

Die Zusammenfassungen sind teilweise stark veraltet (Vorlesungsinhalte aus vergangenen Semestern, alte Normen...) und sollten lediglich als Hilfestellung zum Verfassen eigener Zusammenfassungen dienen.

Bemessung und Konstruktion von Bauteilen im Stahlbeton

Formelsammlung

Jonathan C. Walter

05.02.2022

Diese Formelsammlung wurde im WS 21/22 von Jonathan C. Walter verfasst
Kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Fehlerfreiheit.

Inhaltsverzeichnis

1	Fundamente	2
1.1	Unbewehrt	2
1.2	Bewehrtes Einzelfundament zentrische Belastung	2
1.3	Bewehrtes Einzelfundament exzentrische Belastung	3
1.4	Durchstanzen	3
2	Zweiachsig gespannte Platten	4
2.1	Verfahren nach Piper Martens	4
2.2	Belastungsumordnungsverfahren	5
2.3	Durchstanzen	6
2.3.1	Nachweis ohne Durchstanzbewehrung	6
2.3.2	Bemessung der Bewehrung	7
3	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	8
3.1	Einwirkungskombinationen	8
3.2	GZG Spannungsberechnung bei reiner Biegung	8
3.3	GZG Spannungsberechnung bei Biegung und Normalkraft	9
3.4	Begrenzung der Rissbreite	9
3.4.1	Rissbreitennachweis mit direkter Berechnung für eine zulässige Rissbreite $w_k \leq \omega_k$	9
3.4.2	Rissbreitennachweis mit Tabelle 7.2DE-indirekter NW über Stabdurchmesser	10
3.4.3	Rissbreitennachweis mit Tabelle 7.3N	10
3.4.4	Mindebewehrung zur Begrenzung der Rissbreite infolge Zwang	10
3.4.5	Mindebewehrung zur Begrenzung der Rissbreite infolge Zwang durch Hydratation	11
4	Begrenzung der Verformung	11
4.1	Nachweis der begrenzung der Verformungen ohne direkte Berechnung	11
4.2	Nachweis der Begrenzung der Verformungen mit direkter Berechnung	11
5	Torsion	12
6	Rahmenecke	14
6.1	Negative Rahmenecke (Zug außen)	14
6.2	Positive Rahmenecke (Zug innen)	14
7	Rahmenknoten	15
7.1	Rahmenendknoten	15
7.2	Rahmeninnenknoten	16

8 Konsolen, Ausklinkungen	16
8.1 Konsole	16
8.2 Ausklinkung	17

1 Fundamente

Betondeckung erhöhen um $\begin{cases} 20 \text{ mm} & \text{bei unebener Sauberkeitsschicht} \\ 50 \text{ mm} & \text{bei Herstellung unmittelbar auf Baugrund} \end{cases}$

1.1 Unbewehrt

- Zugspannungsnachweis Moment: $\sigma_c = \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{3\sigma_{gd}a^2}{b_y 0,85^2 h_f^2} \leq f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}$ alternativ $h_f \geq a \tan(\alpha)$

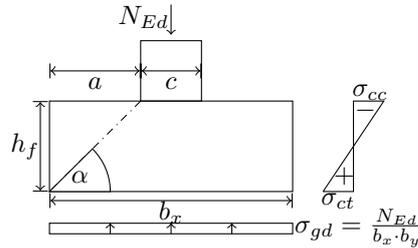
$$- M_{Ed} = \sigma_{gd} \frac{a^2}{2}$$

$$- W = b_y \frac{(0,85h_f)^2}{6}$$

$$- \gamma_c = \begin{cases} 1,5 & \text{ständig und vorrübergehend} \\ 1,3 & \text{außergewöhnlich} \end{cases}$$

$$- \tan(\alpha) \geq \sqrt{\frac{3\sigma_{gd}}{f_{ctd}} \frac{1}{0,85}} \geq 1$$

$$- \sigma_{gd} = \frac{N}{A_F}$$



- Zugspannungsnachweis Querkraft $\tau_{cp} \leq f_{cvd}$

$$- \tau_{cp} = V_{Ed} \frac{S}{b_w \cdot I} \text{ für Rechteckquerschnitt: } \tau_{cp} = 1,5 \frac{V_{Ed}}{A_{cc}}$$

* S : Flächenmoment 1. Grades

* I : Flächenmoment 2. Grades

* b_w : Bauteilbreite

* A_{cc} : Druckzonenfläche

$$- \text{wenn } \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim} \Rightarrow f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd,pl}}$$

$$- \text{wenn } \sigma_{cp} > \sigma_{c,lim} \Rightarrow f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd,pl} - \left(\frac{\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim}}{2}\right)^2}$$

$$* \sigma_{c,lim} = f_{cd,pl} - 2\sqrt{f_{ctd,pl}(f_{ctd,pl} + f_{cd,pl})}$$

$$* \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_{cc}}$$

$$* f_{cd,pl} = \alpha_{cc,pl} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$* f_{ctd,pl} = \alpha_{ct,pl} \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}$$

$$* \alpha_{ct,pl} = \alpha_{cc,pl} = 0,7$$

1.2 Bewehrtes Einzelfundament zentrische Belastung

1. Bodenpressung/Schnittgrößen (Ermittlung der mittleren Momente)

- bei nicht biegefesten Verbindung (in bezug auf Stützenmitte):

$$M_{Ed,x} = \frac{N_{Ed} \cdot b_x}{8} \left(1 - \frac{c_x}{b_x}\right)$$

$$M_{Ed,y} = \frac{N_{Ed} \cdot b_y}{8} \left(1 - \frac{c_y}{b_y}\right)$$

- bei biegefesten Verbindung (Lastabtrag vor allem über Ecken):

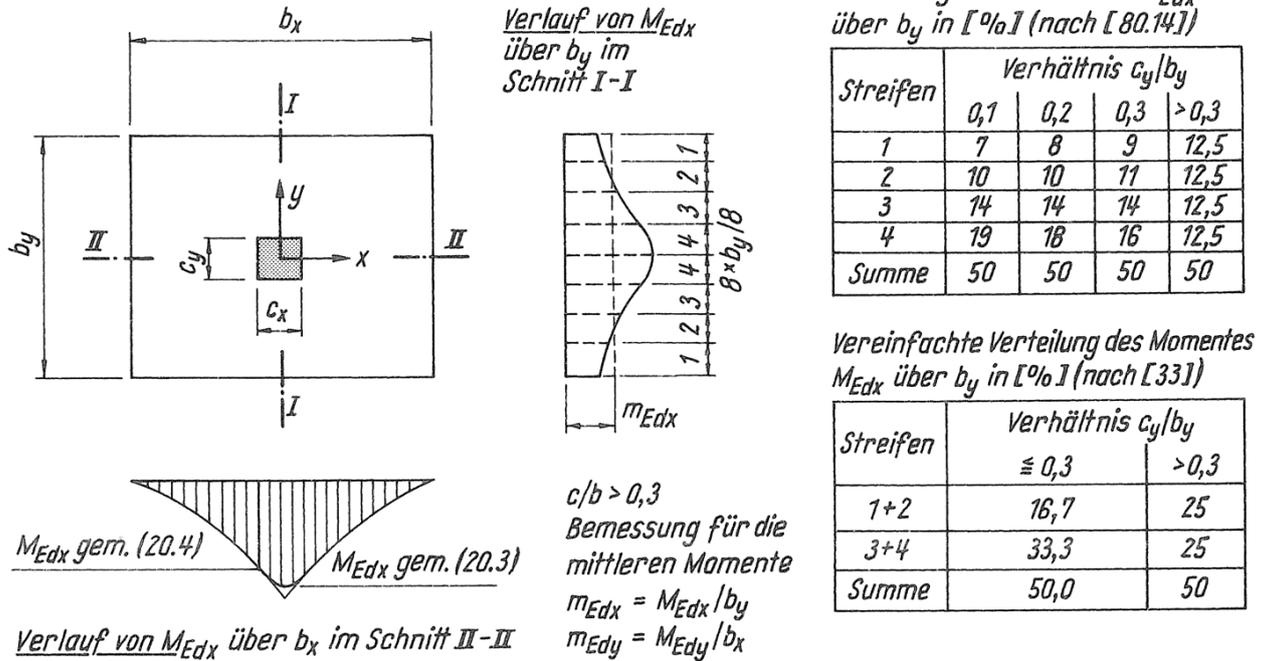
$$M_{Ed,x} = \frac{N_{Ed} \cdot b_x}{8} \left(1 - \frac{c_x}{b_x}\right)^2$$

$$M_{Ed,y} = \frac{N_{Ed} \cdot b_y}{8} \left(1 - \frac{c_y}{b_y}\right)^2$$

2. Biegebemessung in x - und y -Richtung mit mittleren Biegemomenten (ω -Verfahren)

- $\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \Rightarrow \omega$ ablesen $\Rightarrow A_s = \frac{1}{f_{yd}} (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed})$ (s. Stahlbetonbau 1)
 - $f_{yd} = 435 \text{ N mm}^{-2}$
 - Statische Nutzhöhe (gedrückter Bauteilrand bis mitte Zugbewehrung): $d = h - d_1$

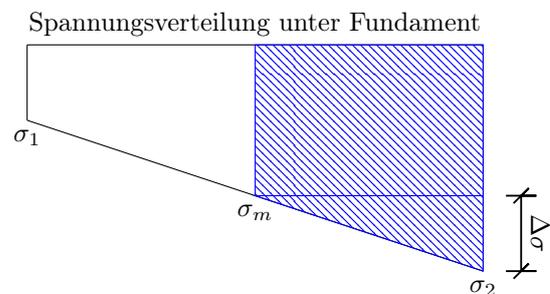
3. Bewehrungsverteilung nach Streifenprinzip



1.3 Bewehrtes Einzelfundament exzentrische Belastung

1. Schnittgrößenberechnung

- $M_{Ed,x} = b_y \left[\sigma_m \frac{b_x^2}{8} + \Delta\sigma \frac{b_x^2}{12} \right]$
- $M_{Ed,y} = b_x \left[\sigma_m \frac{b_y^2}{8} + \Delta\sigma \frac{b_y^2}{12} \right]$
 - $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$
 - $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_m$
 - * $\sigma_{1/2} = \frac{N_{Ed}}{b_x \cdot b_y} \left(1 \mp \frac{6e_x}{b_x} \right)$
 - * $e_x = \frac{M_{Ed,y}}{N_{Ed}}$



2. Biegebemessung s. Unterabschnitt 1.2 Punkt 2

- Verankerungsbereich: $A_{s,max} = 0,08 \cdot A_c$ auch im Stoßbereich

1.4 Durchstanzen

1. Überprüfung ob schlankes Fundament $2d < a_\lambda$

- $a_\lambda = \frac{b-c}{2}$
- $d = \frac{d_x + d_y}{2}$

2. Bemessung der einwirkenden reduzierten Querkraft $\sigma_{bg} = \frac{V_{Ed}}{A_F} = \frac{N_{Ed}}{A_F}$

- A_F : Abmessungen des einzelfundaments, bzw. Lastzugsfläche

3. Bemessungswert der einwirkenden Schubspannung $\nu_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed,red}}{u_{crit} \cdot d}$

- $V_{Ed,red} = V_{Ed} - 0,5A_{crit} \cdot \sigma_{bg}$
- $a_{crit} = 1 \cdot d$
 - u_{crit} : kritischer Umfang
 - A_{crit} : Fläche in u_{crit}

4. Bemessungswert des Durchstanzwiderstandes ohne Durchstanzbewehrung

$$\nu_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2d}{a_{crit}} \right) \geq \nu_{min} \cdot \left(\frac{2d}{a_{crit}} \right)$$

- $C_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_c} = 0,1$
- $\rho_l = \sqrt{\rho_{l,x} \cdot \rho_{l,y}}$ mit $\rho_{l,x/y} = \frac{a_{s,vorh,x/y}}{100d_{x/y}}$
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{[mm]}}} \leq 2$
- $\nu_{min} = \begin{cases} \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}; & \text{wenn } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0,0375}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}; & \text{wenn } d > 800 \text{ mm} \end{cases}$

5. Maximale Durchstanztragfähigkeit des Fundaments $\nu_{Rd,max} = 1,4\nu_{Rd,c}$

- Wenn $\nu_{Ed} \leq \nu_{Rd,c} \leq \nu_{Rd,max}$ ist keine zusätzliche Durchstanzbewehrung anzuordnen

6. Ermittlung der erforderlichen Durchstanzbewehrung $erf A_{sw,s} = \frac{\beta \cdot V_{Ed,red}}{1,3f_{yw,d} \cdot \sin(\alpha)}$ 7. Minstdurchstanzbewehrung $A_{SW,min} = A_s \cdot \sin(\alpha) \frac{0,08\sqrt{f_{ck}}}{1,5f_{yk}} s_r \cdot s_t$

- $s_r = 1 \cdot d$
- $s_t \leq 0,25d$

8. Mindestbewehrung berechnen mit $m_{x/y} = V_{Ed} \cdot \eta_{Ed}$; η_{Ed} nach Tab. NA. 6.1.1

Tabelle NA.6.1.1 — Momentenbeiwerte und Verteilungsbreite der Mindestlängsbewehrung

Zeile	Spalte	η_x		anzu- setzende Breite ^b	η_y		anzu- setzende Breite ^b
		η_x			η_y		
		Zug an der Platten- oberseite ^c	Zug an der Platten- unterseite ^c		Zug an der Platten- oberseite ^c	Zug an der Platten- unterseite ^c	
1	Innenstütze	0,125	0	$0,3 l_y$	0,125	0	$0,3 l_x$
2	Randstütze, Rand „x“ ^a	0,25	0	$0,15 l_y$	0,125	0,125	(je m Platten- breite)
3	Randstütze, Rand „y“ ^a	0,125	0,124	(je m Platten- breite)	0,25	0	$0,15 l_x$
4	Eckstütze	0,5	0,5	(je m Platten- breite)	0,5	0,5	(je m Platten- breite)

^a Definition der Ränder und der Stützenabstände l_x und l_y siehe Bild NA.6.22.1.
^b Siehe Bild NA.6.22.1.
^c Die Plattenoberseite bezeichnet die der Lasteinleitungsfläche gegenüberliegende Seite der Platte; die Plattenunterseite diejenige Seite, auf der die Lasteinleitungsfläche liegt.

- Wenn $a_{s,vorh} < a_s$ muss zulagebewehrung in höhe von $\Delta a_s \geq a_s - a_{s,vorh}$ eingelegt werden

2 Zweiachsig gespannte Platten

2.1 Verfahren nach Piper Martens

- Voraussetzungen:
 - Verkehrslast $q_d \leq 2g_d$

- Gleichlast
- Konstante Plattendicke
- Plattenfelder untereinander Biegesteif

- Feldmomente

1. Lagerungsbedingungen und Plattentyp bestimmen
2. Stützweitenverhältnis des Feldes bestimmen (l_x kürzere Seite)
3. f_x und f_y ablesen
4. Feldmomente mit $m_{f,x/y} = p d \frac{l_x^2}{f_{x/y}}$

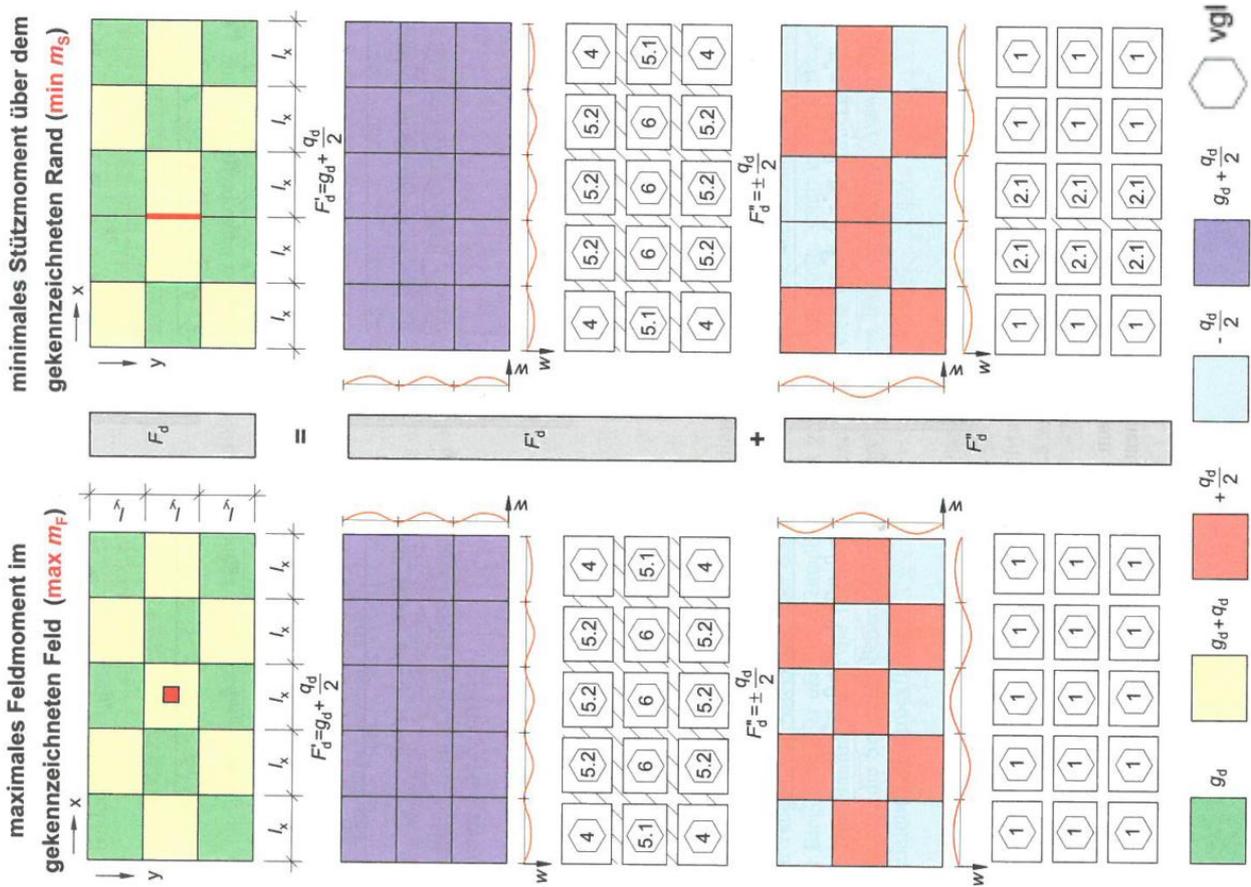
- Stützmomente

1. Lagerungsbedingungen und Plattentyp bestimmen
2. Stützweitenverhältnis des Feldes bestimmen (l_x kürzere Seite)
3. s_x und s_y für beide Platten ablesen

$$4. \text{ Stützmomente mit } m_{s,x/y} = - \left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \begin{array}{l} 0, 5(m_{s1,x/y} + m_{s2,x/y}) \\ 0, 75 \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} m_{s1,x/y} \\ m_{s2,x/y} \end{array} \right\} \end{array} \right\} ; \quad \frac{l_{x1}}{l_{x2}} < 5 \\ \max \left\{ \begin{array}{l} m_{s1,x/y} \\ m_{s2,x/y} \end{array} \right\} ; \quad \frac{l_{x1}}{l_{x2}} > 5 \end{array} \right\}$$

2.2 Belastungsumordnungsverfahren

1. Bemessungslast q_d und g_d bestimmen
2. Überprüfung der Anwendungsgrenzen: $\frac{\min l_x}{\max l_x} \geq 0,75$ und $\frac{\min l_y}{\max l_y} \geq 0,75$, Gleichlast, konstante Plattendicke, Platten untereinander biegesteif
3. Berechnung der Eingangswerte: $F_d = F'_d + F''_d$
 - $F'_d = g_d + \frac{q_d}{2}$
 - $F''_d = \pm \frac{q_d}{2}$
4. Feldmomente berechnen für $F'_d = p \Rightarrow m_{x_m} = \frac{p \cdot l_x^2}{Tafelwert}$ (l_x immer kürzeste Seite)
 - Last gleichmäßig auf alle Platten verteilt
 - Pestimmung des Plattentyps
 - Mit Verhältnis von $\frac{l_y}{l_x}$ und Lagerung *Tafelwert* für x und y -rtg. aus Czerny-Tafeln ablesen
5. Feldmomente berechnen für $F''_d = p \Rightarrow m_{x_m} = \frac{p \cdot l_x^2}{Tafelwert}$
 - Last als „Schachbrettmuster“ angeordnet (allseitig gelenkig gelagert)
 - Mit Verhältnis von $\frac{l_y}{l_x}$ *Tafelwert* für x und y -rtg. aus Czerny-Tafeln ablesen (hier Lagerung=1)
6. Feldmomente infolge F'_d und F''_d für jedes Feld aufaddieren, größtes Moment ist Maßgebend
7. Stützmoment berechnen für F'_d analog zu Punkt 4
8. Stützmoment berechnen für F''_d analog zu Punkt 5
 - Alle Lastkombinationen müssen sowohl in x als auch in y Richtung ausprobiert werden
 - aus linkem und rechtem Stützmoment muss der Mittelwert gebildet werden
9. Mit maßgebenden Momenten anschließend Biege und Querbewehrung berechnen



2.3 Durchstanzen

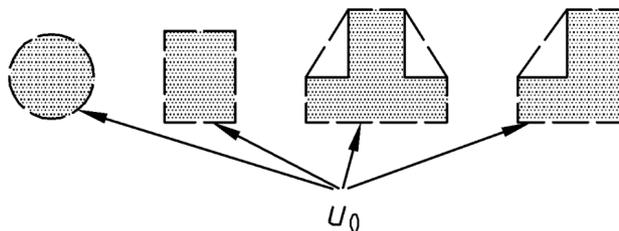
2.3.1 Nachweis ohne Durchstanzbewehrung

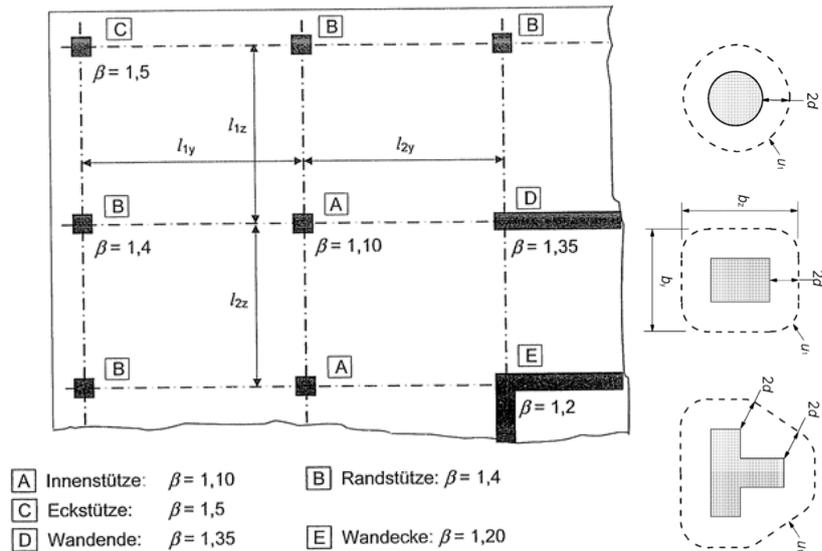
1. Überprüfen ob Nachweiskonzept anwendbar ist:

- Kreisquerschnitt mit Umfang $u_0 \leq 12d$
- Rechteckquerschnitt mit Umfang $u_0 \leq 12d$ und Verhältnis Länge zu Breite $\frac{l}{b} \leq 2$
 - $d = \frac{d_x + d_y}{2}$
 - u_0 : Stützenumfang

2. Keine Durchstanzbewehrung nötig, wenn: $\nu_{Ed}(u_1) \leq \nu_{Rd,c}(u_1)$

- Einwirkende Querkraft: $\nu_{Ed}(u_1) = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 \cdot d}$ wenn $0,8 \leq \frac{l_{1,y/z}}{l_{2,y/z}} \leq 1,25$
 - Rundschnitt u_1 im Abstand a_1 für Rechteck: $u_1 = 2\pi a_1 + 2b + 2h$
 - * $a_1 = 2 \cdot d_{eff}$
 - * $d = \frac{d_x + d_y}{2}$
 - * Lasterhöhungsfaktor β abhängig von Stützenart





- Durchstanzwiderstand: $\nu_{Rd,c}(u_1) = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,1\sigma_{cp} \geq \nu_{\min} + 0,1\sigma_{cp}$
 - $C_{Rd,c} = \begin{cases} 0,18 = 0,12 \\ \frac{0,18}{\gamma_c} (0,1 \frac{u_0}{d} + 0,6) \end{cases}$; bei Innenstütze, wenn $\frac{u_0}{d} < 4$ $\gamma_c = 1,5$
 - $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{[mm]}}} \leq 2$
 - $\rho_l = \sqrt{\rho_{l,x} \cdot \rho_{l,y}} \leq \begin{cases} 0,02 \\ 0,5 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \end{cases}$ mit $\rho_{l,x/y} = \frac{a_{s,vorh,x/y}}{100d_{x/y}}$ (Längsbewehrungsgrad, keine Druckbewehrung ansetzen)
 - $\nu_{\min} = \begin{cases} \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}; & \text{wenn } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0,0375}{\gamma_c} \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}; & \text{wenn } d > 800 \text{ mm} \end{cases}$

2.3.2 Bemessung der Bewehrung

1. Druckstrebentragfähigkeit im kritischen Rundschnitt $\nu_{Ed}(u_1) \leq \nu_{Rd,\max}(u_1)$

- $\nu_{Rd,\max} = 1,4\nu_{Rd,c}(u_1)$ Günstige Normalkräfte dürfen nicht angesetzt werden

2. Ermittlung der statisch notwendigen Bewehrung

$$\nu_{Rd,cs} = 0,75 \cdot \nu_{Rd,c}(u_1) + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) \left(\frac{1}{u_1 \cdot d} \right) A_{sw} \cdot f_{ywd,eff} \sin(\alpha) \Rightarrow A_{sw,i} = \frac{(\nu_{Ed}(u_1) - 0,75\nu_{Rd,c}(u_1)) \cdot s_r \cdot u_1}{1,5 f_{ywd,eff} \sin(\alpha)}$$

- $f_{ywd,eff} = 250 + 0,25d_{[mm]} \leq f_{yd}$
- $\max s_r \leq 0,75d$
- $s_r = \frac{\max s_r}{\sqrt{2}}$ mit Toleranz von $\pm 0,2d$
- α i.d.R. 90°
- Anpassung für die ersten beiden Rundschnitte: (immer min. 2 Bewehrungsreihen anordnen)
 - $A_{sw,1} = A_{sw,i} \cdot \kappa_{sw,1} = A_{sw,i} \cdot 2,5$
 - $A_{sw,2} = A_{sw,i} \cdot \kappa_{sw,2} = A_{sw,i} \cdot 1,4$

3. Erforderliche Anzahl an Bewehrungsreihen: $n = 1 + \frac{a_v - s_0}{s_r}$

- $a_v = a_{out} - 1,5d$
- $0,3d \leq \max s_0 \leq 0,5d$
- $s_0 = \frac{\max s_0}{\sqrt{2}}$ Abstand der ersten Bewehrungsreihe
- $\max s_r \leq 0,75d$
- $s_r = \frac{\max s_r}{\sqrt{2}}$ mit Toleranz von $\pm 0,2d$ Abstand aller weiteren Bewehrungsreihen
- $a_{out} = \frac{u_{out} - 2h - 2b}{2\pi}$

- $u_{out} = \beta \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c}^* \cdot d}$
- $v_{Rd,c}^* = \frac{C_{Rd,c,Querkraft}}{C_{Rd,c,Durchstanzen}} v_{Rd,c}$

4. Überprüfung der Mindestdurchstanzbewehrung $A_{sw,min} = \frac{0,08}{f_{yk}} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{1,5} s_r \cdot s_t$

- $s_t = 1,5d$ Tangentialer Bewehrungsabstand

5. Minimaler Durchmesser berechnen: $\varnothing_{sw,min} = \sqrt{4 \frac{A_{sw,min}}{\pi}}$ aus $A_{s,min} = \pi \frac{(\varnothing_{sw})^2}{4}$

6. Maximaler Durchmesser berechnen: $\varnothing_{sw,max} \leq \begin{cases} 0,05d : & \text{Bügel} \\ 0,08d : & \text{Schrägaufbiegung} \end{cases}$

7. Anzahl der Bügelschenkel je Bewehrungsreihe bestimmen:

Reihe 1: Bügelschenkelanzahl = $\max \begin{cases} n_{1\varnothing_{sw}} \\ n_{erf} \end{cases}$

– Statisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{\varnothing_{sw}} = \frac{A_{sw,1}}{A_s \varnothing_{sw}}$

– Geometrisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{erf} = \frac{U_{i,1}}{s_t}$ mit $U_{i,1} = 2(h + 2s_0) + 2(b + 2s_0)$

Reihe 2: Bügelschenkelanzahl = $\max \begin{cases} n_{2\varnothing_{sw}} \\ n_{erf} \end{cases}$

– Statisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{\varnothing_{sw}} = \frac{A_{sw,2}}{A_s \varnothing_{sw}}$

– Geometrisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{erf} = \frac{U_{i,2}}{s_t}$ mit $U_{i,2} = 2(h + 2(s_0 + s_r)) + 2(b + 2(s_0 + s_r))$

Reihe 3: Bügelschenkelanzahl = $\max \begin{cases} n_{3\varnothing_{sw}} \\ n_{erf} \end{cases}$

– Statisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{\varnothing_{sw}} = \frac{A_{sw,3}}{A_s \varnothing_{sw}}$

– Geometrisch erf. Bügelschenkelanzahl: $n_{erf} = \frac{U_{i,3}}{s_t}$ mit $U_{i,3} = 2(h + 2(s_0 + 2s_r)) + 2(b + 2(s_0 + 2s_r))$

3 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

3.1 Einwirkungskombinationen

- seltene Kombinationen der Einwirkung $E_{d,rare} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} + E_{Qk,j} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot E_{Qk,i}$
- häufige Kombination der Einwirkungen $E_{d,freque} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} + \psi_{1,1} \cdot E_{Qk,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot E_{Qk,i}$
- quasi ständige Kombination der Einwirkungen $E_{d,perm} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot E_{Qk,i}$

3.2 GZG Spannungsberechnung bei reiner Biegung

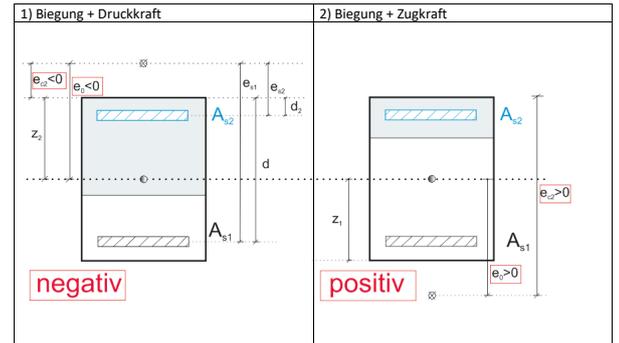
1. Berechnung der maximalen Momente $M_{E_{d,rare}}$ und $M_{E_{d,perm}}$ mit Auflast $E_{d,rare}$ und $E_{d,perm}$ (abhängig vom Statischen System)
2. Begrenzung der Betonspannung
 - Kriechverformung \rightarrow NW mit quasi ständiger EWK $\sigma_{c,perm} \leq 0,45f_{ck}$
 - $\sigma_{c,perm} = -\frac{2M_{E_{d,perm}}}{b \cdot x_{II} \cdot z_{II}}$
 - Druckzohnehöhe x_{II} im Zustand II nach Dutulescu Tabellen
 - Längsrisse vermeiden \rightarrow NW mit seltener EWK $\sigma_{c,rare} \leq 0,6f_{ck}$
 - $\sigma_{c,rare} = -\frac{2M_{E_{d,rare}}}{b \cdot x_{II} \cdot z_{II}}$
3. Begrenzung der Stahlspannung NW mit seltener EWK $\sigma_{sl,rare} \leq 0,8f_{yk}$; bei indirekter Einwirkung (Zwang) $\sigma_{s1,rare} \leq 1,0f_{yk}$

- $\sigma_{s1,rare} = \frac{M_{Ed,rare}}{A_{s1} \cdot z_{II}}$
 - Druckzohnehöhe x_{II} im Zustand II nach Dutulescu Tabellen (siehe Punkt 2)
 - $\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$
 - Innerer Hebelarm $z_{II} \approx d - \frac{x_{II}}{3}$, $\left(\begin{array}{l} \text{Abschätzung nach Norm:} \\ \text{Abschätzung nach Spannungsblock:} \end{array} \right. \begin{array}{l} z_{II} \approx 0,9d \\ z_{II} \approx \zeta \cdot d \end{array} \right)$

3.3 GZG Spannungsberechnung bei Biegung und Normalkraft

1. Berechnung der Eingangswerte

- Druck und Biegung (-), Zug und Biegung (+)
 - $z_2 = z_G = \frac{h}{2}$
 - $e_{c2} = e_0 + z_2$
 - $e_{s1} = e_{c2} - d$
 - $e_{s2} = e_{c2} - d_2$
 - $e_0 = \frac{M_{ed}}{N_{ed}}$
 - $\alpha = \frac{E_s}{E_{cm}}$



2. Tafelwerte nach Dutulescu aus Tabelle 2 berechnen und x_{II} bestimmen, wenn Polynom 3. Grades \Rightarrow Iterierten mit Newton-Rapson Verfahren

- Newton-Rapson Verfahren $x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$
- Für x_i Startwert einsetzen, nach erstem Iterationsschritt Ergebnis für den Startwert einsetzen

3. Spannungsberechnung

- Betondruckspannung: $\sigma_{c2} = -E_c \cdot X \cdot x_{II} = \frac{M_{Ed}}{I_{II}} x_{II}$
- Stahldruckspannung: $\sigma_{s2} = -E_s \cdot X \cdot (x_{II} - d_2)$
- Stahlzugspannung: $\sigma_{s1} = +E_s \cdot X \cdot (d - x_{II}) = \alpha_e \frac{M_{Ed}}{I_{II}} (d - x_{II})$
 - Krümmung: $X = -\frac{N_{Ed}}{E_c} \cdot \frac{1}{s_{i,NL}}$
 - Ideelles statisches Moment um die Nulllinie ($s_{i,NL} = I_{II}$), aus Dutulescu-Tafeln
 - $z_{II} \approx d - \frac{x_{II}}{3}$

3.4 Begrenzung der Rissbreite

3.4.1 Rissbreitennachweis mit direkter Berechnung für eine zulässige Rissbreite $w_k \leq \omega_k$

- $\omega_k = s_{r,\max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$
 - $s_{r,\max} = \min \left\{ \frac{\frac{\sigma_s}{E_s}}{3,6 \rho_{eff}}, \frac{\frac{\sigma_s}{E_s}}{3,6 f_{ct,eff}} \right\}$
 - $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \max \left\{ \frac{\sigma_s}{E_s} - 0,4 \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot \rho_{eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff}), 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \right\}$
 - * $A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff}$ mit $h_{c,eff} = 2,5(h - d) = 2,5d_1$
 - * $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ Wenn keine genaueren Angaben gemacht werden
 - * $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{ctm}}$
 - * $\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$
 - * $\sigma_{s1} = \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}} \cdot \frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} \cdot f_{yd}$ (Abschätzformel) oder nach DUTULESCU

3.4.2 Rissbreitennachweis mit Tabelle 7.2DE-indirekter NW über Stabdurchmesser

1. σ_s berechnen
2. Mit σ_s und w_k aus Tab. 7.2DE Grenzdurchmesser \varnothing_s^* ablesen
3. Wenn $f_{ct,eff} < 2.9 \text{ N mm}^{-2}$ muss mit $\varnothing_{s,lim} = \varnothing_s^* \cdot \max \left\{ \frac{f_{ct,eff}}{2.9}, \frac{\sigma_s \cdot A_s}{4(h-d)b \cdot 2.9} \right\}$ abgemindert werden
4. NW ist eingehalten, wenn $\varnothing_{s,vorh.} \leq \varnothing_{s,lim}$

Tabelle 7.2DE — Grenzdurchmesser bei Betonstählen

σ_s^b N/mm ²	Grenzdurchmesser bei Betonstählen $\varnothing_s^*^a$ mm		
	w_k		
	0,4 mm	0,3 mm	0,2 mm
160	54	41	27
200	35	26	17
240	24	18	12
280	18	13	9
320	14	10	7
360	11	8	5
400	9	7	4
450	7	5	3

^a Die Werte dieser Tabelle basieren auf den folgenden Annahmen:
Grenzwerte der Gleichungen (7.9) und (7.11) mit $f_{ct,eff} = 2,9 \text{ N/mm}^2$ und $E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$:

$$\sigma_s = \sqrt{w_k \frac{3,48 \cdot 10^6}{\varnothing_s^*}}$$

^b unter der maßgebenden Einwirkungskombination

Tabelle 7.3N — Höchstwerte der Stababstände zur Begrenzung der Rissbreiten¹

Stahlspannung ² [N/mm ²]	Höchstwerte der Stababstände [mm]		
	$w_k=0,4 \text{ mm}$	$w_k=0,3 \text{ mm}$	$w_k=0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	—
360	100	50	—

3.4.3 Rissbreitennachweis mit Tabelle 7.3N

1. σ_s berechnen
2. Mit σ_s und w_k aus Tab. 7.3N Höchstwert der Stababstände ablesen
3. NW ist eingehalten, wenn $s_{vorh} \leq s_{lim}$

3.4.4 Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite infolge Zwang

- $A_{s,erf} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$
 - $k_c = 0,4 \left[1 + \frac{\sigma_c}{k_1 \frac{h}{h^*} f_{ct,eff}} \right] \leq 1,0$ (rechteckige Querschnitte und Stege von Plattenbalken)
 - $k_c = 0,9 \frac{F_{cr,Gurt}}{A_{ct} \cdot f_{ct,eff}} \geq 0,5$ (Zuggurte von Plattenbalken und Hohlkästen)
 - * $\left[\text{Reiner Zug: } \sigma_c = f_{ct,eff} \Rightarrow k_1 = \frac{2}{3} \Rightarrow k_c = 1,0; \text{ Reine Biegung: } \sigma_c = 0 \Rightarrow k_c = 0,4 \right]$
 - * $k_1 = \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \quad \text{für Drucknormalkraft} \\ = \frac{2}{3} \frac{h^*}{h} \quad \text{für Zugnormalkraft} \end{array} \right\}; h^* = \left\{ \begin{array}{l} h, \quad h < 1 \text{ m} \\ 1 \text{ m}, \quad h \geq 1 \text{ m} \end{array} \right\}$
 - $k = \left\{ \begin{array}{l} 0,8; \quad h \leq 300 \text{ mm} \\ 0,5; \quad h \geq 800 \text{ mm} \end{array} \right\}$ dazwischen interpolieren; Zwang außerhalb des Bauteils $\Rightarrow k = 1$
 - * h : kleinerer Wert aus Höhe und breite
 - $f_{ct,eff} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{ctm} \\ 3 \text{ N mm}^{-2} \end{array} \right\}$
 - A_{ct} : Betonzugzone im Zustand 1
 - Stahlspannung: $\sigma_s = \sqrt{w_k \frac{3,48 \cdot 10^6}{\varnothing_s^*}}$
 - * $\varnothing_s^* = \varnothing \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,9}{f_{ct,eff}} \\ \frac{4(h-d) \cdot 2,9}{k_c \cdot k \cdot h_{cr} \cdot f_{ct,eff}} \end{array} \right\}$
 - * h_{cr} : höhe der Zugzone im Zustand 1
- NW eingehalten, wenn $A_{s,vorh} \geq A_{s,erf}$

3.4.5 Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite infolge Zwang durch Hydratation

1. Temperaturdehnung Berechnen $\Delta\epsilon_T = \Delta T \cdot \alpha_T$ wenn Grenzdehnung des Betons ($\epsilon_c = 0,1\%$)
2. Berechnung von $A_{s,erf}$ wie in Unterunterabschnitt 3.4.4

- bei frühem Zwang:
 - nach 3 Tagen $f_{ct,eff} = 0,65 \cdot f_{ctm}$
 - nach 5 Tagen $f_{ct,eff} = 0,75 \cdot f_{ctm}$
 - nach 7 Tagen $f_{ct,eff} = 0,85 \cdot f_{ctm}$

4 Begrenzung der Verformung

4.1 Nachweis der begrenzung der Verformungen ohne direkte Berechnung

- Nachweis: $w_{vorh} \leq w_{zul}$

$$\begin{aligned}
 - \rho \leq \rho_0: w_{zul} &= K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right)^3} \right] \\
 - \rho > \rho_0: w_{zul} &= K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \\
 - \text{Zusätzlich: } w_{zul} &\leq \begin{cases} K \cdot 35 \text{ (Allgemein)} \\ K^2 \frac{150}{l} \text{ (bei verformungsempfindlichen Ausbauelementen)} \end{cases}
 \end{aligned}$$

- * K aus Tabelle 7.4N Ablesen
- * $\rho_0 = 10^{-3} \sqrt{f_{ck}}$
- * $\rho = \frac{A_{s1,erf}}{b \cdot d}$: erforderlicher Zugbewehrungsgrad
- * $\rho' = \frac{A_{s2,erf}}{b \cdot d}$: erforderlicher Druckbewehrungsgrad

Tabelle 7.4N — Grundwerte der Biegeschlantheit von Stahlbetonbauteilen ohne Drucknormalkraft

Statisches System	K	Beton hoch beansprucht	Beton gering beansprucht
		$\rho = 1,5\%$	$\rho = 0,5\%$
frei drehbar gelagerter Einfeldträger; gelenkig gelagerte einachsig oder zweiachsig gespannte Platte	1,0	14	20
Endfeld eines Durchlaufträgers oder einer einachsig gespannten durchlaufenden Platte; Endfeld einer zweiachsig gespannten Platte, die kontinuierlich über einer längere Seite durchläuft	1,3	18	26
Mittelfeld eines Balkens oder einer einachsig oder zweiachsig gespannten Platte	1,5	20	30
Platte, die ohne Unterzüge auf Stützen gelagert ist (Flachdecke) (auf Grundlage der größeren Spannweite)	1,2	17	24
Kragträger	0,4	6	8

Anwendungsgrenzen Tabelle 0,8 < $\frac{l_{eff,1}}{l_{eff,2}} < 1,25$

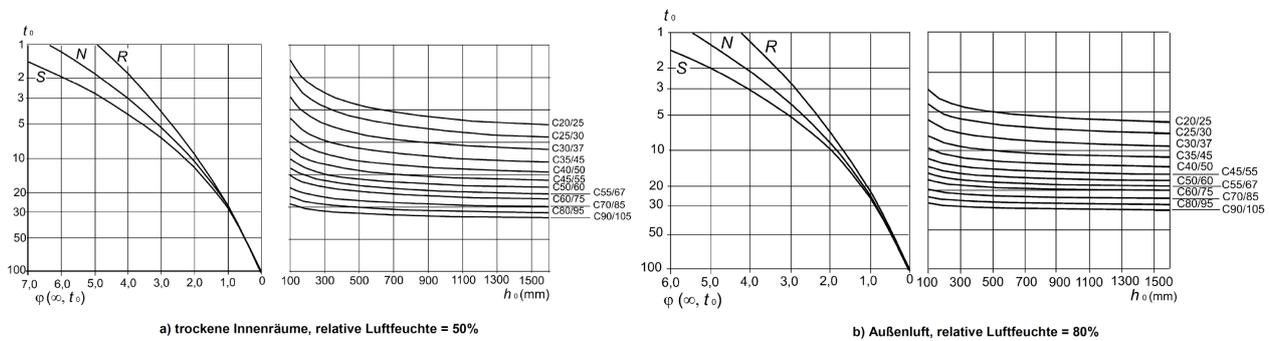
- Berücksichtigung erhöhter Bewehrungsmenge: $w_{zul}^* = w_{zul} \frac{310}{\sigma_{s,perm}} = w_{zul} \frac{500}{f_{yk} \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}}}$
 - * $\sigma_{s,perm} = \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}} \cdot \frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} \cdot f_{yd}$
- Besonderheiten
 - * Gegliederte Querschnitte mit $\frac{b}{b_w} > 3 \Rightarrow$ Grenzwert mit 0,8 multiplizieren
 - * Balken und Platten mit $l_{eff} > 7$ m und leichten Trennwänden die bei Durchbiegung beschädigt werden können muss $\frac{l}{d}$ mit $\frac{7}{l_{eff} [m]}$ multipliziert werden
 - * Flachdecken mit Stützweiten $l_{eff} > 8,5$ m, die leichte Trennwände tragen, die durch übermäßige Durchbiegung beschädigt werden könnten muss $\frac{l}{d}$ mit $\frac{8,5}{l_{eff}}$ multipliziert werden

4.2 Nachweis der Begrenzung der Verformungen mit direkter Berechnung

$$w_{vorh} = K \cdot \kappa_m \cdot l_{eff}^2$$

- K aus Tabelle S11

- Krümmung allgemein $\kappa = \frac{M}{EI}$
- Gesamtkrümmung: $\kappa_m = [\zeta \cdot \kappa_{II} + (1 - \zeta)\kappa_I]$
 - Verteilungsbeiwert: $\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed,perm}} \right)^2$ oder $\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^2$
 - * $\beta = \begin{cases} 0,5; & \text{Langzeit} \\ 1,0; & \text{Kurzzeit} \end{cases}$
 - * $M_{cr} = f_{ctm} \cdot W$
 - Krümmung infolge Last und Kriechen $\kappa_{I/II,L+K} = \frac{M_{Ed,perm}}{E_{c,eff} \cdot I_{I/II}}$
 - * $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$
 - * $\varphi(\infty, t_0)$ aus Bild 3.1 mit $h_0 = 2 \frac{A_c}{u}$, u : Umfang des Querschnitts der dem Trocknen ausgesetzt ist
 - * Nichtlineares Kriechen wenn: $\sigma_{c,perm} > 0,45 f_{ck}$ dann:
 $\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \exp(1,5(k_\sigma - 0,45))$ mit $k_\sigma = \frac{\sigma_c}{f_{ck}(t_0)}$



- Krümmung infolge Schwinden $\kappa_{I/II,S} = \epsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,eff} \frac{S}{I_{I/II}}$
 - * $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$
 - * $\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0}$
 - * $\epsilon_{cd,0}$ und k_h aus Tabelle 3.2 und 3.3
 - * $\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04 \sqrt{h_0^3}}$
 - * $\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty)$
 - * $\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6}$
 - * $\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t[\text{Tage}]}}$

Tabelle 3.2 — Grundwerte für die unbehinderte Trocknungsschwinddehnung $\epsilon_{cd,0}$ (in ‰) für Beton mit Zement CEM Klasse N

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

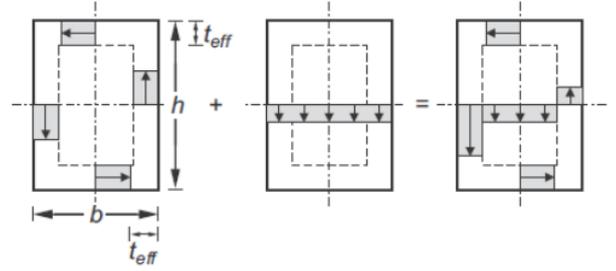
h_0 [mm]	100	200	300	≥ 500
k_h	1,0	0,85	0,75	0,7

- Grenzwerte:
 - Zulässiger Durchhang $w \leq \frac{l}{250}$
 - Zulässiger Durchhang bei verformungsempfindlichen angrenzenden Bauteilen $w \leq \frac{l}{500}$
 - Bei Kragträgern, bestimmen der Grenzwerte mit der 2,5-fachen Kraglänge
- Maximale bauliche Überhöhung $w \leq \frac{l}{250}$

5 Torsion

1. Ersatzholkasten (EHK) dimensionieren (hier Rechteck)

- $a = d_1$ wenn Mittellinie des EHK durch Schwerelinie der Längsbewehrung verläuft
- $t_{eff,i} = 2d_1$
- $b_k = b - t_{eff,i}$
- $h_k = h - t_{eff,i}$
- $A_k = h_k \cdot b_k$
- Umfang Wandmittellinie $u_k = 2(h_k + b_k)$
- Hohlkasten als Hohlkasten, wenn $t_w \leq \frac{1}{6} \max\{b, h\} \rightarrow t_{ef} = t_w$



2. Druckstrebenwinkel Bestimmen

- Vereinfachung $\theta = 45^\circ$
- Genaues Verfahren: $0,58 \leq \cot(\theta) \leq \frac{(1,2+1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}})}{(1 - \frac{V_{Rd,cc}}{\sqrt{V_{Ed,T+V}}})} \leq 3$ für Normalbeton
 - $V_{Rd,cc} = c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}\right) b_w \cdot z$
 - * $c = 0,5$
 - * $\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$
 - * $b_w = t_{eff,i}$
 - * $z_i = \max \left\{ \begin{array}{l} h - t_{eff} \\ b - t_{eff} \end{array} \right\}$
 - $V_{Ed,T+V} = \frac{T_{Ed} \cdot z}{2A_k} + \frac{V_{Ed} \cdot t_{eff,i}}{b_w}$

3. Nachweis der Druckstreben­tragfähigkeit: $V_{Rd,max} \geq V_{Ed}$ und $T_{Ed} \leq T_{Rd,max}$

- $T_{Rd,max} = 2\nu \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)$
- $V_{Rd,max} [MN] = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w [m] \cdot z [m] \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} [\frac{N}{mm^2}]}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} = \alpha_{cw} \cdot b_w [m] \cdot z [m] \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} [\frac{N}{mm^2}] \sin(2\theta) \frac{1}{2}$
 - $\nu = 0,525$; $\nu = 0,75$ bei Kastenquerschnitten mit Bewehrung an den Innen- und Ausenseiten
 - $\alpha_{cw} = 1,0$
 - $\nu_1 = 0,75\nu_2$
 - $\nu_2 = 1,1 - \frac{f_{ck} [\frac{N}{mm^2}]}{500} \leq 1$
- T_{Ed} : einwirkende Torsion in kNm

4. Nachweis der Interaktion der Druckstrebe

- Kompakt- und Vollquerschnitte $\left(\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}\right)^2 \leq 1,00$
- Kastenquerschnitte: $\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1,00$

5. Bei Rechteckigem Querschnitt nur Mindestbewehrung erforderlich wenn:

- $T_{Ed} \leq \frac{V_{Ed} \cdot b_w}{4,5}$
- $V_{Ed} \left[1 + \frac{4,5 T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w}\right] \leq V_{Rd,c}$

6. Nachweis der Zugstrebe durch Ermittlung der Bewehrung

- Torsionslängsbewehrung: $A_{sl,T} = \frac{T_{Ed} [MNm] \cdot u_k}{2 \cdot A_k [m^2] \cdot f_{yd} [\frac{N}{mm^2}] \cdot \tan(\theta)}$
- Torsionsbügelbewehrung: $a_{sw,T} = \frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{T_{Ed} [MNm]}{2 \cdot A_k [m^2] \cdot f_{yd} [\frac{N}{mm^2}]} \tan(\theta)$ (pro Steg)
- Querkraftbügelbewehrung: $a_{sw,V} = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot z} \tan(\theta)$ (insgesamt)

7. Superposition von längs und Bügelbewehrung

8. Konstruktive Durchbildung

- Maximaler Bügelabstand längs $s_{l,max}$ und quer $s_{w,max}$ bestimmen

- Zusätzlich Maximalabstand Torsionsbügel bestimmen $s_l \leq \max\{\frac{u_k}{8}; b; h\}$
- Torsionsbügel entweder als Übergreifungsstoß mit l_0 schließen oder in den Ecken um 135° umbiegen und mit 10∅ verankern; Schlösser hintereinander versetzt anordnen
- Torsionslängsbew: $s \leq 35$ cm, über die Höhe z_i zu verteilen, ein Stab je Ecke

6 Rahmenecke

Tabelle 8.2 — Beiwerte $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ und α_5

Einflussfaktor	Verankerungsart	Bewehrungsstab	
		unter Zug	unter Druck
Form der Stäbe	gerade	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	gebogen (siehe Bild 8.1 (b), (c) und (d))	$\alpha_1 = 0,7$ für $c_4 > 3\phi$ andernfalls $\alpha_1 = 1,0$ (siehe Bild 8.3 für c_4)	$\alpha_1 = 1,0$
Betondeckung	gerade	$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot (c_4 - \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	gebogen (siehe Bild 8.1 (b), (c) und (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot (c_4 - 3\phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (siehe Bild 8.3 für c_4)	$\alpha_2 = 1,0$
nicht an die Hauptbewehrung angeschweißte Querbewehrung	alle Arten	$\alpha_3 = 1 - K \cdot \lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
angeschweißte Querbewehrung ¹⁾	alle Arten, Positionen und Größen sind in Bild 8.1 (e) angegeben	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Querdruk	alle Arten	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	—

Dabei ist
 $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$;
 ΣA_{st} die Querschnittsfläche der Querbewehrung innerhalb der Verankerungslänge l_{bd} ;
 $\Sigma A_{st,min}$ die Querschnittsfläche der Mindestquerbewehrung:
 $\Sigma A_{st,min} = 0,25A_s$ für Balken und $\Sigma A_{st,min} = 0$ für Platten;
 A_s die Querschnittsfläche des größten einzelnen verankerten Stabs;
 K der Wert nach Bild 8.4;
 p der Querdruk [N/mm²] im Grenzzustand der Tragfähigkeit innerhalb l_{bd} .

¹⁾ Siehe auch 8.6: Bei direkter Lagerung darf l_{bd} auch geringer als $l_{b,min}$ angesetzt werden, wenn mindestens ein Querstab innerhalb der Auflagerung angeschweißt ist. Dieser sollte mindestens 15 mm vom Lageranschnitt entfernt sein.

Tabelle NA.8.3 — Beiwert α_6

Stoß	Stab- ϕ	Stoßanteil einer Bewehrungslage	
		$\leq 33\%$	$> 33\%$
Zug	< 16 mm	1,2 ^a	1,4 ^a
	≥ 16 mm	1,4 ^a	2,0 ^b
Druck	alle	1,0	1,0

Wenn die lichten Stababstände $a \geq 6\phi$ (Bild 8.7) und der Randabstand in der Stoßebene $c_1 \geq 4\phi$ (Bild 8.3) eingehalten werden, darf der Beiwert α_6 reduziert werden auf:
^a $\alpha_6 = 1,0$
^b $\alpha_6 = 1,4$

Tabelle NA.8.1 — Mindest-Biegerollendurchmesser D_{min}

a) für Stäbe

Mindestwerte der Biegerollendurchmesser für Haken, Winkelhaken, Schlaufen, Bügel		Mindestwerte der Biegerollendurchmesser für Schrägstäbe oder andere gebogene Stäbe		
Stabdurchmesser mm		Mindestwerte der Betondeckung rechtwinklig zur Biegeebene		
$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	> 100 mm	> 50 mm	≤ 50 mm
		und $> 7\phi$	und $> 3\phi$	oder $\leq 3\phi$
4 ϕ	7 ϕ	10 ϕ	15 ϕ	20 ϕ

6.1 Negative Rahmenecke (Zug außen)

- Stütze und Riegel bemessen
- Biegebewehrung der Stütze (außen) umbiegen, in den Riegel führen und dort mit der Riegelbewehrung stoßen
- Biegerollendurchmesser so groß wählen, wie die Platzverhältnisse zulassen, um inneren Hebelarm zu gewährleisten
- Übergreifungslänge der Stützenbewehrung berechnen: $l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot \frac{\sigma_{sd}}{4} \frac{A_{s,erf}}{f_{bd} A_{s,vorh}} \geq l_{0,min}$

$$- l_{0,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,3\alpha_1 \cdot \alpha_6 l_{b,rqd} \\ 15\phi \\ 20 \text{ cm} \end{array} \right\}$$

- Querbewehrung in Stoßbereich: Unter Zug 2 mal 3 Stäbe auf jeweils $\frac{l_0}{3}$ im Abstand von $s_{sw} = 150$ mm und der Gesamtfläche A_{st} ab Stoßbeginn anordnen; bei Druckstäben je ein weiterer Stab im Abstand von 4ϕ vor dem Stoß
- Grundwert der Verankerungslänge der Steckbügel berechnen $l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$

$$- f_{bd} = 2,25\eta_1 \cdot \eta_2 \frac{f_{ck,0,05}}{\gamma_c}$$

- * $\eta_1 = 0,7$ (mäßiger Verbund); $\eta_1 = 1,0$ (guter Verbund)
- * $\eta_2 = 1,0$ (wenn $\phi < 32$ mm); sonst $\eta_2 = \frac{132 \text{ mm} - \phi [\text{mm}]}{100}$

6.2 Positive Rahmenecke (Zug innen)

1. Stütze und Riegel bemessen Biegebewehrung der Stütze und des Riegels als Schlaufe um 180° umbiegen und ab Stützenmitte mit l_{bd} verankern (Biegerollendurchmesser beachten)

2. Verankerungslänge in Biegedruckzone berechnen: $l_{bd} = \alpha_1 \cdot l_{b,rqd} \frac{a_{s,erf}}{a_{s,vorh}}$

- $l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$
- $f_{bd} = 2,25\eta_1 \cdot \eta_2 \frac{f_{ck,0,05}}{\gamma_c}$
- * $\eta_1 = 0,7$ (mäßiger Verbund); $\eta_1 = 1,0$ (guter Verbund)
- * $\eta_2 = 1,0$ (wenn $\varnothing < 32$ mm); sonst $\eta_2 = \frac{132 \text{ mm} - \varnothing [\text{mm}]}{100}$

3. Übergreifungslänge: siehe Stahlbeton 1

4. Verstärkung der Zugbewehrung ist erforderlich, wenn: $\rho_l = \frac{a_{s1}}{b \cdot d} > 0,4 \%$

- Verstärkung der Zugbewehrung:
 - Alternative 1: Schrägbewehrung $A_{ss} = \max \left\{ \frac{a_{sl,Wand}}{2}, \frac{a_{sl,Platte}}{2} \right\}$
 - Alternative 2: Zulagebewehrung $a_{sl,Zulage} = \frac{1}{2} \cdot \max \left\{ \frac{a_{sl,Wand}}{2}, \frac{a_{sl,Platte}}{2} \right\}$

5. Im Riegel und in der Stütze Steckbügel mit Abstand $s \leq 10$ cm anbringen und ab Auflagerinnenkante mit l_{bd} verankern

6. Bügelquerschnitt $A_{s,b} = \frac{U_{cd}}{f_{yd}}$ über Umlenkkräfte (erforderlich ab $h = 100$ cm)

- $F_{cd,R} = \frac{M_{Ed}}{z_R}$
- $F_{cd,S} = \frac{M_{Ed}}{z_S}$
- $U_{cd} = \sqrt{F_{cd,R}^2 + F_{cd,S}^2}$: Umlenkkraft

7 Rahmenknoten

Stütze: \sqcup_{col}

Riegel: \sqcup_{beam}

7.1 Rahmenendknoten

Riegelbewehrung mit Mindestbiegerollendurchmesser zwei mal umbiegen und in der Riegeldruckzone mit l_{bd} verankern

1. Ermittlung der einwirkenden Knotenkraft $V_{ij} = F_{sd,beam} - V_{Ed,col,0} = \frac{M_{Ed,beam}}{z_{beam}} - V_{Ed,col,0} = f_{yd} \cdot A_{s,erf} - V_{Ed,col,0}$

- $F_{sd,beam} = \frac{M_{Ed,beam}}{z_{beam}} = f_{yd} \cdot A_{s1,erf}$: Stahlkraft im Riegel
- $V_{Ed,col,0}$: Querkraft in der Stütze an der Oberseite des Knotens

2. Bügel notwendig wenn: $V_{j,cd} < V_{jh}$

- $V_{j,cd} = 1,4 \left(1,2 - 0,3 \frac{h_{beam}}{h_{col}} \right) b_{eff} \cdot h_{col} \cdot f_{cd}^{*\frac{1}{4}}$
- $1,0 \leq \frac{h_{beam}}{h_{col}} \leq 2,0$: Schubschlankheit
- $b_{eff} = \frac{b_{beam} + b_{col}}{2} \leq b_{col}$: effektive Knotenbreite
- $f_{cd}^* = \frac{f_{cd}}{\gamma_c}$; $\gamma_c = 1,5$

3. Nachweis der Grenzwerts der oberen Knoten Tragfähigkeit $V_{j,Rd,max} \geq V_{jh} \Rightarrow$ nur konstruktive Steckbügel $\varnothing_{sw} = 8$ mm im Abstand $s \leq 10$ cm anordnen und mit l_{bd} im Riegel verankern

- $V_{j,Rd,max} = \min \left\{ \frac{2V_{j,cd}}{\gamma_N \cdot 0,25 f_{cd}^* \cdot b_{eff} \cdot h_{col}} \right\}$
- $\gamma_N = \gamma_{N1} \cdot \gamma_{N2}$
- $\gamma_{N1} = 1,5 \left(1 - 0,8 \frac{|N_{Ed,col,perm}|}{A_{c,col} \cdot f_{ck}} \right) \leq 1$; $\gamma_{N2} = 1,9 - 0,6 \frac{h_{beam}}{h_{col}} \leq 1$

$$- N_{Ed,col,perm} = \frac{N_{Ed}}{1,4}$$

4. Bestimmung der rechnerisch erforderlichen Büfelbewehrung $V_{j,Rd} = V_{j,cd} + 0,4A_{sj,eff} \cdot f_{yd} \geq V_{jh}$
 - Nach $A_{sj,eff}$ umgestellt $A_{sj,eff} \geq \frac{v_{jh} - V_{j,cd}}{0,4f_{xd}}$
5. Verbundspannungsnachweis: aus Dehnungsverteilung Stahlkraftverteilung und maßgebende Stelle mit ΔF_{sd} bestimmen
6. Konstruktive Durchbildung
 - Biegerollendurchmesser
 - Verankerungslänge
 - USW...

7.2 Rahmeninnenknoten

- Bewehrung durchlaufen lassen
- $V_{jd} = (2F_{sd,beam} - |V_{col}|) \leq \gamma_N \cdot 0,25 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_{eff} \cdot h_{col}$
- $V_{jd} = \frac{|M_{beam,1}| + |M_{beam,2}|}{z_{beam}} - |V_{col}| \leq \gamma_N \cdot 0,25 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_{eff} \cdot h_{col}$ wenn $1 \leq \frac{h_{beam}}{h_{col}} \leq 1,5$
 - $N_{Ed,col,perm} \approx \frac{N_{Ed}}{1,4}$
 - $\gamma_N = \gamma_{N1} \cdot \gamma_{N2}$
 - $\gamma_{N1} = 1,5 \left(1 - 0,8 \frac{|N_{Ed,col,perm}|}{A_{c,col} \cdot f_{ck}} \right) \leq 1$; $\gamma_{N2} = 1,9 - 0,6 \frac{h_{beam}}{h_{col}} \leq 1$
- Nachweis der Verankerung der Riegelbewehrung im Knoten: $l_{bd,beam} \leq h_{col}$
 - Wenn $l_{bd} \leq h_{col}$, Zulagebewehrung anordnen, sodass NW eingehalten
- Nachweis der Verankerung der Stützenbewehrung im Knoten: $l_{bd,col} \leq h_{beam}$

8 Konsolen, Ausklinkungen

8.1 Konsole

1. Lasten F_{Ed} ggf. gegeben oder berechnen; $H_{Ed} = 0,2F_{Ed}$
2. Geometrie: $\frac{a_c}{h_c} \leq 0,5 \Rightarrow$ Bemessung horizontaler Bügel, vertikale Bügel Konstruktiv
 $\frac{a_c}{h_c} > 0,5 \Rightarrow$ Bemessung horizontaler und vertikaler Bügel
 - a_c : abstand Stütze bis Angriffspunkt F_{Ed}
 - h_c : höhe der Konsole
3. Nachweis der Druckstrebe: $V_{Rd,max} = 0,5\nu \cdot b_w \cdot z \cdot f_{cd}^* \geq V_{Ed} = F_{Ed}$
 - $\nu = 0,7 - \frac{f_{ck} \left[\frac{N}{\min 2} \right]}{200} \geq 0,5$
 - $z = 0,9d$
 - $f_{cd}^* = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ mit $\gamma_c = 1,5$
4. Bewehrung aus Nachweis der Zugstrebe berechnen: $A_{s,erf} = \frac{Z_{Ed}}{f_{yd}}$
 - $Z_{Ed} = F_{Ed} \frac{a_c}{z_0} + H_{Ed} \frac{d_1 + z_0}{z_0}$
 - $z_0 = d \left(1 - 0,4 \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right)$
 - Bewehrung einlegen in Schlaufen

5. Bemessung der Bügelbewehrung:

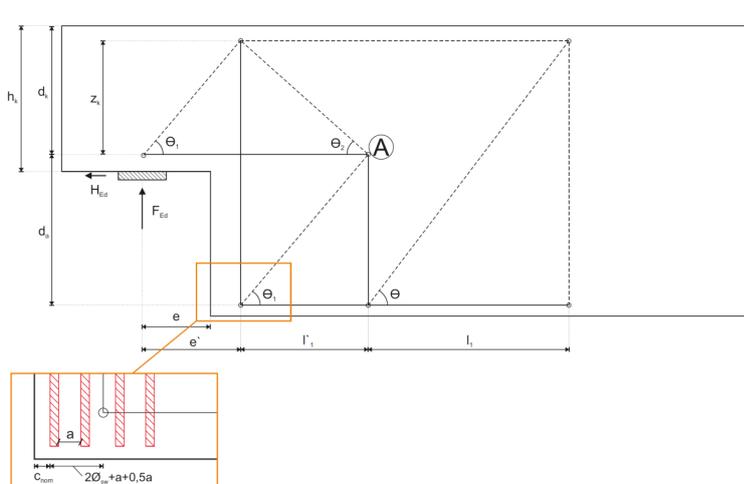
$a_c \leq 0,5h_c$	$V_{Ed} > 0,3V_{Rd,max}$	geschlossene horizontale Bügel mit $A_{sw} \geq 0,5A_s$
	$V_{Ed} < 0,3V_{Rd,max}$	geschlossene horizontale Bügel konstruktiv gewählt
$a_c \geq 0,5h_c$	$V_{Ed} \geq V_{Rd,c}$	vertikale bügel mit $A_{sw} = 0,7 \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$, horizontale konstruktiv
	$V_{Ed} < V_{Rd,c}$	geschlossen vertikal mit ρ_{min} , horizontal konstruktiv

- $V_{Rd,c} [MN] = \left[C_{Rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} [\frac{N}{mm^2}])^{\frac{1}{3}} + 0,12 \cdot \sigma_{cd} [\frac{MN}{m^2}] \right] b_w [m] \cdot d [m] \geq V_{Rd,c,min}$
 - $C_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_c} = 0,1$ mit $\gamma_c = 1,5$
 - $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d [mm]}} \leq 2$
 - $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,2$; b_w : kleinste Querschnittsbreite in Zugzone
 - $\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$

6. Konstruktive Durchbildung:

- Verankerungslänge der Zugbewehrung beginnt unter der Innenkante des Lagerkörpers
günstige Wirkung der Querpressung $\alpha_5 = \frac{2}{3}$, $\alpha_1 = 0,7$ (liegende Schlaufe) wenn $D \geq 15\varnothing \Rightarrow \alpha_1 = 0,5$
- Biegerollendurchmesser
- Bei abgehängten Lasten zusätzliche Schlaufen mit $A_{s2} = \frac{0,6F_{Ed}}{f_y d} \sqrt{\frac{a_k}{0,85d} + 1}$
 - a_k abstand Konsolenrand zur Lasteinleitungsfläche

8.2 Ausklinkung



- Annahme: $H_{Ed} \geq 0,2F_{Ed}$
- Abschätzung der Anzahl der Bügel der Zugstrebe
- Horizontale Zugstrebe: $F_{td,1} = F_{Ed} \frac{e'}{z_k} + H_{Ed} = F_{Ed} \cot(\theta_1) + H_{Ed}$
- Vertikale Druckstrebe: $F_{td,2} = F_{Ed} + H_{Ed} \frac{z_k}{z_k + d_a} \cot(\theta_1) = F_{Ed} + H_{Ed} \left(\frac{1}{\cot(\theta_1) + \cot(\theta_2)} \right)$
 - $d_k = h_k - d_1$
 - $z_k = h_k - 2d_1$
 - $d_a = h - d_k - d_1$
 - $e' = e + c_{nom} + \frac{n}{2} \varnothing_{sw} + \frac{n-1}{2} \cdot a$
 - $\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_k}{e'}\right) \in [45^\circ, 60^\circ]$
 - $\theta_2 = \arctan\left(\frac{z_k}{l'_1}\right) \geq 30^\circ$
 - $l'_1 = d_a \cot(\theta)$

$$- a = \max \left\{ \begin{array}{l} \varnothing_{sw} \\ 2 \text{ cm} \end{array} \right.$$

- $A_s = \frac{F_{td,i}}{f_{yd}}$
- Konstruktive durchbildung wie Konsole Punkt 5 $\left(\frac{a_c}{h_c} = \frac{e}{h_k} \right)$
- Überprüfen ob Annahme der Bügelschenkel korrekt war
- Untere Biegebewehrung mit Schlaufen stoßen und Schlaufen verankern