

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:

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

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)

$\gamma_G: [] = 1,35$

$\gamma_Q: [] = 1,5$

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

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

2.1.1 Tabelle mit Kombinationsbeiwerten – DIN EN 1990/NA

Einwirkung:	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlast			
Kategorie A,B: (Wohn-, Aufenthalts-, Büroräume)	0,7	0,5	0,3
Kategorie C,D: (Versammlungsräume, Verkaufsräume)	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: (Lagerräume)	1,0	0,9	0,8
Verkehrslast			
Kategorie F: (Fahrzeuggewicht $F \leq 30$ kN)			
Kategorie G: (Fahrzeuggewicht $30 \text{ kN} \leq F \leq 160$ kN)	0,7	0,7	
Kategorie H: (Dächer)	0,7	0,5	0,6
	0	0	0,3
			0
Windlasten	0,6	0,2	0
Schneelasten			
Orte bis zu NN +1000:	0,5	0,2	0
Orte über NN +1000:	0,7	0,5	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

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

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

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. $e = a_{c,s}$

$z_{i,s}$: 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} : [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 $t \leq$

40mm)

γ_{M0} : [] 1,0

4.1.1 Nachweis gegen Schubbeulen:

Kein Kammerbeton:

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

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

Mit Kammerbeton:

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

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

h_w : [mm] Steghöhe

t_w : [mm] Stegbreite

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

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 $t \leq 40\text{mm}$)

4.2 Momenten – Querkraft – Interaktion

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

→ Der Einfluss der Querkraft auf das Grenzmoment muss nicht berücksichtigt werden

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

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

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

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

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

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

γ_{M0} : [] 1,0

4.3 Nachweis der Momententragfähigkeit

Hinweise:

- Der Nachweis der Momententragfähigkeit ist an den Stellen extremaler 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)

$$b_{ei} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_e}{8} \\ b_i \end{array} \right.$$

Feldbereich und Zwischenaufleger:

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

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

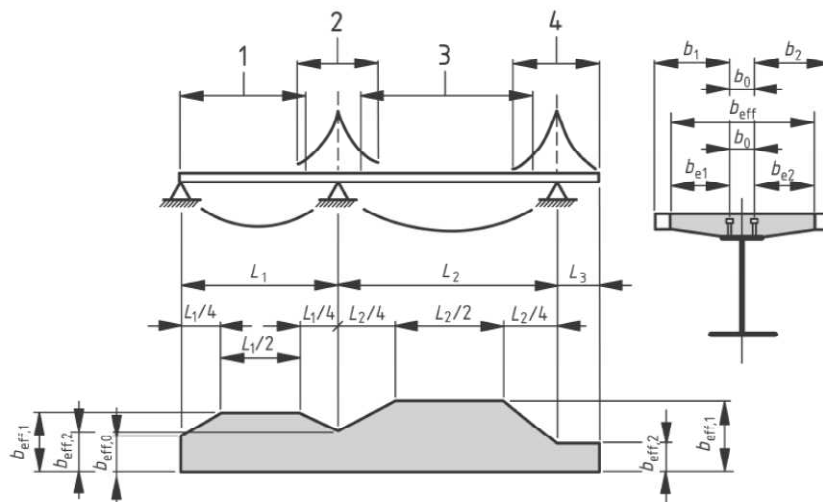
L_3 : [m] Länge des Kragarms

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 $b_{eff,2}$

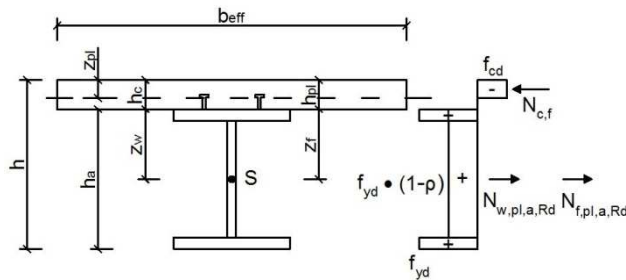
3 $L_e = 0,70 L_2$ für $b_{eff,1}$

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



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

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

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

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

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

Dimensionierung Stahlträger:

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

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

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, $z_f = \frac{\sum A_{f,i} \cdot z_{f,i}}{A_{f,\text{ges}}}$

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 $t \leq 40\text{mm}$)

$f_{c,d}$: [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: $f_{c,d} = 3,11$

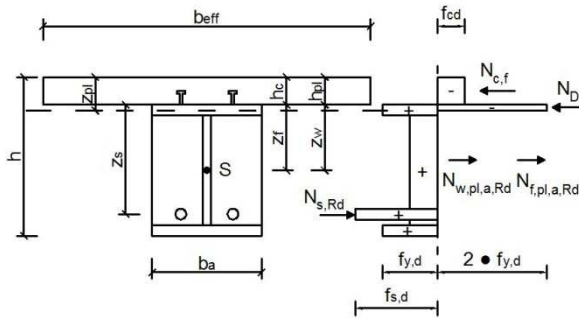
C70/85: $f_{c,d} = 3,97$

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

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

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

4.3.2.2 Positives Moment – Plastische Nulllinie im Obergurt des Stahlträgers



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

$$N_{D,pl,a,Rd} = 2 \cdot (z_{pl} - h_{pl}) \cdot b_a \cdot f_{yd} \quad [\text{KN}]$$

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

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

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

$$z_{pl} = h_{pl} + \frac{N_{w,pl,a,Rd} + N_{f,pl,a,Rd} + N_{s,Rd} - N_{c,f}}{2 \cdot b_a \cdot f_{yd}}$$

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

Hinweise:

- Summe aller Momente um Schwerachse des Betongurtes
- alle Formeln korrekt

A_s : [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: $f_{c,d} = 3,11$

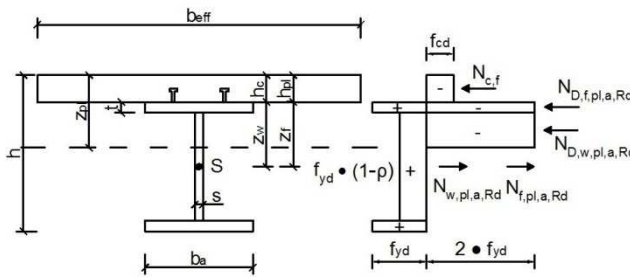
C70/85: $f_{c,d} = 3,97$

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

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

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

4.3.2.3 Positives Moment – Plastische Nulllinie im Steg des Stahlträgers



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

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

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

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

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

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

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

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] Mitragende Breite des Betongurtes, siehe oben

t_f : [cm] Höhe des oberen Trägerflansches

s : [cm] Stegbreite

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_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 $t \leq 40\text{mm}$)

$f_{c,d}$: [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: $f_{c,d} = 3,40$

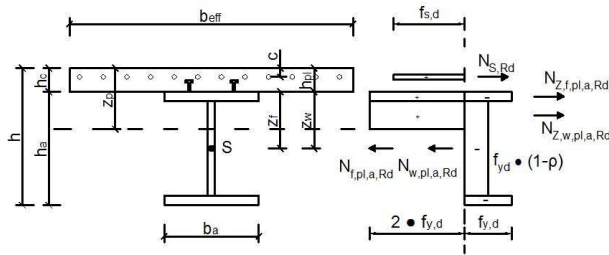
C25/30: $f_{c,d} = 1,42$ C35/45: $f_{c,d} = 1,98$ C45/55: $f_{c,d} = 2,55$ C55/67: $f_{c,d} = 3,11$ C70/85: $f_{c,d} = 3,97$

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

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

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

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)

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

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_{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_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_{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 Bewehrungsachse

$f_{s,d}$: [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: $f_y = 35,5$

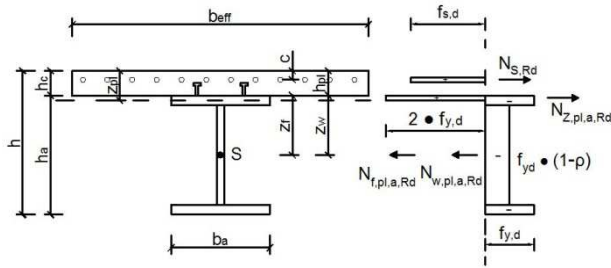
S275: $f_y = 27,5$ S450: $f_y = 44,0$ (Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

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

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

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

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_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_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 Bewehrungsachse

$f_{s,d}$: [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: $f_y = 44,0$

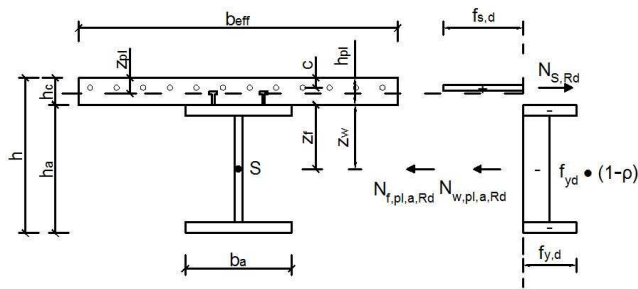
(Werte für $t \leq 40\text{mm}$)

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

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

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

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_{pl} : [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

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

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

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

$f_{s,d}$: [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

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

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

4.3.3 Plastische Biegetragfähigkeit bei teilweiser Verdübelung

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

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

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

$N_{c,f}$: [KN] Druckkraft bei vollständiger Verdübelung

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

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

5 Nachweis der Querschnittstragfähigkeit Elastisch-Elastisch

5.1 Reduktionszahlen

$n_L = n_0 \cdot (1 + \varphi_i \cdot \psi_L) \quad []$ <p>Hinweis:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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. 	$n_0: [] \text{ Reduktionszahl für kurzzeitige Beanspruchung} = \frac{E_a}{E_{cm}} \quad []$ <p>E_a: [KN/cm²] E-Modul des Baustahls = 21.000 E_{cm}: [KN/cm²] E-Modul des Betons</p> <p>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: $E_{cm} = 3600$</p> <p>φ_i: [] Kriechzahl, → siehe im Anhang ψ_L: [] Kriechbeiwert</p> <p>Kurzzeitbeanspruchung (z.B. Verkehrslast): $\psi_L = 0$ ständige Beanspruchung (z.B. Ausbaulast): $\psi_L = 1,1$ Schwinden: $\psi_L = 0,55$ Eingeprägte Verformung: $\psi_L = 1,5$</p>
---	---

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

5.2.1 Im Feldbereich

$A_{i,L} = A_a + A_{c,L} \quad [\text{cm}^2]$ $a = z_a + h_{pl} - 0,5 \cdot h_c$ $a_{c,L} = \frac{A_a \cdot a}{A_{i,L}}$ $a_{a,L} = a - a_{c,L}$ $I_{i,L} = I_a + A_a \cdot a_{a,L}^2 + A_{c,L} \cdot a_{c,L}^2 + I_{c,L} \quad [\text{cm}^4]$ <p>Hinweise:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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. 	<p>A_a: [cm²] Querschnittsfläche des Baustahlquerschnittes $A_{c,L}$: [cm²] reduzierte Betonquerschnittsfläche = $\frac{A_c}{n_L}$ A_c: [cm²] Betonquerschnittsfläche, $A_c = b_{eff} \cdot h_c$ I_a: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Stahlprofils $I_{c,L}$: [cm⁴] Reduziertes Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Betonquerschnittes. = $\frac{I_c}{n_L}$ I_c: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Betonquerschnittes. $I_c = \frac{b_{eff} \cdot h_c^3}{12}$ h_c: [cm] Kammerbetonhöhe, Aufbetonhöhe bei Profilblechen a: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie des Betongurtes und Schwerelinie des Stahlprofils. $a_{c,L}$: [cm] Abstand zwischen Schwerpunkt des ideellen Gesamtquerschnittes und Schwerpunkt des ideellen Betonquerschnittes. $a_{a,L}$: [cm] Abstand zwischen Schwerpunkt des ideellen Gesamtquerschnittes und Schwerpunkt des Stahlprofilquerschnittes. n_L: [] Reduktionszahl, → siehe oben</p>
---	---

5.2.2 Im Stützbereich

$A_{st} = A_a + A_s \quad [\text{cm}^2]$ $a = z_a + h_{pl} - c$ $z_{st} = \frac{A_a \cdot a}{A_{st}} \quad [\text{cm}]$ $I_{st} = I_a + A_s \cdot z_{st}^2 + A_a \cdot (a - z_{st})^2 \quad [\text{cm}^4]$	<p>A_a: [cm²] Querschnittsfläche des Baustahlquerschnittes A_s: [cm²] Querschnittsfläche des Betonstahls I_a: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Stahlprofils z_{st}: [cm] Lage des Gesamtschwerpunktes, bezogen auf die Schwerlinie des Betonstabstahles. a: [cm] Abstand zwischen Schwerelinie der Betonstahlbewehrung und der Schwerelinie des Stahlprofils. c: [cm] Abstand zwischen OK Betongurt und der Schwerelinie der Betonstahlbewehrung.</p>
--	---

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:

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

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

$z_{a,u}$: [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:

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

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

Spannungen im Beton:

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

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

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 oberem 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. $z_{i,a,u} = h_a - z_a + a_{a,L}$

h_a : [cm] Gesamthöhe des Stahlprofils

z_a : [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

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

$z_{i,c,u}$: [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:

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

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

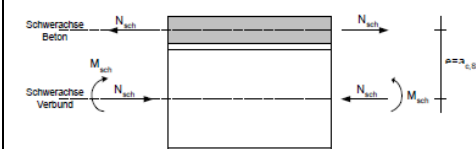
Spannungen im Beton:

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

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

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 oberem 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. $z_{i,a,u} = h_a - z_a + a_{a,s}$

h_a : [cm] Gesamthöhe des Stahlprofils

z_a : [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

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

$z_{i,c,u}$: [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

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

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:

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

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

Mit Kammerbeton:

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

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

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 $t \leq 40\text{mm}$)

5.4.3 Momententragfähigkeit

Nachweis der Baustahlspannung:

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

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

Nachweis der Betonstahlspannung: (über Stütze)

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

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

Nachweis der Betonspannung:

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

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

$f_{s,d}$: [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.

6 Nachweis der Längsschubtragfähigkeit

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

Versagen des Kopfbolzendübeln:

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

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 Kopfbolzendübeln $f_u \leq 45$
 d : [cm] Nennschaftsdurchmesser des Kopfbolzendübeln z.B.: 1,9
 h_{sc} : [cm] Nennhöhe des Dübeln 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: $E_{cm} = 3100$ C35/45: $E_{cm} = 3400$
 C45/55: $E_{cm} = 3600$
 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 Dübeln, hier: $h_{sc} \leq h_p + 75$

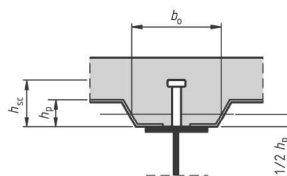


Bild 6.12 — Träger mit parallel zur Trägerachse verlaufenden Profilblechen

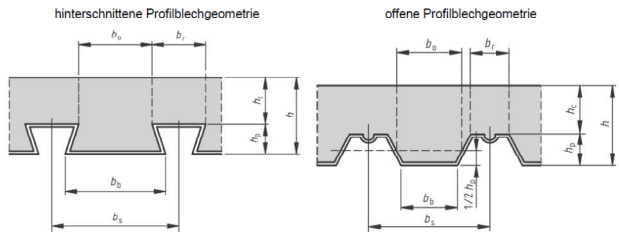
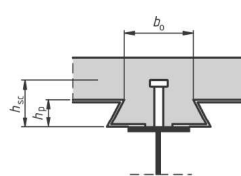


Bild 9.2 — Profilblech- und Deckenabmessungen

6.1.2 Abminderungsfaktor k_t : (bei Profilblechen rechtwinklig zur Trägerachse)

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

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

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

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

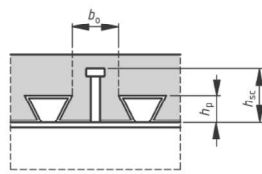
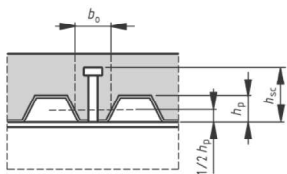
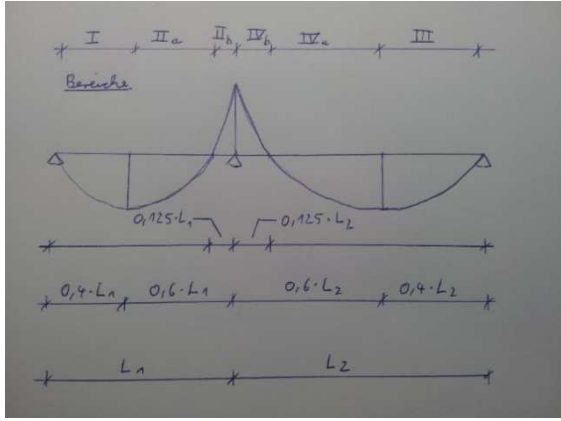


Bild 6.13 — Träger mit senkrecht zur Trägerachse verlaufenden Profilblechen

6.2 Einwirkende Längschubkraft	
6.2.1 Längsschubkraft im Bereich I, II_a, III und IV_a	
$V_{L,Ed} = \eta \cdot N_{cf}$ [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	
$V_{L,Ed} = N_s$ [KN]	η : Verdübelungsgrad, → siehe unten N_{cf} : [KN] Bemessungswert der Drucknormalkraft des Betongurtes bei vollständiger Verdübelung, → siehe oben, i.d.R. = $A_a \cdot f_y$
	
6.2.3 Anzahl der Dübel bei vollständiger Verdübelung	
$n_f = \frac{V_{L,Ed}}{P_{Rd}}$ [] → Anzahl der Dübel wählen 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: <ul style="list-style-type: none"> Eine teilweise Verdübelung ist möglich wenn der Stahlquerschnitt aus den Querschnittsklassen 1 oder 2 besteht und die Verbindungsmittel duktil sind. In Bereichen mit negativem Moment ist eine teilweise Verdübelung nicht zulässig. Hier muss vollständig verdübelt werden!! Kopfbolzendübel gelten als duktil, wenn gilt: <ul style="list-style-type: none"> $h \geq 4 \cdot d$ 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. 	
$\eta_t = \frac{M_{Ed} - M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}} \geq \eta_{min}$ $N_c = \eta_t \cdot N_{c,f}$ [KN] $n_{erf} = \frac{N_c}{P_{Rd}}$ (im Bereich L ₁ oder L ₂) → Anzahl der Dübel wählen	$N_{pl,a,Rd}$: [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/mm ²] charakteristische Streckgrenze ($\gamma_{MO} = 1,0$) 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 $N_{c,f}$: [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, $A_{UG} \leq 3 \cdot A_{OG}$:	
$L_e \leq 20m: \eta_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,3 - 0,015 \cdot L_e) \\ 0,4 \end{array} \right.$ $L_e > 20m: \eta_{min} = 1$	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 Doppelsymmetrischer Baustahlquerschnitt:	
$L_e \leq 25m: \eta_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e) \\ 0,4 \end{array} \right.$ $L_e > 25m: \eta_{min} = 1$	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.	
$L_e \leq 25m: \eta_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{355}{f_y} \cdot (1,0 - 0,04 \cdot L_e) \\ 0,4 \end{array} \right.$ $L_e > 25m: \eta_{min} = 1$	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)) <ul style="list-style-type: none"> • 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 Betonfertigteileplatten

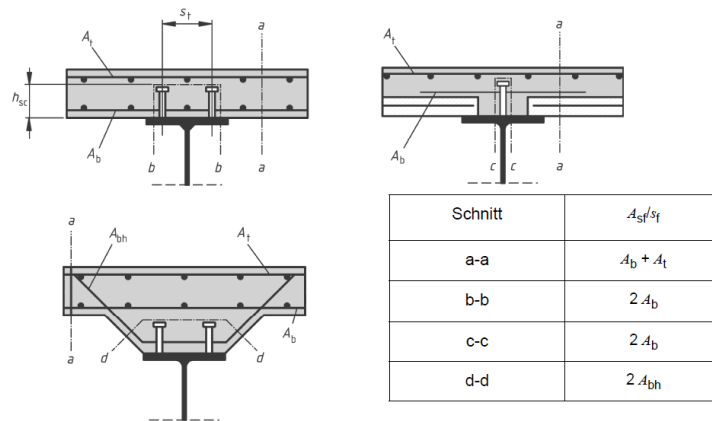


Bild 6.15 — Maßgebende Schnitte beim Nachweis der Längsschubkrafttragfähigkeit

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

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

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

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

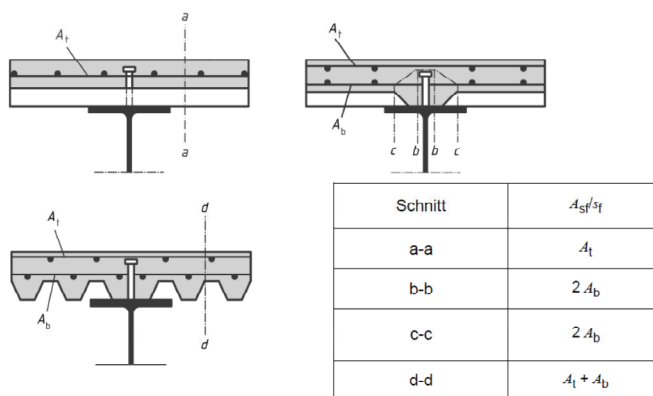


Bild 6.16 — Maßgebende Schnitte für den Nachweis der Längsschubtragfähigkeit bei Betongurten mit Profilblechen

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

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 Verbindungsmitteln ermittelt werden.	
$V_{Ed} = \frac{n \cdot P_{Rd}}{e \cdot h_f}$ [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] = $2 \cdot h_c$ h_c : [cm] Aufbetonhöhe
6.5.2.2 Schubtragfähigkeit – Versagen der Betondruckstrebe	
$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \vartheta + \frac{1}{\cot \vartheta}}$ [KN/cm ²]	h_p : [cm] Profilblechhöhe α_c : [] = 0,75 (für Normalbeton) $f_{c,d}$: [KN/cm ²] 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: $f_{c,d} = 2,27$ 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: $f_{c,d} = 3,97$ $\cot \vartheta$: [] Druckstrebenneigung = 1,2 (für Druckgurt)
6.5.2.3 Schubtragfähigkeit – Versagen der Bewehrung	
$a_{s,erf} = \frac{V_{Ed} \cdot h_f}{f_{sd} \cdot \cot \vartheta} \cdot 100$ [cm ² /m] $V_{Rd,sy} = \frac{A_{sf}}{s_f \cdot h_f} \cdot f_{sd} \cdot \cot \vartheta$ [KN/cm ²] ist keine Bewehrung vorgegeben: $a_{s,oben,erf.} = 0,5 \cdot a_{s,erf}$ [cm ² /m] $a_{s,unten,erf.} = 0,5 \cdot a_{s,erf}$ [cm ² /m] Hinweis: Die errechnete Bewehrung ist zur Hälfte oben und zur anderen Hälfte unten anzuordnen. ist Bewehrung vorgegeben: $a_{s,erf.} \leq \text{vorh.} \cdot \frac{A_{sf}}{s_f}$ Hinweis: <ul style="list-style-type: none"> Bewehrung am besten im Abstand der Dübel anordnen. Die Bewehrung muss hinter b_{eff} verankert werden!! 	$\frac{A_{sf}}{s_f}$: [cm ² /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/cm ²] siehe oben $f_{s,d}$: [KN/cm ²] Streckgrenze des Betonstahls Bst500: $f_{s,d} = 43,5$ $\cot \vartheta$: [] Druckstrebenneigung = 1,2 (39,81°) A_s : [cm ²] Querschnittsfläche eines Stabes e : [m] Abstand der Bewehrung, z.B. Dübelabstand vorh. $\frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{A_{s,vorh.}}{e} = a_{s,vorh.}$ [cm ² /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 Verbindungsmitteln 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_c : [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)
 $f_{c,d}$: [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: $f_{c,d} = 2,27$
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: $f_{c,d} = 3,97$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebenneigung = 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 Zweischnittigkeit zu halbieren und an der Plattenunterseite anzuordnen.

ist Bewehrung vorgegeben:

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

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

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: $f_{s,d} = 43,5$
 $\cot \vartheta$: [] Druckstrebenneigung = 1,2

A_s : [cm²] Querschnittsfläche eines Stabes

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

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

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

$$a_{s,vorh.} : [\text{cm}^2/\text{m}] \quad a_{s,vorh.} = 2 \cdot a_{s,unten}$$

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
- Bezogener 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:
 $\max c_z = 0,3 \cdot h$
 $\max c_y = 0,4 \cdot b$
- Verhältnisswert 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_s : [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))

Betondeckung für Stahlprofile:

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

Betondeckung für Bewehrung:

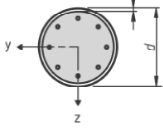
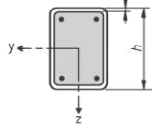
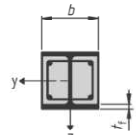
Es gelten die Anforderungen der DIN EN 1992-1-1

b_f : [mm] Flanschbreite

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} : [KN/cm²] 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: $E_{cm} = 3700$
 $N_{G,Ed}$: [KN] ständig wirkende Anteil der Normalkraft
 N_{Ed} : [KN] Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
 φ_t : [] 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 : [KN/cm²] E-Modul des Stahls = 21.000
 $I_{a,y}$: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des Stahlprofils
 E_s : [KN/cm²] E-Modul des Betonstahls = 21.000
 $I_{s,y}$: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment der Betonstahlbewehrung
 $= \sum A_i \cdot z_i^2$ (nur Steiner-Anteil)
 y_i : [cm] Abstand zwischen Gesamtschwerpunkt der Betonstahlbewehrung und Schwerpunkt des einzelnen Betonstabstahl in Y-Richtung.
 $E_{c,eff}$: [KN/cm²] Effektiver E-Modul, → siehe oben
 $I_{c,y}$: [cm⁴] 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 : [KN/cm²] E-Modul des Stahls = 21.000
 $I_{a,z}$: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment des Stahlprofils um die z-Achse
 E_s : [KN/cm²] E-Modul des Betonstahls = 21.000
 $I_{s,z}$: [cm⁴] Flächenträgheitsmoment der Betonstahlbewehrung
 $= \sum A_i \cdot y_i^2$ (nur Steiner-Anteil)
 z_i : [cm] Abstand zwischen Gesamtschwerpunkt der Betonstahlbewehrung und Schwerpunkt des einzelnen Betonstabstahl in z-Richtung.
 $E_{c,eff}$: [KN/cm²] Effektiver E-Modul, → siehe oben
 $I_{c,z}$: [cm⁴] 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

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

$(E \cdot I)_{eff}$: [KNcm²] Biegesteifigkeit, → siehe oben (maßgebend ist bei gleicher Knicklänge die kleinere Biegesteifigkeit)
 s_k : [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 : [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 : [KN/cm²] 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 $t \leq 40\text{mm}$)
 $f_{c,k}$: [KN/cm²] 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: $f_{c,k} = 5,0$
 $f_{s,k}$: [KN/cm²] charakteristische Streckgrenze von Betonstahl = 50

9.7 Bezogener Schlankheitsgrad

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

$N_{pl,Rk}$: [KN] Charakteristische Wert der vollplastischen Normalkrafttragfähigkeit, → siehe oben
 N_{cr} : [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

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

α : [] Beiwert

Knicklinie a: $\alpha = 0,13$

Knicklinie a: $\alpha = 0,21$

Knicklinie b: $\alpha = 0,34$

Knicklinie c: $\alpha = 0,49$

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. \rightarrow 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 $e = 0$:

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

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

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

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

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

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

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

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

S235: $f_y = 21,36$

S355: $f_y = 32,27$

S275: $f_y = 25,0$

S450: $f_y = 40,91$

(Werte für $t \leq 40$ mm)

f_y : [KN/cm²] 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 $t \leq 40$ mm)

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

C20/25: $f_{c,d} = 1,33$

C30/37: $f_{c,d} = 2,0$

C40/50: $f_{c,d} = 2,67$

C25/30: $f_{c,d} = 1,67$

C35/45: $f_{c,d} = 2,33$

C45/55: $f_{c,d} = 3,0$

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

$f_{c,k}$: [KN/cm²] 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: $f_{c,k} = 5,0$

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

S235: $f_y = 21,36$

S355: $f_y = 32,27$

S275: $f_y = 25,0$

S450: $f_y = 40,91$

(Werte für $t \leq 40$ mm)

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

C20/25: $f_{c,d} = 1,33$

C30/37: $f_{c,d} = 2,0$

C40/50: $f_{c,d} = 2,67$

C25/30: $f_{c,d} = 1,67$

C35/45: $f_{c,d} = 2,33$

C45/55: $f_{c,d} = 3,0$

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

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 : [cm²] Querschnittsfläche des Baustahls

$f_{y,d}$: [KN/cm²] 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 $t \leq 40\text{mm}$)

$N_{pl,Rd}$: [KN] Querschnittstragfähigkeit, → siehe oben

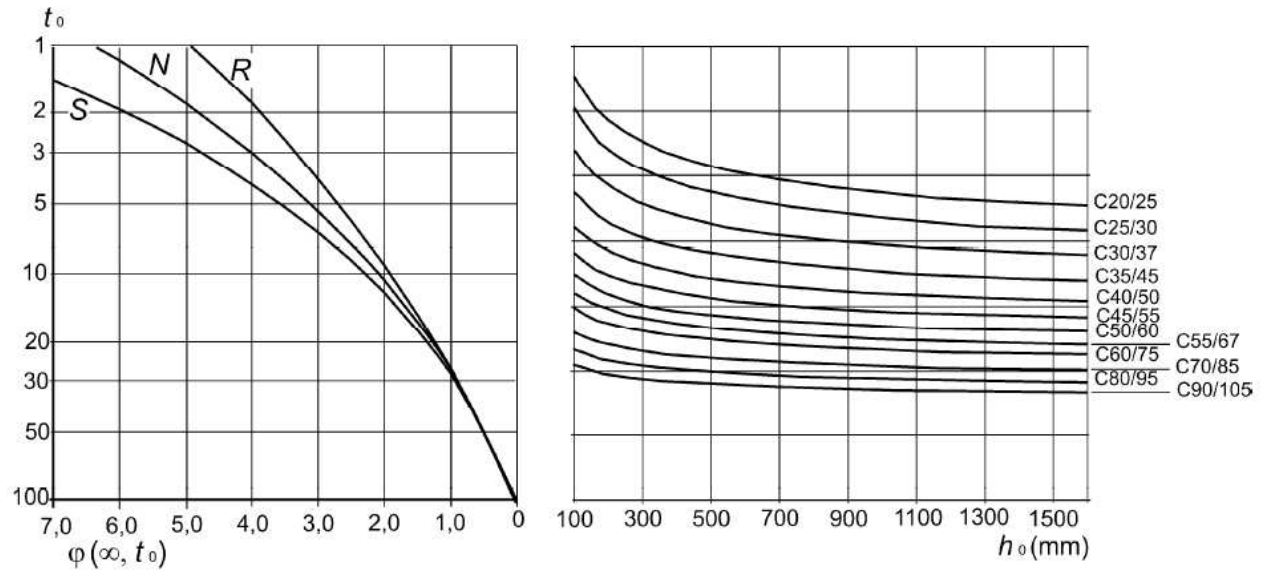
9.11 Nachweis:

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

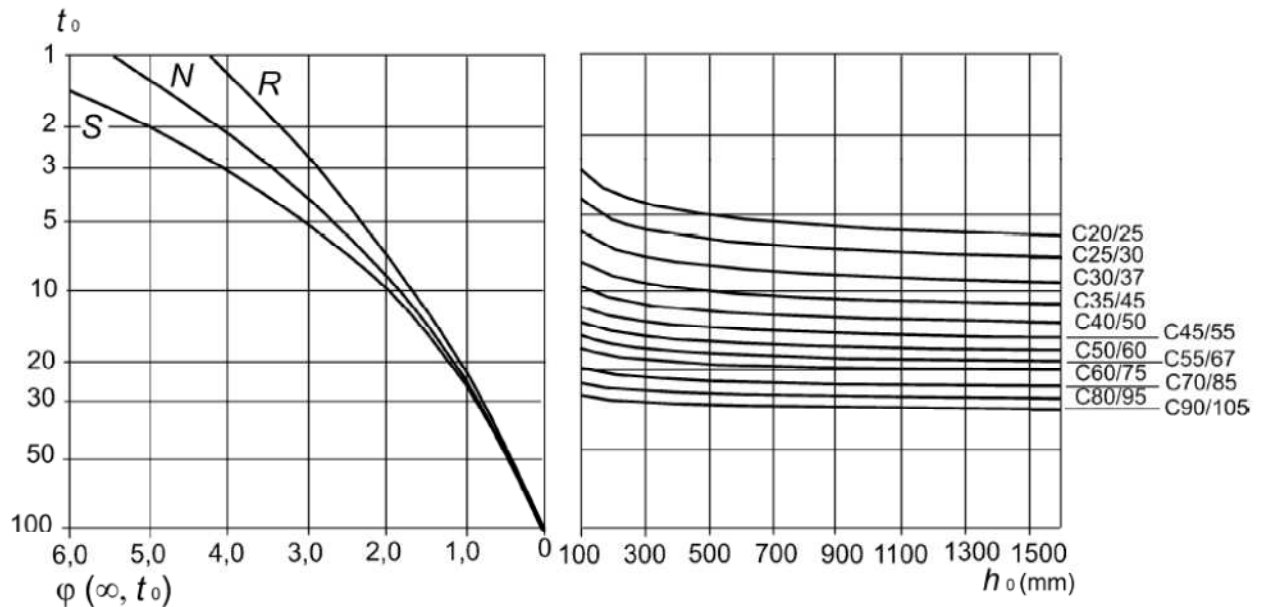
N_{Ed} : einwirkende Normalkraft

$N_{pl,Rd}$: [KN] Querschnittstragfähigkeit, → siehe oben

χ : Abminderungsfaktor, → siehe oben.

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 = $b_{\text{eff}} \cdot h_{\text{pl}}$

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

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

Betonplatte mit Stahlprofil: $u = b_{\text{eff}} + 2 \cdot h_{\text{pl}}$ (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 = $b_{\text{eff}} \cdot h_{\text{pl}}$
 u : [cm] Umfang der dem trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche = $2 \cdot b_{\text{eff}} + 2 \cdot h_{\text{pl}}$

10.2.2 Beiwerte zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit

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

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

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

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

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

10.2.3 Beiwert zur Berücksichtigung der RH auf die Grundzahl des Kriechens

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

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

10.2.4 Beiwert zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit auf die Grundzahl des Kriechens

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

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

10.2.5 wirksames Betonalter unter Berücksichtigung der Zementart

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

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

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

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

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

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

10.2.7 Grundzahl des Kriechens

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

10.2.8 Beiwert zur Berücksichtigung von RH und h_0

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

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

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

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

t : [d] Betonalter bei dem die Kriechzahl gesucht ist
→ $t = \infty \approx 70 \text{ Jahre} \approx 30000 \text{ d}$
 t_0 : [d] Betonalter bei Belastungsbeginn
→ 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 = $b_{\text{eff}} \cdot h_{\text{pl}}$
 u : [cm] Umfang der dem trocknen ausgesetzten Querschnittsfläche = $2 \cdot b_{\text{eff}} + 2 \cdot h_{\text{pl}}$

10.3.2 Beiwert für den Einfluss der Umgebungsfeuchte

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

RH: [%] rel. Feuchte der Umgebung

10.3.3 Grundwert des Trocknungsschwindens

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

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

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

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

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

h_0 : [mm] siehe oben
 t : [d] Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt
→ $t = \infty \approx 70 \text{ Jahre} \approx 30000\text{d}$
 t_s : [d] Betonalter zu Beginn des Trocknungsschwindens.
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

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

k_h : [] Koeffizient, → siehe Tabelle

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

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

Hinweis: Zwischenwerte linear interpolieren
$$k_h = k_{h,\text{max}} + \frac{h_{0,\text{max}} - h_{0,\text{vorh.}}}{h_{0,\text{max}} - h_{0,\text{min}}} \cdot (k_{h,\text{min}} - k_{h,\text{max}})$$

10.3.6 Beiwert zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs

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

t : [d] Betonalter bei dem der Schwindbeiwert gesucht ist
→ $t = \infty \approx 70 \text{ Jahre} \approx 30000\text{d}$

10.3.7 Autogene Schwinddehnung

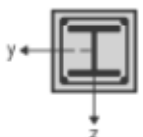
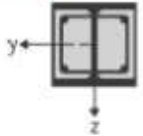
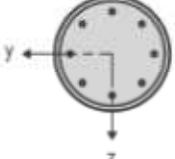
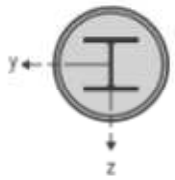
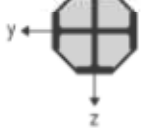
$$\varepsilon_{\text{ca}}(t) = \beta_{\text{as}}(t) \cdot 2,5 \cdot (f_{\text{ck}} - 10) \cdot 10^{-6} \text{ []}$$

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

10.3.8 Schwinddehnung zum Zeitpunkt t

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

Tabelle 6.5 — Knickspannungslinien für Verbundstützen und geometrische Ersatzimperfectionen
(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	$L/200$

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

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

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

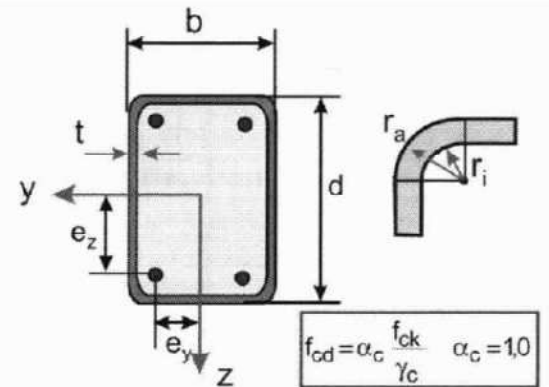
Höhe h_n und plastische Widerstandsmomente im Bereich h_n :

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Höhe h_n und plastische Widerstandsmomente im Bereich h_n :

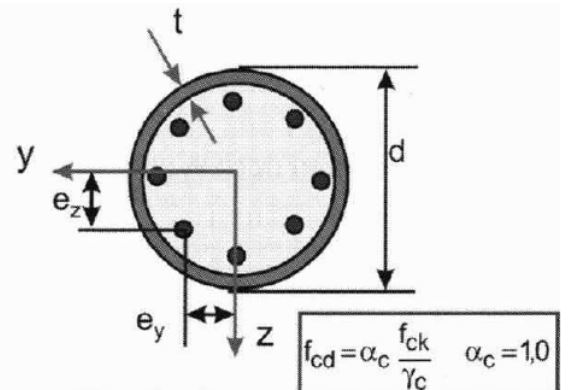
$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2 f_{sd} - f_{cd})}{2 d f_{cd} + 4 t (2 f_{yd} - f_{cd})}$$

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

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

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

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

$M_{\max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$ $M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} - M_{n,Rd} \quad N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$ $M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$	$W_{pl,c} = \frac{b_c h_c^2}{4} - W_{pl,a} - W_{pl,s}$ $W_{pl,a} = \frac{(h - 2t_f)^2 t_w}{4} + b t_f (h - t_f)$ $W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{zi}$	
<p>Nulllinie außerhalb des Profils: $h/2 \leq h_n < h_c/2$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_a (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd}}$ $W_{pl,an} = W_{pl,a}$	$W_{pl,cn} = h_c h_n^2 - W_{pl,an} - W_{pl,sn}$ $W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi}$	
<p>Nulllinie im Stegbereich: $2 h_n \leq h/2 - t_f$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd} + 2 t_w (2f_{yd} - f_{cd})}$ $W_{pl,an} = t_w h_n^2$		
<p>Nulllinie im Flanschbereich: $h/2 - t_f < h_n < h/2$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - (A_a - b h) (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 b_c f_{cd} + 2 b (2f_{yd} - f_{cd})}$ $W_{pl,an} = W_{pl,a} - \frac{b}{4} (h^2 - 4 h_n^2)$		

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

$M_{\max,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,c} f_{cd} + W_{pl,s} f_{sd}$ $M_{pl,Rd} = M_{\max,Rd} - M_{n,Rd} \quad N_{pm,Rd} = A_c f_{cd}$ $M_{n,Rd} = W_{pl,an} f_{yd} + \frac{1}{2} W_{pl,cn} f_{cd} + W_{pl,sn} f_{sd}$	$W_{pl,a} = \frac{(h - 2t_f) t_w^2}{4} + \frac{t_f b^2}{2}$ $W_{pl,c} = \frac{h_c b_c^2}{4} - W_{pl,a} - W_{pl,s}$ $W_{pl,s} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_{yi}$	
<p>Nulllinie außerhalb des Profils: $b/2 \leq h_n < b_c/2$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_a (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd}}$ $W_{pl,an} = W_{pl,a}$	$W_{pl,cn} = h_c h_n^2 - W_{pl,an} - W_{pl,sn}$ $W_{pl,sn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{yi}$	
<p>Nulllinie im Stegbereich: $2 h_n \leq t_w/2$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd} + 2 h (2f_{yd} - f_{cd})}$ $W_{pl,an} = h h_n^2$		
<p>Nulllinie im Flanschbereich: $t_w/2 < h_n < b/2$</p> $h_n = \frac{N_{pm,Rd} - (A_a - 2 t_f h) (2f_{yd} - f_{cd}) - A_{sn} (2f_{sd} - f_{cd})}{2 h_c f_{cd} + 4 t_f (2f_{yd} - f_{cd})}$ $W_{pl,an} = W_{pl,a} - \frac{t_f}{2} (b^2 - 4 h_n^2)$		

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