

Die Formelsammlungen sind teilweise stark veraltet (Vorlesungsinhalte aus vergangenen Semestern, alte Normen...) und sollten lediglich als Hilfestellung zum Verfassen eigener Formelsammlungen dienen. Kontrolliert auf jeden Fall die Formeln, es haben sich auch Fehler eingeschlichen.

Stahl- und Stahlverbund Formelsammlung

Jan Höffgen

3. August 2014

Diese Zusammenfassung wurde auf der Basis des Master-Moduls
Stahl- und Stahlverbundbau
im SS 2014 erstellt.

Verweise in *Schneider Bautabellen für Ingenieure* beziehen sich auf die 19. Auflage.

Kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Fehlerfreiheit.

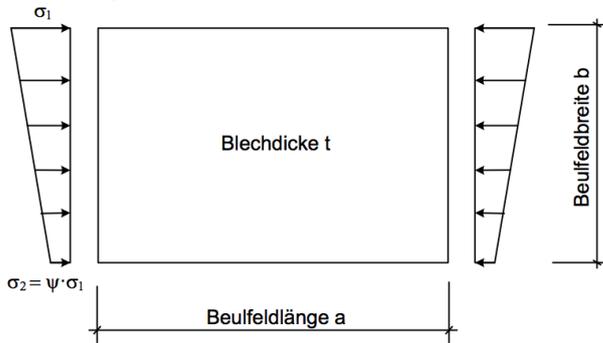
Inhaltsverzeichnis

1	Leichtbau	3
1.1	Plattenbeulen	3
1.2	Trapezprofile	6
1.2.1	Querschnittstragfähigkeit	6
1.3	Schubfelder	9
1.4	Nachweis der Verbindungsmittel	10
2	Verbundbau	11
2.1	Mittragende Breite	11
2.2	Plastische Momententragfähigkeit von Verbundträgern	11
2.2.1	Positives Moment	11
2.2.2	Negatives Moment	13
2.2.3	Abminderung der plastischen Momententragfähigkeit	14
2.3	Momenten-Querkraft-Interaktionsnachweis	14
2.4	Einteilung in Querschnittsklassen	14
2.5	Spannungs- und Verformungsberechnung	15
2.6	Verbundsicherung	17
2.6.1	Besonderheiten bei Verbundträgern mit Profilblechen	18
2.7	Nachweis der Tragfähigkeit des Betongurts	18
2.8	Vereinfachtes Verfahren für Verbundstützen unter planmäßig zentrischen Druck	20
3	Heißbemessung	22
3.1	Ermittlung der Stahltemperatur zum Zeitpunkt t	22
3.1.1	unbekleidete Bauteile	22
3.1.2	geschützte, innenliegende Bauteile	22
3.1.3	Ermittlung der Stahltemperatur im Nomogramm	23
3.2	Standfestigkeitsnachweis	24
3.2.1	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	24
3.2.2	Nachweis auf Temperaturebene	25
4	Torsion	26
4.1	St. Venantsche Torsion	26
4.2	Wölbkrafttorsion	27

1 Leichtbau

1.1 Plattenbeulen

- Grundbegriffe



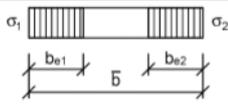
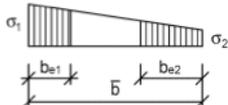
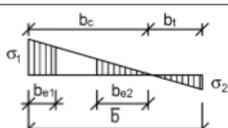
- Seitenverhältnis $\alpha = \frac{a}{b}$
- Randspannungsverhältnis $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ ($\sigma_1 > 0$: größte Druckspannung)
- Streckgrenzenfaktor $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

- Versagensart: $\begin{cases} \xi \leq 0 & : \text{knickstabähnliches Verhalten} \\ 0 < \xi < 1 & : \text{Interaktion} \\ 1 \leq \xi & : \text{plattenartiges Versagen} \end{cases}$ mit Wichtungsfaktor: $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$

- Elastische kritische Knickspannung [MPa]: $\sigma_{cr,c} = 190000 \left(\frac{t}{a}\right)^2$
- Elastische kritische Beulspannung [MPa]: $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = k_\sigma \cdot 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$
- * Ablesen von k_σ in Abhängigkeit der Lagerungsbedingungen und Spannungsverteilung
- Einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho c$		
		$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho b_c = \rho c l(1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho c$		
		$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho b_c = \rho c l(1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_σ	0,43	$0,578/(\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

- Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}				
	$\psi = 1:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$			
	$1 > \psi \geq 0:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
	$\psi < 0:$	$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\overline{AC} - 1 > \psi \geq -3 \overline{AC}$
Beulwert k_G	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

- Plattenartiges Versagen

– Schlankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}}{t \cdot 28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_G}}$

$$* \bar{b} = \begin{cases} b_w & \text{für Stege} \\ b & \text{für beidseitig gestützte Gurtelemente} \\ b - 3t & \text{für Gurte von rechteckigen Hohlprofilen} \\ c & \text{für einseitig gestützte Gurtelemente} \\ h & \text{für gleichschenklige und ungleichschenklige Winkel} \end{cases}$$

- Abminderungsfaktor für Beulen

$$* \text{Beidseitig gestützte QS-Teile: } \rho = \begin{cases} \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 & \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} \\ 1,0 & \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} \end{cases}$$

$$* \text{Einseitig gestützte QS-Teile: } \rho = \begin{cases} \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 & \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \\ 1,0 & \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \end{cases}$$

- Knickstabähnliches Verhalten des Einzelfeldes (unausgesteift)

– Schlankheitsgrad des Ersatzdruckstabs: $\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}}$

– Abminderungsfaktor für Knicken $\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \leq 1,0$ mit $\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2]$ und $\alpha = 0,21$ für Knicklinie a

$$* \text{Abminderungsfaktor: } \rho_c = \begin{cases} \chi_c & \text{für } \xi \leq 0 \\ (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c & \text{für } 0 < \xi < 1 \\ \rho & \text{für } 1 \leq \xi \end{cases}$$

- Wirksame Fläche eines druckbeanspruchten Blechfelds: $A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_c$
 $b_{c,eff} = \rho_c \cdot b_c$

- Wirksame Fläche ist für $\psi \neq 1$ ungleichmäßig über das Feld verteilt \rightarrow resultierender Schwerpunkt \neq Schwerpunkt \rightarrow Exzentrizität $e_N = \Delta z_S$ der Flächenschwerpunkte

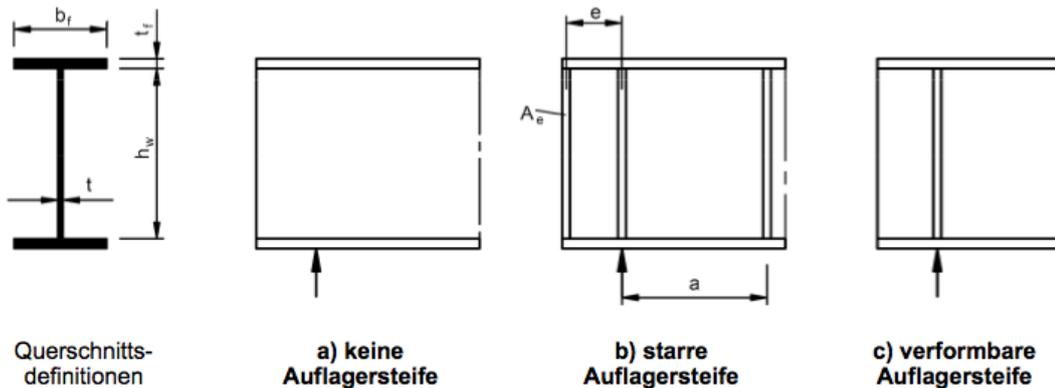
$$* z_{s,eff} = \begin{cases} \frac{1}{b_{eff}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot b_{e1}^2 + (b - \frac{1}{2} \cdot b_{e2}) \cdot b_{e2} \right) & \text{für } 1 > \psi \geq 0 \\ \frac{1}{b_{eff} + b_t} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot b_{e1}^2 + (b - \frac{1}{2} \cdot (b_{e2} + b_t)) \cdot (b_{e2} + b_t) \right) & \text{für } \psi < 0 \end{cases}$$

- Nachweis des unversteiften Blechs mit wirksamen Flächen $\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed} + e_N \cdot N_{Ed}}{f_y \cdot W_{eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0$

- Schubbeulen

- Schubbeulen maßgebend, wenn $\frac{b}{t} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$ (I-Profil: $h_w \equiv b$)
 - * $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
 - * $\eta = 1, 2$ für Anwendungen des Hochbaus für Stahlgüten bis S460, $\eta = 1, 0$ für Anwendungen des Brückenbaus und Stahlgüten höher als S460
- Schubbeulwerte: $k_\tau = \begin{cases} 5,34 + 4,00 \left(\frac{b}{a}\right)^2 & \frac{b}{a} \leq 1 \\ 4,00 + 5,34 \left(\frac{b}{a}\right)^2 & \frac{b}{a} > 1 \end{cases}$, wenn keine Längssteifen angeordnet sind
- Kritische Schubbeulspannung: $\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = k_\tau \cdot 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2$
- Schubbeulschlankheit: $\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}$
- Beitrag des Steges zur Schubbeanspruchbarkeit: χ_w ablesen

	Starre Auflagersteife	Verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$



- Beanspruchbarkeit des Steges: $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$
- Beanspruchbarkeit des Flansches: $V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}}\right)^2\right)$ (vernachlässigen)
 - * $M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$: Momentenbeanspruchbarkeit unter Vernachlässigung des Stegs
 - * $c = a \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{t \cdot h_w^2 \cdot f_{yw}}\right)$
- Beanspruchbarkeit: $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$
- Nachweis: $\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$

- Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

- Vorwerte
 - * $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$
 - * $\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$
 - * Für $\bar{\eta}_3 \leq 0,5$ kein Interaktionsnachweis erforderlich
- Nachweis: $\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0$

1.2 Trapezprofile

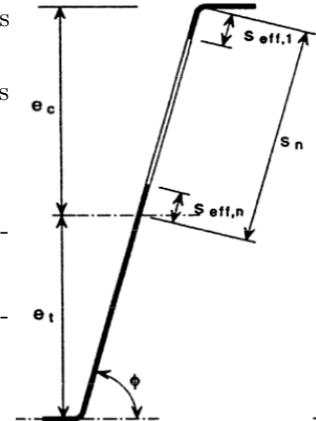
1.2.1 Querschnittstragfähigkeit

- Geometrie
 - b_0 : Gurtbreite
 - b_p : Gerade Breite eines ebenen Elements (gemessen zwischen den Mittelpunkten angrenzender Eckbereiche)
 - h_w : Steghöhe (\perp Gurt)
 - ϕ : Winkel zwischen Gurt und Steg
 - r : Eckausrundungsradius
 - t : Blechdicke
 - z : Abstand Schwerelinie – Druckgurt
- Positivlage: Stahlprofile: breite Gurte oben, Längsstoß in Untergurt; Aluminium: breite Gurte unten
- Anwendungsgrenzen
 - Berechnung der Tragfähigkeitswerte möglich, wenn $0,04 \cdot t \cdot \frac{E}{f_y} > r$
 - Grenzwerte für Größenverhältnisse
 - * $\frac{b_0}{t} < 500$
 - * $45^\circ < \phi < 90^\circ$
 - * $\frac{h_w}{t} < 500 \cdot \sin \phi$
 - Einfluss ausgerundeter Ecken vernachlässigbar, wenn
 - * $5 \cdot t < r$
 - * $0,1 \cdot b_0 < r$
 - Eindrehen der Flansche vernachlässigbar, wenn $\frac{u}{h_w} < 5 \%$
 - * $u = \frac{2 \cdot \sigma_a^2 \cdot b_s^4}{E^2 \cdot t^2 \cdot z}$
 - * $b_s = \frac{b_0}{2}$

- Bestimmung des effektiven Schwerpunkts (für positive und negative Momente unterschiedlich)

1. Zugbeanspruchte Querschnittsteile tragen voll mit

- Wenn f_y zuerst im Zuggurt, Teil des Stegs unter konst. f_y , bis f_y im Druckgurt wirkt
- Wenn f_y zuerst im Druckgurt, lineare Spannungsverteilung bis Zuggurt



2. Wirksame Breite der Druckgurte nach Abschnitt 1.1

3. Bestimmung des vorläufigen Schwerpunkts (Steg und Zuggurt komplett ansetzen, Druckgurt mit b_{eff})

4. $s_n = \frac{e_c}{\sin \phi}$: Steglänge zwischen Druckgurt und vorläufigem Schwerpunkt

5. Wirksame Fläche im Steg

$$(a) s_{eff,1} = 0,76 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$(b) s_{eff,n} = 1,5 \cdot s_{eff,1}$$

$$(c) s_{eff,1} + s_{eff,n} \leq s_n$$

6. Berechnung des effektiven Schwerpunkts

7. Berechnung $I_{y,eff,ges}$ und $W_{eff,ges} = \frac{I_{eff,ges}}{z_{max}}$

- Bezug auf eine gesamte Profileinheit (zwei Stege, Druckgurt, Zuggurt), Werte auf Gesamtbreite beziehen
- Eigenanteile der Flansche vernachlässigen (hinreichend genau), nur Steiner-Anteile
- Berechnung der Steganteile mit $I_{w,i} = \frac{s_{eff,i}^3 \cdot t'}{12}$ mit $t' = \frac{t}{\sin \phi}$

- Bestimmung der Momententragfähigkeit: $M_{c,Rk} = W_{eff,ges} \cdot f_y$

- Schubbeulen (bei abhebenden Lasten): Querkrafttragfähigkeit: $V_{b,Rk} = s_w \cdot t \cdot f_{bv}$
senkrechte Komponente der Querkrafttragfähigkeit: $V_{w,Rk} = h_w \cdot t \cdot f_{bv}$

$$- s_w = \frac{h_w}{\sin \phi}$$

– Schubbeulfestigkeit f_{bv}

Stegschlankheitsgrad	Am Auflager nicht ausgesteifter Steg	Am Auflager ausgesteifter Steg
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

$$- \text{Stegschlankheit: } \bar{\lambda}_w = 0,346 \cdot \frac{s_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}}$$

- Stegkrüppeln (bei andrückenden Lasten)

– Voraussetzungen

$$* \text{ Ein nicht ausgesteifter Steg: } \begin{cases} \frac{h_w}{t} \leq 200 \\ \frac{r}{t} \leq 6 \end{cases} \quad (\text{U-Profil, S-Profil...})$$

$$* \text{ Zwei oder mehr nicht ausgesteifte Stege: } \begin{cases} \frac{h_w}{t} \leq 200 \cdot \sin \phi \\ \frac{r}{t} \leq 10 \end{cases} \quad (\text{Trapezprofil...})$$

$$- \text{ Querkrafttragfähigkeit: } R_{w,Rk} = \alpha \cdot t^2 \cdot \sqrt{f_{yb} \cdot E} \cdot (1 - 0,1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}) \cdot \left[0,5 + \sqrt{0,02 \cdot \frac{l_a}{t}} \right] \cdot \left(2,4 + \left(\frac{\phi}{90^\circ} \right)^2 \right)$$

* Zwischenauflager

$$\cdot \alpha = \begin{cases} 0,15 & \text{bei Profilblechen} \\ 0,115 & \text{bei Kassettenprofilen und Hutprofilen} \end{cases}$$

$$\cdot l_a = \begin{cases} s_s \text{ (Auflagerbreite)} & \text{für } b_v \leq 0,2 \\ 10 \text{ mm} & \text{für } b_v \geq 0,3 \\ \text{lin. Interpol} & \text{sonst} \end{cases}, b_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|} \text{ (Querkräfte beidseitig des Auflagers)}$$

* Endauflager

$$\cdot \alpha = \begin{cases} 0,075 & \text{bei Profilblechen} \\ 0,057 & \text{bei Kassettenprofilen und Hutprofilen} \end{cases}$$

$$\cdot l_a = 10 \text{ mm}$$

· Auflagerbreite zzgl. Trapezprofilüberstand mindestens 40 mm

· Ist der Überstand des Profils über das Auflager größer als $1,5 \cdot h_w$, ist das Auflager als Zwischenaufleger zu berechnen

• Umrechnung der Querkrafttragfähigkeit über Rippenbreite $V'_{w,Rk} = \frac{V_{w,Rk}}{b_R}$, $R'_{w,Rk} = \frac{R_{w,Rk}}{b_R} \rightarrow \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$

• Nachweise GZT

– $\gamma_M = 1,1$

– Feldmoment: $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk,F}/\gamma_M} \leq 1,0$

– Endauflagerkraft: $\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rk,A}/\gamma_M} \leq 1,0$

– Zwischenaufleger

* Abhebende Beanspruchung

$$\cdot \begin{cases} \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk,B}/\gamma_M} \leq 1,0 & \text{für } \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rk}/\gamma_M} \leq 0,5 \\ \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk,B}/\gamma_M} + \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rk}/\gamma_M} - 1 \right)^2 \leq 1,0 & \text{für } 0,5 \leq \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rk}/\gamma_M} \leq 1,0 \end{cases}$$

* Andrückende Beanspruchung

· Stützmoment: $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk,B}/\gamma_M} \leq 1,0$

· Auflagerkraft: $\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rk,B}/\gamma_M} \leq 1,0$

· Interaktion: $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk,B}/\gamma_M} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rk,B}/\gamma_M} \leq 1,25$

– Verwendung von Profiltafeln: Ablesen der Widerstandswerte aus Tabellen

* abweichender Interaktionsnachweis: $\frac{M_{Ed}}{M_{0,Rk,B}/\gamma_M} + \left(\frac{F_{Ed}}{R_{0,Rk,B}/\gamma_M} \right)^a \leq 1,0$

da $M_{0,Rk,B} = 1,25 \cdot M_{c,Rk,B}$, $R_{0,Rk,B} = 1,25 \cdot R_{w,Rk,B}$

· $a = \{1, 2\}$ aus Formblatt

• Nachweis GZG

– Berechnen/ablesen von I_{eff}^+ und I_{eff}^- (Positiv- und Negativlage)

– Berechnen der Durchbiegung w mit $\gamma_{M,ser} = 1,0$

$$\cdot w_{vorh} \leq \begin{cases} \frac{L}{200} & \text{für Dächer allgemein} \\ \frac{L}{250} & \text{für begehbare Dächer} \end{cases}$$

• Tragfähigkeit plastisch-plastisch: Änderung des Momentenverlaufs, wenn $M_{Ed,B} > M_{Rd,B}$

$$\cdot \text{Stützmoment: } M_{R,Rk,res} = \begin{cases} 0 \\ \frac{L - \min L}{\max L - \min L} \\ 1 \end{cases} \cdot M_{R,Rk} \text{ für } \begin{cases} L \leq \min L \\ \min L < L < \max L \\ \max L \leq L \end{cases}$$

– Feldmoment: $\frac{p \cdot l^2}{8}$ abhängen

– Für GZG: $\sigma_{max} \leq f_y$

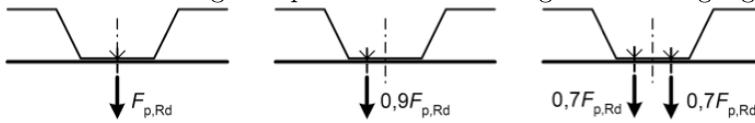
1.3 Schubfelder

- Für kontinuierliche Lasteinleitung (Streckenlast) Spannrichtung parallel zur Last, sonst Lasteinleitungsträger (Einzellasten)
- Berechnung der auszunehmenden Lasten
 - Bestimmung der Horizontallasten im GZT und GZG
 - Bestimmung des Schubflusses
 - * Größe des Schubflusses am oberen und unteren Rand des Verbandsbereichs bestimmt durch

$$T = \frac{\text{Querkraft}}{\text{Länge des Verbands in Lastrichtung}} = \frac{\Delta N}{b}$$
 - * Richtung des Schubflusses bestimmt durch:
 - Schubfluss baut Normalkräfte auf
 - Normalkraft konst \rightarrow Schubfluss = 0
 - Schubfluss geht in Richtung der Normalspannung. Für Druckkräfte in Richtung der Normalkraftzunahme. Für Zugkräfte entgegen der Normalkraftzunahme. Druck- und Zugkraftbereiche werden für den oberen und unteren Rand über die Aufteilung des Biegemoments in ein Kräftepaar bestimmt.
- Nachweis des Trapezprofils
 - Reduktion der Tragfähigkeitswerte $T'_{i,Rk} = T_{i,Rk} \cdot \frac{L_s}{\min L_s}$ erforderlich, wenn $L_s < \min L_s$
 - Querbiegung: $T_{Ed} \leq \frac{T_{1,Rk}}{\gamma_{M1}}$ mit $\gamma_{M1} = 1,1$ (GZT)
 - Relativverschiebung (bei bituminös verklebtem Dachaufbau): $T_{Ed} \leq \frac{T_{2,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$ mit $\gamma_{M,ser} = 1,0$ (GZG)
 - Winkeländerung (für $L \leq L_g$): $T_{Ed} \leq \frac{T_{3,Rk}}{\gamma_{M,ser}}$ mit $T_{3,Rk} = \frac{S}{750}$ und $S = \frac{10^4}{K_1 + \frac{K_2}{L_s}}$ ($\gamma_{M,ser} = 1,0$, GZG)
 - Kräfte am Auflager: $F_{Ed,s} + F_{Ed} \leq \frac{R_{w,Rk,A}}{\gamma_{M1}}$
 - * Andrückende Belastung: $q_{\perp,Dd} = \gamma_G \cdot (g_T + g_A) + \gamma_Q \cdot q_k \rightarrow F_{Ed} = c \cdot q_{\perp,Dd} \cdot L_s$
 - $\gamma_G = 1,35$; $\gamma_Q = 1,5$
 - g_T : Eigengewicht des Trägers für t_N aus Tabelle
 - g_A : Aufbaulast
 - L_s : Schubfeldlänge in Richtung der Horizontallast
 - * Zusätzliche Kraft am Auflager durch Schubfeldbeanspruchung: $F_{Ed,s} = K_3 \cdot T_{Ed}$

1.4 Nachweis der Verbindungsmittel

- Einwirkungen: Schubfeldbelastung, Eigengewicht, Wind, Auflasten etc.
- Reduktion der Zugbeanspruchbarkeit nach Lage der Befestigung



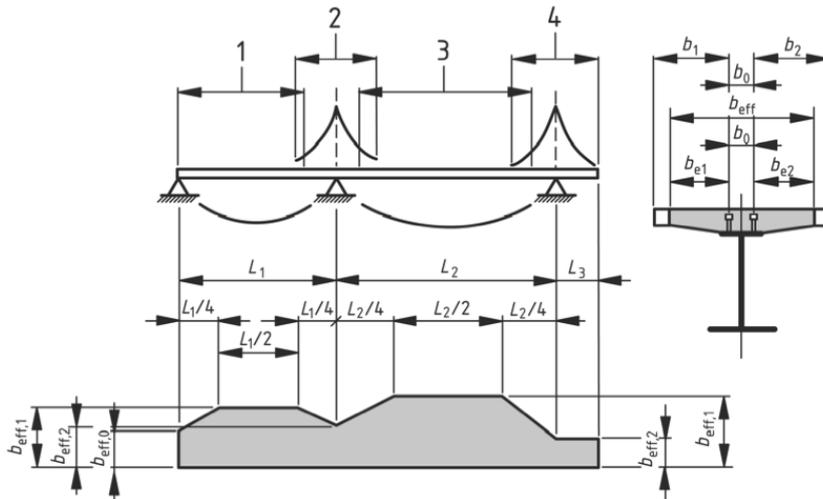
- Widerstand der VM: Ablesen von V_{Rk} und N_{Rk} aus Tafeln
 - Stahl: Minimum aus Ausziehen und Durchknöpfen angegeben
 - Aluminium: Minimum aus Ausziehen und Durchknöpfen bestimmen
- Nachweis der Verbindungsmittel
 - $\gamma_M = 1,33$
 - Längsrandträger
 - * Wahl der Schrauben über Bohrleistung: $t_1 + t_{II} \leq \max \sum t$
(t_1 : Dicke des Trapezprofils, t_{II} : Dicke der Randträger)
 - * $V_{1,Ed} = T_{Ed} \cdot e \Leftrightarrow e_{erf} = \frac{V_{Rk}(t_{II}, t_1) / \gamma_M}{T_{Ed}}$
 - * Abstand untereinander: $50 \text{ mm} \leq e \leq 666 \text{ mm}$
 - Profiltafeln untereinander
 - * Wahl der Schrauben über Bohrleistung: $t_1 + t_1 \leq \max \sum t$
 - * $e_{erf} = \frac{V_{Rk}(t_1) / \gamma_M}{T_{Ed}}$ (vereinfacht analog Verbindung zum Längsrandträger)
 - * Abstand untereinander: $50 \text{ mm} \leq e \leq 666 \text{ mm}$
 - * Randabstand: $e_L \geq \max\{10 \text{ mm}; 1,5 \cdot d_L\}$
 - Querrandträger
 - * Normalkraft: $N_{Ed} = N_{L,Ed} + N_{s,Ed} \leq \frac{N_{Rk}}{\gamma_M}$
 - $N_{s,Ed} = K_3 \cdot T_{Ed} \cdot \frac{b_R}{n}$ aus Schubfeld
 n : Anzahl VM je Rippe
 - $N_{L,Ed} = c \cdot q_{\perp, Sd} \cdot L \cdot e$ aus Lasten senkrecht zum Profil
 $q_{\perp, Sd} = \gamma_G \cdot (g_T + g_A) - \gamma_Q \cdot w_{Ds, k}$
 $\gamma_G = 1,0$
 - * Querkraft: $V_{Ed} = \sqrt{V_{L,Ed}^2 + V_{2,Ed}^2} \leq \frac{V_{Rk}}{\gamma_M}$
 - $V_{2,Ed} = T_{Ed} \cdot \frac{b_R}{n}$ aus Schubfeld
 - $V_{L,Ed} = w_{h, d} \cdot \frac{b_R}{n}$ aus Lasten parallel zur Spannrichtung
 - * Interaktionsnachweis: $\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_M} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rk}/\gamma_M} \leq 1,0$

2 Verbundbau

Baustahl	a	Streckgrenze f_{yk}	$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}$	$\gamma_{M0} = 1,0$
Beton	c	Druckfestigkeit f_{ck}	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	$\gamma_c = 1,5, \alpha_{cc} = \begin{cases} 1,0 & \text{betongefüllte Hohlprofile} \\ 0,85 & \text{sonst} \end{cases}$
Betonstahl	s	Streckgrenze f_{sk}	$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$	$\gamma_s = 1,15$

2.1 Mittragende Breite

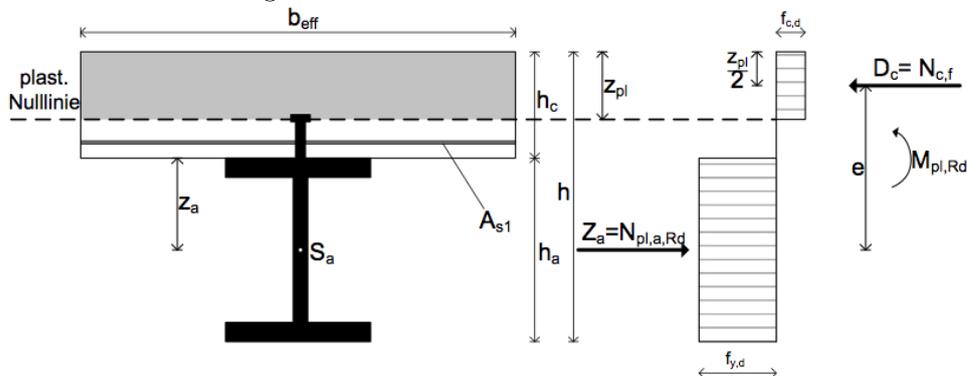
- Feldbereiche und Zwischenaufleger: $b_{eff} = b_0 + \sum_i b_{ei}$
- Endauflager: $b_{eff} = b_0 + \sum_i \beta_i \cdot b_{ei}$
 - $\beta_i = 0,55 + 0,025 \cdot \frac{L_e}{b_{ei}} \leq 1,0$
 - $b_0 = 0$ für eine Dübelreihe
 - $b_{ei} = \frac{L_e}{8} \leq b_i$: Wirksame Plattenbreite
 - 1 : $L_e = 0,85 \cdot L_1$ 2 : $L_e = 0,25 \cdot (L_1 + L_2)$ 3 : $L_e = 0,70 \cdot L_2$ 4 : $L_e = 2 \cdot L_e$



2.2 Plastische Momententragfähigkeit von Verbundträgern

2.2.1 Positives Moment

- Vernachlässigung von Bewehrung
- Plastische Nulllinie liegt in der Platte



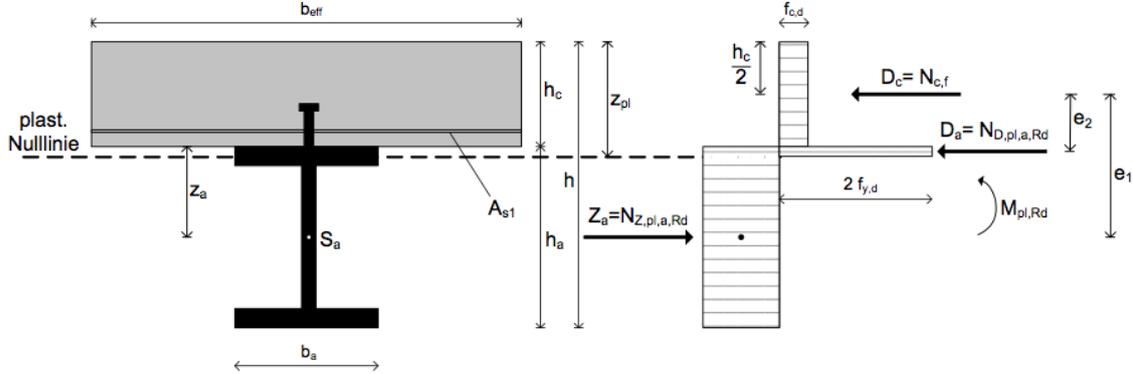
1. Stahlzugkraft: $Z_a = A_s \cdot f_{yd}$
2. Betondruckkraft $D_c = b_{eff} \cdot z_{pl} \cdot f_{cd}$
3. Druckzonenhöhe: $D_c = Z_a \Rightarrow z_{pl} = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_{eff} \cdot f_{cd}} \leq h_c$
 - Wenn $z_{pl} > h_c$, plastische Nulllinie im Stahlträger

4. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = \frac{e}{2} \cdot (Z_a + D_c) = e \cdot D_c = e \cdot Z_a$

– Innerer Hebelarm $e = h_c - \frac{1}{2}z_{pl} + z_a$

○ Iterative Berechnung der Baustahlfläche A_a : $\frac{f_{yd}}{b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{cd}} \cdot A_a = \left(1 + \frac{z_a}{h_c}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{z_a}{h_c}\right)^2 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b_{eff} \cdot h_c^2 \cdot f_{cd}}}$

• Plastische Nulllinie im Flansch



1. Stahlzugkraft: $Z_a = A_a \cdot f_{yd}$

2. Betondruckkraft $D_c = b_{eff} \cdot z_{pl} \cdot f_{cd}$

3. Stahldruckkraft: $D_a = 2 \cdot (z_{pl} - h_c) \cdot b_a \cdot f_{yd}$

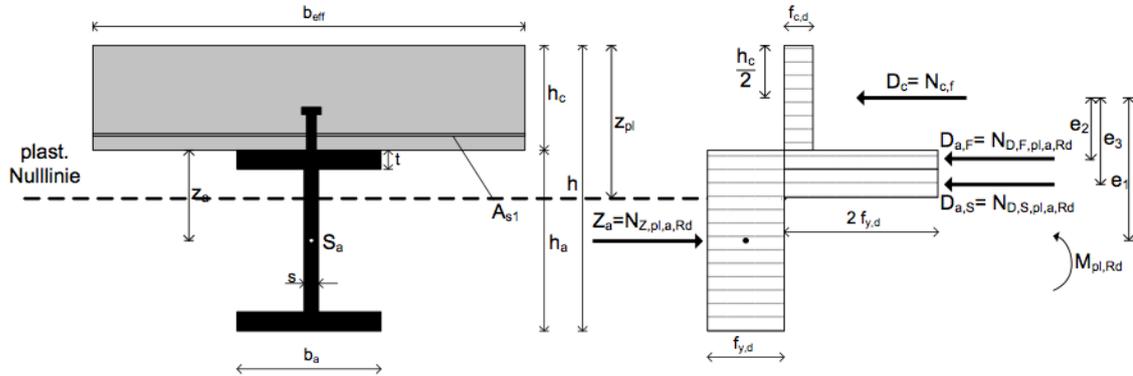
4. Druckzonenhöhe: $z_{pl} = h_c + \frac{Z_a - D_c}{2 \cdot b_a \cdot f_{yd}}$, $h_c \leq z_{pl} \leq h_c + t_f$

5. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = Z_a \cdot e_1 - D_a \cdot e_2$

– $e_1 = \frac{h_a}{2} + \frac{h_c}{2}$

– $e_2 = \frac{h_c}{2} + \frac{z_{pl} - h_c}{2} = \frac{z_{pl}}{2}$

• Plastische Nulllinie im Steg



1. Stahlzugkraft: $Z_a = A_a \cdot f_{yd}$

2. Betondruckkraft $D_c = b_{eff} \cdot z_{pl} \cdot f_{cd}$

3. Stahldruckkraft, Flansch: $D_{a,f} = 2 \cdot t_f \cdot b_a \cdot f_{yd}$

4. Stahldruckkraft, Steg: $D_{a,s} = 2 \cdot (z_{pl} - h_c - t_f) \cdot s \cdot f_{yd}$

5. Druckzonenhöhe: $z_{pl} = h_c + t_f + \frac{Z_a - D_c - D_{a,f}}{2 \cdot s \cdot f_{yd}}$, $h_c + t_f \leq z_{pl} \leq h_c + t_f + h_a$

6. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = Z_a \cdot e_1 - D_{a,f} \cdot e_2 - D_{a,s} \cdot e_3$

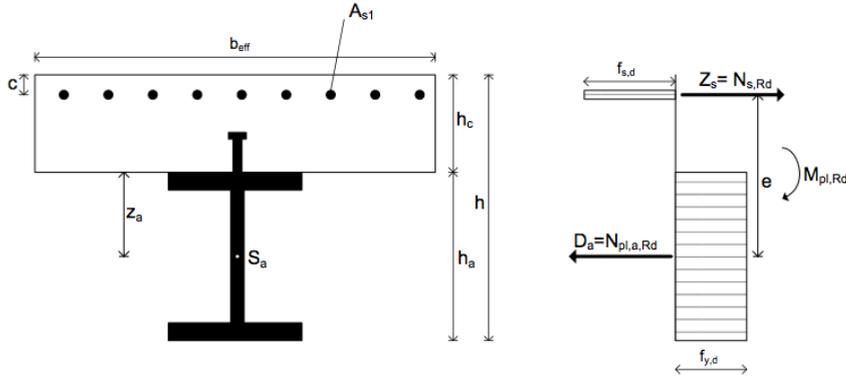
– $e_1 = \frac{h_a}{2} + \frac{h_c}{2}$

– $e_2 = \frac{h_c}{2} + \frac{t_f}{2}$

– $e_3 = \frac{z_{pl}}{2} + \frac{t_f}{2}$

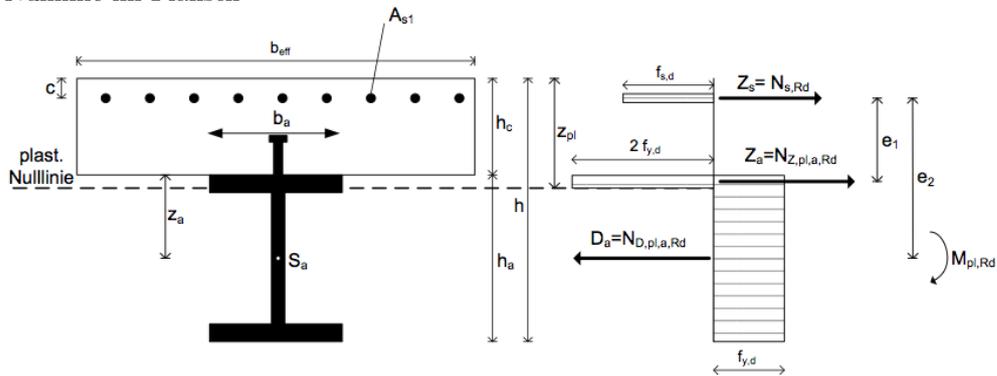
2.2.2 Negatives Moment

- Stahlträger nur QK1/2
- Nulllinie in Platte



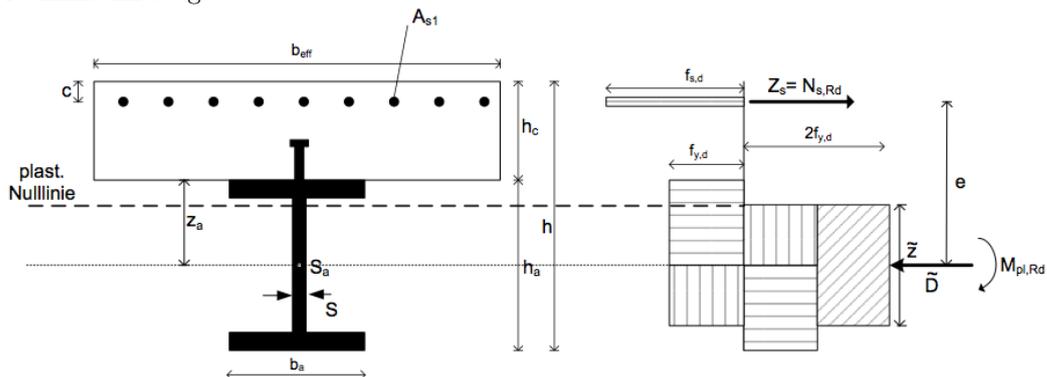
1. Zugkraft: $Z_s = A_{s1} \cdot f_{sd}$
2. Druckkraft: $D_a = A_a \cdot f_{yd}$
3. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = Z_s \cdot e$
 $- e = h_c + \frac{h_a}{2} - c$

- Nulllinie im Flansch



1. Bewehrungszugkraft: $Z_s = A_{s1} \cdot f_{sd}$
2. Stahlzugkraft: $Z_a = 2 \cdot b_a \cdot (z_{pl} - h_c) \cdot f_{yd}$
3. Stahldruckkraft: $D_a = A_a \cdot f_{yd}$
4. Zugzonenhöhe: $z_{pl} = h_c + \frac{D_a - Z_s}{2 \cdot b_a \cdot f_{yd}}$ aus $D_a Z_a + Z_s$
5. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = Z_a \cdot e_1 - D_a \cdot e_2$
 $- e_1 = \frac{z_{pl}}{2} + \frac{h_c}{2} - c$
 $- e_2 = h - c - \frac{h_a}{2}$

- Nulllinie im Steg



1. Zugkraft: $Z_s = A_{s1} \cdot f_{sd}$
2. Druckkraft: $\tilde{D} = \tilde{z} \cdot s \cdot f_{yd}$
3. Überdrückte Steglänge $\tilde{z} = \frac{Z_s}{s \cdot f_{yd}} \leq h_w$ aus $Z_s = \tilde{D}$
4. Plastisches Widerstandsmoment: $M_{pl,Rd} = -Z_s \cdot e \cdot \left(1 - \frac{\tilde{z}}{4 \cdot e}\right) - M_{pl,a,Rd}$
 $- e = h_c - c + \frac{1}{2}h_a$

2.2.3 Abminderung der plastischen Momententragfähigkeit

- Abminderung für S420 – S460: $M_{Rd} = \beta \cdot M_{pl,Rd}$

$$- \beta = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \frac{z_{pl}}{h} \leq 0,15 \\ 1,09 - 0,6 \cdot \frac{z_{pl}}{h} & \text{für } 0,15 < \frac{z_{pl}}{h} \leq 0,40 \\ \text{Ermittlung elastisch-elastisch} & \text{für } 0,40 < \frac{z_{pl}}{h} \end{cases}$$
- Abminderung bei teilweiser Verdübelung: $M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \cdot \frac{N_c}{N_{cf}}$
 - $N_c = P_{Rd} \cdot n_i$: Druckkraft im Betongurt, die durch die Dübel übertragen werden kann
 - * n_i : Anzahl KBD zwischen zwei kritischen Schnitten
 - N_{cf} : Druckkraft im Betongurt bei vollständiger Verdübelung

2.3 Momenten-Querkraft-Interaktionsnachweis

- Querkrafttragfähigkeit des Stahlträgers: $V_{Rd} = V_{pl,a,Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot A_w \cdot f_{yd}$
- Querkraft-Ausnutzung: $\begin{cases} \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 0,5 & \text{kein Interaktionsnachweis erforderlich} \\ 0,5 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0 & \text{Interaktionsnachweis erforderlich} \\ 1,0 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} & \text{Schubversagen} \end{cases}$
- Kein Nachweis gegen Schubbeulen erforderlich, wenn $\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$
 - $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
 - $\eta = 1,2$ für Anwendungen des Hochbaus für Stahlgüten bis S460, $\eta = 1,0$ für Anwendungen des Brückenbaus und Stahlgüten höher als S460
- Wenn kein Interaktionsnachweis, $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$ mit $M_{pl,Rd}$ nach Abschnitt 2.2
- Interaktionsnachweis
 1. Reduzierte Fließgrenze im Steg: $f_{y,Red,d} = (1 - \rho) \cdot f_{yd}$
 - * $\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1\right)^2$
 2. Berechnung von $M_{pl,Rd}$ nach Abschnitt 2.2 unter Berücksichtigung von $f_{y,Red,d}$ im Steg
 3. $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$

2.4 Einteilung in Querschnittsklassen

- Querschnittsklasse 1, wenn örtliches Beulen durch Mindestabstände der Dübel verhindert wird
 - Längsrichtung bei nicht unterbrochener Verbundfuge (Vollbetonplatten): $e_L \leq 22 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
 - Längsrichtung bei unterbrochener Verbundfuge (Gurte mit Profilblechen): $e_L \leq 15 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
 - Querrichtung zum freien Rand (lichter Abstand): $e_Q \leq 9 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
- Einteilung der Biegebauteile mit gedrücktem Flansch analog Grundlagen des Stahlbaus
- Betongefüllte Hohlprofile: siehe Anhang

2.5 Spannungs- und Verformungsberechnung

- Vernachlässigung des Betonstahls, da Einfluss gering

- Bestimmung der Kriechzahlen φ_t und Kriechbeiwerte ψ_L für die Lastfälle Kurzzeitbelastung (L=0), ständige Belastung (L=P) und Schwinden (L=S)

- Ablesen der Kriechzahl φ_t in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte, des Belastungsalters t_0 , der Zementart, der Betonfestigkeitsklasse und $h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{U_c} = 2 \cdot \frac{b_{eff} \cdot h_c}{2 \cdot (b_{eff} + h_c)}$ aus Anhang ($\sigma_{c,perm} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$)

– Schwinden: $t_0 = 1$ d

- Kriechbeiwerte ψ_L

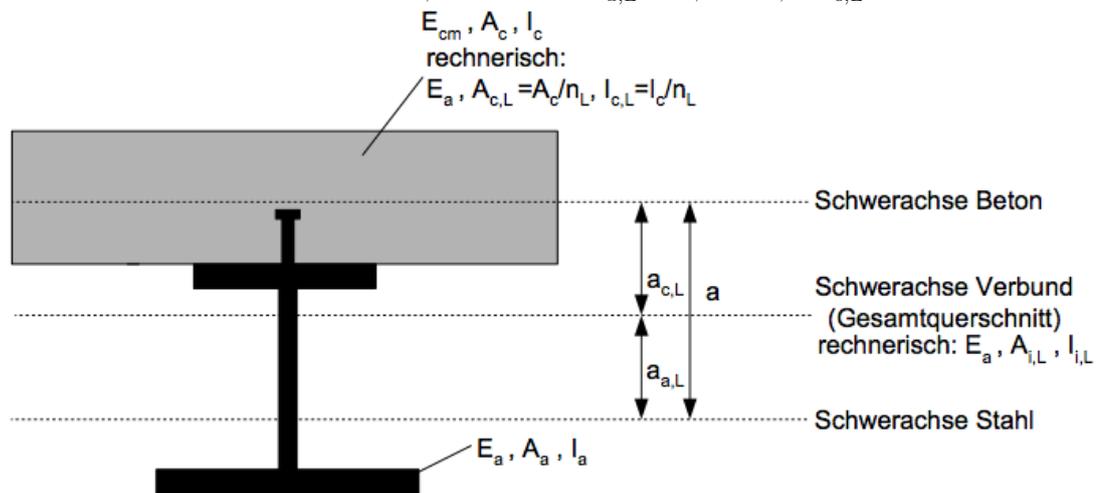
Kurzzeitbeanspruchung	$\psi_0 = 0$	CEM
Ständige Beanspruchung	$\psi_P = 1,10$	R 42,5 R, 52,5 N, 52,5 R
Schwinden	$\psi_S = 0,55$	N 32,5 R, 42,5 N
Eingeprägte Verformung, Lagerverschiebung	$\psi_D = 1,50$	S 32,5 N

- Reduktionszahlen n_L für alle Lastfälle L_i

- $n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}}$ für $t = 0$
- $n_L = n_0 \cdot (1 + \varphi_t \cdot \psi_L)$ für $t = \infty$

- Berechnung der ideellen Querschnittswerte für alle Lastfälle L_i

- Reduzierte Betonfläche: $A_{c,L} = \frac{A_c}{n_L}$
- Reduziertes Flächenträgheitsmoment des Betonquerschnitts: $I_{c,L} = \frac{I_c}{n_L}$
- Ideelle Querschnittsfläche: $A_{i,L} = A_a + A_{c,L}$
- Lage des Schwerpunkts: $a_{c,L} = \frac{A_a \cdot a}{A_{i,L}}$, $a_{a,L} = a - a_{c,L}$
mit a : realer Abstand Schwerlinie Beton – Schwerlinie Stahl
- Ideelles Flächenträgheitsmoment: $I_{i,L} = I_a + A_a \cdot a_{a,L}^2 + I_{c,L} + A_{c,L} \cdot a_{c,L}^2$



4. Beanspruchung durch Schwinden

- Schwinddehnung: $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$ [‰]
 - $\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd0}$: Trocknungsschwinden
 - * ε_{cd0} [‰]

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (N/mm ²)	Relative Luftfeuchte (in ‰)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

* k_h

h_0 [mm]	100	200	300	≥ 500
k_h	1,0	0,85	0,75	0,70

* $\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t-t_s}{(t-t_s)+0,04 \cdot h_0^{1,5}} \rightarrow 1,0$ für $t \rightarrow \infty$ (t_s : Endzeitpunkt der Nachbehandlung)– $\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$ * $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$

f_{ck} [MPa]	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\varepsilon_{ca}(\infty)$ [‰]	0,025	0,038	0,050	0,063	0,075	0,088	0,100	0,113	0,125

* $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot \sqrt{t}) \rightarrow 1,0$ für $t \rightarrow \infty$

- Zwangsschwindkraft im Beton: $N_{sch} = -\varepsilon_{cs} \cdot \frac{E_{cm}}{1+\varphi_t \cdot \psi_S} \cdot A_c$ (Zug)
- Zwangsbiegemoment: $M_{sch} = N_{sch} \cdot e = N_{sch} \cdot a_{c,S}$

5. Spannungsberechnung

- Berechnung in Punkt A (UK Baustahl), Punkt B (OK Baustahl/UK Beton), Punkt C (OK Beton)

– $z_{A,L} = a_{aL} + h_a - z_{a0}$

– $z_{B,L} = -a_{cL} + \frac{1}{2} \cdot h_c$

– $z_{C,L} = -a_{cL} - \frac{1}{2} \cdot h_c$

- Eigengewicht (auf Stahlquerschnitt)

– $\sigma_a = \frac{M_{Ed}}{I_a} \cdot z$ ($z = 0$ in der Stahl-Schwerelinie)

– $\sigma_c = 0$

- Verkehrslasten, Ausbaulasten (auf Verbundquerschnitt)

– $\sigma_a = \frac{N_L}{A_{i,L}} - \frac{N_L \cdot \Delta z_L}{I_{i,L}} \cdot z_L + \frac{M_{Ed}}{I_{i,L}} \cdot z_L$ ($z_L = 0$ in der Verbund-Schwerelinie)

– $\sigma_c = \frac{N_L}{A_{i,L} \cdot n_L} - \frac{N_L \cdot \Delta z_L}{I_{i,L} \cdot n_L} \cdot z_L + \frac{M_{Ed}}{I_{i,L} \cdot n_L} \cdot z_L$ ($z_L = 0$ in der Verbund-Schwerelinie)

* Δz_L : Abstand zwischen z_0 und z_L für den jeweiligen Lastfall L

- Schwinden (auf Verbundquerschnitt)

– $\sigma_a = -\frac{N_{sch}}{A_{i,S}} + \frac{M_{sch}}{I_{i,S}} \cdot z_S$ ($z_S = 0$ in der Verbund-Schwerelinie)

– $\sigma_c = \frac{N_{sch}}{A_c} - \frac{N_{sch}}{A_{i,S} \cdot n_S} + \frac{M_{sch}}{I_{i,S} \cdot n_S} \cdot z_S$ ($z_S = 0$ in der Verbund-Schwerelinie)

- Superposition der Lastfälle

6. Nachweis der elastischen Querschnittstragfähigkeit (für QK 3)

- Betondruckspannung: $\sigma_{c,Ed} \leq f_{cd}$
- Betonstahlspannung: $\sigma_{s1,Ed} \leq f_{sd}$
- Stahlspannung: $\sigma_{a,Ed} \leq f_{yd}$

7. Verformungen

- $f_L = c \cdot q_L \cdot \frac{l^4}{EI_{i,L}}$
- $f_S = \frac{1}{8} \cdot M_{sch} \cdot \frac{l^2}{EI_{i,S}}$
- $f_{ges} = \sum f_L$

2.6 Verbundsicherung

- Maße der KBD wählen

- Tragfähigkeit eines KBD: $P_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_v} \quad \text{Versagen des KBD, } \gamma_v = 1,25 \\ \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \quad \text{Versagen des Betons, } \gamma_v = 1,5 \end{array} \right.$

- $\alpha = 0,2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right)$ für $3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$, $\alpha = 1$ für $\frac{h_{sc}}{d} > 4$
- d : Nenndurchmesser des KBD-Schafts, $16 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm}$
- h_{sc} : Nennwert der Gesamthöhe eines KBD
- $f_u \leq 450 \text{ MPa}$: Zugfestigkeit des Materials des KBD

- erforderliche Dübelanzahl: $n_{erf} = \frac{V_{L,Ed}}{P_{R,d}}$

- $V_{L,Ed}$: Differenz der Normalkräfte im Betongurt zwischen 2 kritischen Schnitten

- Überprüfung, ob äquidistante Anordnung der KBD möglich

$$h \geq 4 \cdot d$$

- Bedingungen für duktilen Verhalten der KBD eingehalten: $16 \leq d \leq 25 \text{ mm}$

Verdübelungsgrad η größer als η_{min}

- * Mindestverdübelungsgrad η_{min} für doppelsymmetrische Stahlträger

- $\eta_{min} = 1,0 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e) \geq 0,4$ für $L_e \leq 25$

- $\eta_{min} = 1,0$ für $L_e > 25$

- L_e : Feldlänge in [m], f_y in [MPa]

- * Mindestverdübelungsgrad η_{min} für einfachsymmetrische Stahlträger mit $A_{f,u} \leq 3 \cdot A_{f,o}$

- $\eta_{min} = 1,0 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,75 - 0,015 \cdot L_e) \geq 0,4$ für $L_e \leq 20$

- $\eta_{min} = 1,0$ für $L_e > 20$

- * Mindestverdübelungsgrad η_{min} für doppelsymmetrische Stahlträger mit Aussteifen

- $\eta_{min} = 1,0 - \frac{355}{f_y} \cdot (1,0 - 0,04 \cdot L_e) \geq 0,4$ für $L_e \leq 25$

- $\eta_{min} = 1,0$ für $L_e > 25$

- QK1 oder QK2

- $\frac{M_{pl,Rd}}{M_{pl,a,Rd}} \leq 2,5$

- Wenn keine äquidistante Anordnung möglich, wird die Anordnung der KBD an den Querkraftverlauf angepasst: Q-Verlauf in etwa 4 gleich große Bereiche einteilen und KBD prozentual aufteilen.

- Abstände der KBD

- Abstände in Kraftrichtung: $e_L \left\{ \begin{array}{l} \geq 5 \cdot d \\ \leq 6 \cdot h_c \\ \leq 800 \text{ mm} \end{array} \right.$

- Abstände rechtwinklig zur Kraftrichtung: $e_q \geq \left\{ \begin{array}{l} 2,5 \cdot d \quad \text{für Vollbetonplatten} \\ 4 \cdot d \quad \text{sonst} \end{array} \right.$

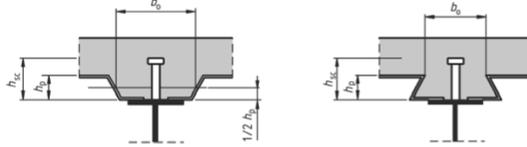
- Abstände zwischen Außenkante des KBD und des Flansches: $e_Q \geq 20 \text{ mm}$

2.6.1 Besonderheiten bei Verbundträgern mit Profilblechen

- Beton zwischen den Profilrippen wird nicht zur Tragfähigkeitsberechnung angesetzt
- Rippen verlaufen parallel zur Trägerachse

– Abminderungsfaktor k_l für die Dübeltragfähigkeit: $k_l = 0,6 \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq 1,0$

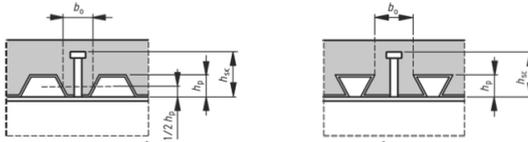
* $h_{sc} < h_p + 75 \text{ mm}$



- Rippen verlaufen senkrecht zur Trägerachse

– Abminderungsfaktor k_t für die Dübeltragfähigkeit: $k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq k_{t,max}$

* $n_r =$ Anzahl nebeneinander angeordneter KBD pro Rippe; $n_r \leq 2$



Anzahl der Dübel je Rippe	Blechdicke t des Profilbleches in mm	Durch die Profilbleche geschweißte Dübel mit Schaftdurchmessern d kleiner als 20 mm	Vorgelochte Profilbleche und Dübel mit Schaftdurchmessern von 19 mm und 22 mm
$n_r = 1$	$\leq 1,0$	0,85	0,75
	$> 1,0$	1,0	0,75
$n_r = 2$	$\leq 1,0$	0,70	0,60
	$> 1,0$	0,8	0,60

- Werte für k_t dürfen verwendet werden, wenn $h_p \leq \{b_0; 85 \text{ mm}\}$ und $d \leq 22 \text{ mm}$ für vorgelochte Profilbleche

2.7 Nachweis der Tragfähigkeit des Betongurtes

- Betondruckstrebe

– kritische Schnitte bestimmen

– Schnitt A-A

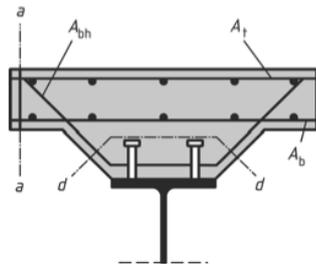
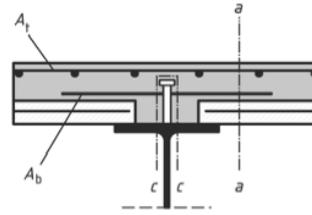
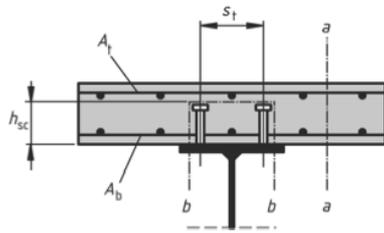
* $\nu_{L,Ed} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{e_L \cdot h_f} \cdot P_{R,d}$

- n : Anzahl KBD nebeneinander in Querschnitt
- h_f : Dicke des Betongurtes
- e_L : Bewehrungsabstand (\equiv Abstand der KBD)

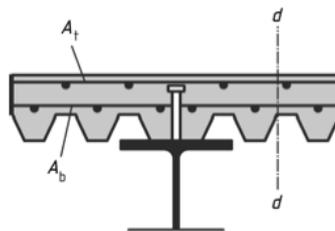
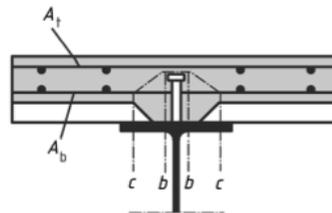
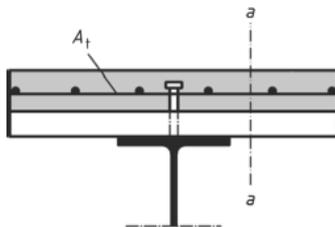
– Schnitt B-B

* $\nu_{L,Ed} = \frac{n}{e_L \cdot h_f} \cdot P_{R,d}$

- h_f von allen Dübeln im QS umschlossene Fläche



Schnitt	A_{sf}/s_f
a-a	$A_b + A_t$
b-b	$2 A_b$
c-c	$2 A_b$
d-d	$2 A_{bh}$



Schnitt	A_{sf}/s_f
a-a	A_t
b-b	$2 A_b$
c-c	$2 A_b$
d-d	$A_t + A_b$

$$- \nu_{Rd,max} = \frac{\nu \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

$$* \cot \theta = \begin{cases} 1,2 & \text{für Druckgurte} \\ 1,0 & \text{für Zuggurte} \end{cases}$$

$$* \nu = 0,75 \cdot \left(1,1 - \frac{f_{ek}}{500}\right) \leq 0,75$$

- Schubbewehrung (quer zur Tragrichtung)

$$- \nu_{Rd,sy} = \frac{A_{sf} \cdot f_{sd}}{s_f \cdot h_f} \cdot \cot \theta \geq \nu_{L,Ed} \Rightarrow \text{erf} \frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{\nu_{L,Ed} \cdot h_f}{f_{sd} \cdot \cot \theta} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \right]$$

* h_f der einzelnen Schnitte analog Druckstrebenachweis

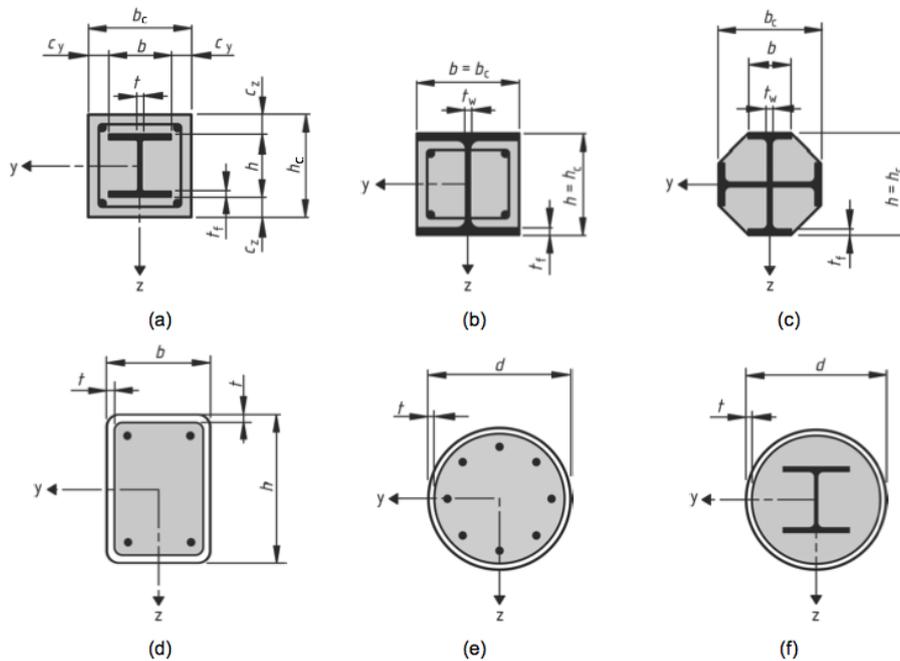
- i. d. R. Abstand der Bewehrung wie Abstand KBD
- Bewehrungsdurchmesser wählen; oben und unten gleiche Bewehrungsfläche
 $\Rightarrow \text{vorh} \frac{A_{sf}}{s_f} \geq \text{erf} \frac{A_{sf}}{s_f}$ in jedem Schnitt

- Mindestlängsbewehrung: $A_{s,min} = \delta \cdot \frac{f_{yk}}{235} \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{sk}} \cdot \sqrt{k_c}$

$$- \delta = \begin{cases} 1,0 & \text{für QK 2} \\ 1,1 & \text{für QK 1} \end{cases}$$

$$- k_c = \frac{1}{1 + \frac{h_c}{2 \cdot a_{c,0}}} + 0,3 \leq 1,0 \quad (a_{c,0} \text{ für Lastfall } L_0)$$

2.8 Vereinfachtes Verfahren für Verbundstützen unter planmäßig zentrischen Druck



- Grundsätzliche Voraussetzungen
 - Normalbeton C20/25 – C50/60
 - Baustahl S235 – S460
 - Nachweis gegen lokales Beulen

- * entfällt für vollständig einbetonierte Stahlprofile (Betondicke $c \geq \begin{cases} 40 \text{ mm} \\ \frac{1}{6} \cdot h_a \end{cases}$)
- * sonst: Einhalten von $\text{grenz} \frac{c}{t}$

ausbetonierte Rohre		$\max (d/t) = 90 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
ausbetonierte rechteckige Hohlprofile		$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
teilweise einbetonierte I-Querschnitte		$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

- doppelsymmetrischer und über die Bauteildicke konstanter Querschnitt
- $0,2 \leq \frac{h_c}{b_c} \leq 5,0$
- bei vollständig einbetonierten Stahlprofilen $\max c_z = 0,3 \cdot h$, $\max c_y = 0,4 \cdot b$ berücksichtigen

- Querschnittstragfähigkeit

- Verbundstützen mit innenliegendem Stahlprofil, rechteckige betongefüllte Hohlprofile:

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd}$$

- * $N_{pl,a,Rd} = A_a \cdot f_{yd}$ mit $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}}$, $\gamma_{M1} = 1,1$

- * $N_{pl,c,Rd} = A_c \cdot f_{cd}$ mit $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $\gamma_c = 1,5$

$$\cdot \alpha_{cc} = \begin{cases} 1,0 & \text{für betongefüllte Hohlprofile} \\ 0,85 & \text{sonst} \end{cases}$$

- * $N_{pl,s,Rd} = A_s \cdot f_{sd}$ mit $f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$, $\gamma_s = 1,15$

- Erhöhung der Betondruckfestigkeit bei betongefüllten kreisförmigen Hohlprofilen, wenn

$$\bar{\lambda} \leq 0,5, \quad e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \leq 0,1$$

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right)$$

- * $\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \cdot 10 \cdot \frac{e}{d}$
 $\eta_{a0} = 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) \leq 1,0$

- * $\eta_c = \eta_{c0} \cdot (1 - 10 \cdot \frac{e}{d})$
 $\eta_{c0} = 4,9 - 18,5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \geq 0$

- $0,2 \leq \delta \leq 0,9$ mit $\delta = \frac{N_{pl,a,Rd}}{N_{pl,Rd}}$ als Voraussetzung für den vereinfachten Nachweis

- Effektiver E-Modul des Betons: $E_{c,eff} = E_{cm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \varphi_t}$

- $N_{G,Ed}$: ständig wirkende Normalkraft

- φ_t : Kriechzahl aus Anhang

- Wirksame Biegesteifigkeit: $(EI)_{eff,\lambda} = E_a I_a + E_s I_s + 0,6 \cdot E_{c,eff} I_c$

- für Knicken maßgebende Achse: Achse mit geringerer Biegesteifigkeit

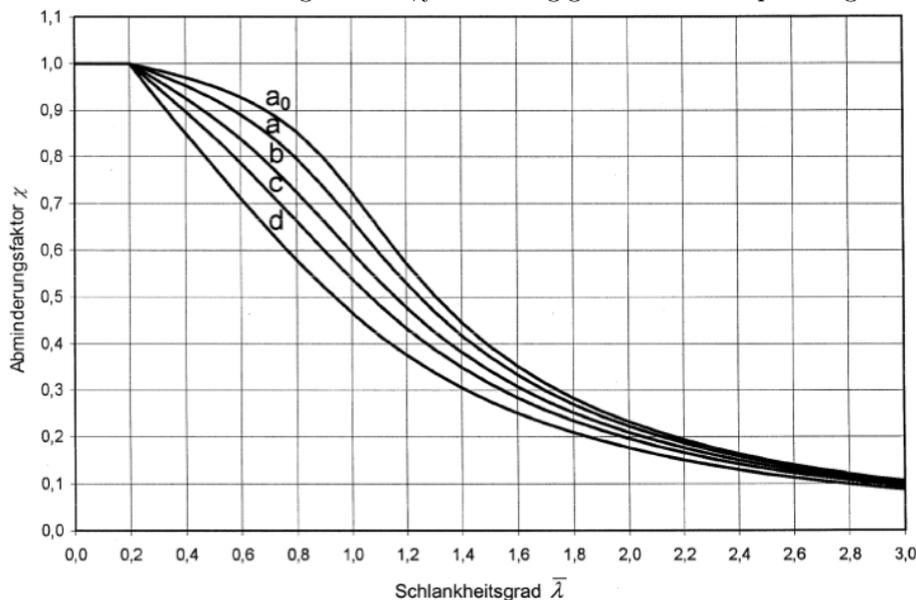
- Normalkraft unter der kleinsten Verzweigungslast: $N_{cr,i} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_{eff,\lambda}}{L_{cr,i}^2}$

- $L_{cr,i}$: Knicklänge um Achse i

- Bezogener Schlankheitsgrad: $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr,i}}} \stackrel{!}{\leq} 2,0$ für vereinfachten Nachweis

- Berechnung von $N_{pl,Rk}$ mit $\gamma_i = \alpha_{cc} = 1,0$ (ohne Umschnürungseffekt)

- Ablesen des Abminderungsfaktors χ in Abhängigkeit der Knickspannungslinie (vgl. Anhang)



- Nachweis: $\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1,0$

3 Heißbemessung

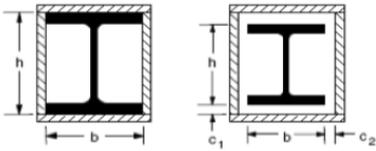
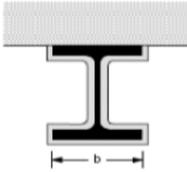
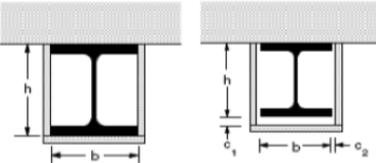
3.1 Ermittlung der Stahltemperatur zum Zeitpunkt t

3.1.1 unbedeckte Bauteile

- Anstieg der Oberflächentemperatur: $\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t$
 - k_{sh} : Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
 - * $k_{sh} = 0,9 \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right)_b$ für I-Profile
 - * $k_{sh} = \left(\frac{A_m}{V}\right)_b$ für andere Querschnitte
 - A_m : dem Brand ausgesetzte Oberfläche pro Längeneinheit (\equiv Umfang) [m]
 - V : Stahlvolumen pro Längeneinheit (\equiv Querschnittsfläche) [m²]
 - $\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = \frac{2 \cdot (b+h)}{V}$: Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
 - c_a : spezifische Wärmekapazität von Stahl in Abhängigkeit der Temperatur
 - $\rho_a = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$: Stahldichte
 - Δt Zeitintervall
 - $\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c}$: gesamter Netto-Wärmestrom
 - * $\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot ((\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4)$: Wärmeübertragung durch Strahlung
 - * $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_a)$: Wärmeübertragung durch Konvektion
 - $\phi \leq 1$: Konfigurationsfaktor
 - $\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1)$: Gesamttemperatur in °C zum Zeitpunkt t (ETK)
 - θ_a : Oberflächentemperatur in °C (Stahltemperatur)
 - $\varepsilon_m = 0,7$: Emissivität der Oberfläche (Baustahl) ($\varepsilon_m = 0,3$ für Edelstahl)
 - $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$: Stephan-Boltzmann-Konstante
 - $\alpha_c = 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$: Wärmeübergangskoeffizient
 - da Temperaturanstieg temperaturabhängig, Berechnung in kleinen Zeitschritten, z. B. $\Delta t = 5$ s

3.1.2 geschützte, innenliegende Bauteile

- $\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot \frac{A_p}{V} \cdot (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a \cdot (1 + \frac{\phi}{3})} \cdot \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t}$
 - $\phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V}$
 - d_p : Dicke des Brandschutzmaterials
 - λ_p : Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzmaterials
 - c_p : spezifische Wärmekapazität des Brandschutzmaterials
 - Δt : Zeitintervall < 30 s

Skizze	Beschreibung	Profilfaktor (A_p / V)
	Profifolgende Verkleidung konstanter Dicke	$\frac{\text{Stahlumfang}}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke	$\frac{2(b+h)}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Profifolgende Verkleidung konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{\text{Stahlumfang} - b}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{2h+b}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$

¹⁾ Die Größe der Zwischenräume c_1 und c_2 sollte $h/4$ nicht überschreiten.

3.1.3 Ermittlung der Stahltemperatur im Nomogramm

- ungeschützte Profile: Ablesen der Stahltemperatur in Abhängigkeit von $P = \left(\frac{A_m}{V}\right)_b$
- verkleidete Profile: Ablesen der Stahltemperatur in Abhängigkeit von $TP = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \left[\frac{1}{m} \cdot \frac{\text{W/mK}}{\text{m}} \right]$

3.2 Standfestigkeitsnachweis

3.2.1 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

- Beanspruchung: $E_{f_i,d,t} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} + A_d + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$

- Querschnittsklassifizierung

$$- \text{Flansch: } \frac{c}{t} \leq \begin{cases} 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{235/f_y} & \text{für QK1} \\ 10 \cdot \varepsilon & \text{für QK2} \\ 14 \cdot \varepsilon & \text{für QK3} \end{cases}$$

$$- \text{Steg: } \frac{c}{t} \leq \begin{cases} 72 \cdot \varepsilon & \text{für QK1} \\ 83 \cdot \varepsilon & \text{für QK2} \\ 124 \cdot \varepsilon & \text{für QK3} \end{cases}$$

- Zugbeanspruchte Bauteile: $N_{f_i,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,f_i}}$

– $k_{y,\theta}$: Abminderungsfaktor für die Fließgrenze (aus Tabelle)

– $\gamma_{M,0} = 1,0$

– $\gamma_{M,f_i} = 1,0$

- Bauteile unter zentrischem Druck: $N_{b,f_i,\theta,Rd} = \chi_{f_i} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,f_i}}$

$$- \chi_{f_i} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$* \varphi_{\theta} = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2)$$

• $\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{235/f_y}$: Imperfektionsbeiwert

$$* \bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

$$* \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr,Rd}}} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \lambda_1} \text{ mit Trägheitsbeiwert } i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Stahlgüte	S235	S275	S355	S420	S460
Materialbeiwert λ_1	93,9	86,8	76,4	70,2	67,1

- Bauteile unter reiner Biegung: $M_{f_i,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot M_{Rd}$

– Berücksichtigung des positiven Einflusses ungleicher Temperaturverteilungen:

$$M_{f_i,t,Rd} = \frac{M_{f_i,\theta,Rd}}{\kappa_1 \cdot \kappa_2}$$

Temperaturverteilung über den Querschnitt	κ_1
allseitige Brandbeanspruchung	1,0
ungeschützter Träger, dreiseitige Brandbeanspruchung, Betonplatte auf der vierten Seite	0,70
geschützter Träger, dreiseitige Brandbeanspruchung, Betonplatte auf der vierten Seite	0,85
Temperaturverteilung entlang des Trägers	κ_2
statisch unbestimmt gelagert	0,85
alle anderen Fälle	1,0

Stahl- temperatur θ_a	Abminderungsfaktoren bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20°C		
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Fließgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

Anmerkung: Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

- Biegedrillknicken: $M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}$
 - $\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}}$
 - * $\phi_{LT,\theta} = 0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2)$ mit $\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
 - * $\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$
 - $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,fi} \cdot f_y}{M_{cr}}}$ mit M_{cr} aus GdS, Abschnitt 6.2.2

3.2.2 Nachweis auf Temperaturebene

- Nicht zulässig bei Stabilitätsgefährdung
- Ausnutzungsgrad μ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$: $\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \geq 0,013$
- $\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$
- Nachweis: $\theta_{a,d} \leq \theta_{a,cr}$

4 Torsion

4.1 St. Venantsche Torsion

- Voraussetzungen
 - wölbfreie Querschnitte mit natürlicher Drillachse
 - * ununterbrochen rotationssymmetrisch
 - * zwei kreuzende Rechteckquerschnitte (L- oder T-Profile)
 - * Blechdickenvektoren schneiden sich in einem Punkt
 - keine Wölbbehinderung: Verschiebungen in Stablängsrichtung können sich frei einstellen, M_T greift nur an Stabenenden an
- einwirkendes Torsionsmoment M_T
 - Bestimmung des Schubmittelpunkts
 - * bei zwei sich kreuzenden Rechteckprofilen im Schnittpunkt der Schwerelinien
 - $m_T = q \cdot e_m$
- Torsionsträgheitsmoment I_T und Schub aus Torsion
 - Dünnwandige offene Querschnitte: $I_T = \frac{1}{3} \cdot b \cdot t^3$, $\tau_{T,max} = \frac{M_T}{I_T} \cdot t$
 - Dünnwandige offene Querschnitte aus mehreren Scheiben: $I_T = \sum \frac{1}{3} \cdot b \cdot t^3$,
 $\tau_{max} = \frac{M_T}{I_T} \cdot t_{T,max}$
 - * Korrekturbeiwert η für Walzprofile

Profil	L	T,C,U,Z	I
η	1,0	1,10 – 1,15	$\approx 1,3$
 - Kreisquerschnitte: $I_T = \frac{\pi}{2} \cdot (r_a^4 - r_i^4)$, $\tau_T = \frac{M_T}{I_T} \cdot r_a$
 - * Zusammengesetzte Profile aus zwei Kreisquerschnitten: $I_T = \sum I_{T,i}$, $\tau_T = \frac{M_T}{2 \cdot A_m \cdot t_{min}} \cdot \frac{I_{T,i}}{I_T}$
 - Dünnwandige geschlossene Querschnitte: $I_T = \frac{4 \cdot A_m^2}{\oint \frac{ds}{t}} = \frac{4 \cdot A_m^2}{U_m}$, $\tau_{T,max} = \frac{M_T}{2 \cdot A_m \cdot t_{min}}$
 - * A_m/U_m : Fläche/Umfang der durch die Mittellinie begrenzten Fläche
 - Mehrzellige Querschnitte
 - * Reduzierter Schubfluss für die Zelle k : $-\phi_{k-1} \cdot \int \frac{ds}{t} + \phi_k \cdot \int \frac{ds}{t} - \phi_{k+1} \cdot \int \frac{ds}{t} = 2 \cdot A_{m,k}$
 - Integrationsweg in Richtung des Torsionsmomentendrehsinns
 - $\int \frac{ds}{t}$ der Zellen $k-1$, $k+1$: nur Stege gemeinsam mit Zelle k berücksichtigen
 - k Gleichungen mit k Unbekannten $\rightarrow \phi_k$
 - * Torsionswiderstandsmoment $I_T = 2 \cdot \sum_k A_{m,k} \cdot \phi_k$
 - * Schubflüsse je Zelle: $T_k = \frac{M_T}{I_T} \cdot \phi_k$
 - * Schubspannung in Wand i der Zelle k : $\tau_i = \frac{T_k}{t_i}$
 - * Überlagerung der Schubflüsse in Grenzwänden benachbarter Zellen: $\tau_i = \frac{\Delta T}{t_i}$
- Schubspannungen: $\tau_{ges} = \tau_T + \tau_Q$
 - Schub aus Querkraft: $\tau_Q = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t}$
- Berechnung der Verdrehung ϑ [rad]: $\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{M_T(x)}{GI_T} \Leftrightarrow \vartheta = \frac{1}{GI_T} \cdot \int_x M_T(x) dx$ ($G = 8100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$)

4.2 Wölbkrafttorsion

- Bestimmung der Einheitsverwölbung ω_A :
 1. Integrationsweg s festlegen (Vom frei gewählten Nullpunkt zu den Enden hin)
 - Nullpunkt auf Symmetrieachse wählen \rightarrow Integrationskonstante wird null
 2. r_t -Flächen bestimmen
 - r_t ist der Abstand der Tangenten an den Querschnitt in Richtung $+s$ vom Drehpunkt A
 3. $\bar{\omega}_A = \int r_t ds = r_t \cdot s$ (\rightarrow über den Integrationsweg aufsummieren)
 - s : Länge des Profilabschnitts
 4. Integrationskonstante $\omega_{A0} = -\frac{1}{A} \cdot \int \bar{\omega}_A dA$
 5. $\omega_A = \bar{\omega}_A + \omega_{A0}$
- Umrechnung der Einheitsverwölbung ω_A mit Bezug auf die Drillachse A in die Einheitsverwölbung ω_B mit Bezug auf die Drillachse B (z. B. Schwerpunkt S auf Schubmittelpunkt M)
 - $\omega_B = \omega_A - (y_B - y_A) \cdot z + (z_B - z_A) \cdot y + \omega_0$
 - ω_0 analog ω_{A0}
- Ermittlung des Wölbwiderstands: $I_{\omega,A} = t \cdot \int \omega_A^2 ds$ (ω_A mit sich selbst integrieren)
- Art der Torsion über Abklingfaktor: $\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_{\omega,A}}}$
 - $\lambda \cdot l < 0,5$: reine Wölbkrafttorsion
 - $0,5 < \lambda \cdot l < 10$: gemischte Torsion
 - $\lambda \cdot l > 10$: reine St. Venant'sche Torsion
- Gemischte Torsion: $M_T = M_{T,p} + M_{T,s}$
 - $M_{T,p} = G \cdot I_T \cdot \vartheta'$: St. Venant'sche Torsion
 - $M_{T,s} = E \cdot I_{\omega,A} \cdot \vartheta''$: Wölbkrafttorsion
 - DGL der gemischten Torsion: $E \cdot I_{\omega,A} \cdot \vartheta'''' - G \cdot I_T \cdot \vartheta'' = m_T$
 - Lösung der DGL

- * Lösungsansatz abhängig von den Randbedingungen und der Beanspruchung
- * Bestimmung der Koeffizienten durch die Rand- und Übergangsbedingungen

Gabellagerung mit Wölbbehinderung



$$\vartheta(0) = 0$$

$$\vartheta'(0) = 0$$

Gabellagerung ohne Wölbbehinderung



$$\vartheta(0) = 0$$

$$\vartheta''(0) = 0$$

Freies Stabende



$$M_T(0) = 0$$

$$M_{\omega}(0) = 0$$



$$\vartheta(0) = 0$$

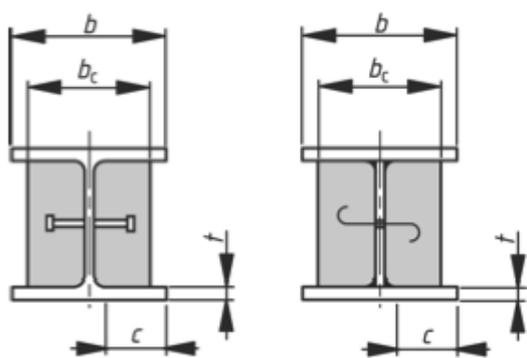
$$M_T(0) = 0$$

Nachgiebige Kopfplatten können mit Hilfe von Wölbfedern abgebildet werden.

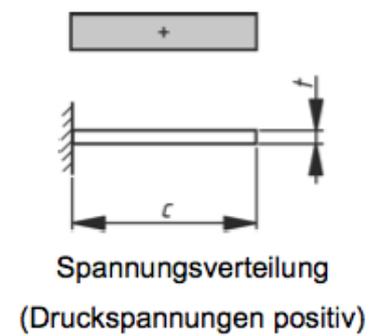
$$\begin{aligned} * \vartheta &= \frac{C_1}{\lambda^2} \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + \frac{C_2}{\lambda^2} \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + C_3 \cdot x + C_4 - \frac{1}{2 \cdot G \cdot I_T} \cdot \left(m_{T,0} + \frac{1}{3} \cdot m_{T,1} \cdot \frac{x}{l} \right) \cdot x^2 \\ * \vartheta' &= \frac{C_1}{\lambda} \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + \frac{C_2}{\lambda} \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + C_3 - \frac{1}{2 \cdot G \cdot I_T} \cdot \left(2 \cdot m_{T,0} + m_{T,1} \cdot \frac{x}{l} \right) \cdot x \\ * \vartheta'' &= C_1 \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + C_2 \cdot \cosh(\lambda \cdot x) - \frac{1}{G \cdot I_T} \cdot \left(m_{T,0} + m_{T,1} \cdot \frac{x}{l} \right) \\ * \vartheta''' &= C_1 \cdot \lambda \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + C_2 \cdot \lambda \cdot \sinh(\lambda \cdot x) - \frac{m_{T,1}}{G \cdot I_T \cdot l} \end{aligned}$$

- Berechnung der Beanspruchungen in Folge von Torsion
 - * Primäres Torsionsmoment: $M_{T,p} = G \cdot I_T \cdot \vartheta'$

- * Sekundäres Torsionsmoment: $M_{T,s} = -EI_{\omega} \cdot \vartheta'''$
- * Wölbmoment: $M_{\omega} = -EI_{\omega} \cdot \vartheta''$ [kNcm²]
- * Wölbnormalspannung: $\sigma_w = -\frac{M_{\omega, M}}{I_{\omega, M}} \cdot \omega_M$ (Überlagern mit Biegenormalspannung)



$$0,8 \leq \frac{b_c}{b} \leq 1,0$$



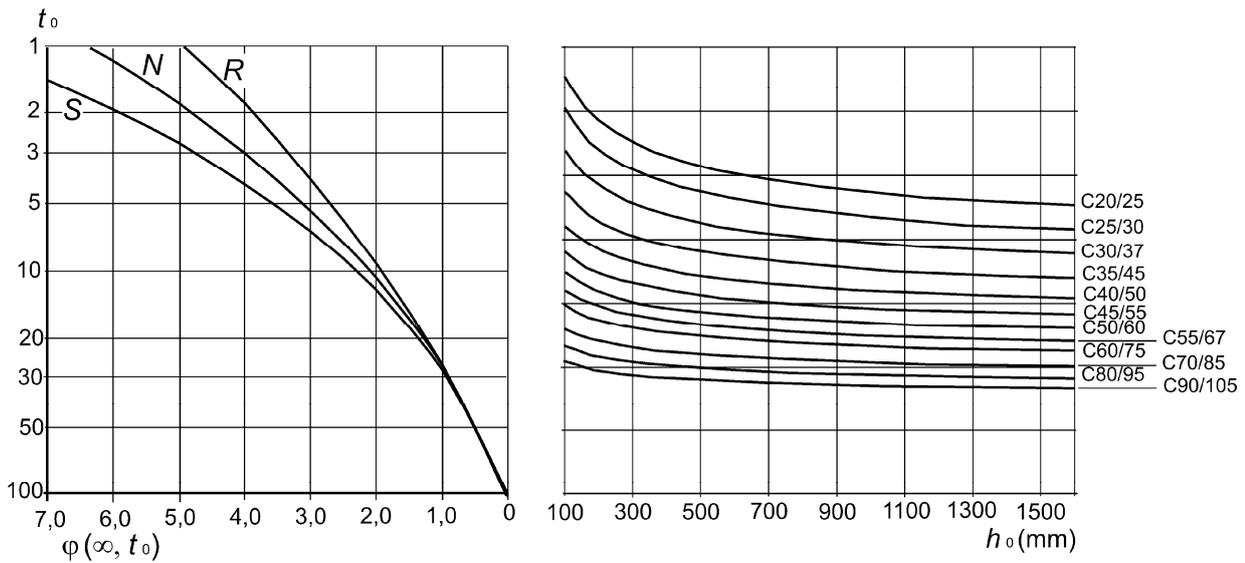
Querschnittsklasse	Querschnittstyp	Grenzwerte für c/t
1	gewalzt (1) oder geschweißt (2)	$c/t \leq 9 \varepsilon$
2		$c/t \leq 14 \varepsilon$
3		$c/t \leq 20 \varepsilon$

Tabelle 3.1 — Nennwerte der Streckgrenze f_y und der Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl

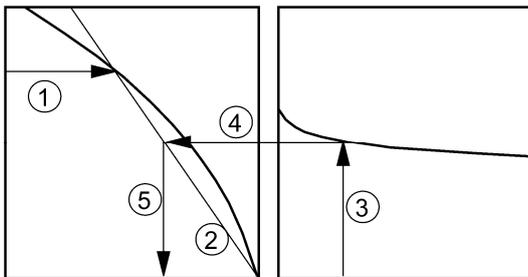
Werkstoffnorm und Stahlsorte	Erzeugnisdicke t mm			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	AC 490 AC	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	AC 490 AC	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Tabelle 3.1 — Festigkeits- und Formänderungskennwerte für Beton

		Betonfestigkeitsklasse																analytische Beziehung
		12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90			
f_{ck}	N/mm ²	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90			
$f_{ck,cube}$	N/mm ²	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105			
f_{cm}	N/mm ²	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$		
f_{ctm}	N/mm ²	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln [1 + (f_{cm}/10)] > C50/60$		
$f_{ctk,0,05}$	N/mm ²	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm}$ 5% Quantil		
$f_{ctk,0,95}$	N/mm ²	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm}$ 95% Quantil		
$E_{cm} \cdot 10^{-3}$	N/mm ²	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 (f_{cm}/10)^{0,3}$		
ε_{c1}	‰	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	Siehe Bild 3.2 [AC] $\varepsilon_{c1} (‰) = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \sqrt{AC}$		
ε_{cu1}	‰	3,5														Siehe Bild 3.2 für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\varepsilon_{cu1} (‰) = 2,8 + 27 [(98 - f_{cm})/100]^4$		
ε_{c2}	‰	2,0														Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\varepsilon_{c2} (‰) = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}$		
ε_{cu2}	‰	3,5														Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\varepsilon_{cu2} (‰) = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$		
η		2,0														für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\eta = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$		
ε_{c3} (‰)	‰	1,75														Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\varepsilon_{c3} (‰) = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50) / 40]$		
ε_{cu3}	‰	3,5														Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} = 50$ N/mm ² $\varepsilon_{cu3} (‰) = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$		

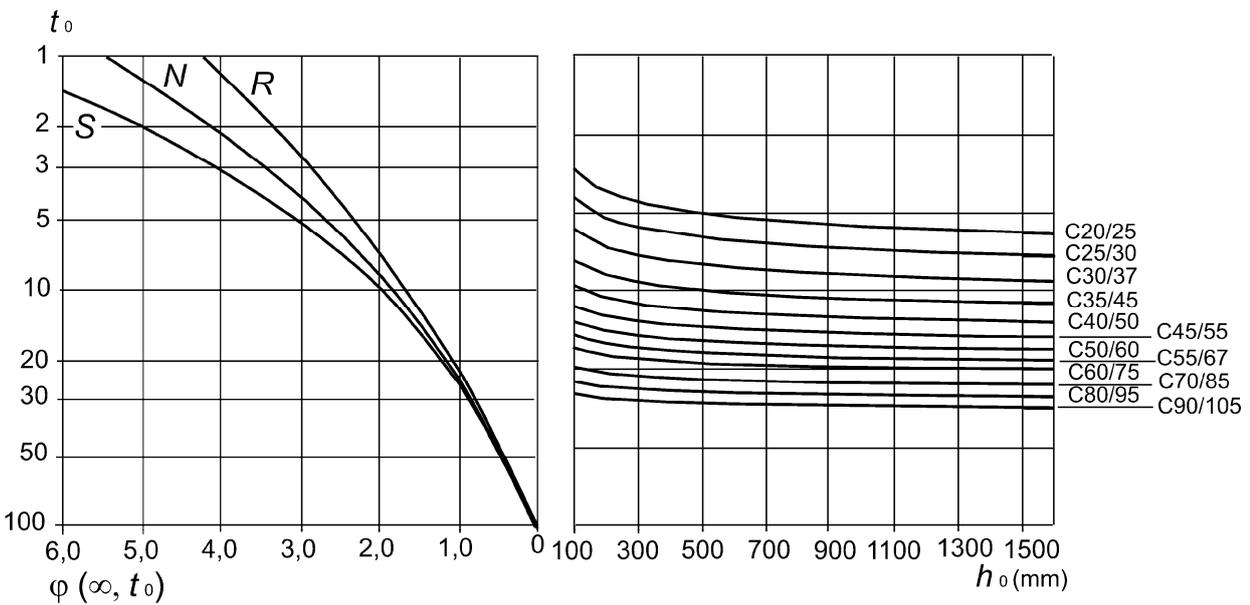


a) trockene Innenräume, relative Luftfeuchte = 50%



ANMERKUNG

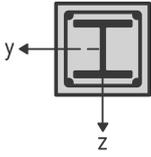
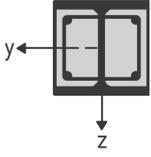
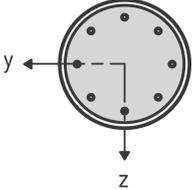
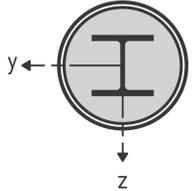
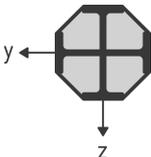
- der Schnittpunkt der Linien 4 und 5 kann auch über dem Punkt 1 liegen
- für $t_0 > 100$ darf $t_0 = 100$ angenommen werden (Tangentenlinie ist zu verwenden)



b) Außenluft, relative Luftfeuchte = 80%

Bild 3.1 — Methode zur Bestimmung der Kriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ für Beton bei normalen Umgebungsbedingungen

Tabelle 6.5 — Knickspannungslinien für Verbundstützen und geometrische Ersatzimperfektionen
(Stich der Vorkrümmung bezogen auf die Stützenlänge L)

Querschnitt	Anwendungsgrenzen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knickspannungslinie	maximaler Stich der Vorkrümmung
vollständig einbetonierte I-Querschnitte 		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
teilweise einbetonierte I-Querschnitte 		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
ausbetonierte kreisförmige und rechteckige Hohlprofile 	$\rho_s \leq 3 \%$	y-y und z-z	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6 \%$	y-y und z-z	b	$L/200$
ausbetonierte Rohre mit zusätzlichen I-Profilen als Einstellprofil 		y-y	b	$L/200$
		z-z	b	$L/200$
teilweise einbetonierte, gekreuzte I-Profile 		y-y und z-z	b	$L/200$

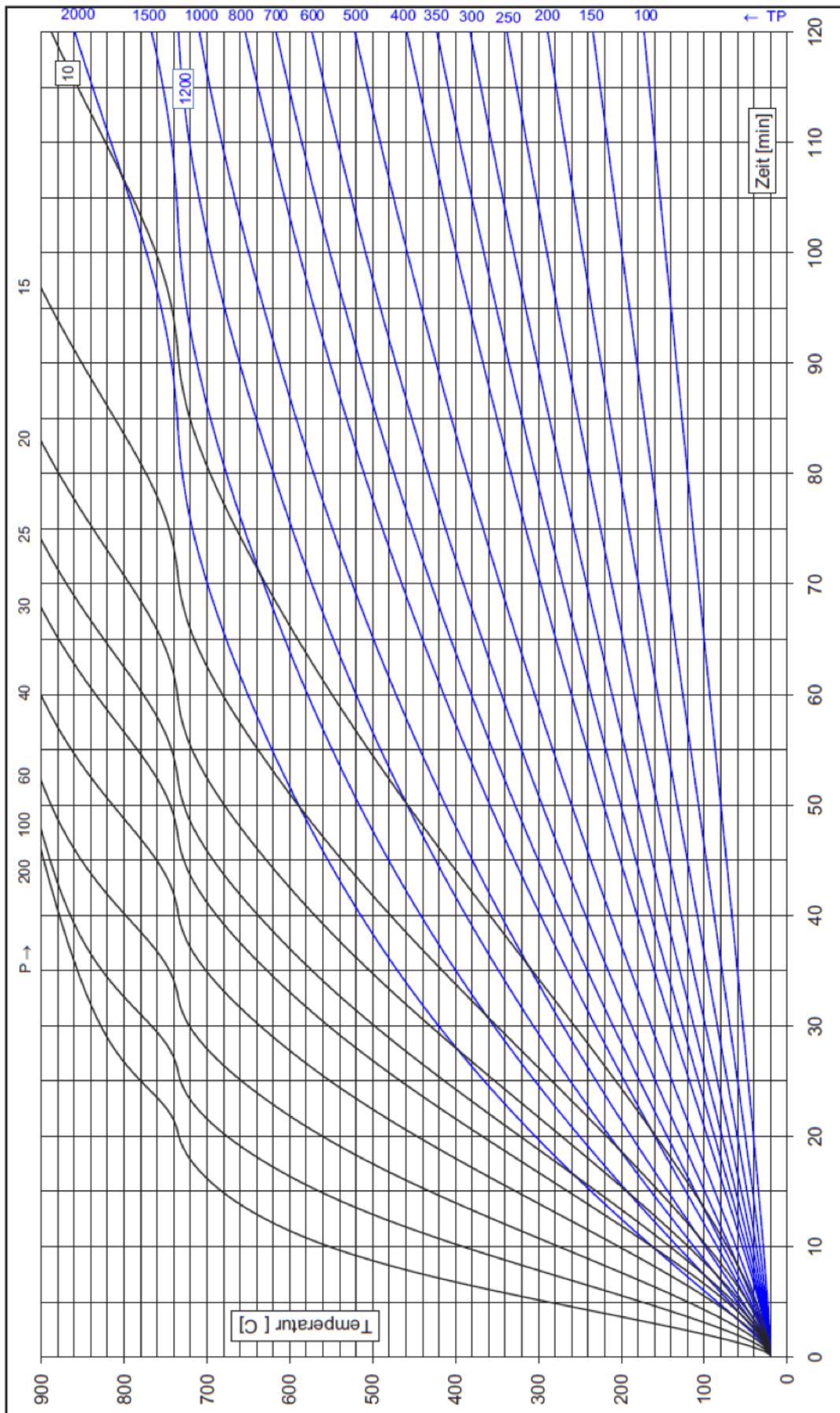


Bild 2: Entwicklung der Stahltemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer (Zeit)
 P = Profilfaktor für ungeschützte Stahlprofile [m⁻¹]
 TP = thermischer Profilfaktor für verkleidete Stahlprofile [W/(m³·K)]