

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
Bemessung für Biegung und Längskraft	3
Bemessungsgrundlagen	3
Bemessung für ein gegebenes Bewehrungsverhältnis	7
Bemessung nach kd-Verfahren	8
Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile	9
Mindestbewehrung für Druckglieder	9
Hebelgesetz	9
Ermittlung der effektiven Steifigkeit	10
Schubbemessung	13
Ortbetonerfüllung	19
Torsion	21
Schubbemessung für Elementdecken mit Gitterträgern	23
Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	24
Rissbreitennachweis nach EN 1992-1-1	24
Spannungsnachweis nach EN 1992-1-1	28
Außergewöhnliche Bemessungssituation Brand	30
Literatur	34

Normen und verwendete Kurzbezeichnungen

EN: Empfohlene Werte EN 1992-1-1
EN 1992-1-1:2004 /A1:2014 und EN 1992-1-2:2004 /AC:2008

NDP Im nationalen Anhang (NA) definierbarer Parameter.

Aktuelle Versionen der nationalen Anhänge (NA):

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

NA-A: Österreich
ÖNORM B 1992-1-1:2011 und ÖNORM B 1992-1-2:2011
Diese NA ersetzen die bisher gültigen von 2007

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

NA-I : Italien
UNI EN 1992-1-1/NTC:2008 und EN 1992-1-2:2004 /AC:2008
NTC: die Anwendung des Eurocode in Italien ist in den „Norme tecniche per le costruzioni“ (/56/) und dem ergänzende Rundschreiben “Circolare finissima 2.2.2009” (/57/) geregelt.

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

Bemessung für Biegung und Längskraft

Bei der Stahlbetonbemessung wird für gegebene Schnittkräfte bei unbekannter Bewehrung der zum Versagen führende Dehnungszustand ermittelt.

Durch die in den Normen definierten Dehnungsverteilungen im GZT ist immer eine der Randdehnungen bekannt. Innere und äußere Kräfte müssen 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.

Für die Biegebemessung kann das kh- (Kd) Verfahren (nur bei einachsiger Beanspruchung) oder das Verfahren mit gegebenem Bewehrungsverhältnis gewählt werden.

Bei schwach beanspruchten Querschnitten kann die Einhaltung der Mindestbewehrung (Druck/Biegung) maßgebend werden.

Außerdem wird ggf. eine Überschreitung der zulässigen Höchstbewehrung angezeigt

Bemessungsgrundlagen

Arbeitslinie Beton	Bild 3.3
Spannungsmaximum f_{cd}	$\alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$
Grenzstauchung Beton ϵ_{cu2}	$\epsilon_{cu2} = 3.5 ‰$, > C50 betonabhängig Tab.3.1, Leichtbeton siehe Tabelle 11.3.1
Stauchung Ende Parabelbereich ϵ_{c2}	$\epsilon_{c2} = 2.0 ‰$, > 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
Arbeitslinie Betonstahl	Bild 3.8
Spannungsmaximum f_{td}	$K \cdot f_{yk} / \gamma_s$
Grenzdehnung Stahl ϵ_{ud}	NDP
Dehnungsverteilung GZT	Bild 6.1

Die Spannungsdehnungslinie des Betons ist das Parabel-Rechteck-Diagramm.

Für Normalbeton mit $\epsilon_{c2} = 2 ‰$ und Exponent = 2 können die inneren Schnittkräfte bei Rechteck- und Kreisquerschnitt über geschlossene Formeln ermittelt werden (/2/).

Für alle anderen Fälle (Hochleistungsbeton, Plattenbalken- und Schichtenquerschnitte) erfolgt eine näherungsweise Berechnung durch Aufteilung der Betondruckzone in dünne Schichten. Bei Ortbetonergänzung werden die inneren Schnittkräfte des Betons mit den entsprechenden Arbeitslinien der verwendeten ggf. unterschiedlichen Betone ermittelt.

Optional (→ [B2](#): Konfiguration Bemessung) / [B2+](#)) kann die vom Stahl in der Druckzone verdrängte Betonfläche berücksichtigt werden. Nach /10/ S.13 ist die bisher übliche Vernachlässigung bei hochbewehrten Querschnitten insbesondere aus hochfestem Beton nicht mehr gerechtfertigt.

f_{ck} Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
Festigkeitsklassen nach Tabelle 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-D	0,85	0,75	0,7
NA-GB	0,85	= EN	= EN
NA-A	= EN	= EN	= EN
NA-I	0,85	=EN	=EN
NA-PL	=EN	=EN	=EN

 γ_c Teilsicherheitsbeiwerte für Beton NDP

	Ständig/vorübergehend 2.4.2.4	Außergewöhnlich 2.4.3.4	Erdbeben
EN	1,5	1,2	1,5
NA-D	= EN	1,3	1,5
NA-GB	= EN	= EN	= EN
NA-A	= EN	= EN	=1,3
NA-I	= EN	1,0	=EN
NA-PL	1,4	=EN	1,4

Mögliche Reduzierung nach Anhang A

	A2.1 reduzierte geometrische Abweichungen durch Kontrolle $\gamma_{c,Red1}$	A2.2 (1) gemessene oder ver- minderte geometrische Daten $\gamma_{c,Red2}$	A2.2 (2) Variations- koeffizient der Betonfestig-keit < 10 % $\gamma_{c,Red3}$	A2.3 Betonfestigkeit im Betonwerk bestimmt Abminderung Faktor η ($\gamma_{c,Red} \cdot \eta$)	A2.3 Minimum γ_c ($\gamma_{c,Red4}$)
EN	1,4	1,45	1,35	0,85	1,30
NA-D	1,5	1,5	1,5	0,9	1,35
NA-GB	= EN	= EN	= EN	= EN	= EN
NA-A	= EN	= EN	= EN	= EN	= EN
NA-I	1,4	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt	1,4
NA-PL	1,35	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt	1,35

Spannungsdehnungslinie Betonstahl:

E_s : E-Modul	200000 N/mm ² oder entsprechend Zulassung
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 ZugfestigkeitDuktilitätsklasse A: $k= 1,05$ $\epsilon_{uk}= 25$ o/ooDuktilitätsklasse B: $k= 1,08$ $\epsilon_{uk}= 50$ o/ooDuktilitätsklasse C: $k= 1,15$ $\epsilon_{uk}= 75$ o/oo ϵ_{ud} : Grenzdehnung NDP

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

 γ_s : 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	= EN	= EN
NA-GB	= EN	= EN	= EN
NA-A	= EN	= EN	=1,0
NA-I	=EN	=EN	=EN
NA-PL	=EN	=EN	=EN

Mögliche Reduzierung nach Anhang A

	A2.1 reduzierte geometrische Abweichungen durch Kontrolle $\gamma_{s,Red1}$	A2.2 (1) gemessene oder verminderte geometrische Daten $\gamma_{c,Red2}$
NA-EN	1,10	1,05
NA-D	1,15	1,15
NA-GB	=EN	=EN
NA-A	=EN	=EN
NA-II	nicht möglich	nicht möglich
NA-PL	=EN	=EN

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. in der Zulassung nichts anderes gesagt ist.

Hochfester Stahl SAS nach Zulassung Z-1.1-267:2016-04/2021-04 [72]:

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,

Grenzen der Dehnungsverteilung im GZT nach Bild 6.1:

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 $M > N \cdot \max(2 \text{ cm}, h/30)$
 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.

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 /46/ ($f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$) Kreis- und Rechteckquerschnitte mit $d_1/h = 0,05 \dots 0,20$
NA-A:	Tafeln für einachsige Beanspruchung in /48/ ($f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$) Kreis- und Rechteckquerschnitte mit $d_1/h = 0,05 \dots 0,20$
NA-GB:	Tafeln für einachsige Beanspruchung in /50/ ($f_{ck} \leq 50$, $f_{ck} = 90 \text{ N/mm}^2$) Kreis- und Rechteckquerschnitte mit $d_1/h = 0,05 \dots 0,20$
NA-I:	eine exemplarische Tafel für einachsige Beanspruchung in /58/ ($f_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$) Rechteckquerschnitt mit $d_1/h = 0,1$
NA-PL	exemplarische Tafeln für einachsige Beanspruchung in /64/ ($f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$) 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.

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

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.

Bei linear- elastischer Berechnung von Durchlaufträgern ist die Druckzonenhöhe zu begrenzen, sofern keine konstruktiven Maßnahmen ergriffen werden. Die Einhaltung des Kriteriums wird durch eine entsprechend modifizierte Stahlgrenzdehnung erreicht, ab der eine Druckbewehrung ermittelt wird.

Mindestbewehrung

Bei Druckgliedern ($e_d/h < 3,5$) 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+](#)

Besonderheiten bei Durchlaufträgern ohne Schnittkraftumlagerung

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

$$\frac{x}{d} = \frac{(\delta - k_1)}{k_2} \text{ bzw. } \frac{x}{d} = \frac{(\delta - k_3)}{k_4} \text{ für } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

	K1	K2	x/d	K3	K4	x/d (C90)
NA-EN	0.44	$k_4 = 1,25 (0,6 + 0,0014 / \epsilon_{cu2})$	0.448	0.54	$k_4 = 1,25 (0,6 + 0,0014 / \epsilon_{cu2})$	0.33
NA-D	0.64	0.8	0.45	0.72	0.8	0.35 *a)
NA-GB	0.4	$k_4 = (0,6 + 0,0014 / \epsilon_{cu2})$	0.6	0.4	$k_4 = (0,6 + 0,0014 / \epsilon_{cu2})$	0.53
NA-A	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN
NA-IT	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN
NA-PL	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN	=EN

NA-D *a): gilt auch für Leichtbeton

Mindestbewehrung für auf Biegung beanspruchte Bauteile

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

	As _{min}
EN	$= 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d > 0,0013 \cdot b_t \cdot d$
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/
NA-GB	= EN
NA-A	= EN
NA-I	= EN
NA-PL	= EN

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 $e_d/h \leq 3,5$. Bei zweiachsiger Beanspruchung muss das Kriterium wenigstens in einer Richtung erfüllt sein.

As,min	Stützen	Wände
NDP As,min	Stützen (9.5.2(2))	Wände (9.6.2 (1))
EN	$= 0.10 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} > 0.002 \cdot A_c$	$= 0.002 \cdot A_c$
NA-D	$= \frac{0.15 \cdot N_{Ed}}{f_{yd}}$	$= 0.15 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$ $0.003 \cdot A_c > A_s > 0.0015 \cdot A_c$
NA-GB	= EN	= EN
NA-A	$= 0.13 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} > 0.0026 \cdot A_c$	= EN
NA-PL	= EN	= EN

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.

Siehe weiterhin → [Ermittlung der effektiven Steifigkeit](#)

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 $E_{y,eff} = M_y \cdot H / (\epsilon_1 - \epsilon_3)$ und

$E_{z,eff} = M_z \cdot B / (\epsilon_1 - \epsilon_2)$.

H,B: Abmessungen des umschließenden Rechteckes des Querschnittes

ϵ_1 : Dehnung mit maximalen Druck

ϵ_2 : Dehnung in der benachbarten Ecke in x-Richtung

ϵ_3 : 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.

EN 1992-1-1, Grenzzustand der Tragfähigkeit

Arbeitslinie Stahl bilineare Arbeitslinie nach Bild 3.8 mit Bemessungswerten f_{yd} (Fließgrenze) und $f_{td}(\epsilon_{ud})$.

Zusatzoption "Mittelwerte der Baustoffgrößen":

$f_y = f_{yk}$ und

$f_t(\epsilon_{uk}) = f_y \cdot k$ (ϵ_{uk} , k nach Anhang C)

NA-D: Bild 3.8.1, NCI zu 5.7

$f_y = 1,1 \cdot f_{yk}$ und

$f_t(\epsilon_{uk}) = f_y \cdot k$ (ϵ_{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 $f_c = f_{cd}$ 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, γ_{cE} ist NDP), andernfalls das Parabel-/Rechteckdiagramm nach Bild 3.3 und Parametern nach Tabelle 3.1 bzw. 11.3.1

	f_c	γ_{cE}
EN	f_{cd}	1,2
NA-D	f_{cm}/γ_c	1,5
NA-GB	=EN	= EN
NA-A	=EN	= EN
NA-I	= EN	= EN
NA-PL	= EN	= EN

Zusatzoption "Mittelwerte der Baustoffgrößen"

NA-D: 5.7 (6) ff. ergänzende NCCI

$$f_c = 0,85 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$$

$$k = E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1} / f_c \text{ (} E_{cm}, \varepsilon_{c1} \text{ und } \varepsilon_{c1u} \text{ nach Tab.3.1 bzw.}$$

$$\text{Tab. 11.3.1).}$$

andere NA wie NA-D

EN 1992-1-1, 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 $\varphi = \varphi(t_0, \infty)$ nach Anhang B

Eine Berücksichtigung der abgeminderten Kriechzahl φ_{eff} nach 5.8.4. ist durch deren manuelle Eingabe möglich

→ siehe [B2-Umweltbedingungen/Kriechzahl](#) / [B2+ Dauerhaftigkeit](#)

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

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

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 /24/ S.18 über eine negative Druckvordehnung in Höhe von ε_{cs} 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 (vgl. /14/ S.35) berücksichtigt. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Stahlspannung unter Last im Zustand II zur Stahlspannung unter Risschnittgrößen reduziert sich die Stahldehnung infolge Zugversteifung nach /14/ Bild H.8-3 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 $1/r_I = M / (I \cdot E_{ceff}) + 1/r_S$

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

$$\zeta = 1 - \beta \cdot (\sigma_s / \sigma_{sr})^2 \quad \text{Gl. 7.19}$$

σ_{sr} : Stahlspannung Zustand II unter Risschnittgrößen ermittelt mit $f_{ctk0,05}$ (Standard) bzw. f_{ctm} (Option)

→ siehe [B2](#) / [B2+](#)

σ_s : Stahlspannung Zustand II unter der Last, für die die Steifigkeit ermittelt wird (Standard) bzw. in der seltenen Lastkombination (Option)

→ siehe [B2](#) / [B2+](#)

Kurzzeitbeanspruchung: $\beta = 1,0$ (GZT)

Langzeitbeanspruchung: $\beta = 0,5$ (GZG)

$$E_{eff} = M_y / (1/r_m)$$

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

$E_{eff} = M / (k\zeta \cdot 1/r_{II})$ (vgl. /22/ S. 303)

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.

Schubbemessung für vertikale Schubbewehrung (Bügel):

VEd Bemessungswert der Querkraft (GZT)

VRd,c Die Querkrafttragfähigkeit ohne Bewehrung ergibt sich für den gerissenen Zustand nach Gleichung 6.2 bzw. 11.6.2 für Leichtbeton

$$VR_{d,c} = CR_{dc} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot b_w \cdot d \geq VR_{dc} \text{ (Gl. 6.2b)}$$

CR_{dc}: Kalibrierfaktor nach 6.2.2. (1) (NDP)

K₁: empirischer Spannungsbeiwert

NDP	k ₁ :	CR _{dc}
EN	0,15	0,18/γ _c Normalbeton 0,15/γ _c Leichtbeton
NA-D	0,12	0,15/γ _c
NA-GB	0,15,	0,18/γ _c , > C50 Test oder wie C50
NA-A	= EN	= EN
NA-I	= EN	= EN
NA-PL	= EN	= EN

η₁ Korrekturbeiwert Leichtbeton

$$K = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2 \quad [d \text{ in mm}]$$

Maßstabsfaktor, kleiner mit wachsender Nutzhöhe

$$\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d) < 0,02$$

Zugbewehrung A_{sl}, die mit l_{bd}+d über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt wird

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$$

Spannung (Druck negativ)

b_w: kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Nutzhöhe

Gleichung 6.2.b

$$VR_{d,c} > (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

NDP	v _{min} Normalbeton	v _{l,min} Leichtbeton
EN	$0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$	$0,028 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$
NA-D	$0,0520/\gamma_c \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ (d < 600) $0,0375/\gamma_c \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ (d > 800)	0
NA-GB	=EN	$0,028 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$
NA-A	=EN	
NA-I	=EN	$0,030 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$
NA-PL	=EN	=EN

NA-GB: > C50 mit f_{ck} = 50 N/mm² oder Zusatzoption „keine Abminderung“

Optional (siehe [B2](#) / [B2+](#)) ist eine Berechnung im ungerissenen Zustand nach Gleichung 6.4 möglich, wenn die Betonrandspannungen kleiner als f_{ctk} 0.05/γ_c (NA-D: f_{ctd}) sind.

NA-D: gilt außer für vorgespannte Elementdecken

Sonst: gilt nur für Einfeldsysteme aus Spannbeton

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_{i1} \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}$$

I: Trägheitsmoment

S: Statisches Moment im maßgebenden Schnitt

b_w: Breite im maßgebenden Schnittσ_{cp}: Längsspannung im maßgebenden Schnittα_i: Beiwert für Vorspannung mit sofortigem Verbund im Bereich der Eintragungslänge, sonst immer 1.0f_{ctd}: Rechenwert der Betonzugfestigkeit

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

γ_c: Teilsicherheitsbeiwert (siehe [Bemessungsgrundlagen](#))f_{ctk} 0.05: unterer charakteristischer Wert der Betonzugfestigkeit

NDP	α _{ct} Normalbeton nach 3.1.6	α _{ct} Leichtbeton nach 11.3.5
EN	1.0	0,85
NA-D	0.85	0.85
NA-GB	=EN	=EN
NA-A	=EN	=EN
NA-I	=EN	=EN
NA-PL	=EN	=EN

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 VR_{d,c} auch abhängig von der eingegebenen Längskraft (Minimum maßgebend) und dem eingegebenen Biegemoment (Maximum maßgebend) ist.

Bauteile mit erforderlicher Querkraftbewehrung

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

NDP	Max Cot Θ	Min Cot Θ	Bemerkung
EN	2,5	1,0	Bestimmung von Θ aus VRd,max Kriterium
NA-D	3,0 Normalbeton 2,0 Leichtbeton	0,58	Beachte Zusätzliches Rissreibungskriterium
NA-GB	= EN bei externen Zug 1,25	= EN	=EN
NA-A	1,6 generell 2,5 wenn Querschnitt überdrückt	= EN	=EN
NA-I	=EN	=EN	=EN
NA-PL	2.0	=EN	=EN

NA-D:

$$\text{Cot } \Theta \leq (1,2 - 1,4 \cdot \sigma_{cd}/f_{cd}) / (1 - \text{VRd,cc}/\text{VEd}) \quad \text{Gl. 6.7aDE}$$

VRd,cc: Rissreibungskraft

$$\text{VRd,cc} = \beta_{ct} \cdot 0,1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot (1 - 1,2 \cdot \sigma_{cd}/f_{cd}) \cdot b_w \cdot z \quad \text{Gl.6.7.bDE}$$

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.

- z** Hebelarm des angenommenen Fachwerkmodelles entsprechend Biegebemessung (falls nicht bekannt, Annahme von $0,9 \cdot d$ bzw. bei Kreisquerschnitten $0,55 \cdot d$)
- NA-D: Begrenzung $z < d - 2 \cdot c_{v,l}$ (hier $c_{v,l} = \text{nomc}$ der Längsbewehrung in der Druckzone, nach /26/ gilt für $c_{v,l} > 3\text{cm}$ eine Begrenzung von $z < d - c_{v,l} - 3\text{cm}$)
- Der Hebelarm kann auch nutzerdefiniert vorgegeben werden (→ [B2-Bemessung Ergebnisse](#)).

asw Rechnerische Schubbewehrung nach Gl. 6.8

Durch die Wahl des Druckstrebenwinkels auch unter dem Kriterium der Einhaltung von VRdmax ist Gl. 6.12 nachgewiesen.

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 $b_{wS} = A_c/D_a$).

Bei Kreisquerschnitten wird in Anlehnung an /31/ 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.

$$\text{Min asw/s} = \rho \cdot b_w \cdot \sin \alpha$$

	ρ (Balken) nach 9.2.2	ρ (Platten) nach 9.3.2	Bemerkung
EN	$0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}/f_{yk}}$	0	
NA-D	$0,16 \cdot f_{ctm}/f_{yk}$	0 wenn $V_{Ed} < V_{Rdc}$ Sonst $0,6 \cdot \rho$	Übergangsbereich $4 < b/h < 5$: Interpolation zwischen 0 und einfachen Wert ($V_{Ed} < V_{Rdc}$) bzw. zwischen 0,6 und einfachen Wert ($V_{Ed} > V_{Rdc}$)
NA-GB	=EN	=EN	
NA-A	$0,15 \cdot f_{ctm}/f_{yd}$	=EN	
NA-I	=EN	=EN	Entwurf NA
NA-PL	=EN	=EN	

$V_{Rd,max}$ Die Druckstreben­tragfähigkeit ergibt sich nach 6.9 bzw. äquivalent in Abhängigkeit von $\cot \Theta$ alleine zu

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \cot \Theta / (1 + \cot^2 \Theta)$$

NDP	v_1 nach 6.2.3	Bemerkung
EN	$v_1 = 0,6 \cdot (1 - f_{ck}/250)$ $v_1 = 0,5 \cdot (1 - f_{ck}/250)$	Gl. 6.6N Gl. 11.6.6N Leichtbeton
NA-D	$v_1 = 0,75$ * $(1,1 - f_{ck}/500)$ * η_1	Normalbeton > C50 Leichtbeton
NA-A	=EN	
NA-GB	$v_1 = 0,6 \cdot (1 - f_{ck}/250)$ $v_1 = 0,5 \cdot (1 - f_{ck}/250)$	Gl. 6.6N Gl. 11.6.6N Leichtbeton
NA-I	$v_1 = 0,5$ [1] $v_1 = 0,5 \cdot \eta_1 (1 - f_{ck}/250)$ [4]	Normalbeton Leichtbeton
NA-PL	=EN	

Alle NA: von der Erhöhung durch den Ansatz von nur 80 % Biegel­tragfähigkeit nach Gl. 6.10a und 6.10b wird nicht Gebrauch gemacht

Für Stahlbeton gilt $\alpha_{cw} = 1,0$

NA-GB: > C50 mit $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ oder Zusatzoption „keine Abminderung“

(siehe [B2](#) / [B2+](#))

f_{cd} darf nach PD 6687:2006 Kapitel 2.3 mit $\alpha_{cc} = 1,0$ ermittelt werden

(Option „Erhöhtes f_{cd} nach PD 6687:2006“ siehe [B2](#) / [B2+](#))

Das Maximum von $V_{Rd,max}$ ergibt sich für einen Druckstrebenwinkel von 45° .

Ist $V_{Rd,max}$ kleiner als der Bemessungswert der Querkraft, ist der Querschnitt oder die Betonklasse zu erhöhen.

bw Die Breite bw entspricht bei Plattenbalken der Stegbreite b0, bei Schichtenquerschnitten der geringsten Breite im Querschnitt. Bei Kreisquerschnitten entspricht bw nach /27/ 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.

sl,max maximaler Bügelabstand nach 9.2.2 (6)

	sl,max (NDP nach 9.2.2 (6))
EN	$0,75 \cdot d \cdot (1 + \cot \alpha)$
NA-D	Differenziert nach Querkraftausnutzung mit einem VRdmax ($\theta = 40^\circ$)
NA-GB	= EN2
NA-A	$0,75 \cdot d \cdot (1 + \cot \alpha) \leq 250 \text{ mm}$
NA-I	=EN
NA-PL	=EN

NA-D:

$V_{Ed} < 0,3 \cdot VR_{dmax}$ sMax = $0,7 \cdot h$ Balken: < 30 cm (> C50/60: < 20 cm)

$V_{Ed} < 0,6 \cdot VR_{dmax}$ sMax = $0,5 \cdot h$ Balken: < 30 cm (> C50/60: < 20 cm)

$V_{Ed} > 0,6 \cdot VR_{dmax}$ sMax = $0,25 \cdot h$ Balken: < 20 cm

VRdmax darf nach /14/ S. 212 mit $\theta = 40$ Grad angenommen werden.

Querkraft zweiachsig für Rechteckquerschnitte

Mit einem in /39/ 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 $\alpha_v = 0$, der Grenzfall 2 die zweiachsige Beanspruchung mit einem Lastangriff der Resultierenden genau über Eck, d.h. $\alpha_v = 1$.

Die Kraft im Bügel ist für Fall 2 nach /39/

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

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} nach /39/ auf konserverativ abgeschätzte $0,6 \cdot b$ 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 $0 \leq \alpha_v \leq 1$,

dann Tragfähigkeitsnachweis mit $b_w = b$,

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

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

Interpolationsfaktor Schubbewehrung

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

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

Interpolationsfaktor Druckstreben­tragfähigkeit

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

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 $z = 0,9 \cdot (h-d_1)$ für $\alpha_v = 0$ und $z = 0,9 \cdot (h-d_1+b-b_1)/2$ für $\alpha_v = 1,0$ bzgl. dem vorhandenen α_v .

NA_D: $z < d - 2 \cdot \text{nomc}$

Diese Begrenzung soll sicherstellen, dass der Abstand der Druckresultierenden vom Druckrand nicht kleiner $2 \cdot \text{nomc}$ ist.

d ist demzufolge der Abstand der Zugresultierenden vom Druckrand in Richtung des Hebelarmes.

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

Ortbetoneerganzung

Bei Querschnitten mit Ortbetoneerganzung ist die Tragfähigkeit der Ortbetonfuge nachzuweisen
 $v_{Edi} < v_{Rdi}$ Gl. 6.23

v_{Edi} Zu übertragende Schubkraft je Längeneinheit in der Fuge

$$v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i) \text{ Gl. 6.24}$$

V_{Ed} : Bemessungswert der Querkraft

z : Hebelarm der inneren Kräfte,
siehe Nachweis Querkrafttragfähigkeit

NA-D: Falls $v_{Rd,c} > V_{Ed}$, entfällt die Hebelarmbegrenzung mit c_v .

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

v_{Rdi} Bemessungswert des Schubkraftwiderstandes der Fuge

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

(Gl. 6.25, Leichtbeton mit $f_{ctd} = f_{lctd}$ und $v = v_l$ und $f_{cd} = f_{lcd}$)

σ_n Normalspannung senkrecht zur Fuge mit $\sigma_{ND} = n_{Ed}/b_i < 0,6 \cdot f_{cd}$

n_{Ed} : Bemessungswert (Druck: unterer, Zug: oberer) der Normalkraft senkrecht zur Fuge je Längeneinheit, Druck negativ.

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

c Rauigkeitsbeiwert entsprechend Oberflächenbeschaffenheit

sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
0,1	0,20	0,40	0,50

μ Reibungsbeiwert entsprechend Oberflächenbeschaffenheit nach Tabelle 13

sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
0,5	0,6	0,7	0,9

v Festigkeitsabminderungsbeiwert nach 6.2.2 (6)

v	sehr glatt	glatt	rauh	Verzahnt
EN				
Normalbeton	$0,6 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,6 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,6 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,6 \cdot (1-f_{ck}/250)$
Leichtbeton	$0,5 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,5 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,5 \cdot (1-f_{ck}/250)$	$0,5 \cdot (1-f_{ck}/250)$
NA-D (NCCI)				
Normalbeton	0,0	0,2	0,5	0,7
> C50	0,0	* $(1,1-f_{ck}/500)$	* $(1,1-f_{ck}/500)$	* $(1,1-f_{ck}/500)$
Leichtbeton	* η_1	* η_1	* η_1	* η_1

NA-D:

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (1,2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) < 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

(Gl. 6.25 + NCI bzw. Gl. 11.6.25 für Leichtbeton, dort mit $f_{ctd} = f_{lctd}$ und $v = v_l$ und $f_{cd} = f_{lcd}$)

sehr glatt mit $c = 0$

ρ Schubbewehrungsgrad der Fuge

$$\rho = A_{sw} / A_i = a_{sw} / b_i$$

a_{sw} Die Fuge kreuzende erforderliche Bügelbewehrung damit $v_{Rdi} = v_{Edi}$

$$v_{Rdi0} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \quad \text{Tragfähigkeit ohne Fugenbewehrung}$$

$$a_{sw} = b_i \cdot (v_{Edi} - v_{Rdi0}) / (f_{yd} \cdot k \cdot \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$$

NA-A:

$$a_{sw} > \text{Min} = \rho_{\min} \cdot b$$

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 a_{sw} mit f_{yd} ohne Abminderung erfolgt.

Torsion

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

teff,i: effektive Wanddicke
 $teff,i = A / U$
 < 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:

$$T_{Ed}/TR_{dc} + V_{Ed}/VR_{d,c} < 1 \quad \text{Gl. 6.31}$$

T_{Ed}: Bemessungswert des Torsionsmomentes

TR_{dc}: Allein durch die Betonzugfestigkeit f_{ctd} aufnehmbares Torsionsmoment

$$TR_{dc} = f_{ctd} \cdot t \cdot 2 \cdot A_k \quad \text{nach /55/ S.6-13}$$

W_t: Widerstandsmoment nach /46/ S.309

NA-D:

$$T_{Ed} < V_{Ed} \cdot bw/4,5 \quad \text{Gl. 6.31aDE}$$

$$V_{Ed} \cdot (1 + (4,5 \cdot T_{Ed}) / (V_{Ed} \cdot bw)) \leq VR_{dct} \quad \text{Gl. 6.31bDE}$$

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 $\Theta = 1,0$ (45 Grad) nachgewiesen werden (siehe [B2](#) / [B2+](#)).

NA-D:

Ermittlung des Druckstrebenwinkels nach /51/, S. 173 ff.

$$\text{Cot } \Theta \leq (1,2 - 1,4 \cdot \sigma_{cd}/f_{cd}) / (1 - VR_{d,cc}/V_{Ed, T+V}) \quad \text{entspr. Gl. 6.7.aDE}$$

V_{Ed, T+V}: Resultierende Beanspruchung

$$V_{Ed, T+V} = V_{Ed, T} + V_{Ed, V} \cdot teff,i / bw$$

V_{Ed, V}: Beanspruchung aus Querkraft

V_{Ed, T}: Beanspruchung aus Torsion
 $V_{Ed, T} = T_{Ed} \cdot z_i / (2 \cdot A)$

VR_{d, cc}: Rissreibungskraft entspr. Gl. 6.7.bDE

$$VR_{d, cc} = \beta_{ct} \cdot 0,1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot (1 - 1,2 \cdot \sigma_{cd}/f_{cd}) \cdot teff,i \cdot z$$

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

$$TRd,max = 2 \cdot v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,l} \cdot \cot \theta (1 + \cot^2 \theta)$$

Ak: Fläche, die von den Wandmittellinien eingeschlossen wird

NDP	v (6.2.2. (6))	Bemerkung
EN	$v = 0,6 \cdot (1-f_{ck}/250)$ $v = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot (1-f_{ck}/250)$	Analog Querkraft Normalbeton Leichtbeton
NA-D (NCCI)	$v = 0,525$ $* (1,1-f_{ck}/500)$ $* \eta_1$	gegenüber Querkraft abgemindert Normalbeton > C50 Leichtbeton
NA-A	=EN	
NA-GB	=EN	
NA-I (NCCI)	$v=0,5$ $v = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot (1-f_{ck}/250)$ [4] S.63	Analog Querkraft Normalbeton Leichtbeton
NA-PL	=EN	

α_{cw} : 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

$$aswT^* = TEd / (2 \cdot A_k \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta) \quad /46/ \text{ S. 283}$$

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 ($aswT = 2 \cdot aswT^*$). Hintergrund ist die einfachere Überlagerung mit einer Querkraftbeanspruchung.

Siehe Zehetmayer, Zilch: "Bemessung im konstruktiven Betonbau", Springer-Verlag, Berlin 2010, 2. Auflage, S. 308

AsL Die zusätzliche Längsbewehrung infolge Torsion

$$AsL = TEd \cdot \cot \theta \cdot U_k / (2 \cdot A_k \cdot f_{yd}) \quad \text{Gl. 6.28}$$

Uk: Umfang der Fläche Ak

Bei kombinierter Querkraft- und Torsionsbeanspruchung ist folgende Interaktionsbedingung einzuhalten:

$$TEd/TRd,max + VEd/VRd,max < 1 \quad \text{Gl. 6.29}$$

NA-D und NA-A:

Für Kompaktquerschnitte gilt

$$(TEd/TRd,max)^2 + (VEd/VRd,max)^2 < 1 \quad \text{NA-D: Gl. NA.6.29.1 / NA-A: Gleichung (9)}$$

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 (z.B. /67/.../72/).

Gitterträger sind Fachwerkträger bestehend aus Druckgurt, Zuggurt und Streben.

Die Streben können entweder die Form gleichschenkliger Dreiecke haben (Neigungswinkel $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ z.B. /67/, /69/, /71/ im folgenden System „gleichschenkliges Dreieck“ genannt) oder bestehen aus einem vertikalen Pfosten und einer geneigten Diagonale (Neigungswinkel $45^\circ \leq \alpha_1 < 90^\circ$ z.B. /68/, /70/, /72/ 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 \ominus	Abweichend gilt als untere Begrenzung Cot $\ominus \geq 1,0$
	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 ($\alpha=\alpha_1$) und Pfosten ($\alpha=90$ Grad) jeweils 50% der Beanspruchung übernehmen. Werden die Streben aus glattem Betonstahl B 500 A+G hergestellt, so darf nur $f_{yd} = 365 \text{ N/mm}^2$ in Rechnung gestellt werden.
VRd,max	Die Ermittlung von VRd,max erfolgt nach Gl. 6.14 entsprechend des Neigungswinkels α der Streben, abweichend gilt $VR_{d,max,GT} = 1/3 \cdot VR_{d,max}$ nach Gl. 6.14. Beim System Pfosten/Diagonale wird wegen der unterschiedlichen Neigungen der Streben der Nachweis mit einer Interaktionsgleichung $\sum(VR_{dsy, \alpha_i} / VR_{dmax, \alpha_i}) \leq 1,0$ geführt. (siehe /66/ Gl. H.6-7) VR _{dsy, α_i} : Tragfähigkeitsanteil der Strebe mit dem Winkel α_i VR _{dmax, 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 nach /67/ - /72/ $s_{max} = (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot z \leq 20 \text{ cm}$

Schubkraftübertragung in der Fuge:

Abweichend zum Nachweis nach Kapitel 6.2.5 gilt zusätzlich eine Begrenzung von $vR_{di,max}$ für Normal- und Leichtbeton gemäß Zulassung (/67/ bis /72/).

Ergibt sich beim Nachweis der Querkraft $V_{Ed} < VR_{dc}$, entfällt für die Ermittlung von v_{Ed} die Hebelarmbegrenzung $z < \max.(d - 2 \cdot c_{vl}, d - c_{vl} - 3 \text{ cm})$.

(siehe /66/ zu 6.2.5 (1))

Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Rissbreitennachweis nach EN 1992-1-1

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

wird für eine äußere Belastung entsprechend der maßgebenden Einwirkungskombination und für eine gewählte Bewehrung der maximale Grenzdurchmesser ermittelt, für den die zulässige Rissbreite eingehalten ist.

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

Stahlbetonbauteile ab Expositionsklasse XC2 sind in den meisten betrachteten NA's übereinstimmend für eine zulässige Rissbreite von 0,3 mm nachzuweisen.

Der Nachweis für XC1 erfolgt aus ästhetischen Gründen für eine Rissbreite von 0,4 mm (Ausnahme GB: 0,3 mm)

Maßgebende Lastkombination ist i.d.R. die quasi- ständige Lastkombination (Qk).

Wesentlich davon abweichende Anforderungen gelten in Italien und den Niederlanden.

Anforderungen an Stahlbetonbauteile nach Tab.7.1

	X0, XC1	XC2/XC3/XC4	XS1-3, XD1-3	Bemerkung
EN	0,4 mm + Qk	0,3 mm + Qk	0,3 mm + Qk	Tab. 7.1N
NA-D	=EN	=EN	=EN	Tab. 7.1DE
NA-GB	0,3 mm + Qk	=EN	=EN	
NA-A	=EN	=EN	=EN	
NA-I	AO 0,3 mm + Qk 0,4 mm + Hk	AA 0,2 mm + Qk 0,3 mm + Hk	AM 0,2 mm + Qk 0,2 mm + Hk	AO, AO, AA, AM nach NTC Tab. 4.1. III
NA-PL	=EN	=EN	=EN	

Wegen der höheren Korrosionsempfindlichkeit der Spannstähle werden für Spannbetonbauteile höhere Anforderungen hinsichtlich der nachzuweisenden Lastkombination (seltene (Sk), häufige (Hk)) und der zulässigen Rissbreite gestellt, ggf. ist ein Nachweis der Dekompression (Dek.) gefordert.

Dies ist in den nationalen Anhängen unterschiedlich geregelt.

Spannbeton im Verbund:

	X0, XC1	XC2/XC4	XS1-3, XD1-3	
EN	0,2 + Hk	0,2+ Hk Dek. Qk	Dek. Hk	Tab. 7.1N
NA-D	=EN	=EN	nachträglicher Verbund: 0,2+ Hk und Dek. Qk Sofortiger Verbund 0,2 + Sk und Dek. Hk	Tab. 7.1DE
NA-GB	=EN	=EN	=EN	
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,A0,AA,AM nach NTC Tab. 4.1. III
NA-PL	=EN	=EN	=EN	

Die Rissbreite ergibt sich aus dem maximalen Rissabstand s_{rmax} und der mittleren Dehnungsdifferenz $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ von Beton und Stahl.

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

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

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

σ_s : 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
 $\rho_{eff} = (A_s + A_p \cdot \xi^2) / A_{ceff}$

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 · D1 < (h-X0II)/2

X0II: Druckzonenhöhe im Zustand II

falls keine Bewehrung mit Abstand < h_{eff}

vorhanden gilt $h_{eff} = (h-X0I)/2$

- b_{eff} wirksame Zugzonenbreite bei Plattenbalken
 NA-D:
 nach /5/ S.191 entsprechend der zulässigen Auslagerungsbreite der Zugbewehrung
 $b_{\text{eff}} \leq \sum (0,5 \cdot b_{\text{eff},i}(\text{Z.I})) + b_w \leq b_f$ (NCI zu 9.2.1.2 (2))
 Eingabe: siehe [B2-Steuerung des Rissbreitennachweises](#) / [B2+](#)

$S_{r,\text{max}}$: maximaler Rissabstand:

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

- 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 $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (2 \cdot \varepsilon_1)$
- c : Betondeckung Längsbewehrung
- ϕ : mittlerer Durchmesser der Zugbewehrung

NDP	k_3	k_4
EN	3,4	0,425
NA-D	0	$1/(3,6 \cdot k_1 \cdot k_2) < \sigma_s \cdot \rho_{p,\text{eff}} / (3,6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot f_{ct,\text{eff}})$
NA-GB	=EN	=EN
NA-A	0	$1/(3,6 \cdot k_1 \cdot k_2) < \phi \cdot \sigma_s / (3,6 \cdot f_{ct,\text{eff}})$
NA-I	=EN	=EN
NA-PL	=EN	=EN

NA_D: Bei Gitterträgern nach bauaufsichtlicher Zulassung /67/ .../72/ 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.
 Mit diesem lässt sich auch die in den Zulassungen angegebene Tabelle der Grenzdurchmesser berechnen.

Der Grenzdurchmesser ergibt sich durch Umstellung der Rissformel nach ϕ .

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.

Bei Kreisquerschnitten wird $\rho_{\text{eff}} = A_s/A_{c,\text{eff}}$ in Anlehnung an /30/ wegen der kontinuierlich verteilten Bewehrung bezogen auf einen Kreisring mit der Dicke h_{eff} ermittelt, allerdings genauer mit $A_{c,\text{eff}} = \pi (D \cdot h_{\text{eff}} - h_{\text{eff}}^2)$.

Bei Kreisringquerschnitten gilt zusätzlich $A_{c,\text{eff}} \leq A_c$.

Die Ergebnisse stimmen mit denen in /30/ gut überein, sofern man die dortige Annahme von $n = 10$ durch Ansatz geringer Kriechzahlen einhält. Für $t = \infty$ ergeben sich infolge der dann höheren Kriechzahlen allerdings ungünstigere Ergebnisse.

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.

$$A_{s,min} \cdot \sigma_S = k_C \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (Gl.7.1)$$

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/mm ² wenn t >= 28 d
k _C	Beiwert zur Spannungsverteilung $k_C = 0,4 \cdot (1 - \sigma_C / (k_1 \cdot f_{ct,eff} \cdot h/h'))$ σ_C : Betonspannung (Zustand I) unter Risschnittkräften im Schwerpunkt des Teilquerschnittes Gurte Hohlkasten, T-Querschnitte, für Risschnittkräfte vollst. unter Zug $k_C = 0,9 \cdot F_{cr} / (A_{ct} \cdot f_{ct,eff}) \geq 0,5$ F _{cr} : Zugkraft im Gurt unter Risschnittkräften (Zustand I)
σ_S :	Tab. 7.2N mit D _{s1} , Herleitung siehe /54/ 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 $F_S = F_{cr} = k \cdot k_C \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}$ wird A_s direkt ermittelt.

$$F_{cr} < F_{cre} = A_{ceff} \cdot f_{ct,eff}$$

$$A_s = \sqrt{\frac{d_s \cdot (1 - \beta t) \cdot F_s \cdot F_s}{3,6 \cdot E_s \cdot w_k \cdot f_{ct,eff}}}$$

sonst

$$A_s = \sqrt{\frac{d_s \cdot F_{cre} \cdot (F_s - \beta t \cdot F_{cre})}{3,6 \cdot E_s \cdot w_k \cdot f_{ct,eff}}}$$

Spannungsnachweis nach EN 1992-1-1

Beton, seltene Kombination

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

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

$$\sigma_c < k_2 \cdot f_{ck}$$

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

$$\sigma_s < k_3 \cdot f_{yk}$$

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: $\sigma_s < k_4 \cdot f_{yk}$

	k1	k2	k3	k4	Bemerkung
EN	0.6	0.45	0.8	1.0	k1: Bei Expositionsklassen XD, XS oder XF empfohlen.
NA-D	=EN	=EN	=EN	=EN	k1: kann bei nicht vorgespannten Bauteilen im üblichen Hochbau entfallen, wenn der Grad der Umlagerung < 15 % beträgt.
NA-GB	=EN	=EN	=EN	=EN	
NA-A	=EN	=EN	=EN	=EN	
NA-I	=EN	=EN	=EN	=EN	k1: 20 % reduziert, wenn $h \leq 50$ mm
NA-PL	=EN	=EN	=EN	=EN	

Ermittlung der vorhandenen Spannungen

Die Ermittlung der Stahlspannungen ist nach /11/ mit einem abgeminderten E- Modul

$E_{\text{eff}} = E_{\text{cm}} / (1 + \varphi(t_0, \infty))$ durchzuführen.

Damit wird das Langzeitverhalten des Betons berücksichtigt, der sich durch Kriechen, d.h. durch Umlagerung auf den Betonstahl, einer Mitwirkung an der Aufnahme der Beanspruchung zu entziehen sucht.

Nach /11/ ist dies bei kompakten Querschnitten häufig vernachlässigbar, bei Plattenbalken aber ergeben sich um 5 % höhere Stahlspannungen gegenüber einer Berechnung ohne Berücksichtigung der Kriechzahl. Ein entsprechender Hinweis wie in ENV 1992-1-1, Abschnitt 4.4.1.2.(3) fehlt jedoch in EN 1992-1-1.

Für die Ermittlung der Betonspannungen sind dementsprechend frühe Zeitpunkte maßgebend, d.h. hier ist $\varphi = 0$.

NA-A:

Betonstahlspannungen seltene Lastkombination:

werden mit $\varphi_{\text{eff}}(t_0, \infty) = \varphi(t_0, \infty) \cdot \frac{M_{\text{qp,k}}}{M_{\text{E0,k}}}$ berechnet

$M_{\text{qp,k}}$: Biegemoment quasi- ständige LK

$M_{\text{E0,k}}$: Biegemoment seltene LK

Betonspannungen mit seltener Lastkombination:

laut NA mit $\varphi_{\text{eff}}(t_0, t)$ mit $t =$ Beginn der Nutzung möglich, zurzeit aber wegen Geringfügigkeit nicht berücksichtigt

Betonspannungen quasi- ständige LK:

nicht vorgespannte Tragwerke immer mit $\varphi(t_0, \infty)$

diese Annahme gilt in B2 standardmäßig

Außergewöhnliche Bemessungssituation Brand

Die Bemessung oder Ermittlung der Steifigkeit für Rechteck- und Kreisquerschnitte mit 1,3 und 4-seitigen Brandangriff ist möglich (Hinweis: B5 derzeit nur 4-seitig).

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.

Programm B2 – Stahlbetonbemessung:

Da die genaue Lage der Stähle von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis ist, muss das Zusatzmodul „Polygonale Bemessung B2-Poly“ vorhanden sein. Die Nachweise im Brandfall erfolgen mit den Querschnittstypen „Rechteck und allgemeine Punktbewehrung“ sowie „Kreis und allgemeine Punktbewehrung“.

Bei Nichtvorhandensein des Zusatzmoduls TA können die Temperaturen auch näherungsweise mit den Diagrammen nach EN 1992-1-2 Anhang A ermittelt werden, allerdings ergeben sich dann Abweichungen zu den laut einigen nationalen Anhängen zu treffenden Annahmen.

Randbedingungen für die Temperaturanalyse für verschiedene nationale Anhänge

	Bauteil- feuchte %	Dichte ρ kg/m ³	Leitfähigkeit λ nach NA
EN (Anh.A)	1,5	2300	λ_u
NA-D	3	2400	λ_o
NA-A	=EN	=EN	=EN hochfest: λ_o
NA-GB	=EN	=EN	=EN hochfest: λ_o
NA-PL	=EN	=EN	=EN

Anmerkung: Bauteilfeuchte und Dichte sind eigentlich keine NDP, werden aber in Deutschland abweichend zu den Annahmen von EN 1992-1-2 Anhang A verwendet, siehe z.B. Näherungsverfahren nach DIN EN 1992-1-2/NA Anhang AA.

Äußere Schnittkräfte

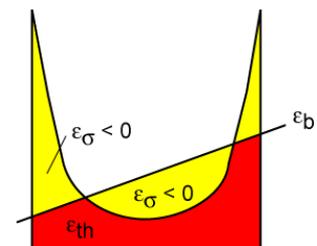
Es sind Schnittkräfte der Kombination für die außergewöhnliche Bemessungssituation Brand nach EN 1990 zu verwenden. Abweichend davon erlaubt EN 1991-1-2 für die maßgebende veränderliche Einwirkung den quasi-ständigen Wert $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ zu verwenden.
(NA-D: im Falle Wind als Leiteinwirkung 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 /42/ 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 (NA-A: Tab. 1).

Die inneren Schnittkräfte des Betonstahles ergeben sich entsprechend der Temperatur in den Bewehrungspunkten nach /42/ Bild 3.3 und Tabelle 3.2. Dabei kann ggf. das günstigere Verhalten von warmgewalztem Stahl berücksichtigt werden. Nach /44/ bedarf Stahl der Klasse X einer experimentellen Absicherung und wird z.Zt. nicht berücksichtigt. Die thermische Dehnung ergibt sich entsprechend /42/ Bild 3.

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 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.

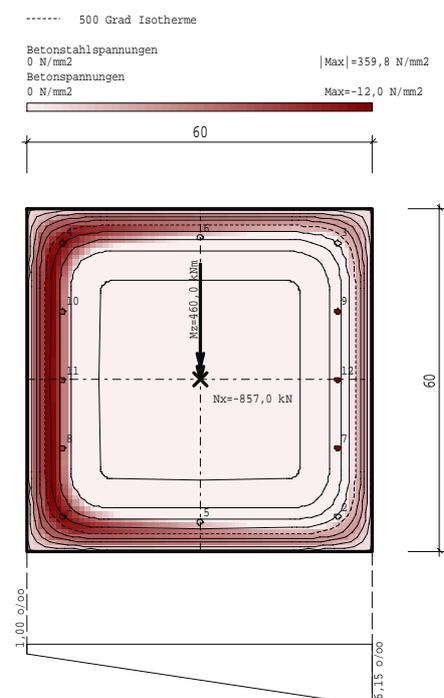
Die inneren Schnittkräfte des Stahles werden unter Berücksichtigung der einzelnen Bewehrungsstäbe ermittelt. Die effektive Steifigkeit ergibt sich aus dem gefundenen Dehnungszustand zu

Bemessung

Es wird iterativ der Dehnungszustand (Biegeebene) 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 Dehnungsebene wird zwischen den definierten Bruchdehnungen variiert. Die erforderliche Bewehrungsmenge ergibt sich direkt aus dem gefundenen Dehnungszustand.



Ermittlung der effektiven Steifigkeit

→ siehe Kapitel [Ermittlung der effektiven Steifigkeit](#).

Validierungsbeispiele

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 $b/h = 20 \text{ cm}/38 \text{ cm}$ und der Stützweite $l = 3,0 \text{ m}$ (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
 --- beflamnte Seite

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

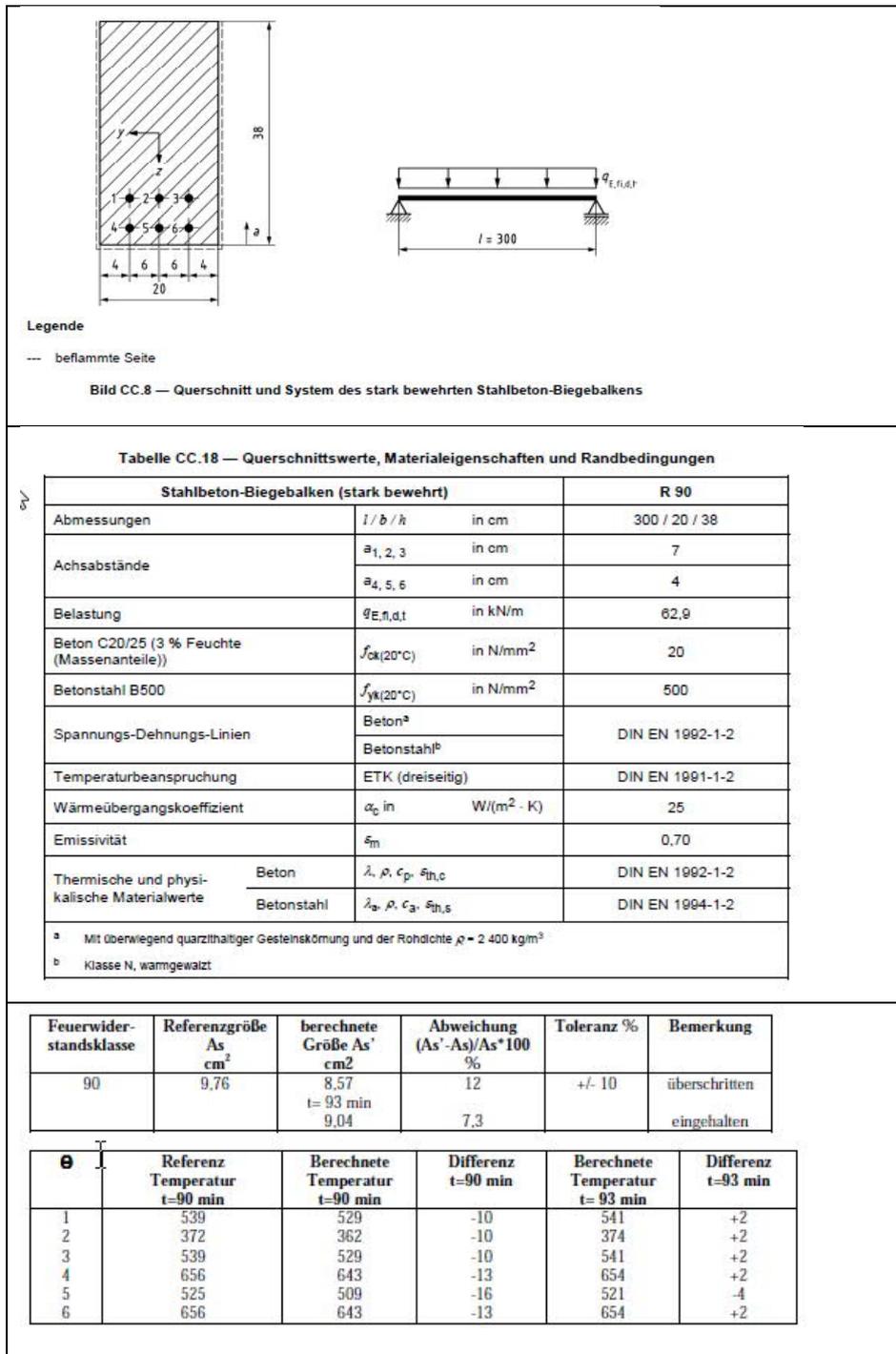
Tabelle CC.16 — Querschnittswerte, Materialeigenschaften und Randbedingungen

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	$q_{E,t,d,t}$ in kN/m	29	
Beton C20/25 (3 % Feuchte (Massenanteile))	$f_{ck}(20^\circ\text{C})$ in N/mm ²	20	
Betonstahl B500	$f_{yk}(20^\circ\text{C})$ in N/mm ²	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/(m ² · K)	25	
Emissivität	ϵ_m	0,70	
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	$\lambda, \rho, c_p, \alpha_{th,c}$	DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	$\lambda_s, \rho_s, c_{p,s}, \alpha_{th,s}$	DIN EN 1994-1-2

^a Mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte $\rho = 2\,400 \text{ kg/m}^3$
^b Klasse N, warmgewalzt

Feuerwiderstandsklasse	Referenzgröße A_s cm ²	berechnete Größe A_s' cm ²	Abweichung $(A_s' - A_s)/A_s \cdot 100$ %	Toleranz %	Bemerkung
90	3,56	3,44	3,5	+/- 10	3,5 < 10 erfüllt

Referenz Temperatur $t=90 \text{ min}$	Berechnete Temperatur	Differenz
562	555	-7



Da die errechneten Temperaturen deutlich geringer als die nach NA ausgewiesenen sind, ergibt sich für Beispiel CC.4.9 auch eine gegenüber dem NA geringere Bewehrung, der Toleranzbereich wird leicht überschritten. Das deckt sich auch mit den Ergebnissen anderer Softwarehersteller, z.B. /65/.

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.

Literatur

- / 1 / Leonhardt, Vorlesungen für den Massivbau Teil I
- / 2 / Linse Thielen, „Grundlagen der Biegebemessung der DIN 1045 aufbereitet für den Gebrauch an Rechenanlagen“, Beton- und Stahlbeton 9/72, S.199 ff.
- / 3 / König, Grimm, „Hochleistungsbeton“, Betonkalender 1996, Teil II, S.441 ff.
- / 4 / Neubauer: „Bemessung und Spannungsnachweis für den kreisförmigen Stahlbetonquerschnitt“, Die Bautechnik 5/96, S. 168 ff.
- / 5 / Zilch, Rogge: „Bemessung der Stahl- und Spannbetonbauteile nach DIN 1045-1“, Betonkalender 2002, Teil I.
- / 6 / Fischer: "Begrenzung der Rissbreite und Mindestbewehrung", Seminar DIN 1045-1, S.7
- / 7 / Tue, Pierson: "Ermittlung der Rißbreite und Nachweiskonzept nach DIN 1045-1", Beton- und Stahlbeton 5/2001, S.365 ff.
- / 8 / Reineck: "Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1", Bauingenieur 2001, S.168 ff.
- / 9 / Beispiele zur Bemessung nach DIN 1045-1, Band 1 Hochbau
Deutscher Betonverein, Ernst & Sohn
- / 10 / Schmitz, Goris: Bemessungstabellen nach DIN 1045-1, Werner Verlag
- / 11 / Fritze, Stahlbetonbemessungstabellen auf Basis der ÖNORM B4700
- / 12 / Valentin/Kidery: Stahlbetonbau, MANZ Verlag 2001
- / 13 / Curbach/Zilch, "Einführung in DIN 1045-1" Ernst und Sohn 2001
- / 14 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 525, Beuth 2003 inklusive Berichtigung 5-2005
- / 15 / Grasser: „Bemessung von Stahl- und Spannbetonbauteilen“
Betonkalender 1995, Teil 1
- / 16 / EC2, italienische Fassung vom Dezember 1991
- / 17 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 425, Beuth 1992
- / 18 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 400, Beuth 1989
- / 19 / Nationales Anwendungsdokument Italien zum EC2,
in Gazzetta Ufficiale 2/1996
- / 20 / Mosley, Bungey, Hulse: „Reinforced Concrete Design“, Palgrave, Fifth edition 1999
- / 21 / FI-Norm E-4539, Filigran Elementdecke, Querkraftnachweis nach DIN 1045-1
- / 22 / Krüger/Mertzsch, "Beitrag zur Verformungsberechnung von Stahlbetonbauten"
Beton- und Stahlbeton 10/1998, S.300 ff.
- / 23 / Beispiele zur Bemessung nach DIN 1045-1, Band 2 Ingenieurbau
Deutscher Betonverein, Ernst & Sohn
- / 24 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 415, Beuth 1990
- / 25 / Fingerloos, Deutscher Betonverein, „Anwendung der neuen DIN 1045-1 mit aktueller Bemessungssoftware“
- / 26 / Kommentierte Kurzfassung DIN 1045, 2. überarbeitete Auflage, Beuth 2005
- / 27 / Auslegung zur DIN 1045-1 des NABau vom 12.3.2005
- / 28 / 2. Berichtigung DIN 1045-1 (2005-06)
- / 29 / Fingerloos, Litzner: „Erläuterungen zur praktischen Anwendung von DIN 1045-1“, Betonkalender 2005,
Teil 2, S.422 ff.
- / 30 / Wiese, Curbach, Speck, Wieland, Eckfeldt, Hampel: "Rissbreitennachweis für Kreisquerschnitte", Beton- und Stahlbetonbau 4/2004, S. 253 ff.

- / 31 / D.Constantinescu: „On the shear strength of R/C Members with circular cross sections“, Darmstadt Concrete 8/1993
- / 32 / G.Fritsche, „Der Grenzdurchmesser“, "Betonstahl" - Offizielles Organ des Güteschutzverbandes für Bewehrungsstahl Magazin Nr. 78 1/00,Österreichisches Betonstahlmagazin 1/2000
- / 33 / Zulassung Z 15.1-1 Kaiser-Gitterträger KT 800 für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 34 / Zulassung Z 15.1-38 Kaiser- Omnia- Träger KTS für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 35 / Zulassung Z 15.1-147 Filigran- E- Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 36 / Zulassung Z 15.1-93 Filigran- EQ- Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 37 / Zulassung Z 15.1-142 van Merksteijn- Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 38 / Zulassung Z 15.1-143 van Merksteijn- EQ- Träger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 39 / P. Mark: "Bemessungsansatz für zweiachsig durch Querkräfte beanspruchte Stahlbetonbalken mit Rechteckquerschnitt"; Beton- und Stahlbeton 5/2005 S.370 ff.
- / 40 / Deutscher Beton- und Bautechnikverein, Heft 14 (2008)
- / 41 / Prof. Quast, Dr. Richter; vereinfachte Berechnung von Stahlbetonstützen unter Brandbeanspruchung; Beton- und Stahlbetonbau 2/2008“.
- / 42 / DIN EN 1992-1-2: 2010-12
- / 43 / Dr. Nause: „Berechnungsgrundlagen für das Brandverhalten von Druckgliedern aus hochfestem Beton“; Dissertation an der TU Braunschweig 2005
- / 44 / Prof. Hosser; Dr. Richter: „Überführung von EN 1992-1-2 in EN Norm und Bestimmung der national festzulegenden Parameter im nationalen Anhang zu DIN EN 1992-1-2“;Frauenhofer IRB Verlag 2007
- / 45 / CEB Bulletin 145, „Design of concrete structures for fire resistance“; Paris 1982
- / 46 / Zehetmayer,Zilch: "Bemessung im konstruktiven Betonbau", Springerverlag, Berlin 2010, 2. Auflage
- / 47 / Fritze, Kidery, Potocek: "Stahlbetonbau Teil 1 Grundlagen und Beispiele", Manzverlag 2008
- / 48 / Fritze, Kidery, Potocek: "Stahlbetonbau Teil 2 Bemessungstabellen", Manzverlag 2008
- / 49 / Potucek: "Eurocode 2 Praxisbeispiele", Austrian Standard, 2008
- / 50 / Narayanan, Beeby: Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2, Thomas Telford , London 2005
- / 51 / Grünberg, „Stahl- und Spannbetontragwerke nach DIN 1045-1“, Springer- Verlag 2002
- / 52 / Maurer, Tue, Havaresch, Arnhold, "Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten bei dicken Wänden", Bauingenieur 10/2005, S.479 ff.
- / 53 / <https://www.scia-online.com/>, Eurocodes_EN.pdf
- / 54 / Eurocode 2 Commentary , European Concrete Platform 2008
- / 55 / Eurocode 2, Worked Exambles , European Concrete Platform 2008
- / 56 / Norme tecniche per le costruzioni pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 04 02 2008

- / 57 / Circolare finissima 2.2.2009, Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- / 58 / Guida All'Uso dell' Eurocodice 2, AICAP 2008
- / 59 / C.R.Braam, P.Legendijk, Constructieler Gewapend Beton, Cement&Beton 2008
- / 60 / Grafieken en Tabellen bij CB2, Betonvereniging Gouda, 2008
- / 61 / Kommentierte Kurzfassung DIN 1045, 3. überarbeitete Auflage, Beuth 2008
- / 62 / T. Harrison, O. Brooker; „How to design concrete structures using Eurocode 2, BS 8500 for building structures“, The Concrete Centre 2005
- / 63 / Appendice Nazionale alla UNI EN 1992-1-1, Draft Version 2007
- / 64 / A. Ajdukiewicz; „Eurokod 2“, Stowarzyszenie Producentow Cementu, Krakow 2009
- / 65 / Infograph, „Prüfung und Validierung von Rechenprogrammen für Brandschutznachweise mittels allgemeiner Rechenverfahren“
- / 66 / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 600, Beuth 2012
- / 67 / Zulassung Z-15.1-1 (2019) Gitterträger KT 800 für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 68 / Zulassung Z-15.1-1 (2020) Gitterträger KTS für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 69 / Zulassung Z-15.1-147 (2019) Filigran-E-Gitterträger und Filigran-Ev-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 70 / Zulassung Z-15.1-93 (2019) Filigran-EQ-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 71 / Zulassung Z-15.1-142 (2019) Intersig-Gitterträger für Fertigplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht
- / 72 / Zulassung Z-15.1-143 (2020) INTERSIG-EQ-Gitterträger
- / 73 / Norme tecniche per le costruzioni
pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 20 02 2018
- / 74 / Circolare Istruzioni per l'applicazione delle <<Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni">> pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 11 02 2019
- / 75 / Zulassung Z-1.4-50:2017-07/2022-07 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500B NR kaltverformt vom Ring
- / 76 / Zulassung Z-1.4-228:2017-05/2023-04 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500A NR kaltverformt in Ringen
- / 77 / Zulassung Z-1.4-261:2018-09/2023-09 SCHEIBINOX nichtrostende Bewehrung B500B NR kaltverformt vom Ring
- / 78 / Zulassung Z-1.4-273:2018-02/2023-02 SCHEIBINOX nichtrostender Stabstahl B500A NR warm gewalzt
- / 79 / Zulassung Z-1.4-266:2016-09/2021-05 SWISS STEEL nichtrostende Bewehrung B500B NR warm gewalzt vom Ring
- / 80 / Zulassung Z-1.4-272:2018-02/2023-02 SWISS STEEL Stabstahl warmgewalzt B670B NR
- / 81 / Zulassung Z-1.1-267:2016-04/2021-04 ANNAHÜTTE hochfester Betonstahl für Biegebauteile