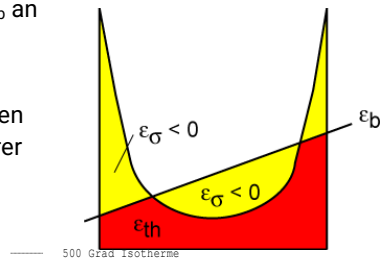
Es sind Schnittkräfte der Kombination für die außergewöhnliche Bemessungssituation Brand nach EN 1990 zu verwenden. Abweichend davon erlaubt EN 1991-1-2 für die maßgebende veränderliche Einwirkung den quasi-ständigen Wert $\psi 2,1$* Qk,1 zu verwenden. (NA-D: im Falle Wind als Leiteinwirkung nicht erlaubt).

Innere Schnittkräfte

Zur Ermittlung der inneren Schnittkräfte des Betons wird der Betonquerschnitt in Elemente mit der Kantenlänge 1 cm aufgeteilt. Die inneren Schnittkräfte des Elementes ergeben sich mit den der mittleren Elementtemperatur entsprechenden Spannungsdehnungslinien nach EN 1992-1-2 Bild 3.1 und Tabelle 3.1. Dabei können ggf. kalksteinhaltige Zuschläge berücksichtigt werden. Die thermische Dehnung ergibt sich entsprechend Bild 3.5. Für hochfeste Betone werden nach Tabelle 6.1N modifizierte Spannungsdehnungslinien verwendet.

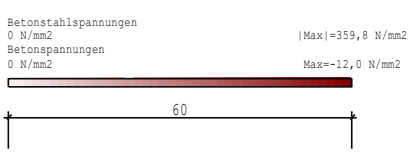
Bei den inneren Schnittkräften des Betonstahles kann ggf. das günstigere Verhalten von warmgewalztem Stahl berücksichtigt werden. . Die thermische Dehnung ergibt sich entsprechend Bild 3. Stahl der Klasse X bedarf einer experimentellen Absicherung und wird z.Zt. nicht berücksichtigt.

Die spannungserzeugende Dehnung ε_σ in einem Querschnittspunkt ergibt sich aus der thermischen Dehnung ε_{th} entsprechend der dort vorhandenen Temperatur und der Biegedehnung ε_b an diesem Punkt zu $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_b - \varepsilon_{th}$.



Für den Beton ergibt sich damit bei vierseitiger Beflammung ein typisches Tragverhalten, bei dem sich ein schmaler äußerer Ring aufgrund der bei hohen Temperaturen stark abgeminderten Spannungsdehnungslinien und ein innerer Bereich mit $\varepsilon_\sigma > 0$ (Zug) der Mitwirkung entziehen.

Bei den inneren Schnittkräften von Betonstahl zeigt sich ein sehr sensibles Verhalten bezüglich der Lage des Bewehrungspunktes – schon eine Lageänderung von 1 cm kann eine Änderung der Stahlspannung in Größenordnungen bewirken.



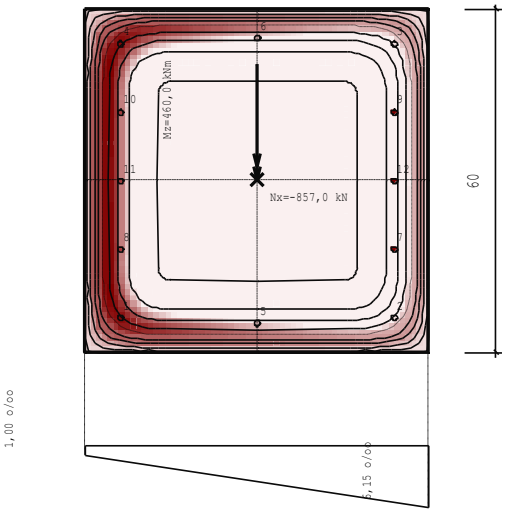
Bemessung

Die Dehnungsebene wird zwischen den definierten Bruchdehnungen variiert und iterativ der Dehnungszustand gesucht, bei dem innere und äußere Schnittkräfte im Gleichgewicht stehen.

Die inneren Schnittkräfte des Stahles werden zunächst für eine noch unbekannte Bewehrungsfläche unter der Annahme einer gleichmäßigen Wichtung der eingegebenen Bewehrungspunkte ermittelt.

Die erforderliche Bewehrungsmenge ergibt sich direkt aus dem gefundenen Dehnungszustand

.



Ermittlung der effektiven Steifigkeit

Für eine gegebene Bewehrung wird und iterativ der Dehnungszustand gesucht, bei dem innere und äußere Schnittkräfte im Gleichgewicht stehen.

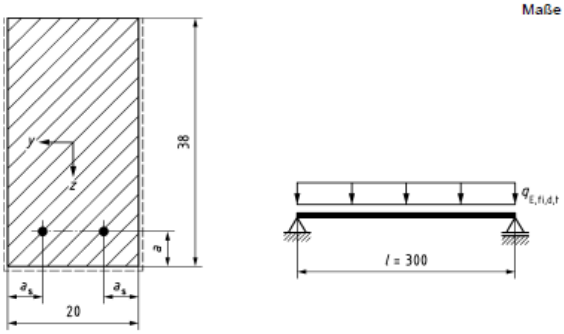
Validierungsbeispiele (NA-D)

Nach DIN EN 1991-1-2/NA sind bei Anwendung des allgemeinen Nachweisverfahrens die Programme anhand der Beispiele in Anhang CC zu validieren. Dem Nachweisbereich von B2 entsprechende Validierungsbeispiele sind: CC4.8 und CC4.9 - schwach und hoch bewehrter Balken.

CC.4.8 Beispiel 8 — schwach bewehrter Stahlbeton-Biegebalken

Ein schwach bewehrter Stahlbeton-Biegebalken mit dem Querschnitt b/h = 20 cm/38 cm und der Stützweite l = 3,0 m (Bild CC.7), wird dreiseitig beflammt. Die Achsabstände der Bewehrung werden entsprechend Tabelle CC.16 für die Feuerwiderstandsklasse R 90 vorgegeben.

Maße in Zentimeter



Legende

--- beflammte Seite

Bild CC.7 — Querschnitt und System des schwach bewehrten Stahlbeton-Biegebalkens

Tabelle CC.16 — Querschnittswerte, Materialeigenschaften und Randbedingungen

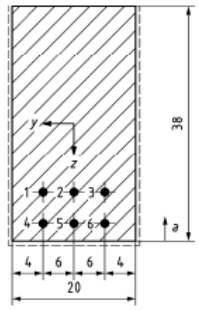
Stahlbeton-Biegebalken (schwach bewehrt)			R 90
Abmessungen		l / b / h in cm	300 / 20 / 38
Achsabstände		a / a_s in cm	4,5 / 5,5
Belastung		$q_{E,fi,d,t}$ in kN/m	29
Beton C20/25 (3 % Feuchte (Massenanteile))		$f_{ck(20°C)}$ in N/mm²	20
Betonstahl B500		$f_{yk(20°C)}$ in N/mm²	500
Spannungs-Dehnungs-Linien		Beton[a]	DIN EN 1992-1-2
		Betonstahl[b]	
Temperaturbeanspruchung		ETK (dreiseitig)	DIN EN 1991-1-2
Wärmeübergangskoeffizient		α_c in W/(m² · K)	25
Emissivität		ϵ_m	0,70
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	λ, ρ, c_p, $\epsilon_{th,c}$	DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	λ_a, ρ, c_a, $\epsilon_{m,s}$	DIN EN 1994-1-2

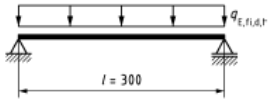
[a] Mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte ρ = 2 400 kg/m³

[b] Klasse N, warmgewalzt

Feuerwiderstandsklasse	Referenzgröße As cm²	berechnete Größe As' cm2	Abweichung (As'-As)/As*100 %	Toleranz %	Bemerkung
90	3,56	3,44	3,5	+/- 10	3,5 < 10 erfüllt

Referenz Temperatur t=90 min	Berechnete Temperatur	Differenz
562	555	-7





Legende

--- beflammte Seite

Bild CC.8 — Querschnitt und System des stark bewehrten Stahlbeton-Biegebalkens

Tabelle CC.18 — Querschnittswerte, Materialeigenschaften und Randbedingungen

Stahlbeton-Biegebalken (stark bewehrt)				R 90
Abmessungen		l / b / h	in cm	300 / 20 / 38
Achsabstände		$a_{1, 2, 3}$	in cm	7
		$a_{4, 5, 6}$	in cm	4
Belastung		$q_{E,fi,d,t}$	in kN/m	62,9
Beton C20/25 (3 % Feuchte (Massenanteile))		$f_{ck(20°C)}$	in N/mm²	20
Betonstahl B500		$f_{yk(20°C)}$	in N/mm²	500
Spannungs-Dehnungs-Linien		Beton[a]		DIN EN 1992-1-2
		Betonstahl[b]		
Temperaturbeanspruchung		ETK (dreiseitig)		DIN EN 1991-1-2
Wärmeübergangskoeffizient		α_c in	W/(m² · K)	25
Emissivität		ε_m		0,70
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	λ, ρ, c_p, $\varepsilon_{th,c}$		DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	λ_a, ρ, c_a, $\varepsilon_{th,s}$		DIN EN 1994-1-2

[a] Mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte ρ = 2 400 kg/m³

[b] Klasse N, warmgewalzt

Feuerwiderstandsklasse	Referenzgröße As cm²	berechnete Größe As' cm2	Abweichung (As'-As)/As*100 %	Toleranz %	Bemerkung
90	9,76	8,57 t= 93 min 9,04	12 7,3	+/- 10	überschritten eingehalten

θ	Referenz Temperatur t=90 min	Berechnete Temperatur t=90 min	Differenz t=90 min	Berechnete Temperatur t= 93 min	Differenz t=93 min
1	539	529	-10	541	+2
2	372	362	-10	374	+2
3	539	529	-10	541	+2
4	656	643	-13	654	+2
5	525	509	-16	521	-4
6	656	643	-13	654	+2

Da die errechneten Temperaturen deutlich geringer als die nach NA ausgewiesenen sind, ergibt sich für Beispiel CC4.9 auch eine gegenüber dem NA geringere Bewehrung, der Toleranzbereich wird leicht überschritten. Das deckt sich auch mit den Ergebnissen anderer Softwarehersteller, z.B. [29].

Nimmt man eine 3 Minuten längere Brandbeanspruchung an, so ergeben sich nach unserer Temperaturanalyse Temperaturen die denen laut NA entsprechen. Das Bemessungsergebnis liegt dann im Toleranzbereich.

Literaturverzeichnis

[1] L. Thielen, „Grundlagen der Biegebemessung der DIN 1045 aufbereitet für den Gebrauch an Rechenanlagen"," *Beton- und Stahlbeton 9/72, S.199 ff.,* September 1972.

[2] „Zulassung Z-1.4-273:2018-02/2023-02 SCHEIBINOX nichtrostender Stabstahl B500A NR warm gewalzt," 2018.

[3] „Zulassung Z-1.4-261:2018-09/2023-09 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500B NR kaltverformt vom Ring," 2018.

[4] „Zulassung Z-1.4-50:2017-07/2022-07 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500B NR kaltverformt vom Ring," 2017.

[5] „Zulassung Z-1.4-266:2016-09/2021-05 SWISS STEEL nichtrostende Bewehrung B500B NR warm gewalzt vom Ring," 2016.

[6] „Zulassung Z-1.4-228:2017-05/2023-04 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500A NR kaltverformt in Ringen," 2018.

[7] „Zulassung Z-1.4-272:2018-02/2023-02 SWISS STEEL Stabstahl warmgewalzt B670B NR," 2018.

[8] „Zulassung Z-1.1-267:2016-04/2021-04 ANNAHÜTTE hochfester Betonstahl für Biegebauteile," 2016.

[9] Z. Zehetmayer, Bemessung im konstruktiven Betonbau, Berlin: Springerverlag, 2010.

[10] K. P. Fritze, Stahlbetonbau Teil 2 Bemessungstabellen", Manzverlag, 2008.

[11] B. Narayanan, Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2, London: Thomas Telford, 2005.

[12] Guida All'Uso dell' Eurocodice 2, AICAP , 2008.

[13] A. Ajdukiewicza, Eurokod 2, Krakow : Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2009 .

[14] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 600, 2.Auflage, Beuth, 2020.

[15] „Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 415," Beuth , 1990.

[16] Krüger/Mertzsch, „Beitrag zur Verformungsberechnung von Stahlbetonbauten," *Beton- und Stahlbeton,* p. 300 ff., 10 1998.

[17] D.Constantinescu, „On the shear strength of R/C Members with circular cross sections, Darmstadt Concrete 8/1993," 1993.

[18] „P. Mark: "Bemessungsansatz für zweiachsig durch Querkräfte beanspruchte Stahlbetonbalken mit Rechteckquerschnitt";," *Beton- und Stahlbeton ,* p. S.370 ff., 5 2005.

[19] Eurocode 2, Worked Exambles, European Concrete Platform , 2008.

[20] Grünberg, Stahl- und Spannbetontragwerke nach DIN 1045-1, Springer- Verlag , 2002.

[21] „Zulassung Z-15.1-1 (2019) Gitterträger KT 800 für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2019.

[22] „Zulassung Z-15.1-1 (2020) Gitterträger KTS für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2020.

[23] „Zulassung Z-15.1-147 (2019) Filigran-E-Gitterträger und Filigran-Ev-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2019.

[24] „Zulassung Z-15.1-93 (2019) Filigran-EQ-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2019.

[25] „Zulassung Z-15.1-93 (2019) Filigran-EQ-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2019.

[26] „Zulassung Z-15.1-93 (2019) Filigran-EQ-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht," 2019.

[27] C. S. W. E. H. Wiese, „Rissbreitennachweis für Kreisquerschnitte," *Beton- und Stahlbetonbau,* p. S. 253 ff, 4 2004.

[28] Eurocode 2 Commentary, European Concrete Platform , 2008.

[29] Infograph, „Prüfung und Validierung von Rechenprogrammen für Brandschutznachweise mittels allgemeiner Rechenverfahren," [Online].

[30] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 525, berichtigte Auflage, Beuth , 2005.