

Vebundkonstruktionen (EC4)

1 Literaturverzeichnis 2

Deutsches Institut für Normung e.V. (Dezember 2010). *DIN EN 1994-1-1; Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). *DIN EN 1994-1-1NA; Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*. Dez 2010: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e.V. (Dez 2010). *DIN EN 1994-1-2/NA; Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*. Berlin : Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e.V. (Dez 2010). *DIN EN 1994-1-2; Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*. Berlin: Beuth Verlag.

Kuhlmann, P. D.-I. (2010). *Stahlbau Kalender 2010*. Berlin: Ernst & Sohn.

2 Einwirkungskombinationen (vereinfacht)

2.1 Grundkombination:

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \gamma_f \cdot S_k + \sum [\gamma_Q \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}]$$

$\gamma_G: [] = 1,35$

$\gamma_Q: [] = 1,5$

$\gamma_f: []$ Teilsicherheitsbeiwert für Schwinden = 1,0

$\Psi_{0,i}: [] \rightarrow$ siehe Tabelle

Hinweis:
Schwinden und Kriechen braucht bei der Schnittgrößenermittlung nicht berücksichtigt werden, wenn Querschnitte der Klasse QK 1 oder QK2 verwendet werden und wenn keine Biegedrillknickgefahr besteht. DIN EN 1994-1-1/5.4.2.2 (7)

2.1.1 Tabelle mit Kombinationsbeiwerten – DIN EN 1990/NA

Einwirkung:	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Nutzlast Kategorie A,B: (Wohn-, Aufenthalts-, Büroräume) Kategorie C,D: (Versammlungsräume, Verkaufsräume) Kategorie E: (Lagerräume)	0,7 0,7 1,0	0,5 0,7 0,9	0,3 0,6 0,8
Verkehrslast Kategorie F: (Fahrzeuggewicht $F \leq 30$ KN) Kategorie G: (Fahrzeuggewicht 30 KN $\leq F \leq 160$ KN) Kategorie H: (Dächer)	0,7 0,7 0	0,7 0,5 0	0,6 0,3 0
Windlasten	0,6	0,2	0
Schneelasten Orte bis zu NN +1000: Orte über NN +1000:	0,5 0,7	0,2 0,5	0 0,2
Sonstige veränderliche Einwirkungen	0,8	0,7	0,5

Verbundträger

3 Bemessungsschnittgrößen

3.1 Schnittgrößen auf Stahlquerschnitt wirkend

Hinweise:

- Einwirkungen die nur auf den Stahlquerschnitt bezogen werden treten nur auf, wenn im Bauzustand keine Hilfsunterstützungen vorhanden sind.
- Einwirkungen auf den Stahlquerschnitt sind das Eigengewicht der Betonplatte und das Eigengewicht des Stahlträgers.
- !! Bei der Schnittgrößenermittlung infolge Eigengewichts ist als Lasteinzugsbreite der Achsabstand der Stahlträger anzusetzen.

3.2 Schnittgrößen auf Verbundquerschnitt wirkend

Hinweise:

- Wenn im Bauzustand keine Hilfsstützen vorhanden sind, bestehen die Einwirkungen die auf den Verbundquerschnitt wirken aus Verkehrslasten, Ausbaulasten und Schwinden.

3.2.1 Lastfall Schwinden

$$N_{sch} = - \epsilon_{cs,\infty} \cdot \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_t \cdot \psi_s} \cdot A_c \quad [KN]$$

$$M_{sch} = N_{sch} \cdot e \quad [KNm]$$

Hinweis:

Die Zwangskraft N_{sch} macht die Schwindverkürzung $\epsilon_{cs,\infty}$ rückgängig. Dabei entstehen im Betongurt Zugspannungen und im Baustahlquerschnitt Druckspannungen.

$\epsilon_{cs,\infty}$: [-] Schwinddehnung, → siehe Anhang
 E_{cm} : [KN/cm²] E-Modul des Betons

C20/25: $E_{cm} = 3000$ C35/45: $E_{cm} = 3400$
C25/30: $E_{cm} = 3100$ C40/50: $E_{cm} = 3500$
C30/37: $E_{cm} = 3300$ C45/55: $E_{cm} = 3600$

$\psi_s = 0,55$ für Schwinden.
 φ_t : [] Kriechzahl (i.d.R mit $t_0 = 1$) → siehe im Anhang
 A_c : [cm²] Betonfläche = $b_{eff} \cdot h_c$
 b_{eff} : [cm] effektive Querschnittsbreite
 h_c : [cm] Höhe des Betongurtes
 e : [m] Hebelarm der Normalkraft N_{sch}
→ Abstand zwischen Schwerachse Beton und Schwerachse des ideellen Gesamtquerschnitts. $e = a_{cs}$
 $z_{i,s}$: Lage des Gesamtschwerpunktes = $z_{i,L}$ für Lastfall Schwinden

4 Nachweis der Querschnittstragfähigkeit Elastisch-Plastisch

4.1 Querkrafttragfähigkeit

Hinweis:

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ist in den folgenden kritischen Schnitten zu führen:

- Auflagerpunkte
- Angriffspunkte von Einzellasten
- Stellen mit Querschnittssprüngen
- Querschnitte mit Stegöffnungen und Durchbrüchen in Betongurten

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad [\text{KN}]$$

Hinweise:

- Querkrafttragfähigkeit des Betongurtes wird nicht angesetzt.
- Kammerbeton kann auf die Querkrafttragfähigkeit angerechnet werden.

A_{vz} : $[\text{cm}^2]$ wirksame Schubfläche, siehe Anhang
gewalzte I-Profile: siehe Anhang
geschweißte I-Profile: $A_{vz} = \eta \cdot h_w \cdot t_w$ ($\eta = 1,0$)
 f_y : $[\text{KN/cm}^2]$ Streckgrenze
S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)
 γ_{M0} : $[\cdot]$ 1,0

4.1.1 Nachweis gegen Schubbeulen:

Kein Kammerbeton:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \cdot \epsilon \rightarrow \text{kein Nachweis erforderlich}$$

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \epsilon \rightarrow \text{Nachweis erforderlich, siehe DIN EN 1993-1-5}$$

h_w : $[\text{mm}]$ Steghöhe

t_w : $[\text{mm}]$ Stegbreite

$$\epsilon: [\cdot] \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

f_y : $[\text{KN/cm}^2]$ Streckgrenze

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$
(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

Mit Kammerbeton:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 124 \cdot \epsilon \rightarrow \text{kein Nachweis erforderlich}$$

$$\frac{h_w}{t_w} > 124 \cdot \epsilon \rightarrow \text{Nachweis erforderlich, siehe DIN EN 1993-1-5}$$

4.2 Momenten – Querkraft – Interaktion

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 0,5$$

\rightarrow Der Einfluss der Querkraft auf das Grenzmoment muss nicht berücksichtigt werden

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} > 0,5$$

\rightarrow Momenten-Querkraft-Interaktion muss berücksichtigt werden. Berücksichtigung durch Abminderung der Streckgrenze mit einem Abminderungsfaktor:

$M_{pl,y,Rd}$: siehe Ermittlung plastische Biegetragfähigkeit

A_{vz} : $[\text{cm}^2]$ wirksame Schubfläche, siehe Anhang
gewalzte I-Profile: siehe Anhang
geschweißte I-Profile: $A_{vz} = \eta \cdot h_w \cdot t_w$ ($\eta = 1,0$)

f_y : $[\text{KN/cm}^2]$ charakteristische Streckgrenze
S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$
(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

ρ : $[\cdot]$ Beiwert zur Berücksichtigung des Querkrafeinflusses auf die Momententragsfähigkeit

$$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5: \rho = 0$$

$$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5: \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

γ_{M0} : $[\cdot]$ 1,0

4.3 Nachweis der Momententrägfähigkeit

Hinweise:

- Der Nachweis der Momententrägfähigkeit ist an den Stellen extremer Biegemomente zu führen.
- Bei Zweifeldträgern ist der Nachweis einmal für das Endfeld und einmal für das Stützfeld zu führen.

4.3.1 Mittragende Breite des Betongurtes (DIN EN 1994-1-1: 2010-12 – 5.4.1.2)

$$b_{ei} = \min \left\{ \frac{L_e}{8}, b_i \right\}$$

Feldbereich und Zwischenauflager:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei} \text{ [m]}$$

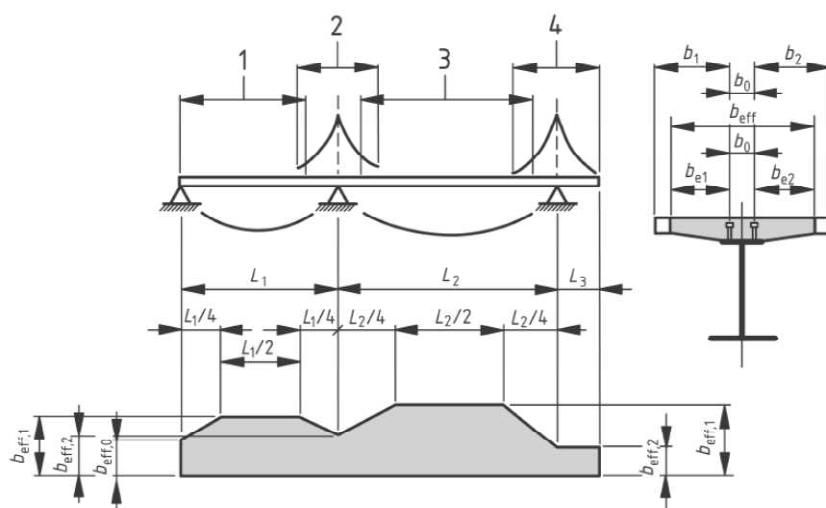
Endauflager:

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i \cdot b_{ei} \text{ [m]}$$

L_e : [m] äquivalente Stützweite des Feldes
Mittelfeld: $L_e = 0,70 \cdot L$
Stützfeld: $L_e = 0,25 \cdot (L_1 + L_2)$
Endfeld: $L_e = 0,85 \cdot L$
Kragfeld: $L_e = 2 \cdot L_3$

L : [m] Stützweite des Feldes
 L_1 : [m] Stützweite des Feldes links vom Auflager
 L_2 : [m] Stützweite des Feldes rechts vom Auflager
 L_3 : [m] Länge des Kragarms

b_i : [m] physikalisch vorhandene Breite
 b_{ei} : [m] mittragende Breite der Teilgurte
 b_0 : [m] Achsabstand zwischen den äußeren Dübelreihen
bei nur einer Dübelreihe: $b_0 = 0$
 β_i : $0,55 + 0,025 \cdot \frac{L_e}{b_{ei}} \leq 1,0$



Legende

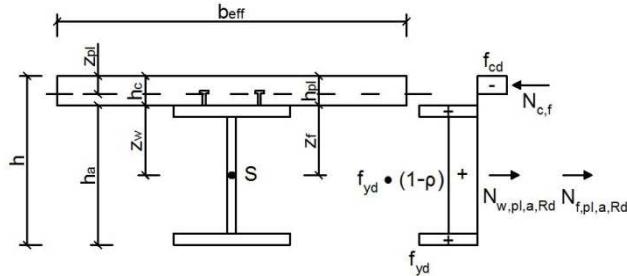
- 1 $L_e = 0,85 L_1$ für $b_{eff,1}$
2 $L_e = 0,25(L_1 + L_2)$ für $b_{eff,2}$

- 3 $L_e = 0,70 L_2$ für $b_{eff,1}$
4 $L_e = 2 L_3$ für $b_{eff,2}$

Bild 5.1 — Äquivalente Stützweiten zur Ermittlung der mittragenden Gurtbreite

4.3.2 Plastische Biegetragfähigkeit bei vollständiger Verdübelung

4.3.2.1 Positives Moment - Plastische Nulllinie im Beton



$$N_{c,f} = b_{eff} \cdot z_{pl} \cdot f_{c,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$$

$$N_{f,pl,a,Rd} = (A - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$$

$$z_{pl} = \frac{A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) + (A - A_{vz}) \cdot f_{y,d}}{b_{eff} \cdot f_{cd}} \leq h_c$$

$$M_{pl,Rd} = N_{w,pl,a,Rd} \cdot (z_w + h_{pl} - \frac{z_{pl}}{2})$$

$$+ N_{f,pl,a,Rd} \cdot (z_f + h_{pl} - \frac{z_{pl}}{2}) \text{ [KNm]}$$

Dimensionierung Stahlträger:

$$A_a = \frac{M_{Ed}}{f_{y,d} \cdot (z_a + h_{pl} - \frac{z_{pl}}{2})} \text{ [cm}^2]$$

$$\text{mit } \frac{z_{pl}}{2} = \frac{A_a \cdot f_{y,d}}{2 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}}$$

Hinweise:

- Alle Formeln überprüft und korrekt.

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers

A_f : [cm²] Querschnittsfläche der beiden Flansche = $A_{f,o} + A_{f,u}$

h_a : [cm] Höhe des Stahlträgers

h_{pl} : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_c : [cm] Höhe Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

b_{eff} : [cm] Mittragende Breite des Betongurtes, siehe oben

z_w : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_f : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_f = \frac{\sum A_{i,f} \cdot z_{i,f}}{A_{i,ges}}$

z_{pl} : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$

S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

f_{cd} : [KN/cm²] Zylinderdrukfestigkeit des Betons ($\alpha_c = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$)

C20/25: $f_{cd} = 1,13$

C30/37: $f_{cd} = 1,7$

C40/50: $f_{cd} = 2,27$

C50/60: $f_{cd} = 2,83$

C60/75: $f_{cd} = 3,40$

C25/30: $f_{cd} = 1,42$

C35/45: $f_{cd} = 1,98$

C45/55: $f_{cd} = 2,55$

C55/67: $f_{cd} = 3,11$

C70/85: $f_{cd} = 3,97$

ρ : [] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkraefteinflusses auf die Momententrägfähigkeit

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5$: $\rho = 0$

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5$: $\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$

4.3.2.2 Positives Moment – Plastische Nulllinie im Obergurt des Stahlträgers

	$N_{c,f} = b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{cd} \text{ [KN]}$ $N_{D,pl,a,Rd} = 2 \cdot (z_{pl} - h_{pl}) \cdot b_a \cdot f_{yd} \text{ [KN]}$ $N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$ $N_{f,pl,a,Rd} = (A_a - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$ $N_{s,Rd} = A_s \cdot f_{sd} \text{ [KN]}$ $z_{pl} = h_{pl} + \frac{N_{w,pl,a,Rd} + N_{f,pl,a,Rd} + N_{s,Rd} - N_{c,f}}{2 \cdot b_a \cdot f_{yd}}$ $M_{pl,Rd} = N_{w,pl,a,Rd} \cdot \left(z_w + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) + N_{f,pl,a,Rd} \cdot \left(z_f + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) + N_{s,Rd} \cdot \left(z_s + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) - N_{D,pl,a,Rd} \cdot \left(\frac{z_{pl} - h_{pl}}{2} + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) \text{ [KNm]}$
	<p>Hinweise:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Summe aller Momente um Schwerachse des Betongurtes • alle Formeln korrekt

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

A_{vz} : [cm²] Querschnittsfläche vom Steg des Stahlträgers, siehe Anhang

A_s : [cm²] Querschnittsfläche der Bewehrung

h_{pl} : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_p : [cm] Profilblechhöhe ohne Berücksichtigung von Noppen

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

b_{eff} : [cm] Mittragende Breite des Betongurtes, siehe oben

b_a : [cm] Breite des Stahlprofils, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

z_w : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_i : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_i = \frac{\sum A_{i,f} \cdot Z_{i,f}}{A_{f,ges}}$

z_s : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der Betonstahlbewehrung

z_{pl} : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand gemessen

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$

S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$

$f_{c,d}$: [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\alpha_c = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$)

C20/25: $f_{c,d} = 1,13$

C30/37: $f_{c,d} = 1,7$

C40/50: $f_{c,d} = 2,27$

C50/60: $f_{c,d} = 2,83$

C60/75: $f_{c,d} = 3,40$

C25/30: $f_{c,d} = 1,42$

C35/45: $f_{c,d} = 1,98$

C45/55: $f_{c,d} = 2,55$

C55/67: $f_{c,d} = 3,11$

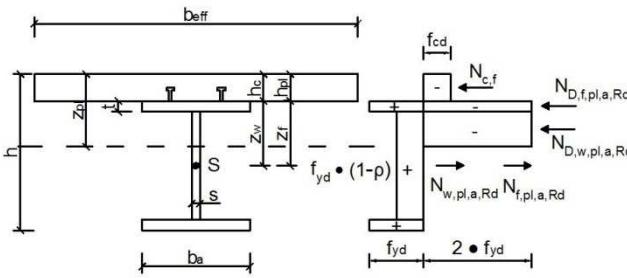
C70/85: $f_{c,d} = 3,97$

ρ : [] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkraefteinflusses auf die Momententragfähigkeit

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5$: $\rho = 0$

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5$: $\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$

4.3.2.3 Positives Moment – Plastische Nulllinie im Steg des Stahlträgers



$$N_{c,f} = b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{c,d} \quad [KN]$$

$$N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$$

$$N_{f,pl,a,Rd} = (A_a - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \quad [KN]$$

$$N_{D,f,pl,a,Rd} = 2 \cdot t_f \cdot b_a \cdot f_{y,d} \quad [KN]$$

$$N_{D,w,pl,a,Rd} = 2 \cdot s \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \cdot (z_{pl} - h_{pl} - t_f) \quad [KN]$$

$$z_{pl} = h_{pl} + t_f + \frac{N_{w,pl,a,Rd} + N_{f,pl,a,Rd} - N_{c,f} - N_{D,f,pl,a,Rd}}{2 \cdot s \cdot f_{yd} \cdot (1 - p)} \quad [cm]$$

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{w,pl,a,Rd} \cdot \left(z_w + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) + N_{f,pl,a,Rd} \cdot \left(z_f + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \right) \\
 & - N_{D,w,pl,a,Rd} \cdot \left(\frac{z_{pl}}{2} + \frac{h_{pl}}{2} + \frac{t_f}{2} - \frac{h_c}{2} \right) \\
 & - N_{D,f,pl,a,Rd} \cdot \frac{t_f}{2} + h_{pl} - \frac{h_c}{2} \quad [\text{KNm}]
 \end{aligned}$$

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff

A_{vz} : [cm²] Querschnittsfläche vom Steg des Stahlträgers, siehe Anhang

h_a : [cm] Höhe des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_{pl} : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_p : [cm] Profilblechhöhe ohne Berücksichtigung von Noppen

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

b_{eff} : [cm] Mittragende Breite des Betongurtes, siehe oben

t_f : [cm] Höhe des oberen Trägerflansches

s: [cm] Stegbreite

Zw: [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_f : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_f = \frac{\sum A_{f,i} \cdot z_{i,f}}{A_{f,ges}}$

Zs: [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der Betonstahlbewehrung

z_p : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand gemessen

$f_{v,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_v \equiv 23.5$ S355: $f_v \equiv 35.5$

S275: $f_v = 27.5$ S450: $f_v = 44.0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

f_{ed} : [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\alpha_s = 0.85$, $\gamma_s = 1.5$)

$$C20/25: f_{c,d} = 1,13 \quad C30/37: f_{c,d} = 1,7 \quad C40/50: f_{c,d} = 2,27 \quad C50/60: f_{c,d} = 2,83 \quad C60/75: f_{c,d} = 3,40$$

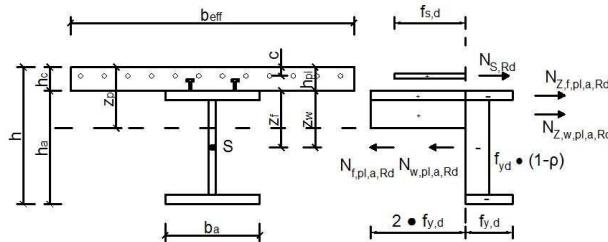
C20/23; $f_{\text{c,d}} = 1, 15$	C30/37; $f_{\text{c,d}} = 1, 1$	C40/50; $f_{\text{c,d}} = 2, 27$	C50/60; $f_{\text{c,d}} = 2, 63$	C60/70; $f_{\text{c,d}} = 3, 40$
C25/30; $f_{\text{c,d}} = 1, 42$	C35/45; $f_{\text{c,d}} = 1, 98$	C45/55; $f_{\text{c,d}} = 2, 55$	C55/67; $f_{\text{c,d}} = 3, 11$	C70/85; $f_{\text{c,d}} = 3, 97$

o [1] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkrafteinflusses auf die Momententrägfähigkeit:

$$V_{Ed}/V_{Pl} \leq 0.5; \rho = 0$$

$$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} = 0,5: \rho = 0$$

4.3.2.4 Negatives Moment – Plastische Nulllinie im Stahlträgersteg



$$N_{s,Rd} = A_s \cdot f_{s,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$$

$$N_{f,pl,a,Rd} = (A_a - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{z,f,pl,a,Rd} = 2 \cdot t_f \cdot b_a \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{z,w,pl,a,Rd} = 2 \cdot s \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \cdot (z_{pl} - h_{pl} - t_f) \text{ [KN]}$$

$$z_{pl} = h_{pl} + t_f + \frac{N_{f,pl,a,Rd} + N_{w,pl,a,Rd} - N_{s,Rd} - N_{z,f,pl,a,Rd}}{2 \cdot s \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho)} \text{ [cm]}$$

(Hinweis: falls die NL nach der 1. Annahme nicht im Steg liegt, erneuter Versuch mit NL im Flansch)

$$M_{pl,Rd} = N_{z,f,pl,a,Rd} \cdot \left(h_{pl} + \frac{t_f}{2} - c \right) + N_{z,w,pl,a,Rd} \cdot \left(\frac{z_{pl} + h_{pl} + t_f}{2} - c \right) - N_{f,pl,a,Rd} \cdot (z_f + h_{pl} - c) - N_{w,pl,a,Rd} \cdot (z_w + h_{pl} - c) \text{ [KNm]}$$

Hinweise:

- b_{eff} muss neu berechnet werden
- Summe aller Momente um Schwerachse des Betonbaustahls. Alternativ würde auch die Summe aller Momente um Schwerachse des Verbundquerschnittes funktionieren.
- Formeln selber hergeleitet, sind aber identisch mit den Formeln aus dem Skript.

A_s : [cm²] Stahlbetonquerschnittsfläche

A_{vz} : [cm²] Querschnittsfläche vom Steg des Stahlträgers, siehe Anhang

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_a : [cm] Höhe des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_p : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_p : [cm] Profilblechhöhe ohne Berücksichtigung von Noppen

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

b_a : [cm] Breite des Stahlprofils, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

z_w : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_f : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_f = \frac{\sum A_{i,f} \cdot z_{i,f}}{A_{f,ges}}$

z_{pl} : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand gemessen

t_f : [cm] Dicke des oberen Trägerflansches

s : [cm] Dicke des Trägersteges

c : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Betonquerschnittes und Bewehrungssachse

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$

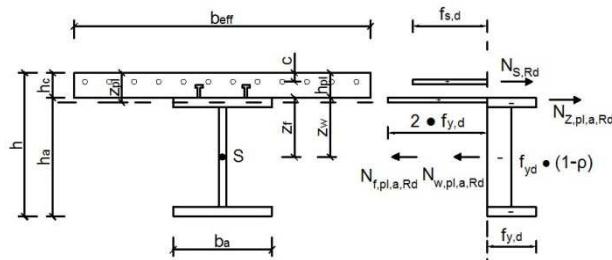
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

ρ : [] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkrafteinflusses auf die Momententragfähigkeit

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5$: $\rho = 0$

$$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5: \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2 \quad V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5: \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

4.3.2.5 Negatives Moment – Plastische Nulllinie im Obergurt des Stahlträgers



$$N_{s,Rd} = A_s \cdot f_{s,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$$

$$N_{f,pl,a,Rd} = (A_a - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{z,pl,a,Rd} = 2 \cdot b_a \cdot f_{y,d} \cdot (z_{pl} - h_{pl}) \text{ [KN]}$$

$$z_{pl} = h_{pl} + \frac{N_{f,pl,a,Rd} + N_{w,pl,a,Rd} - N_{s,Rd}}{2 \cdot b_a \cdot f_{y,d}} \text{ [cm]}$$

$$M_{pl,Rd} = N_{z,pl,a,Rd} \cdot \left(\frac{z_{pl}}{2} + \frac{h_{pl}}{2} - c \right) - N_{f,pl,a,Rd} \cdot (z_f + h_{pl} - c) - N_{w,pl,a,Rd} \cdot (z_w + h_{pl} - c) \text{ [KNm]}$$

Hinweise:

- Summe aller Momente um Schwerachse des Baustahls.
- z_{pl} wurde durch die Summe aller horizontalen Kräfte gebildet.

A_s : [cm²] Stahlbetonquerschnittsfläche

A_{vz} : [cm²] Querschnittsfläche vom Steg des Stahlträgers, siehe Anhang

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h : [cm] Höhe des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_{pl} : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_p : [cm] Profilblechhöhe ohne Berücksichtigung von Noppen

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

b_a : [cm] Breite des Stahlprofils, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

z_w : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_f : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_f = \frac{\sum A_{i,f} \cdot Z_{i,f}}{A_{f,ges}}$

z_{pl} : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand gemessen

c : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Betonquerschnittes und Bewehrungssachse

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$

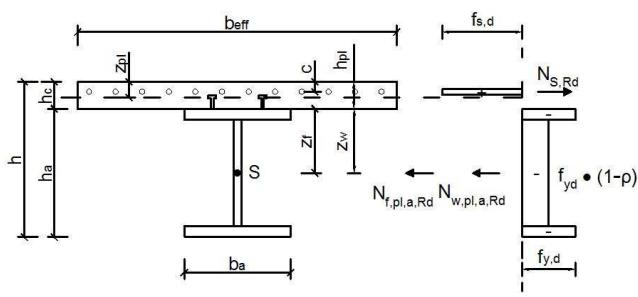
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

ρ : [] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkraefteinflusses auf die Momententragfähigkeit

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5$: $\rho = 0$

$$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} > 0,5: \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

4.3.2.6 Negatives Moment – Plastische Nulllinie im Betongurt



$$N_{s,Rd} = A_s \cdot f_{s,d} \text{ [KN]}$$

$$N_{w,pl,a,Rd} = A_{vz} \cdot f_{y,d} \cdot (1 - \rho) \text{ [KN]}$$

$$N_{f,pl,a,Rd} = (A_a - A_{vz}) \cdot f_{y,d} \text{ [KN]}$$

$$M_{pl,Rd} = N_{f,pl,a,Rd} \cdot (z_f + h_{pl} - c) + N_{w,pl,a,Rd} \cdot (z_w + h_{pl} - c) \text{ [KNm]}$$

Hinweise:

- Summe aller Momente um Schwerachse des Baustahls.

A_s : [cm²] Stahlbetonquerschnittsfläche

A_{vz} : [cm²] Querschnittsfläche vom Steg des Stahlträgers, siehe Anhang

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_a : [cm] Höhe des Stahlträgers, siehe Schneider Bautabellen 8.161 ff.

h_p : [cm] Gesamthöhe der Platte

h_p : [cm] Profilblechhöhe ohne Berücksichtigung von Noppen

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

z_w : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt des Stahlträgersteges

z_f : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Stahlträgers und Schwerpunkt der beiden Flansche, $z_f = \frac{\sum A_{f,f} \cdot z_{f,f}}{A_{f,ges}}$

z_{pl} : [cm] Lage der plastischen Nulllinie vom oberen Querschnittsrand gemessen

c : [cm] Abstand zwischen Oberkante des Betonquerschnittes und Bewehrungssachse

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$

S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

ρ : [] Beiwert zur Berücksichtigung des Querkraefteinflusses auf die Momententrägfähigkeit

$V_{Ed}/V_{pl,z,Rd} \leq 0,5$: $\rho = 0$

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

4.3.3 Plastische Biegeträgfähigkeit bei teilweiser Verdübelung

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \cdot \frac{N_c}{N_{c,f}} \text{ [KNm]}$$

$M_{pl,a,Rd}$: [KNm] vollplastische Momententrägfähigkeit des Baustahlquerschnitts

$M_{pl,Rd}$: [KNm] vollplastische Momententrägfähigkeit des Verbundquerschnitts bei vollständiger Verdübelung

$N_{c,f}$: [KN] Druckkraft bei vollständiger Verdübelung
= $b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{c,d}$ [KN]

N_c : [KN] Druckkraft die durch die vorhandenen Dübel übertragbar ist.

5 Nachweis der Querschnittstragfähigkeit Elastisch-Elastisch

5.1 Reduktionszahlen

$$n_L = n_0 \cdot (1 + \Phi_t \cdot \Psi_L) \quad [\cdot]$$

Hinweis:

- Die Reduktionszahl n_L ist für jeden Lastfall (Verkehr, Ausbaulast, Schwinden) zu ermitteln. Für den Lastfall Eigengewicht nur, wenn der Träger im Bauzustand unterstützt wird.

$n_0: [\cdot]$ Reduktionszahl für kurzzeitige Beanspruchung $= \frac{E_a}{E_{cm}} \quad [\cdot]$

$E_a: [\text{KN}/\text{cm}^2]$ E-Modul des Baustahls $= 21.000$

$E_{cm}: [\text{KN}/\text{cm}^2]$ E-Modul des Betons

C20/25: $E_{cm} = 3000 \quad C35/45: E_{cm} = 3400$

C25/30: $E_{cm} = 3100 \quad C40/50: E_{cm} = 3500$

C30/37: $E_{cm} = 3300 \quad C45/55: E_{cm} = 3600$

$\Phi_t: [\cdot]$ Kriechzahl, \rightarrow siehe im Anhang

$\Psi_L: [\cdot]$ Kriechbeiwert

Kurzzeitbeanspruchung (z.B. Verkehrslast): $\Psi_L = 0$

ständige Beanspruchung (z.B. Ausbaulast): $\Psi_L = 1,1$

Schwinden: $\Psi_L = 0,55$

Eingeprägte Verformung: $\Psi_L = 1,5$

5.2 Ideelle Querschnittswerte (Zeitpunkt t=0 \rightarrow L=0 ; Zeitpunkt t=X \rightarrow L=X)

5.2.1 Im Feldbereich

$$A_{i,L} = A_a + A_{c,L} \quad [\text{cm}^2]$$

$$a = z_a + h_{pl} - 0,5 \cdot h_c$$

$$a_{c,L} = \frac{A_a \cdot a}{A_{i,L}}$$

$$a_{a,L} = a - a_{c,L}$$

$$I_{i,L} = I_a + A_a \cdot a_{a,L}^2 + A_{c,L} \cdot a_{c,L}^2 + I_{c,L} \quad [\text{cm}^4]$$

Hinweise:

- Das Indize i steht für ideell.
- Das Indize L steht für Lastfall.
- Die Querschnittswerte müssen für jeden Lastfall (L) ermittelt werden.
- Die ideellen Querschnittswerte stehen für einen fiktiven Querschnitt aus reinem Baustahl
- Die Querschnittswerte sind von den Lastfällen abhängig. Sie müssen deshalb für jeden Lastfall separat berechnet werden.
- Die Schwerelinie des Verbundquerschnitts entspricht der Schwerelinie des ideellen Querschnitts
- Die Lage der Schwerelinie des ideellen Querschnitts ist für jeden Lastfall unterschiedlich.

$A_a: [\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des Baustahlquerschnittes

$A_{c,L}: [\text{cm}^2]$ reduzierte Betonquerschnittsfläche $= \frac{A_c}{n_L}$

$A_c: [\text{cm}^2]$ Betonquerschnittsfläche, $A_c = b_{eff} \cdot h_c$

$I_a: [\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Stahlprofils

$I_{c,L}: [\text{cm}^4]$ Reduziertes Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Betonquerschnittes, $= \frac{I_c}{n_L}$

$I_c: [\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment 2. Grades des

Betonquerschnittes, $I_c = \frac{b_{eff} \cdot h_c^3}{12}$

$h_c: [\text{cm}]$ Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

$a: [\text{cm}]$ Abstand zwischen Schwerelinie des Betongurtes und Schwerelinie des Stahlprofils.

$a_{c,L}: [\text{cm}]$ Abstand zwischen Schwerpunkt des ideellen Gesamtquerschnittes und Schwerpunkt des ideellen Betonquerschnittes.

$a_{a,L}: [\text{cm}]$ Abstand zwischen Schwerpunkt des ideellen Gesamtquerschnittes und Schwerpunkt des Stahlprofilquerschnittes.

$n_L: [\cdot]$ Reduktionszahl, \rightarrow siehe oben

5.2.2 Im Stützbereich

$$A_{st} = A_a + A_s \quad [\text{cm}^2]$$

$$a = z_a + h_{pl} - c$$

$$z_{st} = \frac{A_a \cdot a}{A_{st}} \quad [\text{cm}]$$

$$I_{st} = I_a + A_s \cdot z_{st} + A_a \cdot (a - z_{st}) \quad [\text{cm}^4]$$

$A_a: [\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des Baustahlquerschnittes

$A_s: [\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des Betonstahls

$I_a: [\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Stahlprofils

$z_{st}: [\text{cm}]$ Lage des Gesamtschwerpunktes, bezogen auf die Schwerelinie des Betonstabstahles.

$a: [\text{cm}]$ Abstand zwischen Schwerelinie der Betonstahlbewehrung und der Schwerelinie des Stahlprofils.

$c: [\text{cm}]$ Abstand zwischen OK Betongurt und der Schwerelinie der Betonstahlbewehrung.

5.3 Spannungsermittlung

5.3.1 Spannungen auf Stahlquerschnitt wirkend

5.3.1.1 Spannungen aus Eigengewicht Betonplatte & Stahlträger

Hinweise:

- Spannungen die nur auf den Stahlquerschnitt wirken, treten nur auf wenn der Verbundträger im Bauzustand nicht unterstützt wird.

Spannungen im Stahl:

$$\sigma_{a,u} = \pm \frac{|N|}{A_a} \pm \frac{|M| \cdot 100}{I_a} \cdot |z_{a,u}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$$\sigma_{a,o} = \pm \frac{|N|}{A_a} \pm \frac{|M| \cdot 100}{I_a} \cdot |z_{a,o}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$z_{a,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Stahlprofils und unterem Querschnittsrand des Stahlprofils.

$z_{a,o}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Stahlprofils und oberem Querschnittsrand des Stahlprofils.

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlprofils

I_a : [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des Stahlprofils

5.3.2 Spannungen auf Verbundquerschnitt wirkend

5.3.2.1 Verkehrslasten, Ausbaulasten, Eigengewicht (bei Unterstützung im Bauzustand)

Spannungen im Stahl:

$$\sigma_{a,L,o} = \pm \frac{|N_L|}{A_{i,L}} \pm \frac{|M_L| \cdot 100}{I_{i,L}} \cdot |z_{i,a,o}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$$\sigma_{a,L,u} = \pm \frac{|N_L|}{A_{i,L}} \pm \frac{|M_L| \cdot 100}{I_{i,L}} \cdot |z_{i,a,u}| \text{ [KN/cm}^2]$$

Spannungen im Beton:

$$\sigma_{c,L,o} = \pm \frac{|N_L|}{A_{i,L} \cdot n_L} \pm \frac{|M_L| \cdot 100}{I_{i,L} \cdot n_L} \cdot |z_{i,c,o}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$$\sigma_{c,L,u} = \pm \frac{|N_L|}{A_{i,L} \cdot n_L} \pm \frac{|M_L| \cdot 100}{I_{i,L} \cdot n_L} \cdot |z_{i,c,u}| \text{ [KN/cm}^2]$$

Hinweise:

- Die Spannungen im Beton ergeben sich durch Reduktion der berechneten Stahlspannungen mit der Reduktionszahl n_L .

N_L : [KN] Einwirkende Normalkraft des Lastfalles L

M_L : [KNm] Einwirkendes Moment des Lastfalles L

$A_{i,L}$: [cm²] ideelle Querschnittsfläche, → siehe oben

$I_{i,L}$: [cm⁴] ideelles Flächenträgheitsmoment, → siehe oben

n_L : Reduktionszahl, → siehe oben

$z_{i,a,o}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und oberen Querschnittsrand des Stahlträgers. $z_{i,a,o} = a_{c,L} - 0,5 \cdot h_c - h_p$

h_c : [cm] Höhe der Betonplatte, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

h_p : [cm] Noppenhöhe bei Profilblechen

$z_{i,a,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und dem unteren Querschnittsrand des Stahlträgers. $z_{i,a,u} = a_{c,L} - z_a + a_{a,L}$

$a_{a,L}$: [cm] Gesamthöhe des Stahlprofils

$z_{i,c,o}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Stahlprofils und oberem Querschnittsrand des Stahlträgers.

$a_{a,L}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und Schwerelinie des Stahlprofilquerschnittes. → siehe oben

$z_{i,c,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und oberem Querschnittsrand des Betons. $z_{i,c,u} = a_{c,L} + 0,5 \cdot h_c$

$z_{i,c,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und unterem Querschnittsrand des Betons. $z_{i,c,u} = a_{c,L} - 0,5 \cdot h_c$

5.3.2.2 Schwinden

Spannungen im Stahl:

$$\sigma_{a,S,o} = - \frac{|N_{Sch}|}{A_{i,S}} - \frac{|M_{Sch}| \cdot 100}{I_{i,S}} \cdot |z_{i,a,o}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$$\sigma_{a,S,u} = - \frac{|N_{Sch}|}{A_{i,S}} + \frac{|M_{Sch}| \cdot 100}{I_{i,S}} \cdot |z_{i,a,u}| \text{ [KN/cm}^2]$$

Spannungen im Beton:

$$\sigma_{c,S,o} = + \frac{|N_{Sch}|}{A_c} - \frac{|N_{Sch}|}{A_{i,S} \cdot n_s} - \frac{|M_{Sch}| \cdot 100}{I_{i,S} \cdot n_s} \cdot |z_{i,c,o}| \text{ [KN/cm}^2]$$

$$\sigma_{c,S,u} = + \frac{|N_{Sch}|}{A_c} - \frac{|N_{Sch}|}{A_{i,S} \cdot n_s} - \frac{|M_{Sch}| \cdot 100}{I_{i,S} \cdot n_s} \cdot |z_{i,c,u}| \text{ [KN/cm}^2]$$

Hinweis:

Die Zwangskraft N_{sch} macht die Schwindverkürzung $\epsilon_{cs,\infty}$ rückgängig. Dabei entstehen im Betongurt Zugspannungen und im Baustahlquerschnitt Druckspannungen.



N_{sch} : [KN] Einwirkende Normalkraft durch den Lastfall Schwinden.

M_{sch} : [KNm] Einwirkendes Moment durch den Lastfall Schwinden.

$A_{i,S}$: [cm²] ideelle Querschnittsfläche, → siehe oben

$I_{i,S}$: [cm⁴] ideelles Flächenträgheitsmoment, → siehe oben

$z_{i,a,o}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und oberen Querschnittsrand des Stahlträgers. $z_{i,a,o} = a_{c,s} - 0,5 \cdot h_c - h_p$

h_c : [cm] Höhe der Betonplatte, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

h_p : [cm] Noppenhöhe bei Profilblechen

n_s : Reduktionszahl, → siehe oben

$z_{i,a,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und dem unteren Querschnittsrand des Stahlträgers. $z_{i,a,u} = a_{c,s} - z_a + a_{a,s}$

$a_{a,s}$: [cm] Gesamthöhe des Stahlprofils

$z_{i,c,o}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Stahlprofils und oberem Querschnittsrand des Stahlträgers.

$a_{a,s}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und Schwerelinie des Stahlprofilquerschnittes. → siehe oben

$z_{i,c,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und oberem Querschnittsrand des Betons. $z_{i,c,u} = a_{c,s} + 0,5 \cdot h_c$

$z_{i,c,u}$: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des ideellen Verbundquerschnittes und unterem Querschnittsrand des Betons. $z_{i,c,u} = a_{c,s} - 0,5 \cdot h_c$

5.4 Nachweis der elastischen Querschnittstragfähigkeit - Nachweis der Spannungen

5.4.1 Querkrafttragfähigkeit

Hinweis:

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ist in den folgenden kritischen Schnitten zu führen:

- Auflagerpunkte
- Angriffspunkte von Einzellasten
- Stellen mit Querschnittssprüngen
- Querschnitte mit Stegöffnungen und Durchbrüchen in Betongurten

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \text{ [KN]}$$

Hinweise:

- Querkrafttragfähigkeit des Betongurtes wird nicht angesetzt.
- Kammerbeton kann auf die Querkrafttragfähigkeit angerechnet werden.

A_{vz} : [cm²] wirksame Schubfläche, siehe Anhang
gewalzte I-Profile: siehe Anhang
geschweißte I-Profile: $A_{vz} = \eta \cdot h_w \cdot t_w$ ($\eta = 1,0$)

f_y : [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)
 γ_{M0} : [] 1,0

5.4.2 Nachweis gegen Schubbeulen:

Kein Kammerbeton:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{kein Nachweis erforderlich}$$

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Nachweis erforderlich, siehe DIN EN 1993-1-5}$$

h_w : [mm] Steghöhe
 t_w : [mm] Stegbreite

$$\varepsilon: [] \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

f_y : [KN/cm²] Streckgrenze
S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$
(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

Mit Kammerbeton:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 124 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{kein Nachweis erforderlich}$$

$$\frac{h_w}{t_w} > 124 \cdot \varepsilon \rightarrow \text{Nachweis erforderlich, siehe DIN EN 1993-1-5}$$

5.4.3 Momententragfähigkeit

Nachweis der Baustahlspannung:

$$\sigma_{Rd} = f_{y,d} \text{ [KN/cm}^2\text{]}$$

$$\eta = \frac{\sigma_{a,Ed}}{\sigma_{Rd}} \leq 1,0$$

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$
(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

f_{cd} : [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\alpha_c = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$)

C20/25: $f_{cd} = 1,13$ C30/37: $f_{cd} = 1,7$
C25/30: $f_{cd} = 1,42$ C35/45: $f_{cd} = 1,98$
C40/50: $f_{cd} = 2,27$ C45/55: $f_{cd} = 2,55$
C50/60: $f_{cd} = 2,83$ C55/67: $f_{cd} = 3,11$
C60/75: $f_{cd} = 3,40$

$\sigma_{a,Ed}$: [KN/cm²] Bemessungswert der einwirkenden Stahlspannung.

$\sigma_{s,Ed}$: [KN/cm²] Bemessungswert der einwirkenden Betonstahlspannung.

$\sigma_{c,Ed}$: [KN/cm²] Bemessungswert der einwirkenden Betonspannung.

Nachweis der Betonstahlspannung: (über Stütze)

$$\sigma_{Rd} = f_{s,d} \text{ [KN/cm}^2\text{]}$$

$$\eta = \frac{\sigma_{s,Ed}}{\sigma_{Rd}} \leq 1,0$$

Nachweis der Betonspannung:

$$\sigma_{Rd} = f_{c,d} \text{ [KN/cm}^2\text{]}$$

$$\eta = \frac{\sigma_{c,Ed}}{\sigma_{Rd}} \leq 1,0$$

6 Nachweis der Längsschubtragfähigkeit

6.1 Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln (DIN EN 1994-1-1: 2010-12 – 6.6.3)

Versagen des Kopfbolzendübelns:

$$P_{Rd} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \gamma_v} \quad [\text{KN}]$$

Versagen des Betons:

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \quad [\text{KN}]$$

Hinweis:

bei Kopfbolzendübeln mit Profilblechen muss die Grenzkraft P_{Rd} mit dem Faktor k_l bzw. k_t abgemindert werden.

f_u : [KN/cm²] Zugfestigkeit des Stahls des Kopfbolzendübelns $f_u \leq 45$

d : [cm] Nennschaftdurchmesser des Kopfbolzendübelns z.B.: 1,9

h_{sc} : [cm] Nennhöhe des DüBELS z.B.: 8,0

f_{ck} : [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons

C20/25: $f_{ck} = 2,0$ C25/30: $f_{ck} = 2,5$ C30/37: $f_{ck} = 3,0$

α : $h_{sc}/d > 4$: $\alpha = 1,0$

$3 \leq h_{sc}/d \leq 4$: $\alpha = 0,2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right)$

E_{cm} : [KN/cm²] E-Modul

C20/25: $E_{cm} = 3000$

C30/37: $E_{cm} = 3300$

C40/50: $E_{cm} = 3500$

C25/30: $E_{cm} = 3100$

C45/55: $E_{cm} = 3600$

C35/45 $E_{cm} = 3400$

γ_v : [] Teilsicherheitsbeiwert

Dübelversagen: $\gamma_v = 1,25$ (NAD)

Betonversagen: $\gamma_v = 1,50$ (NAD)

6.1.1 Abminderungsfaktor k_l : (bei Profilblechen parallel zur Trägerachse)

$$k_l = 0,6 \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq 1,0$$

b_0 : [mm] Breite der Voute

→ siehe Bild 6.12 und Bild 9.2

h_p : [mm] Gesamthöhe des Profilbleches, ohne Sicken oder Noppen

h_{sc} : [mm] Nennhöhe des DüBELS, hier: $h_{sc} \leq h_p + 75$

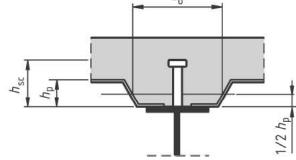


Bild 6.12 — Träger mit parallel zur Trägerachse verlaufenden Profilblechen

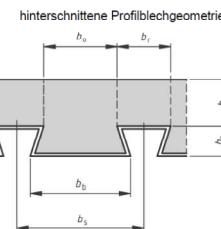
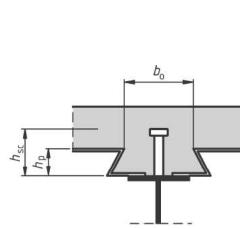
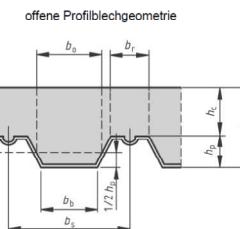


Bild 9.2 — Profilblech- und Deckenabmessungen



6.1.2 Abminderungsfaktor k_t : (bei Profilblechen rechtwinklig zur Trägerachse)

$$k_t = \min \left\{ \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right), k_{t,max} \right\}$$

n_r : [] Anzahl der Bolzendübel je Rippe ($n_r \leq 2$)

b_0 : [mm] Breite der Voute

→ siehe Bild 6.13

h_p : [mm] Gesamthöhe des Profilbleches, ohne Sicken oder Noppen

h_{sc} : [mm] Nennhöhe des DüBELS

$k_{t,max}$: [] siehe Tabelle

Hinweis: der Abminderungsfaktor k_t darf nur verwendet werden, wenn die Profilblechhöhe $h_p \leq 85\text{mm}$ und $b_0 \geq h_p$

Anzahl der Dübel je Rippe	Blechdicke des Profilbleches	Durchgeschweißte Dübel (\varnothing Schaft $\leq 20\text{mm}$)	Vorgelochte Profilbleche, Dübel (\varnothing Schaft = 19mm & 22mm)
$n_r = 1$	$t \leq 1,0 \text{ mm}$	0,85	0,75
$n_r = 1$	$t > 1,0 \text{ mm}$	1,00	0,75
$n_r = 2$	$t \leq 1,0 \text{ mm}$	0,70	0,60
$n_r = 2$	$t > 1,0 \text{ mm}$	0,80	0,60

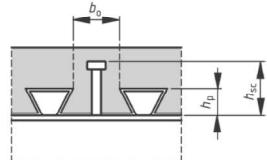
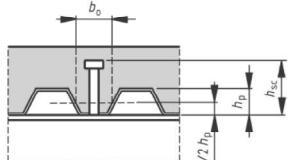


Bild 6.13 — Träger mit senkrecht zur Trägerachse verlaufenden Profilblechen

6.2 Einwirkende Längsschubkraft

6.2.1 Längsschubkraft im Bereich I, II_a, III und IV_a

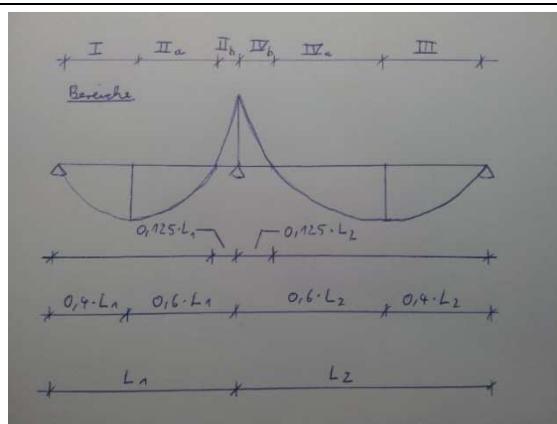
$$V_{L,Ed} = \eta \cdot N_{cf} [\text{KN}]$$

η : Verdübelungsgrad, → siehe unten
 N_{cf} : [KN] Bemessungswert der Drucknormalkraft des Betongurtes bei vollständiger Verdübelung, → siehe oben, i.d.R. = $A_a \cdot f_y$

6.2.2 Längsschubkraft im Bereich II_b und IV_b

$$V_{L,Ed} = N_s [\text{KN}]$$

η : Verdübelungsgrad, → siehe unten
 N_s : [KN] Bemessungswert der Drucknormalkraft des Betongurtes bei vollständiger Verdübelung, → siehe oben, i.d.R. = $A_a \cdot f_y$



6.2.3 Anzahl der Dübel bei vollständiger Verdübelung

$$n_f = \frac{V_{L,Ed}}{P_{Rd}} []$$

→ Anzahl der Dübel wählen

$$\text{vorhandener Verdübelungsgrad: } \eta = \frac{n}{n_f} [] \geq \eta_{min}$$

n : [] Anzahl der vorhandenen (gewählten) Kopfbolzendübeln
 n_f : [] Anzahl der Kopfbolzendübeln bei vollständiger Verdübelung
 η_{min} : [] Mindestverdübelungsgrad, → siehe unten
 $V_{L,Ed}$: [KN] Kraft die übertragen werden muss. → siehe Bild

6.2.4 Anzahl der Dübel bei teilweiser Verdübelung

Hinweise:

- Eine teilweise Verdübelung ist möglich wenn der Stahlquerschnitt aus den Querschnittsklassen 1 oder 2 besteht und die Verbindungsmitte duktil sind.
- In Bereichen mit negativem Moment ist eine teilweise Verdübelung nicht zulässig. Hier muss vollständig verdübelt werden!!
- Kopfbolzendübel gelten als duktil, wenn gilt:
 - $h \geq 4 \cdot d$
 - Schaftdurchmesser: $16\text{mm} \leq d \leq 25\text{mm}$
 - Verdübelungsgrad $\eta > \eta_{min}$
- Kopfbolzendübel gelten ebenfalls als duktil, wenn die Bedingungen nach DIN EN 1994-1-1/6.6.1.2(3) eingehalten sind.

$$\eta_t = \frac{M_{Ed} - M_{Pl,a,Rd}}{M_{Pl,Rd} - M_{Pl,a,Rd}} \geq \eta_{min}$$

$$N_c = \eta_t \cdot N_{cf} [\text{KN}]$$

$$n_{erf.} = \frac{N_c}{P_{Rd}} \text{ (im Bereich } L_1 \text{ oder } L_2 \text{)}$$

→ Anzahl der Dübel wählen

$N_{pla,Rd}$: [KN] plastische Normalkraft des Stahlprofils
 $= A_a \cdot f_{y,d}$

$M_{pl,a,Rd}$: [KNm] vollplastisches Moment des Stahlprofils
 $= W_{pl,y} \cdot f_{y,d}$

η_{min} : [] Mindestverdübelungsgrad, → siehe unten
 $f_{y,d}$: [N/mm²] charakteristische Streckgrenze ($\gamma_{M0} = 1,0$)

S235: $f_y = 235$ S355: $f_y = 355$

S275: $f_y = 275$ S450: $f_y = 440$

(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

N_c : [KN] Bemessungswert der Drucknormalkraft des Betongurtes
 N_{cf} : [KN] Bemessungswert der Drucknormalkraft des

Betongurtes bei vollständiger Verdübelung, → siehe oben, i.d.R.
 $= A_a \cdot f_y$

6.3 Mindestverdübelungsgrad:

6.3.1 Einfachsymmetrischer Baustahlquerschnitt, $A_{UG} \leq 3 \cdot A_{OG}$:

$L_e \leq 20m: \eta_{min} = \max \left\{ 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,3 - 0,015 \cdot L_e), 0,4 \right\}$ $L_e > 20m: \eta_{min} = 1$	$f_y: [N/mm^2]$ charakteristische Streckgrenze S235: $f_y = 235$ S355: $f_y = 355$ S275: $f_y = 275$ S450: $f_y = 440$ (Werte für $t \leq 40mm$) $L_e: [m]$ Länge des positive Momentenbereichs
--	--

6.3.2 Doppeltsymmetrischer Baustahlquerschnitt:

$L_e \leq 25m: \eta_{min} = \max \left\{ 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e), 0,4 \right\}$ $L_e > 25m: \eta_{min} = 1$	$f_y: [N/mm^2]$ charakteristische Streckgrenze S235: $f_y = 235$ S355: $f_y = 355$ S275: $f_y = 275$ S450: $f_y = 440$ (Werte für $t \leq 40mm$) $L_e: [m]$ Länge des positive Momentenbereichs
--	--

6.3.3 wenn Bedingungen nach DIN EN 1994-1-1/6.6.1.2(3) eingehalten sind:

Hinweis: auf der sicheren Seite können die oberen Formeln verwendet werden.

$L_e \leq 25m: \eta_{min} = \max \left\{ 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (1,0 - 0,04 \cdot L_e), 0,4 \right\}$ $L_e > 25m: \eta_{min} = 1$	$f_y: [N/mm^2]$ charakteristische Streckgrenze S235: $f_y = 235$ S355: $f_y = 355$ S275: $f_y = 275$ S450: $f_y = 440$ (Werte für $t \leq 40mm$) $L_e: [m]$ Länge des positive Momentenbereichs
---	--

6.4 Konstruktive Durchbildung

6.4.1 Längsabstand der Dübel

Äquidistante (gleicher Abstand) Anordnung zulässig
wenn gilt: (DIN EN 1994-1-1/6.6.1.3(3))

- Querschnitt besitzt Klasse 1 oder 2
- Mindestverdübelungsgrad eingehalten ist
- $\frac{M_{pl,Rd}}{M_{pl,a,Rd}} \leq 2,5$

Mindestabstände:

$$e_L \geq 5 \cdot d$$

$$e_L \leq 6 \cdot h_c$$

$$e_L \leq 800mm$$

$h_c: [cm]$ Höhe der Betonplatte, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

6.4.2 Querabstand der Dübel

Zwischen zwei Dübeln:

Vollbetonplatten: $e_q \geq 2,5 \cdot d$

Alle anderen Fälle: $e_q \geq 4 \cdot d$

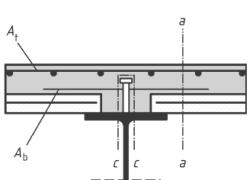
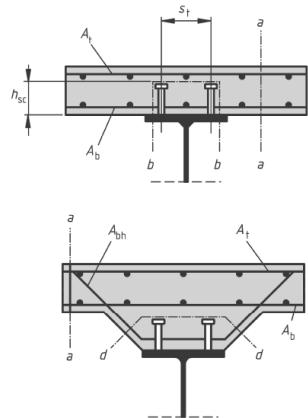
Abstand zum Rand des Stahlprofilflansches:

$e_Q \geq 20mm$

6.5 Schubsicherung des Betongurtes

6.5.1 Ermittlung der kritischen Schnitte

6.5.1.1 Vollbetonplatten und Betonfertigteilplatten



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

Bild 6.15 — Maßgebende Schnitte beim Nachweis der Längsschubkrafttragfähigkeit

$$h_{f,a-a} = 2 \cdot h_c \text{ [cm]}$$

$$h_{f,b-b} = (2 \cdot h_{sc} + d + s_t) \text{ [cm]}$$

$$h_{f,c-c} = (2 \cdot h_{sc} + d) \text{ [cm]}$$

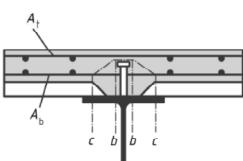
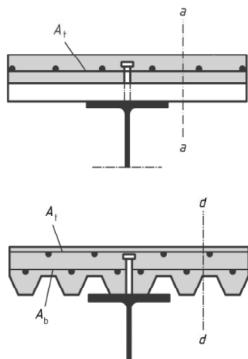
h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

h_{sc} : [cm] Nennwert der Gesamthöhe des DüBELS

d : [cm] Durchmesser des DüBELS

s_t : [cm] Abstand der KopfbolzendüBEL

6.5.1.2 Betongurt mit Profilblechen



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

Bild 6.16 — Maßgebende Schnitte für den Nachweis der Längsschubtragfähigkeit bei Betongurten mit Profilblechen

$$h_{f,a-a} = 2 \cdot h_c \text{ [cm]}$$

Hinweis: Bei Profilblechen darf nur die Aufbetondicke oberhalb der Sicke berücksichtigt werden !! (DIN EN 1994-1-1, 6.6.6.4(1))

$$h_{f,b-b} = (2 \cdot h_{sc} + d) \text{ [cm]}$$

$$h_{f,c-c} = (d + 2 \cdot c_1) \text{ [cm]}$$

Hinweis: Bei Profilblechen darf nur die Aufbetondicke oberhalb der Sicke berücksichtigt werden !! (DIN EN 1994-1-1, 6.6.6.4(1))

h_c : [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen

h_{sc} : [cm] Nennwert der Gesamthöhe des DüBELS

d : [cm] Durchmesser des DüBELS

c_1 : [cm] einseitige Umrissfläche, die oberhalb des Profilbleches verläuft.

6.5.2 Nachweis im Plattenanschnitt (Schnitt a – a):

6.5.2.1 Längsschubkraft im Plattenanschnitt:

Hinweis: die Längsschubkraft kann entweder aus der Betondruckkraft N_c oder aus den Schubkräften in den Verbindungsmittern ermittelt werden.

$$V_{Ed} = \frac{n \cdot P_{Rd}}{e \cdot h_f} \quad [\text{KN}/\text{cm}^2]$$

P_{Rd} : [KN] maßgebende Dübeltragkraft
 e : [cm] Abstand der Dübel in Trägerlängsrichtung
 n : [] Anzahl der Dübel in dem kritischen Schnitt (i.d.R. 1 oder 2)
 h_f : [cm] = $2 \cdot h_c$
 h_c : [cm] Aufbetonhöhe

6.5.2.2 Schubtragfähigkeit – Versagen der Betondruckstrebbe

$$V_{Rd,max} = \frac{a_c \cdot f_{cd}}{\cot \vartheta + \frac{1}{\cot \vartheta}} \quad [\text{KN}/\text{cm}^2]$$

h_p : [cm] Profilblechhöhe
 a_c : [] = 0,75 (für Normalbeton)
 f_{cd} : [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($a_c = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$)
 C20/25: $f_{c,d} = 1,13$ C30/37: $f_{c,d} = 1,7$ C40/50: $f_{c,d} = 2,27$
 C25/30: $f_{c,d} = 1,42$ C35/45: $f_{c,d} = 1,98$ C45/55: $f_{c,d} = 2,55$
 C55/67: $f_{c,d} = 3,11$ C70/85: $f_{c,d} = 3,97$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebeneigung = 1,2 (für Druckgurt)

6.5.2.3 Schubtragfähigkeit – Versagen der Bewehrung

$$a_{s,erf} = \frac{V_{Ed} \cdot h_f}{f_{sd} \cdot \cot \vartheta} \cdot 100 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sf}}{s_f \cdot h_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot \vartheta \quad [\text{KN}/\text{cm}^2]$$

ist keine Bewehrung vorgegeben:

$$a_{s,oben,erf} = 0,5 \cdot a_{s,erf} \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

$$a_{s,unten,erf} = 0,5 \cdot a_{s,erf} \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

Hinweis: Die errechnete Bewehrung ist zur Hälfte oben und zur anderen Hälfte unten anzutragen.

ist Bewehrung vorgegeben:

$$a_{s,erf} \leq \text{vorh. } \frac{A_{sf}}{s_f}$$

Hinweis:

- Bewehrung am besten im Abstand der Dübel anordnen.
- Die Bewehrung muss hinter b_{eff} verankert werden!!

$\frac{A_{sf}}{s_f}$: [cm²/m] anrechenbare Bewehrung,

Vollbetonplatten: $\frac{A_{sf}}{s_f} = A_b + A_t$

Betongurte mit Profilblechen: $\frac{A_{sf}}{s_f} = A_t$

V_{Ed} : [KN/cm²] siehe oben

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebeneigung = 1,2 (39,81°)

A_s : [cm²] Querschnittsfläche eines Stabes

e : [m] Abstand der Bewehrung, z.B. Dübelabstand

$$\text{vorh. } \frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{A_{s,vorh.}}{e} = a_{s,vorh.} \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

$$A_{s,vorh.} : A_{s,vorh.} = A_b + A_t$$

$$a_{s,vorh.} : a_{s,vorh.} = a_{s,unten} + a_{s,oben}$$

6.5.2.4 Nachweise

$$V_{Rd,max} \geq V_{Ed,a-a}$$

$$V_{Rd,sy} \geq V_{Ed,a-a}$$

6.5.3 Nachweis im Plattenanschnitt (Schnitt b – b):

6.5.3.1 Längsschubkraft im Plattenanschnitt:

Hinweis: die Längsschubkraft kann entweder aus der Betondruckkraft N_c oder aus den Schubkräften in den Verbindungsmittern ermittelt werden.

$$V_{Ed} = \frac{n \cdot P_{Rd}}{e \cdot h_f} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

P_{Rd} : [KN] maßgebende Dübeltragkraft
 e : [cm] Abstand der Dübel in Trägerlängsrichtung
 n : [] Anzahl der Dübel in dem kritischen Schnitt (i.d.R. 1 oder 2)
 h_f : [cm] = $2 \cdot h_{sc} + d$
 h_{sc} : [cm] Aufbetonhöhe
 h_{sc} : [cm] Dübelhöhe
 d : [cm] Kopfdurchmesser des KopfbolzendüBELS

6.5.3.2 Schubtragfähigkeit – Versagen der Betondruckstrebe

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \vartheta + \frac{1}{\cot \vartheta}} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

h_p : [cm] Profilblechhöhe
 α_c : [] = 0,75 (für Normalbeton)
 f_{cd} : [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\alpha_c = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$)
 C20/25: $f_{cd} = 1,13$ C30/37: $f_{cd} = 1,7$ C40/50: $f_{cd} = 2,27$
 C25/30: $f_{cd} = 1,42$ C35/45: $f_{cd} = 1,98$ C45/55: $f_{cd} = 2,55$
 C55/67: $f_{cd} = 3,11$ C70/85: $f_{cd} = 3,97$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebeneigung = 1,2 (für Druckgurt)

6.5.3.3 Schubtragfähigkeit – Versagen der Bewehrung

$$a_{s,erf} = \frac{V_{Ed} \cdot h_f}{f_{sd} \cdot \cot \vartheta} \cdot 100 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sf}}{s_f \cdot h_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot \vartheta \quad [\text{KN/cm}^2]$$

ist keine Bewehrung vorgegeben:

$$a_{s,oben,erf} = 0 \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

$$a_{s,unten,erf} = 0,5 \cdot a_{s,erf} \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$$

Hinweis: Die Bewehrung ist aufgrund der Zweischmittigkeit zu halbieren und an der Plattenunterseite anzuordnen.

ist Bewehrung vorgegeben:

$$a_{s,erf} \leq \text{vorh. } \frac{A_{sf}}{s_f}$$

Hinweis:

- Bewehrung am besten im Abstand der Dübel anordnen.
- Die Bewehrung muss hinter b_{eff} verankert werden!

A_{sf} : [cm²/m] anrechenbare Bewehrung,

s_f : Vollbetonplatten: $\frac{A_{sf}}{s_f} = A_b$

Betongurte mit Profilblechen: $\frac{A_{sf}}{s_f} \rightarrow$ Schnitt b nicht vorhanden

V_{Ed} : [KN/m] siehe oben

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebeneigung = 1,2

A_s : [cm²] Querschnittsfläche eines Stabes

e : [m] Abstand der Bewehrung, z.B. Dübelabstand

vorh. $\frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{A_{s,vorh.}}{e} = a_{s,vorh.} \quad [\text{cm}^2/\text{m}]$

$A_{s,vorh.}$: [cm²] $A_{s,vorh.} = 2 \cdot A_b$ (Schnitt B-B)

$a_{s,vorh.}$: [cm²/m] $a_{s,vorh.} = 2 \cdot a_{s,unten}$

6.5.3.4 Nachweise

$$V_{Rd,max} \geq V_{Ed,b-b}$$

$$V_{Rd,sy} \geq V_{Ed,a-a}$$

Hinweis: die Bewehrung die eingelegt wird, ergibt sich aus dem maßgebenden Schnitt.

6.6 Hinweise:

- Bei Mehrfeldträgern werden die Stahlträger oftmals als Einfeldträger eingebaut. Erst durch das einlegen der Bewehrung über der Stütze werden die Einfeldträger zu einem Durchlaufträger.
 → Im Bauzustand kann der Stahlträger als Einfeldträger betrachtet werden.

7 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

7.1 Nachweis der Verformungen

Vorgehen:

- 1.) Ermittlung der Flächenträgheitsmomente ($I_{i,L}$) für die einzelnen Einwirkungen.
→ siehe Querschnittstragfähigkeit Elastisch-Plastisch
- 2.) Berechnung der Durchbiegungen. → siehe unten.

7.2 Durchbiegungsformeln

7.2.1 Einfeldträger:

Gleichstreckenlast:

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot 100 \cdot E \cdot I} \quad [\text{cm}]$$

Zwei Endmomente (inf. Schwinden):

$$f = \frac{2}{16} \cdot \frac{M_{\text{Sch}} \cdot 100 \cdot L^2}{E \cdot I} \quad [\text{cm}]$$

q: [KN/m] Flächenlast

L: [cm] Trägerlänge

E: [KN/cm²] E-Modul des ideellen Querschnittes aus Stahl
E = 21.000

I: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades

M_{Sch}: [KNm] Randmoment infolge Schwindbeanspruchung

8 Belastungsgeschichte

Für das Verformungs- und Tragverhalten spielt die Herstellung des Verbundträgers eine Rolle.

Träger 1: hergestellt ohne Hilfsunterstützung

→ Das Eigengewicht des Stahlträgers und des flüssigen Betons wird von dem Stahlträger übernommen.

→ Ausbaulasten und Verkehrslasten wirken auf den Verbundquerschnitt.

→ Verbundträger ohne Eigengewichtverbund

→ Fließgrenze (überschreiten der Streckgrenze) wird sehr früh erreicht

Träger 2: hergestellt mit einer Hilfsunterstützung

→ Träger bleibt während der Betonage quasi spannungslos.

→ Nachdem der Beton erhärtet ist und die Hilfsstützen entfernt wurden, wirken alle Eigengewichtslasten und Verkehrslasten auf den Verbundträger.

→ Verbundträger mit Eigengewichtsverbund.

Träger 3: hergestellt mit einer Hilfsunterstützung, die den Träger negativ belastet.

→ Träger hat im Bauzustand ein negatives Moment

→ Fließgrenze (überschreiten der Streckgrenze) wird spät erreicht, da zunächst die Druckspannungen infolge der Überhöhung abgebaut werden müssen.

Fazit:

→ Auf die Grenztragfähigkeit des Trägers hat das Herstellungsverfahren keinen Einfluss.

→ Alle Träger erreichen $M_{pl,Rd}$

→ Herstellungsverfahren beeinflusst maßgebend die Verformungen.

Verbundstützen

9 Vereinfachtes Verfahren (DIN EN 1994-1-1/6.7.3)

9.1 Allgemeine Voraussetzungen nach der DIN EN 1994-1-1

- Baustahl: S235 – S460
- Beton: C20/25 – C50/60
- Querschnittsparameter δ muss zwischen $0,2 \leq \delta \leq 0,9$ liegen. → wird später überprüft.
- Doppelsymmetrischer Querschnitt
- Querschnitt konstant über die Länge
- Bezugener Schlankheitsgrad $\bar{\lambda} \leq 2,0$ → wird später überprüft.
- Bei voll einbetonierten Querschnitten darf die Betondeckung zwischen Stahlträger und Betonoberfläche maximal wie folgt berücksichtigt werden:
 $\max c_z = 0,3 \cdot h$
 $\max c_y = 0,4 \cdot b$
- Verhältniswert h_c/b_c muss zwischen $0,2 \leq h_c/b_c \leq 5,0$ liegen.
- $A_{s,\text{rechn.}} = \min \begin{cases} 0,06 \cdot A_c \\ A_{s,\text{vorh.}} \end{cases}$

h_c : [mm] Querschnittshöhe (in Richtung z-Achse)

b_c : [mm] Querschnittsbreite

A_c : [cm²] Querschnittsfläche des Betonstahls

A_c : [cm²] Querschnittsfläche des Betons = $b_c \cdot h_c - A_a$

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Stahlprofils

9.2 Nachweis gegen örtliches Beulen

9.2.1 voll einbetonierte Querschnitte:

Der Nachweis darf entfallen, wenn das Stahlprofil vollständig einbetoniert ist und die Betondeckung c eingehalten ist.
(DIN EN 1994-1-1/ 6.7.1(9))

b_f : [mm] Flanschbreite

Betondeckung für Stahlprofile:

$$c \geq \max \begin{cases} 40 \text{ [mm]} \\ \frac{1}{6} \cdot b_f \text{ [mm]} \end{cases}$$

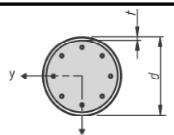
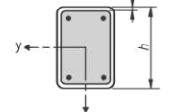
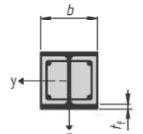
Betondeckung für Bewehrung:

Es gelten die Anforderungen der DIN EN 1992-1-1

9.2.2 Andere Querschnitte:

Der Nachweis darf entfallen wenn die Grenzverhältnisse aus Tabelle 6.3 eingehalten sind. (DIN EN 1994-1-1/ 6.7.1(9))

Tabelle 6.3 — Grenzwerte für (d/t) , (h/t) und (b/t_f) mit f_y in N/mm²

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

9.3 Effektiver Elastizitätsmodul des Betons

$$E_{c,eff} = E_{cm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \varphi_t} \quad [\text{KN/cm}^2]$$

E_{cm} : $[\text{KN/cm}^2]$ Elastizitätsmodul des Betons.
 C20/25: $E_{cm} = 3000$ C25/30: $E_{cm} = 3100$
 C30/37: $E_{cm} = 3300$ C35/45: $E_{cm} = 3400$
 C40/50: $E_{cm} = 3500$ C45/55: $E_{cm} = 3600$
 C50/60: $E_{cm} = 3700$
 $N_{G,Ed}$: $[\text{KN}]$ ständig wirkende Anteil der Normalkraft
 N_{Ed} : $[\text{KN}]$ Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
 φ_t : $[\cdot]$ Kriechzahl des Betons, → siehe oben

9.4 Wirksame Biegesteifigkeit

9.4.1 Knicken um die y-Achse

$$(E \cdot I)_{eff,y} = E_a \cdot I_{a,y} + E_s \cdot I_{s,y} + 0,6 \cdot E_{c,eff} \cdot I_{c,y} \quad [\text{KNcm}^2]$$

E_a : $[\text{KN/cm}^2]$ E-Modul des Stahls = 21.000
 $I_{a,y}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment des Stahlprofils
 E_s : $[\text{KN/cm}^2]$ E-Modul des Betonstahls = 21.000
 $I_{s,y}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment der Betonstahlbewehrung
 $= \sum A_i \cdot z_i^2$ (nur Steiner-Anteil)
 y_i : $[\text{cm}]$ Abstand zwischen Gesamtschwerpunkt der Betonstahlbewehrung und Schwerpunkt des einzelnen Betonstabstahl in Y-Richtung.
 $E_{c,eff}$: $[\text{KN/cm}^2]$ Effektiver E-Modul, → siehe oben
 $I_{c,y}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment des reinen Betonquerschnittes $= \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} - I_{a,y} - I_{s,y}$

9.4.2 Knicken um die z-Achse

$$(E \cdot I)_{eff,z} = E_a \cdot I_{a,z} + E_s \cdot I_{s,z} + 0,6 \cdot E_{c,eff} \cdot I_{c,z} \quad [\text{KNcm}^2]$$

E_a : $[\text{KN/cm}^2]$ E-Modul des Stahls = 21.000
 $I_{a,z}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment des Stahlprofils um die z-Achse
 E_s : $[\text{KN/cm}^2]$ E-Modul des Betonstahls = 21.000
 $I_{s,z}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment der Betonstahlbewehrung
 $= \sum A_i \cdot y_i^2$ (nur Steiner-Anteil)
 z_i : $[\text{cm}]$ Abstand zwischen Gesamtschwerpunkt der Betonstahlbewehrung und Schwerpunkt des einzelnen Betonstabstahl in z-Richtung.
 $E_{c,eff}$: $[\text{KN/cm}^2]$ Effektiver E-Modul, → siehe oben
 $I_{c,z}$: $[\text{cm}^4]$ Flächenträgheitsmoment des reinen Betonquerschnittes $= \frac{b_c^3 \cdot h_c}{12} - I_{a,z} - I_{s,z}$

9.5 Normalkraft unter der kleinsten Verzweigungslast

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (E \cdot I)_{eff}}{s_k^2} \quad [\text{KN}]$$

$(E \cdot I)_{eff}$: $[\text{KNcm}^2]$ Biegesteifigkeit, → siehe oben (maßgebend ist bei gleicher Knicklänge die kleinere Biegesteifigkeit)
 s_k : $[\text{cm}]$ Knicklänge = $\beta \cdot l$

9.6 Charakteristischer Wert der vollplastischen Normalkrafttragfähigkeit

$$N_{pl,Rk} = A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_{c,k} + A_s \cdot f_{s,k} \quad [\text{KN}]$$

A_a : $[\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des Baustahls
 A_c : $[\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des reinen Beton = $b_c \cdot h_c - A_a$
 (Querschnittsfläche des Betonstahls braucht nicht abgezogen zu werden)
 b_c : $[\text{cm}]$ Breite des Stützenquerschnitts
 h_c : $[\text{cm}]$ Höhe des Stützenquerschnitts
 A_s : $[\text{cm}^2]$ Querschnittsfläche des Betonstahls
 f_y : $[\text{KN/cm}^2]$ charakteristische Streckgrenze von Baustahl
 S235: $f_y = 23,5$ S355: $f_y = 35,5$
 S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$
 (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)
 $f_{c,k}$: $[\text{KN/cm}^2]$ charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons
 C20/25: $f_{c,k} = 2,0$ C30/37: $f_{c,k} = 3,0$ C40/50: $f_{c,k} = 4,0$
 C25/30: $f_{c,k} = 2,5$ C35/45: $f_{c,k} = 3,5$ C45/55: $f_{c,k} = 4,5$
 C50/60: $f_{c,k} = 5,0$
 $f_{s,k}$: $[\text{KN/cm}^2]$ charakteristische Streckgrenze von Betonstahl = 50

9.7 Bezogener Schlankheitsgrad

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad [\cdot]$$

$N_{pl,Rk}$: $[\text{KN}]$ Charakteristische Wert der vollplastischen Normalkrafttragfähigkeit, → siehe oben
 N_{cr} : $[\text{KN}]$ Normalkraft unter der kleinsten Verzweigungslast, → siehe oben

9.8 Abminderungsfaktor χ :

$$\bar{\lambda} \leq 0,2: \chi = 1,0$$

$$\bar{\lambda} > 0,2: \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$\bar{\lambda} > 2,0 \rightarrow$ Verfahren darf nicht angewendet werden!

Φ : [] Faktor

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

α : [] Beiwert

$$\text{Knicklinie a: } \alpha = 0,13$$

$$\text{Knicklinie a: } \alpha = 0,21$$

$$\text{Knicklinie b: } \alpha = 0,34$$

$$\text{Knicklinie c: } \alpha = 0,49$$

$$\text{Knicklinie d: } \alpha = 0,76$$

Hinweis: Zuordnung zur Knickspannungslinie siehe Tabelle 6.5 im Anhang

9.9 Querschnittstragfähigkeit

9.9.1 Betongefülltes, kreisförmiges Hohlprofil:

Hinweis:

Die Querschnittstragfähigkeit bzw. Betondruckfestigkeit aufgrund der Umschnürungswirkung darf nur erhöht werden, wenn $\bar{\lambda} \leq 0,5$ und $e < 0,1$.

Falls eines der Kriterien nicht eingehalten ist, muss die Querschnittstragfähigkeit wie für alle anderen Querschnittsformen ermittelt werden. → siehe Allgemein.

$$N_{Pl,Rd} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_{y,d} + A_s \cdot f_{s,d} + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}\right) [\text{KN}]$$

Wenn $e = 0$:

$$\eta_a = \min \begin{cases} 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) & [] \\ 1,0 & [] \end{cases}$$

$$\eta_c = \max \begin{cases} 4,9 - 18,5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 & [] \\ 1,0 & [] \end{cases}$$

Wenn $0 < e/d \leq 0,1$:

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \cdot 10 \cdot \frac{e}{d} [\text{]}]$$

$$\eta_c = \eta_{c0} \cdot (1 - 10 \cdot \frac{e}{d}) [\text{]}]$$

$$\eta_{a0} = \min \begin{cases} 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) & [] \\ 1,0 & [] \end{cases}$$

$$\eta_{a0} = \max \begin{cases} 4,9 - 18,5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 & [] \\ 0 & [] \end{cases}$$

t : [mm] Wanddicke des Stahlprofils

d : [mm] Außendurchmesser der Stütze

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Baustahls

A_c : [cm²] Querschnittsfläche des reinen Beton = $b_c \cdot h_c - A_a$
(Querschnittsfläche des Betonstahls braucht nicht abgezogen zu werden)

b_c : [cm] Breite des Stützenquerschnittes

h_c : [cm] Höhe des Stützenquerschnittes

A_s : [cm²] Querschnittsfläche des Betonstahls

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Bemessungswert der Streckgrenze von Baustahl

$$\text{S235: } f_y = 21,36 \quad \text{S355: } f_y = 32,27$$

$$\text{S275: } f_y = 25,0 \quad \text{S450: } f_y = 40,91$$

(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

f_y : [KN/cm²] charakteristische Streckgrenze von Baustahl

$$\text{S235: } f_y = 23,5 \quad \text{S355: } f_y = 35,5$$

$$\text{S275: } f_y = 27,5 \quad \text{S450: } f_y = 44,0$$

(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

$f_{c,d}$: [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\gamma_c = 1,5$)

$$\text{C20/25: } f_{c,d} = 1,33 \quad \text{C30/37: } f_{c,d} = 2,0 \quad \text{C40/50: } f_{c,d} = 2,67$$

$$\text{C25/30: } f_{c,d} = 1,67 \quad \text{C35/45: } f_{c,d} = 2,33 \quad \text{C45/55: } f_{c,d} = 3,0$$

$$\text{C50/60: } f_{c,d} = 3,33$$

$f_{c,k}$: [KN/cm²] charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons

$$\text{C20/25: } f_{c,k} = 2,0 \quad \text{C30/37: } f_{c,k} = 3,0 \quad \text{C40/50: } f_{c,k} = 4,0$$

$$\text{C25/30: } f_{c,k} = 2,5 \quad \text{C35/45: } f_{c,k} = 3,5 \quad \text{C45/55: } f_{c,k} = 4,5$$

$$\text{C50/60: } f_{c,k} = 5,0$$

α_c : allgemein: $\alpha_c = 0,85$

Betongefüllte Hohlprofile: $\alpha_c = 1,0$

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons = 43,5 ($\gamma_s = 1,15$)

9.9.2 Allgemein:

$$N_{Pl,Rd} = A_a \cdot f_{y,d} + A_s \cdot f_{s,d} + A_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} [\text{KN}]$$

A_a : [cm²] Querschnittsfläche des Baustahls

A_c : [cm²] Querschnittsfläche des reinen Beton = $b_c \cdot h_c - A_a$

(Querschnittsfläche des Betonstahls braucht nicht abgezogen zu werden)

b_c : [cm] Breite des Stützenquerschnittes

h_c : [cm] Höhe des Stützenquerschnittes

A_s : [cm²] Querschnittsfläche des Betonstahls

$f_{y,d}$: [KN/cm²] Bemessungswert der Streckgrenze von Baustahl

$$\text{S235: } f_y = 21,36 \quad \text{S355: } f_y = 32,27$$

$$\text{S275: } f_y = 25,0 \quad \text{S450: } f_y = 40,91$$

(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

$f_{c,d}$: [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons ($\gamma_c = 1,5$)

$$\text{C20/25: } f_{c,d} = 1,33 \quad \text{C30/37: } f_{c,d} = 2,0 \quad \text{C40/50: } f_{c,d} = 2,67$$

$$\text{C25/30: } f_{c,d} = 1,67 \quad \text{C35/45: } f_{c,d} = 2,33 \quad \text{C45/55: } f_{c,d} = 3,0$$

$$\text{C55/67: } f_{c,d} = 3,67 \quad \text{C70/85: } f_{c,d} = 4,67$$

α_c : allgemein: $\alpha_c = 0,85$

Betongefüllte Hohlprofile: $\alpha_c = 1,0$

$f_{s,d}$: [KN/cm²] Zylinderdruckfestigkeit des Betons = 43,5 ($\gamma_s = 1,15$)

9.10 Querschnittsparameter δ :

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{y,d}}{N_{pl,Rd}} \quad [\]$$

Nachweis: $0,2 \leq \delta \leq 0,9$

Hinweis:

- wenn der Nachweis nicht eingehalten ist, kann die Stütze nicht nach der DIN EN 1994-1-1/6.7 bemessen werden.
- Wenn $\delta < 0,2$: Bemessung als Betonstütze
- Wenn $\delta > 0,9$: Bemessung als Stahlstütze

A_a : $[cm^2]$ Querschnittsfläche des Baustahls
 $f_{y,d}$: $[KN/cm^2]$ Bemessungswert der Streckgrenze von Baustahl
($\gamma_{M1} = 1,1$)
S235: $f_y = 21,36$ S355: $f_y = 32,27$
S275: $f_y = 25,0$ S450: $f_y = 40,91$
(Werte für $t \leq 40mm$)
 $N_{pl,Rd}$: $[KN]$ Querschnittstragfähigkeit, → siehe oben

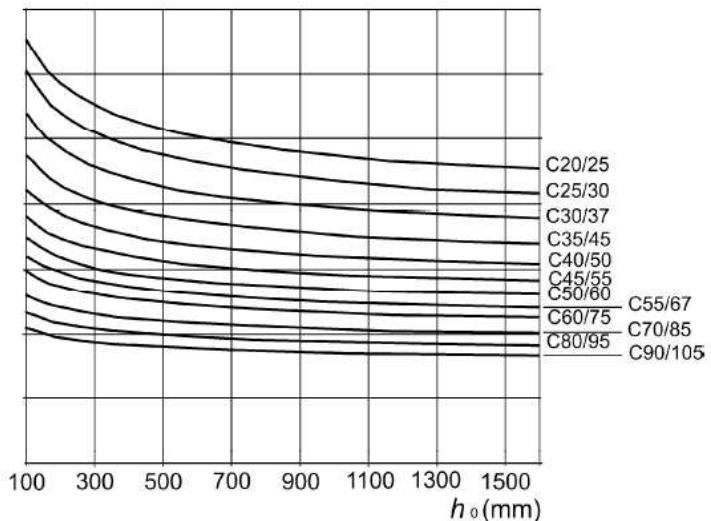
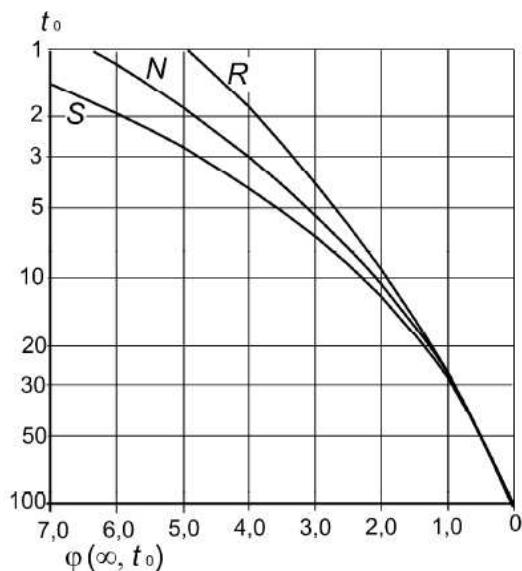
9.11 Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{X \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1,0$$

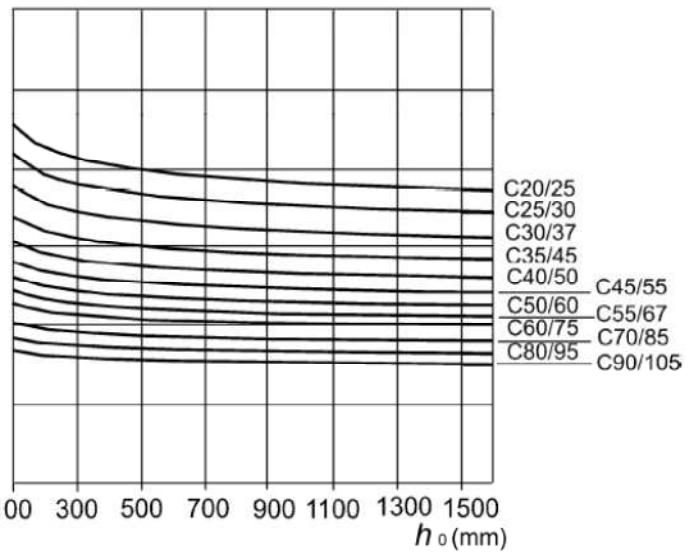
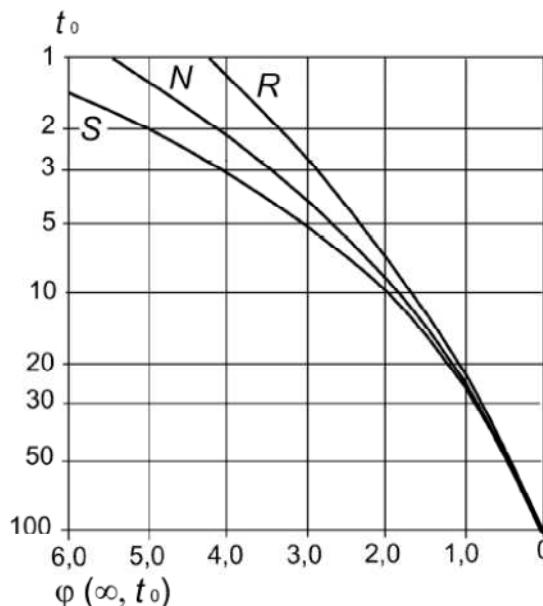
N_{Ed} : einwirkende Normalkraft
 $N_{pl,Rd}$: $[KN]$ Querschnittstragfähigkeit, → siehe oben
 X : Abminderungsfaktor, → siehe oben.

10 Anhang

10.1 Ermittlung Kriechzahl φ - grafisch



a) trockene Innenräume, relative Luftfeuchte = 50%



b) Außenluft, relative Luftfeuchte = 80%

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

h_0 : [mm] wirksame Querschnittsdicke = $\frac{2 \cdot A_c}{u} \cdot 10$

A_c : [cm²] Betonquerschnittsfläche = $b_{eff} \cdot h_{pl}$

u : [cm] Umfang der dem trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche.

Betonplatte ohne Stahlprofil: $u = 2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot h_{pl}$

Betonplatte mit Stahlprofil: $u = b_{eff} + 2 \cdot h_{pl}$ (Unterseite des Betons kann nicht austrocknen)

Klasse R: CEM 42,5R, CEM 52,5N, CEM 52,5R

Klasse N: CEM 32,5R, CEM 42,5N

Klasse S: CEM 32,5N

Hinweise:

- Die Kriechzahlen müssen für jeden Lastfall separat ermittelt werden.
- Für Verkehrslasten braucht keine Kriechzahl ermittelt zu werden, da nur kurzzeitige Belastung.
- Beim Schwinden ist das Alter bei Belastungsbeginn in der Regel mit einem Tag anzunehmen. (DIN EN 1994-1-1/5.4.2.2(4))
- Belastungsbeginn bei Ausbaulast i.d.R. $t_0 = 28$ Tage.

10.2 Ermittlung der Kriechzahl - analytisch

10.2.1 Wirksame Bauteilhöhe

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \cdot 10 \text{ [mm]}$$

A_c : [cm²] Betonquerschnittsfläche = $b_{eff} \cdot h_{pl}$
 u : [cm] Umfang der dem trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche = $2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot h_{pl}$

10.2.2 Beiwerte zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit

wenn $f_{cm} > 35 \text{ N/mm}^2$:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$

f_{cm} : [N/mm²] mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen = $f_{ck} + 8$

wenn $f_{cm} \leq 35 \text{ N/mm}^2$:

$$\alpha_1 = 1,0 \quad \alpha_2 = 1,0 \quad \alpha_3 = 1,0$$

10.2.3 Beiwert zur Berücksichtigung der RH auf die Grundzahl des Kriechens

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - 0,01 \cdot RH}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad []$$

RH: [%] relative Luftfeuchte der Umgebung
 h_0 : [mm] siehe oben

10.2.4 Beiwert zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit auf die Grundzahl des Kriechens

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad []$$

f_{cm} : [N/mm²] mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen = $f_{ck} + 8$

10.2.5 wirksames Betonalter unter Berücksichtigung der Zementart

$$t_{0,eff} = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \quad [d]$$

$t_{0,T}$: [d] der Temperatur angepasste Betonalter bei Belastungsbeginn. → Annahme $d = 1$
 α : siehe Tab.

Hinweis:
Vereinfacht: $t_{0,eff} = t_0$

Zementart	Klasse	α
CEM 32,5N	S	-1
CEM 32,5R, CEM 42,5N	N	0
CEM 42,5R, CEM 52,5N, CEM 52,5R	R	1

10.2.6 Beiwert zur Berücksichtigung des Betonalters bei Erstbelastung

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + (t_{0,eff})^{0,2}} \quad []$$

$t_{0,eff}$: [d] siehe oben

10.2.7 Grundzahl des Kriechens

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad []$$

10.2.8 Beiwert zur Berücksichtigung von RH und h_0

$t = \infty \rightarrow \beta_H = 0 \rightarrow$ weiter mit Kriechzahl zum Zeitpunkt t

RH: [%] rel. Luftfeuchte
Außenbauteil: RH = 80 %

$$t \neq \infty \rightarrow \beta_H = \min \left\{ 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right\}$$

Innenbauteil: RH = 50%
 h_0 : [mm] siehe oben
 α_3 : [] siehe oben

10.2.9 Beiwert zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Kriechens nach Belastungsbeginn

$t = \infty \rightarrow \beta_c(t, t_0) = 1 \rightarrow$ weiter mit Kriechzahl zum Zeitpunkt t

t: [d] Betonalter bei dem die Kriechzahl gesucht ist
 $\rightarrow t = \infty \approx 70 \text{ Jahre} \approx 30000 \text{ d}$

$$t \neq \infty \rightarrow \beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

t_0 : [d] Betonalter bei Belastungsbeginn
 \rightarrow Annahme $t_0 = 1$

10.2.10 Kriechzahl zum Zeitpunkt t

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad []$$

10.3 Ermittlung des Schwindmaßes - analytisch

10.3.1 Wirksame Bauteilhöhe

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \cdot 10 \text{ [mm]}$$

A_c : [cm²] Betonquerschnittsfläche = $b_{eff} \cdot h_{pl}$
 u : [cm] Umfang der dem trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche = $2 \cdot b_{eff} + 2 \cdot h_{pl}$

10.3.2 Beiwert für den Einfluss der Umgebungsfeuchte

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot [1 - (0,01 \cdot RH)^3]$$

RH: [%] rel. Feuchte der Umgebung

10.3.3 Grundwert des Trocknungsschwindens

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-0,1 \cdot \alpha_{ds2} \cdot f_{cm}}] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \text{ []}$$

α_{ds1} : [] Beiwert → siehe Tabelle
 α_{ds2} : [] Beiwert → siehe Tabelle
 f_{cm} : [N/mm²] = $f_{ck} + 8$

Zementart	Klasse	α	α_{ds1}	α_{ds2}
CEM 32,5N	S	-1	3	0,13
CEM 32,5R, CEM 42,5N	N	0	4	0,12
CEM 42,5R, CEM 52,5N, CEM 52,5R	R	1	6	0,11

10.3.4 Beiwert zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufes des Trocknungsschwindens

$t = \infty$:
 $\beta_{ds}(t, t_s) = 1,0$

h_0 : [mm] siehe oben
 t : [d] Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt
 $\rightarrow t = \infty \approx 70$ Jahre ≈ 30000 d

$t \neq \infty$:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{(h_0)^3}} \text{ []}$$

t_s : [d] Betonalter zu Beginn des Trocknungsschwinden.
Normalerweise zum Ende der Nachbehandlung.
Beim Schwinden ist das Alter bei Belastungsbeginn in der Regel mit einem Tag anzunehmen. (DIN EN 1994-1-1/5.4.2.2)

10.3.5 Trocknungsschwinddehnung zum Zeitpunkt t

$$\varepsilon_{cd}(t, t_s) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \text{ []}$$

k_h : [] Koeffizient, → siehe Tabelle

h_0	100	200	300	≥ 500
k_h	1,0	0,85	0,75	0,7

Hinweis: Zwischenwerte linear interpolieren

$$k_h = k_{h,max} + \frac{h_{0,max} - h_{0,vorh.}}{h_{0,max} - h_{0,min}} \cdot (k_{h,min} - k_{h,max})$$

$k_{h,max}$ = k_h -Wert, der der größeren wirksamen Bauteilhöhe zugeordnet ist.
 $k_{h,min}$ = k_h -Wert, der der kleineren wirksamen Bauteilhöhe zugeordnet ist.

10.3.6 Beiwert zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs

$t = \infty$:
 $\beta_{as}(t) = 1,0$

$t \neq \infty$:

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} \text{ []}$$

t : [d] Betonalter bei dem der Schwindbeiwert gesucht ist
 $\rightarrow t = \infty \approx 70$ Jahre ≈ 30000 d

10.3.7 Autogene Schwinddehnung

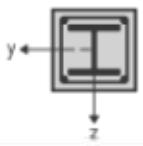
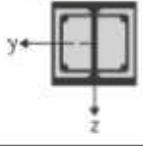
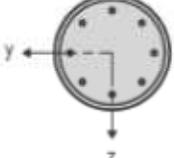
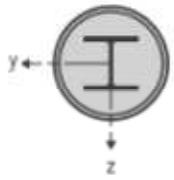
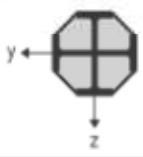
$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \text{ []}$$

α_{as} : siehe Tabelle oben
 f_{ck} : [N/mm²]

10.3.8 Schwinddehnung zum Zeitpunkt t

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t, t_s) \text{ []}$$

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

Querschnitt	Anwendungs-grenzen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knickspannungs- linie	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	$L/200$

$$M_{max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} \quad N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$$

$$M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$$

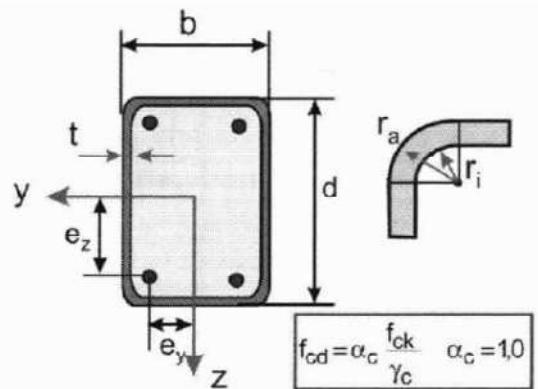
Höhe h_n und plastische Widerstandsmomente im Bereich h_n :

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2 f_{sd} - f_{cd})}{2b f_{cd} + 4t (2 f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi}$$

$$W_{pl,an} = 2t h_n^2$$

$$W_{pl,cn} = (b - 2t) h_n^2 - W_{pl,sn}$$



Plastische Widerstandsmomente:

$$W_{pl,c} = \frac{(b - 2t)(d - 2t)^2}{4} - \frac{2}{3} r_i^3 - r_i^2 (4 - \pi) \left(\frac{d}{2} - r_a \right) - W_{pl,s}$$

$$W_{pl,a} = \frac{b d^2}{4} - \frac{2}{3} r_a^3 - r_a^2 (4 - \pi) \left(\frac{d}{2} - r_a \right) - W_{pl,c} - W_{pl,s}$$

$$W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{zi}$$

Bild 125. Ermittlung von h_n und $M_{pln,Rd}$ für ausbetonierte rechteckige Hohlprofile

$$M_{max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$$

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd}$$

$$M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$$

$$N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$$

Höhe h_n und plastische Widerstandsmomente im Bereich h_n :

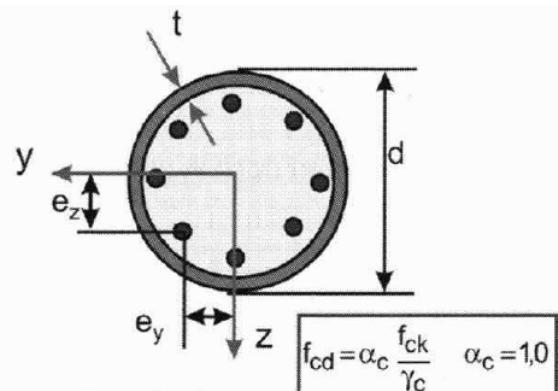
$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2 f_{sd} - f_{cd})}{2d f_{cd} + 4t (2 f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,an} = 2t h_n^2$$

$$W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi}$$

$$W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi}$$

Bei der Ermittlung von $W_{pl,an}$ wird näherungsweise eine gerade Außenwandung angenommen



Plastische Widerstandsmomente:

$$W_{pl,c} = \frac{(d - 2t)^3}{6} - W_{pl,s}$$

$$W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{zi}$$

$$W_{pl,a} = \frac{d^3}{6} - W_{pl,c} - W_{pl,s}$$

Bild 126. Ermittlung von h_n und $M_{pln,Rd}$ für ausbetonierte runde Hohlprofile

$$M_{\max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$$

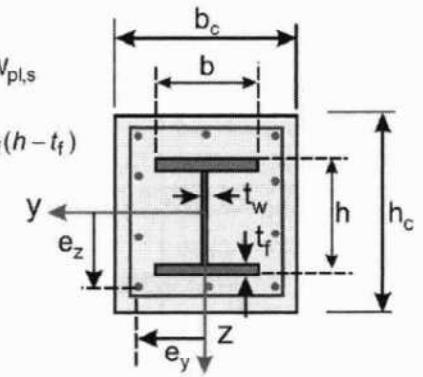
$$M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} - M_{n,Rd} \quad N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$$

$$M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$$

$$W_{pl,c} = \frac{b_c h_c^2}{4} - W_{pl,a} - W_{pl,s}$$

$$W_{pl,a} = \frac{(h-2t_f)^2 t_w}{4} + b t_f (h-t_f)$$

$$W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{zi}$$



Nulllinie außerhalb des Profils: $h/2 \leq h_n < h_c/2$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_a (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd}}$$

$$W_{pl,an} = W_{pl,a}$$

Nulllinie im Stegbereich: $2 h_n \leq h/2 - t_f$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd} + 2 t_w (2f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,an} = t_w h_n^2$$

$$W_{pl,cn} = h_c h_n^2 - W_{pl,an} - W_{pl,sn}$$

$$W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi}$$

Nulllinie im Flanschbereich: $h/2 - t_f < h_n < h/2$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - (A_a - b h) (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd} + 2 b (2f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,an} = W_{pl,a} - \frac{b}{4} (h^2 - 4h_n^2)$$

Bild 127. Ermittlung von h_n und $M_{pln,Rd}$ für vollständig einbetonierte Profile (starke Achse)

$$M_{\max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$$

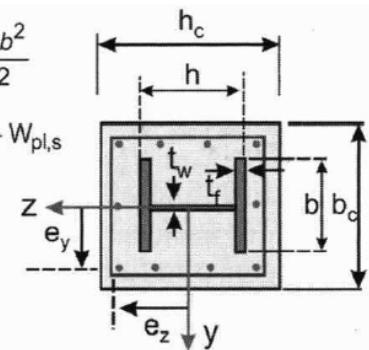
$$M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} - M_{n,Rd} \quad N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$$

$$M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$$

$$W_{pl,a} = \frac{(h-2t_f) t_w^2}{4} + \frac{t_f b^2}{2}$$

$$W_{pl,c} = \frac{h_c b_c^2}{4} - W_{pl,a} - W_{pl,s}$$

$$W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{yi}$$



Nulllinie außerhalb des Profils: $b/2 \leq h_n < b_c/2$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_a (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd}}$$

$$W_{pl,an} = W_{pl,a}$$

Nulllinie im Stegbereich: $2 h_n \leq t_w/2$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd} + 2 h (2f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,an} = h h_n^2$$

$$W_{pl,cn} = h_c h_n^2 - W_{pl,an} - W_{pl,sn}$$

$$W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{yi}$$

Nulllinie im Flanschbereich: $t_w/2 < h_n < b/2$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - (A_a - 2t_f h) (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd} + 4 t_f (2f_{yd} - f_{cd})}$$

$$W_{pl,an} = W_{pl,a} - \frac{t_f}{2} (b^2 - 4h_n^2)$$

Bild 128. Ermittlung von h_n und $M_{pln,Rd}$ für vollständig einbetonierte Profile (schwache Achse)