

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

Aussteifung und Stabilität im Stahlbetonbau

Formelsammlung

Jan Höffgen

5. August 2015

Diese Zusammenfassung wurde auf der Basis des Master-Moduls
Aussteifung und Stabilität im Stahlbetonbau
im SS 2015 erstellt.

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

Kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Fehlerfreiheit.

Inhaltsverzeichnis

1 Aussteifung	3
1.1 Berechnung von Wandkräften bei statisch unbestimmten Systemen	3
1.2 Bewertung der Gebäudesteifigkeit	4
1.3 Veränderliche Querschnittsabmessungen	4
2 Stabilitätsgefährdete Bauteile unter Längsdruck	5
2.1 Konstruktive Durchbildung	5
2.2 Berücksichtigung von Imperfektionen	5
2.3 Berechnung der Ersatzlänge	6
2.4 Stütznachweis nach Theorie II. Ordnung	7
2.4.1 Nachweis mit Bemessungshilfen	8
2.5 Schiefe Biegung	10
3 Heißbemessung	12
3.1 Stütznachweis mit Hilfe von Tabellen	12
3.2 Vereinfachter Nachweis für Stützen in R90	13
3.3 Rechnerische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer	15
4 Schnittgrößenermittlung mit Momenten-Umlagerung	15
4.1 Schnittgrößenermittlung nach Elastizitätstheorie mit begrenzter Umlagerung	15
4.2 Schnittgrößenermittlung nach Plastizitätstheorie	16
5 Ermüdung	18

1 Aussteifung

1.1 Berechnung von Wandkräften bei statisch unbestimmten Systemen

o Allgemein

- Vernachlässigung der Torsionssteifigkeit der Einzelscheiben
- Berücksichtigung der Biegesteifigkeiten i. d. R. nur in der Hauptrichtung \Rightarrow Stützen nehmen nicht an der Lastabtragung teil
- Betrachtung der Decken als biegeeweiche Platten und starre Scheiben, die die Horizontalkräfte in gelenkig angeschlossene Aussteifungselemente weiterleiten
- Die Verteilung der Lastanteile erfolgt analog deren Biegesteifigkeiten
- Wandecken beliebig aufteilen, da keine schubsteife Verbindung (Ecken in beide Richtungen anrechnen)
- Statisch bestimmte Aussteifungssysteme
 - Gebäude durch drei Wandscheiben ausgesteift, die sich nicht in einem Punkt schneiden oder parallel angeordnet sind
 - Lastverteilung durch Gleichgewichtsbedingungen
 - Mehrere Lastfälle: Berücksichtigung einer Exzentrizität von $\pm 10\%$ für die Berechnung von $H_{i,\max}$ und $H_{i,\min}$

1. Wahl des Koordinatensystems

2. Berechnung der Flächenträgheitsmomente I_{yi} , I_{zi} je Wand

3. Berechnung der Lage des Schubmittelpunkts M_0 (\bar{y}_0 , \bar{z}_0)

- $\bar{y}_0 = \frac{\sum EI_{yi} \cdot \bar{y}_i}{\sum EI_{yi}}$
- $\bar{z}_0 = \frac{\sum EI_{zi} \cdot \bar{z}_i}{\sum EI_{zi}}$
 - (\bar{y}_i, \bar{z}_i) : Koordinaten der Wandschwerpunkte

4. Lastanteile aus Translation

- $H_{yi} = \frac{EI_{zi}}{\sum EI_{zi}} \cdot H_y$
- $H_{zi} = \frac{EI_{yi}}{\sum EI_{yi}} \cdot H_z$
- Alle Kraftrichtungen positiv in positive Koordinatenrichtung

5. Lastanteile aus Rotation

(a) Berechnung des Torsionsmoments: $M_T = M_{T,y} + M_{T,z}$

- $M_{T,y} = H_y \cdot e_z$ mit $e_z = |\bar{z}_h - \bar{z}_0|$, $M_{T,z}$ analog
- H_j greift in einem Bereich $(0,5 \pm 0,1) \cdot l_j$ an \rightarrow zur Berechnung von $H_{ij,\max}$ und $H_{ij,\min}$ mehrere Lastfälle berücksichtigen

(b) Berechnung der Torsionssteifigkeit $I_\omega = C_\omega = \sum (I_{yi} \cdot y_i^2 + I_{zi} \cdot z_i^2)$

- $y_i = \bar{y}_i - \bar{y}_0$: Abstand des Wandschwerpunkts vom Gesamtschubmittelpunkt
- $z_i = \bar{z}_i - \bar{z}_0$
- Kontrollrechnung: $\sum I_{yi} \cdot y_i \approx 0$, $\sum I_{zi} \cdot z_i \approx 0$

(c) Berechnung der Wandkräfte

- $H_{yi} = \frac{I_{zi} \cdot z_i}{C_\omega} \cdot M_T$
- $H_{zi} = \frac{I_{yi} \cdot y_i}{C_\omega} \cdot M_T$
 - Dreht H_{ji} bezogen auf den Schubmittelpunkt in die gleiche Richtung wie M_T , letzteres positiv ansetzen

6. Gesamtbelastung aus Translation und Rotation: $H_{ji} = H_{ji,Trans} + H_{ji,Rot}$

1.2 Bewertung der Gebäudesteifigkeit

- Translationssteifigkeit/Seitensteifigkeit: $\frac{F_{v,Ed} \cdot L^2}{\sum E_{cd} \cdot I_c} \leq K_1 \cdot \frac{n_s}{n_s+1,6}$
 - Nachweis in beide Koordinatenrichtungen getrennt
- Verdrehsteifigkeit: $\left(\frac{1}{L} \cdot \sqrt{\frac{E_{cd} \cdot I_\omega}{\sum_j (F_{v,Ed,j} \cdot r_j^2)}} + \frac{1}{2,28} \cdot \sqrt{\frac{G_{cd} \cdot I_T}{\sum_j (F_{v,Ed,j} \cdot r_j^2)}} \right)^{-2} \leq K_1 \cdot \frac{n_s}{n_s+1,6}$
 - n_s : Anzahl der Geschosse
 - $K_1 = 0,31$ für gerissene Aussteifungsbauteile, $K_2 = 0,62$ für ungerissene Bauteile (nachweisen)
 - L : Gesamthöhe des Bauwerks bzw. Höhe ab einer ausgesteiften Deckenebene
 - r_j : Abstand der Stütze j vom Schubmittelpunkt M_0 des Systems mit $r_j^2 = y_j^2 + z_j^2$
 - $F_{v,Ed,j}$: Bemessenswert der Vertikallast je Bauteil ($\gamma_F = 1,0$) aus Eigengewicht und veränderlichen Lasten,
 $F_{v,Ed} = \sum_j F_{v,Ed,j}$: gesamte Vertikallast
 - $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,2}$: Bemessenswert des E-Moduls
 - $E_{cd} \cdot I_c$: Summe der Biegesteifigkeiten aller aussteifenden Bauteile
 - $E_{cd} \cdot I_\omega$: Summe der Wölbsteifigkeiten aller gegen Verdrehung aussteifenden Bauteile
 - $G_{cd} \cdot I_T$: Summe der Torsionssteifigkeiten aller gegen Verdrehung aussteifenden Bauteile
 - * $G_{cd} = \begin{cases} \frac{E_{cd}}{2} & \text{für gerissenen Beton} \\ \frac{E_{cd}}{2,4} & \text{für ungerissenen Beton} \end{cases}$
 - * $I_T \simeq \begin{cases} 0 & \text{wenn keine geschlossenen Profile vorhanden} \\ \frac{1}{3} \cdot h \cdot b^3 & \text{für Wände mit } h > 10 \cdot b \\ \frac{4 \cdot A_m^2}{\sum b_i/d_i} & \text{für Kerne} \end{cases}$
 - Verdrehsteifigkeit vereinfacht für gleichmäßig belastete Rechteckgrundrisse:
 - $\left(\frac{1}{L} \cdot \sqrt{\frac{E_{cd} \cdot I_\omega}{F_{v,Ed} \cdot (d^2/12+c^2)}} + \frac{1}{2,28} \cdot \sqrt{\frac{G_{cd} \cdot I_T}{F_{v,Ed} \cdot (d^2/12+c^2)}} \right)^{-2} \leq K_1 \cdot \frac{n_s}{n_s+1,6}$
 - * d : Grundrissdiagonale
 - * c : Abstand zwischen Schubmittelpunkt und Grundrissmittelpunkt
 - * Wenn $I_T \approx 0$: $\frac{F_{v,Ed} \cdot (d^2/12+c^2) \cdot L^2}{E_{cd} \cdot I_\omega} \leq K_1 \cdot \frac{n_s}{n_s+1,6}$

1.3 Veränderliche Querschnittsabmessungen

- Berücksichtigung unterschiedlicher Steifigkeiten, Abmessungen oder Aussparungen, indem die Verformung des Systems unter Gleichlast mit den Verformungen des Systems mit konstanter Steifigkeit gleichgesetzt wird
- Veränderliche Abmessungen: $f = \sum_i \int_{h_i} \frac{M \cdot \bar{M}}{E_c I_c} dx$, $f^* = \frac{w \cdot h^4}{8 \cdot E I_m} \rightarrow E I_m = \frac{w \cdot h^4}{8 \cdot f}$
- Wand auf zwei Stützen
 - $I_1^* = I_1 = \frac{d \cdot l^3}{12}$ für die durchgehende Wand
 - $I_2^* = 2 \cdot a^2 \cdot A_{\text{Stütze}}$ mit a : Abstand Stützenachse – Wandachse
 - Ersatzbreite der Stütze: $l_2 = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_2^*}{d}} \rightarrow$ Berechnung analog veränderliche Abmessungen

2 Stabilitätsgefährdete Bauteile unter Längsdruck

2.1 Konstruktive Durchbildung

- Definition
 - Wand: $b > 4 \cdot h$
 - Stütze: $b \leq 4 \cdot h$
- Mindestquerschnittsabmessungen
 - Ortbeton: $\{b; h\} \geq 20$ cm
 - Fertigteil: $\{b; h\} \geq 12$ cm
- Längsbewehrung in Stützen
 - Mindestdurchmesser: $\phi_{sl} \geq 12$ mm
 - Mindestanzahl: 1 Stab je Ecke (6 Stäbe bei Kreisquerschnitten)
 - Höchststababstand: 30 cm (40 cm bei $\{b; h\} \leq 40$ cm)
 - * Sicherung der zusätzlichen Längsstäbe durch Zwischenbügel (s. u.)
 - Maximal fünf Bewehrungsstäbe je Ecke, äußerster Stab innerhalb des 15-fachen Bügeldurchmessers
- Bügelbewehrung
 - Mindestdurchmesser: $\phi_{sw} \geq \min \begin{cases} \frac{\phi_{sl}}{4} \\ 6 \text{ mm} & \text{Stabstahl} \\ 12 \text{ mm} & \text{Stabbündel mit } \phi_n > 28 \text{ mm, Stäbe mit } \phi_s > 32 \text{ mm} \\ 5 \text{ mm} & \text{Matten} \end{cases}$
 - Höchststababstände: $s_b \leq \min \begin{cases} 12 \cdot \phi_{sl} \\ b \\ h \\ 30 \text{ cm} \end{cases}$
 - * Für die Längsbewehrung erforderliche Zwischenbügel dürfen maximal den doppelten Höchststababstand haben ($s_{b,z} \leq 2 \cdot s_b$)
 - * Multiplikation des Bügelabstands mit 0,6 im Lasteinleitungsbereich über die Höhe der größten Stützenabmessung und bei Übergreifungen von Längsstäben mit $\phi_{sl} > 14$ mm
- Mindestbewehrung: $A_{s,min} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}}$
- Höchstbewehrung: $A_{s,max} \leq 0,09 \cdot A_c$ (auch bei Stößen)

2.2 Berücksichtigung von Imperfektionen

- m : Anzahl lastabtragender Bauteile je Reihe und Ebene
 - Anzahl der Stützen, die mindestens 70 % der mittleren Druckkraft $F_{ed,m} = \frac{1}{n} \sum F_{Ed,i}$ aufnehmen
 - Einzelstützen: $m = 1$
- Anzusetzende Schiefstellung des Bauteils: $\theta_i = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = \begin{cases} \frac{\alpha_m}{100 \cdot \sqrt{l}} & \text{für } l > 4 \text{ m} \\ \frac{\alpha_m}{200} & \text{für } l \leq 4 \text{ m} \end{cases}$ [rad]
 - $\alpha_m = \sqrt{\frac{1+1/m}{2}}$

m	1	2	3	4	5	6	7	8
*	α_m	1,000	0,866	0,816	0,791	0,775	0,764	0,756

$$- \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}} \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1,0 \end{cases}$$

- l : i. A. Gebäudehöhe, bei Einzelstützen Stützenlänge

- Anzusetzende Ersatzhorizontalkraft in der Deckenebene j : $\Delta H_j = \sum_i V_{ij} \cdot \theta_i = n \cdot F_{Ed,m} \cdot \theta_i$
 - $\sum_i V_{ij}$: Summe der Vertikallasten in den aussteifenden und auszusteifenden Bauteilen i
 - n : Anzahl der senkrechten Bauteile

2.3 Berechnung der Ersatzlänge

- Reduktion der vorkommenden statischen Systeme auf eine Modellstütze

- Druckglieder in ausgesteiften Systemen: $l_0 = 0,5 \cdot l_{col} \cdot \sqrt{\left[1 + \frac{k_1}{0,45+k_1}\right] \cdot \left[1 + \frac{k_2}{0,45+k_2}\right]}$

- ungerissenes System: $k_i = \frac{\theta}{\sum M} \cdot \sum \frac{EI_{col}}{l_{col}} \geq 0,1, i = 1, 2$

* Stütze starr eingespannt: $k = 0,1$

* Stütze gelenkig gelagert: $k = \infty$

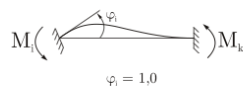
* $\sum \frac{EI_{col}}{l_{col}}$: Stabsteifigkeit aller an einem Knoten elastisch angeschlossenen oder eingespannten Druckglieder

* l_{col} : lichte Länge des Druckglieds zwischen den Endeinspannungen

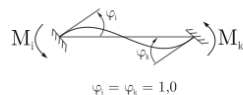
* θ : Knotenverdrehung

* $\sum M$: Momente aller einspannenden Stäbe (\equiv Riegel) am Knoten infolge θ

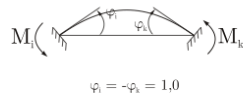
$$M_j = \frac{\eta \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_j \quad \varphi \triangleq \theta$$



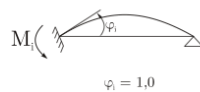
$$M_i = \frac{4 \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_i \quad (\text{an Aussteifungsbauteilen})$$



$$M_i = M_k = \frac{6 \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_i \quad (\text{zwischen Innenknoten an verschieblichen Systemen})$$



$$M_i = \frac{2 \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_i, \quad M_k = -\frac{2 \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_k \quad (\text{unverschiebliche Innenknoten})$$



$$M_i = \frac{3 \cdot EI}{\ell} \cdot \varphi_i$$




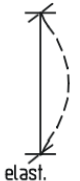



- $k_{i,gerissen} = 2 \cdot k_{i,ungerissen}$, da I_b zu 50 % angesetzt wird

* Häufig: Stütze als ungerissen, Balken als gerissen annehmen ($I_{b,ger} = 0,5I_b$)

- k_1 unten an Stütze, k_2 oben an Stütze, $k_{1,o} = k_{2,u}$ an einem Knoten

- Druckglieder in nicht ausgesteiften Systemen: $l_0 = l_{col} \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}, \left[1 + \frac{k_1}{1+k_1}\right] \cdot \left[1 + \frac{k_2}{1+k_2}\right] \right\}$

• Einzelstützen

	unverschieblich				verschieblich		
System	gelenkig 	gelenkig 	starr eingesp. 	elast. eingesp. 	frei 	starr eingesp. 	elast. eingesp. 
β (theoretisch)	1,0	0,7	0,5	0,5 bis 1,0	2,0	1,0	1,0 bis ∞
β (realistisch)	1,0	0,8	0,66	0,66 bis 1,0	2,2	1,15	1,15 bis ∞

2.4 Stütznachweis nach Theorie II. Ordnung

1. Materialkennwerte: $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$
2. Geometrie: $d = h - d_1$, h : Stützenabmessung in der betrachteten Ebene (in Richtung des Ausweichens)
3. Bestimmung des Verhältnisses $\frac{d_1}{h}$
4. Berechnung der Ersatzlänge nach Abschnitt 2.3
5. Schlankheit: $\lambda = \frac{l_0}{i}$

- Trägheitsbeiwert: $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \begin{cases} 0,289 \cdot h & \text{für Rechteckstützen} \\ \frac{r}{2} & \text{für Rundstützen} \end{cases}$

- Wenn $\lambda \leq \lambda_{lim} = \begin{cases} 25 & \text{für } |n_{Ed}| \geq 0,41 \\ \frac{16}{\sqrt{|n_{Ed}|}} & \text{für } |n_{Ed}| < 0,41 \end{cases}$, Berechnung nach Theorie I. Ordnung

– Wenn Bedingungen nur knapp eingehalten, ist es unsicher, die Theorie II. Ordnung und Kriechen zu vernachlässigen, wenn der mechanische Bewehrungsgrad $\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} < 0,25$

- (a) Berechnung des bezogenen Bemessungsmoments: $\mu_{Ed} = m_{Ed} = \frac{|M_{Ed}|}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$ (Normalkräfte nicht berücksichtigen)
- (b) Berechnung der bezogenen Normalkraft: $\nu_{Ed} = n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$ (Druck negativ)
- (c) Ablesen von ω_{tot} aus dem Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm für $\frac{d_1}{h}$ und Bewehrungsanordnung [S5.144ff]
- (d) Berechnung von $A_{s,tot} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
- (e) Wegen symmetrischer Bewehrungsanordnung gleichmäßige Aufteilung von $A_{s,tot}$ auf die i Seiten mit Bewehrung ($i = \{2; 4\}$)

6. Verfahren auf Grundlage einer Nennkrümmung (Modellstützenverfahren)

- (a) Lastausmitte aus Theorie I. Ordnung: e_0

- unverschiebliches System: $e_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} |0,6 \cdot e_{02} + 0,4 \cdot e_{01}| \\ |0,4 \cdot e_{02}| \end{array} \right.$, $|e_{02}| \geq |e_{01}|$
– $e_{0i} = \frac{M_i}{N_i}$ am Stützenkopf und -fuß

- verschiebliches System: $e_0 = \max\{|e_{01}|, |e_{02}|\}$
- Lastausmitte im Querschnitt ($e_0 \leq 0,5 \cdot h$): Bemessung für Lastkombination mit Eigengewicht günstig und Bemessung für LK mit Eigengewicht ungünstig
- Lastausmitte außerhalb des Querschnitts ($e_0 > 0,5 \cdot h$): Bemessung für Lastkombination mit Eigengewicht ungünstig

- (b) Ungewollte Ausmitte: $e_i = \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \frac{l_0}{2}$

- $\theta_i = \begin{cases} \frac{1}{100 \cdot \sqrt{l_{col}}} & \text{für } l_{col} > 4 \text{ m} \\ \frac{1}{200} & \text{für } l_{col} \leq 4 \text{ m} \end{cases}$

- Einzelstützen: $e_i = \frac{l_0}{400}$
- (c) Lastausmitte aus Theorie II. Ordnung: $e_2 = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{r} \cdot K_1 \cdot l_0^2$
 - $c = \begin{cases} 10 & \text{üblich bei konstanten Querschnitten} \\ 8 & \text{bei feiner Staffelung der Bewehrung} \end{cases}$
 - $K_1 = \begin{cases} \frac{\lambda}{10} - 2,5 & \text{für } 25 < \lambda < 35 \\ 1,0 & \text{für } \lambda \geq 35 \end{cases}$
 - $\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{f_{yd}}{0,45 \cdot d \cdot E_s} \left[\stackrel{\text{B500}}{=} K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{207 \cdot d} \right]$
 - $K_r = \frac{n_u - |n_{Ed}|}{n_u - n_{bal}} = \frac{N_u - |N_{Ed}|}{N_u - N_{bal}} \leq 1$
 - * $K_r = 1,0$ für $|n_{Ed}| \leq n_{bal}$
 - * $n_u = 1 + \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = 1 + \omega_{tot}$ (A_s abschätzen)
 - * $n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$
 - * $n_{bal} = 0,4$
 - $K_\varphi = 1 + \left(0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150} \right) \cdot \left(\varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{1Eqp}}{M_{0,Ed}} \right) \geq 1$
 - * $K_\varphi = 1,0$ wenn
 - $\varphi(\infty, t_0) \leq 2$, $\lambda \leq 75$ und $\frac{M_{0,Ed}}{N_{Ed}} \geq h$ oder
 - Stütze an beiden Enden monolithisch mit lastabtragenden Bauteilen verbunden
 - bei verschieblichen Tragwerken $\lambda < 50$ und $\frac{M_{0,Ed}}{N_{Ed}} > 2 \cdot h$
 - * $\varphi(\infty, t_0)$: Endkriechzahl in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte, des Belastungsalters t_0 , der Zementart, der Betonfestigkeitsklasse und $h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{U_c} = 2 \cdot \frac{b_{eff} \cdot h_c}{2 \cdot (b_{eff} + h_c)}$ aus Anhang ablesen ($\sigma_{c,perm} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$)
 - für $\sigma_{c,perm} > 0,45 \cdot f_{ck}$: $\varphi_{ni}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp(1,5 \cdot (k_\sigma - 0,45))$ mit $k_\sigma = \frac{\sigma_c}{f_{ck}}$
 - * $M_{1eqp} = M_{1perm}$: Biegemoment nach Theorie I. Ordnung unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination unter Berücksichtigung der Imperfektionen
 - * $M_{0,Ed}$: Biegemoment nach Theorie I. Ordnung unter der Bemessungs-Einwirkungskombination unter Berücksichtigung der Imperfektionen
 - * Falls $\frac{M_{0,Eqp}}{M_{0,Ed}}$ über Stütze nicht konstant, Berechnung für maximales Momentenverhältnis oder am repräsentativem Querschnitt
 - (d) Gesamtausmitte: $e_{tot} = e_0 + e_i + e_2$
 - (e) Biegemoment nach Theorie II. Ordnung: $M_{Ed,II} = N_{Ed} \cdot e_{tot}$
 - (f) Berechnung des bezogenen Bemessungsmoments: $\mu_{Ed} = m_{Ed} = \frac{|M_{Ed,II}|}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$
 - $\mu_{Ed,tot} = \mu_{Ed,0} + |\nu_{Ed}| \cdot \frac{e_i + e_2}{h} = |\nu_{Ed}| \cdot \frac{e_{tot}}{h}$
 - (g) Berechnung der bezogenen Normalkraft: $\nu_{Ed} = n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$ (Druck negativ)
 - (h) Ablesen von ω_{tot} aus dem Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm für $\frac{d_l}{h}$ und Bewehrungsanordnung
 - (i) Berechnung von $A_{s,tot} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
 - falls $A_{s,tot} > A_{s,gesch}$: weitere Iteration mit neuem $A_s \geq A_{s,tot}$ ab Berechnung von K_r
 - Wegen symmetrischer Bewehrungsanordnung gleichmäßige Aufteilung von $A_{s,tot}$ auf die i Seiten mit Bewehrung ($i = \{2; 4\}$)
 - Mindestbewehrung: $A_{s,min} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}}$
 - Höchstbewehrung: $A_{s,max} \leq 0,09 \cdot A_c$

2.4.1 Nachweis mit Bemessungshilfen

μ -Nomogramm

- Optimaler Einsatzbereich: $|\nu_{Ed}| \leq 0,4$
- 1. Bestimmung der Geometriekennwerte, der Ersatzlänge und der Schlankheit analog Abschnitt 2.4
- 2. Materialkennwerte: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ ($\alpha_{cc} = 1,0$)

3. Gesamtausmitte aus Theorie I. Ordnung: $e_1 = e_0 + e_i$
4. Bemessungsmoment: $M_{Ed} = |N_{Ed}| \cdot e_1$
5. Bezogenes Moment: $m_{Ed} = \mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$
6. Bezogene Normalkraft: $n_{Ed} = \nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$
7. Bezogene Ersatzlänge: $\frac{l_0}{h}$
 - Berücksichtigung gestaffelter Bewehrung: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^* = 1,10 \cdot \frac{l_0}{h}$
 - Berücksichtigung von Kriechen: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^{**} = \frac{l_0}{h} \cdot \sqrt{1 + \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}}}$
 - Berücksichtigung gestaffelter Bewehrung und Kriechen: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^{***} = 1,10 \cdot \frac{l_0}{h} \cdot \sqrt{1 + \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}}}$
8. Vorgehen
 - (a) Diagramm für $\frac{h_1}{h} = \frac{d_1}{h}$ auswählen
 - (b) Verbindungsgerade zwischen μ_{Ed} und $\frac{l_0}{h}$ zeichnen
 - (c) am Schnittpunkt der Gerade mit ν_{Ed} ω_{tot} ablesen
 - (d) $A_{s,tot} = A_{s1} + A_{s2} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
 - (e) Mindestbewehrung: $A_{s,min} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}}$
 - (f) Höchstbewehrung: $A_{s,max} \leq 0,09 \cdot A_c$

○ Rückrechnung von e_2 : Verbindungsgerade $\frac{l_0}{h} = 0$ mit ω_{tot} liefert $\mu_{tot} \rightarrow$ Berechnung $M_{Ed,II} \rightarrow$ Berechnung e_2

$\frac{e_1}{h}$ -Nomogramm

- Optimaler Einsatzbereich: $|\nu_{Ed}| \geq 0,4$
1. Bestimmung der Geometrie Kennwerte, der Ersatzlänge und der Schlankheit analog Abschnitt 2.4
 2. Materialkennwerte: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ ($\alpha_{cc} = 1,0$)
 3. Gesamtausmitte aus Theorie I. Ordnung: $e_1 = e_0 + e_i$
 4. Bezogene Normalkraft: $n_{Ed} = \nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$
 5. Bezogene Ausmitte: $\frac{e_1}{h}$
 6. Bezogene Ersatzlänge: $\frac{l_0}{h}$
 - Berücksichtigung gestaffelter Bewehrung: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^* = 1,10 \cdot \frac{l_0}{h}$
 - Berücksichtigung von Kriechen: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^{**} = \frac{l_0}{h} \cdot \sqrt{1 + \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}}}$
 - Berücksichtigung gestaffelter Bewehrung und Kriechen: $\left(\frac{l_0}{h}\right)^{***} = 1,10 \cdot \frac{l_0}{h} \cdot \sqrt{1 + \frac{M_{Ed,perm}}{M_{Ed}}}$
 7. Vorgehen
 - (a) Diagramm für $\frac{h_1}{h} = \frac{d_1}{h}$ auswählen
 - (b) Ursprungsgerade zu $\frac{l_0}{h}$ zeichnen
 - (c) Parallele durch $\frac{e_1}{h}$ zeichnen
 - (d) am Schnittpunkt mit ν_{Ed} waagrecht ins rechte Diagramm bis ν_{Ed}
 - (e) ω_{tot} ablesen
 - (f) $A_{s,tot} = A_{s1} + A_{s2} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
 - (g) Mindestbewehrung: $A_{s,min} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}}$
 - (h) Höchstbewehrung: $A_{s,max} \leq 0,09 \cdot A_c$

2.5 Schiefe Biegung

o Definitionen

- y -Achse ist starke Achse ($b_z \geq b_y \leftrightarrow h \geq b$)
- $b_z = h$: Querschnittsbreite in z -Richtung, senkrecht zu y
- $b_y = b$: Querschnittsbreite in y -Richtung, senkrecht zu z
- e_z : Ausmitte in z -Richtung durch Moment um y
- e_y : Ausmitte in y -Richtung durch Moment um z
- | | | | | | |
|----------------|-------|----------|-------------|-------|-------|
| Biegung um y | M_y | l_{0z} | λ_y | i_y | e_z |
| Biegung um z | M_z | l_{0y} | λ_z | i_z | e_y |

1. Überprüfung, ob ein getrennter Nachweis möglich ist

- Bestimmung der Ersatzlänge l_0 nach Abschnitt 2.3 (l_{0z} für Biegung um y)
- Bestimmung der Schlankheiten $\lambda_y = \frac{l_{0z}}{i_y}$ mit $i_y = 0,289 \cdot b_z \equiv 0,289 \cdot h$, $\lambda_z = \frac{l_{0y}}{i_z}$ mit $i_z = 0,289 \cdot b_y \equiv 0,289 \cdot b$ für Rechteckquerschnitte
- Bedingungen
 - (a) $0,5 \leq \frac{\lambda_y}{\lambda_z} \leq 2$
 - (b) $\frac{e_z/h_{eq}}{e_y/b_{eq}} \leq 0,2$ oder $\frac{e_y/b_{eq}}{e_z/h_{eq}} \leq 0,2$
 - $e_y = e_{0,y} = \frac{M_{Ed,z}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Ed,0,z}}{N_{Ed}}$, $e_z = e_{0,z} = \frac{M_{Ed,y}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Ed,0,y}}{N_{Ed}}$
 - $b_{eq} = i_z \cdot \sqrt{12}$, $h_{eq} = i_y \cdot \sqrt{12}$

2. Getrennter Nachweis: getrennte Betrachtung von Knicken in y - (Biegung um z) und Knicken in z -Richtung

- Berechnung der Gesamtausmitten $e = e_0 + e_i$ in beide Richtungen
 - Ungewollte Ausmitte: $e_i = \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \frac{l_0}{2}$
 - * $\theta_i = \begin{cases} \frac{1}{100 \cdot \sqrt{l_{col}}} & \text{für } l_{col} > 4 \text{ m} \\ \frac{1}{200} & \text{für } l \leq 4 \text{ m} \end{cases}$
 - * $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l_{col}}} \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1,0 \end{cases}$
 - * l_{col} : Stützenlänge
- Knicken in y -Richtung
 - Wenn $\lambda_z \leq \lambda_{lim} = \begin{cases} 25 & \text{für } |n_{Ed}| \geq 0,41 \\ \frac{16}{\sqrt{|n_{Ed}|}} & \text{für } |n_{Ed}| < 0,41 \end{cases}$, Berechnung nach Theorie I. Ordnung, sonst Theorie II. Ordnung
 - * $n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$
 - Wenn $e_{0z} > 0,2 \cdot h$ reduzierte Querschnittshöhe: $h_{red} = \frac{h}{2} \cdot (1 + \frac{h}{6 \cdot e_z})$ (nur erforderlich bei Biegung um z , wenn $h = b_z > b_y$, also bei Biegung um die schwache Achse)
 - $M_{Ed,z} = N_{Ed} \cdot e_y$
 - Berechnung von $\mu_{Ed} = \frac{|M_{Ed,z}|}{b_y^2 \cdot h_{red} \cdot f_{cd}} = \frac{|M_{Ed,z}|}{b^2 \cdot h_{red} \cdot f_{cd}}$ und $\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b_y \cdot h_{red} \cdot f_{cd}}$
 - Ablesen von ω_{tot} aus Schmitz-Goris-Diagrammen für $\frac{b_1}{b}$ und λ_z oder Modellstützenverfahren (ggf. mitteln)
 - $A_{s,tot} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h_{red} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$
- Knicken in z -Richtung
 - Wenn $\lambda_y \leq \lambda_{lim} = \begin{cases} 25 & \text{für } |n_{Ed}| \geq 0,41 \\ \frac{16}{\sqrt{|n_{Ed}|}} & \text{für } |n_{Ed}| < 0,41 \end{cases}$, Berechnung nach Theorie I. Ordnung, sonst Theorie II. Ordnung
 - * $n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$

- Reduzierung der Querschnittshöhe nicht erforderlich, wenn Abmessung in y -Richtung kleiner als in z -Richtung
- $M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot e_z$
- Berechnung von $\mu_{Ed} = \frac{|M_{Ed,y}|}{b_z^2 \cdot b_y \cdot f_{cd}} = \frac{|M_{Ed,y}|}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$ und $\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b_y \cdot b_z \cdot f_{cd}}$
- Ablesen von ω_{tot} aus Schmitz-Goris-Diagrammen für $\frac{d_1}{h}$ und λ_y oder Modellstützenverfahren (ggf. mitteln)
- $A_{s,tot} = \omega_{tot} \cdot b_y \cdot b_z \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$

3. Interaktionsnachweis

- Wenn $\lambda \leq \lambda_{lim} = \begin{cases} 25 & \text{für } |n_{Ed}| \geq 0,41 \\ \frac{16}{\sqrt{|n_{Ed}|}} & \text{für } |n_{Ed}| < 0,41 \end{cases}$, Berechnung nach Theorie I. Ordnung, sonst Theorie II. Ordnung

– $n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$

- Ungewollte Ausmitte: $e_i = \theta_i \cdot \frac{l_0}{2} = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \frac{l_0}{2}$

– $\theta_i = \begin{cases} \frac{1}{100 \cdot \sqrt{l}} & \text{für } l > 4 \text{ m} \\ \frac{1}{200} & \text{für } l \leq 4 \text{ m} \end{cases}$

* $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}} \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 1,0 \end{cases}$

- Lastausmitte aus Theorie II. Ordnung: $e_2 = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{r} \cdot K_1 \cdot l_0^2$

– $c = \begin{cases} 10 & \text{üblich bei konstanten Querschnitten} \\ 8 & \text{bei feiner Staffelung der Bewehrung} \end{cases}$

– $K_1 = \begin{cases} \frac{\lambda}{10} - 2,5 & \text{für } 25 < \lambda < 35 \\ 1,0 & \text{für } \lambda \geq 35 \end{cases}$

– $\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{f_{yd}}{0,45 \cdot d \cdot E_s} \left[\stackrel{\text{B500}}{=} K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{207 \cdot d} \right]$

* $K_r = \frac{n_u - |n_{Ed}|}{n_u - n_{bal}} = \frac{N_u - |N_{Ed}|}{N_u - N_{bal}} \leq 1$
 • $K_r = 1,0$ für $|n_{Ed}| \leq n_{bal}$
 • $n_u = 1 + \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = 1 + \omega_{tot}$ (A_s abschätzen)
 • $n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$
 • $n_{bal} = 0,4$

* K_φ vernachlässigen oder analog Abschnitt 2.4

• Endkriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ mit

$M_{0Ed} = \sqrt{M_{0Ed,y}^2 + M_{0Ed,z}^2}$ und $M_{1perm} = \sqrt{M_{1perm,y}^2 + M_{1perm,z}^2}$

* d : Statische Nutzhöhe (abschätzen)

– Schwache Achse: e_2 größer

- Gesamtausmitten $e_{z,tot} = e_{0z} + e_{iz} + e_{2z}$, $e_{y,tot} = e_{0y} + e_{iy} + e_{2y}$
- Biegemomente nach Theorie II: Ordnung: $M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot e_{z,tot}$, $M_{Ed,z} = N_{Ed} \cdot e_{y,tot}$
- Bezogene Biegemomente: $\mu_{Ed,y} = \frac{M_{Ed,y}}{b_z^2 \cdot b_y \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed,y}}{h^2 \cdot b \cdot f_{cd}}$, $\mu_{Ed,z} = \frac{M_{Ed,z}}{b_z \cdot b_y^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed,z}}{h \cdot b^2 \cdot f_{cd}}$
- $\mu_{Ed,1} = \max\{\mu_{Ed,y}; \mu_{Ed,z}\}$, $\mu_{Ed,2} = \min\{\mu_{Ed,y}; \mu_{Ed,z}\}$
- $\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$
- Ablesen und Mitteln von ω_{tot} in Abhängigkeit von $\mu_{Ed,1}$, $\mu_{Ed,2}$ und ν_{Ed} aus Interaktionsdiagramm für $\frac{d_1}{h}$ und $\frac{b_1}{b}$
- $A_{s,tot} = \omega_{tot} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$

○ Bewehrung in den Ecken anordnen, damit Bewehrung in Hauptrichtung auch für Nebenrichtung wirkt

○ Mindestbewehrung: $A_{s,min} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}}$

○ Höchstbewehrung: $A_{s,max} \leq 0,09 \cdot A_c$

3 Heißbemessung

3.1 Stützennachweis mit Hilfe von Tabellen

1. Voraussetzungen

- Stützen in ausgesteiften Gebäuden mit rotationsbehindernder Lagerung im Brandfall
 - Durch Wärmedehnung im Brandfall kann aus einer gelenkigen Lagerung eine Einspannung werden → verringerte Knicklänge
- gleiche Feuerwiderstandsklasse von Decke und Stütze
- Betonfestigkeitsklasse $\leq C50/60$
- Ersatzlänge der Stütze im Brandfall $l_{0,fi} \leq 3$ m
- Bewehrung $A_s < 0,04 \cdot A_c$

2. Einwirkung bei Normaltemperatur: $N_{Ed} = \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$

- $\psi_{0,Wind} = 0,6$, $\psi_{0,Schnee, < 1000m} = 0,5$, $\psi_{0,Nutzlast} = 0,7$

3. Einwirkung im Brandfall: $N_{Ed,fi} = \eta_{fi} \cdot N_{Ed}$

- $\eta_{fi} = \frac{1 + \psi_{fi,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi}$: Reduktionsfaktor

– vereinfacht: $\eta_{fi} = 0,7$

- $\xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k}$: Einwirkungsverhältnis

- $\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,50$

- $\psi_{fi} = \begin{cases} 0,3 & \text{Nutzlast in Wohn- u. Bürogebäuden} \\ 0,6 & \text{Nutzlast in Versammlungsbereichen, Verkaufsflächen} \\ 0,0 & \text{Nutzlast auf Dächern, Schnee unter 1000 m, Wind} \\ 0,5 & \text{Wind (als Leiteinwirkung)} \end{cases}$

- $N_{Ed,fi} = \sum_j G_{k,j} + [\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}] + \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

4. Ersatzlänge $l_{0,fi} = l_0$ nach Abschnitt 2.3 (vereinfacht bei Normaltemperatur)

- Für Bauteile mit einer erforderlichen Feuerwiderstandsdauer > 30 min darf die Ersatzlänge zu $l_{0,fi} = 0,5 \cdot l_{col}$ bei innen liegenden Geschossen und zu $0,5 \cdot l_{col} \leq l_{0,fi} \leq 0,7 \cdot l_{col}$ im obersten Geschoss angesetzt werden

5. Bauteilwiderstand bei Normaltemperatur: $N_{Rd} = \nu_{Rd} \cdot A_c \cdot f_{cd}$

- (a) Betondruckfestigkeit: $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ mit $\alpha_{cc} = 1,0$ ($\alpha_{cc} = 0,85$ liegt auf der sicheren Seite)

- (b) Gesamtausmitte e_{tot} nach Abschnitt 2.4 (vereinfacht bei Normaltemperatur)

- (c) Biegemoment nach Theorie II. Ordnung: $M_{Ed,II} = N_{Ed} \cdot e_{tot}$

- (d) Berechnung des bezogenen Bemessungsmoments: $\mu_{Ed} = m_{Ed} = \frac{|M_{Ed,II}|}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$

- (e) Berechnung der bezogenen Normalkraft: $\nu_{Ed} = n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}$ (Druck negativ)

- (f) Ablesen von ν_{Rd} aus $\mu - \nu$ -Interaktionsdiagramm für $\frac{d_1}{h}$

– Ursprungsgrade durch (μ_{Ed}, ν_{Ed}) zeichnen, am Schnittpunkt mit $\omega_{vorh} = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} \nu_{Rd}$ ablesen

6. Ausnutzungsgrad: $\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} \leq 1,0$

7. Mindestabmessungen: Stützenbreite $b \geq b_{min}$, Achsabstand $a = d_1 \geq a_{min}$

Feuerwiderstands- klasse	Mindestmaße (mm)			
	Stützenbreite b_{min} / Achsabstand a			
	brandbeansprucht auf mehr als einer Seite			brandbeansprucht auf einer Seite
	$\mu_{fi} = 0,2$	$\mu_{fi} = 0,5$	$\mu_{fi} = 0,7$	$\mu_{fi} = 0,7$
1	2	3	4	5
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40**	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45** 450/40**	350/57** 450/51**	175/35
R 180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R 240	350/61**	450/75**	–	295/70

** Mindestens 8 Stäbe

Ⓐ Bei vorgespannten Stützen ist die Vergrößerung des Achsabstandes nach 5.2 (5) zu beachten. Ⓐ

ANMERKUNG Tabelle 5.2a berücksichtigt den Ⓐ gestrichener Text Ⓐ Wert für $\alpha_{cc} = 1,0$

3.2 Vereinfachter Nachweis für Stützen in R90

o Randbedingungen für Standard-Diagramme

- Vierseitige Normbrandbeanspruchung
- Normalbeton C30/37
- Querschnittsabmessungen $h = \{300, 450, 600, 800\}$ mm
- Einlagige Bewehrung aus B500
- Bezogener Achsabstand der Längsbewehrung $\frac{a}{h} = 0,10$, $a \equiv d_1$
- Geometrischer Bewehrungsgrad $\rho = 2\%$

1. Anwendungsvoraussetzungen

- C20/25 – C50/60
- Einlagige Bewehrung
- Bezogene Ersatzlänge im Brandfall: $10 \leq \frac{l_{0,fi}}{h} \leq 50$
 - Ersatzlänge $l_{0,fi} = l_0$ nach Abschnitt 2.3 (vereinfacht bei Normaltemperatur)
 - * $l_{0,fi} = 0,5 \cdot l_{col}$ bei innen liegenden Geschossen und $0,5 \cdot l_{col} \leq l_{0,fi} \leq 0,7 \cdot l_{col}$ im obersten Geschoss erlaubt
- Bezogene Lastausmitte: $0 \leq \frac{e_1}{h} \leq 1,5$, $e_1 = e_0 + e_i$ nach Abschnitt 2.4 (bei Normaltemperatur)
- Mindestquerschnittsabmessungen: $300 \text{ mm} \leq h_{min} \leq 800 \text{ mm}$
- Geometrischer Bewehrungsgrad: $1\% \leq \rho \leq 8\%$
- Bezogener Achsabstand der Bewehrung: $0,05 \leq \frac{a}{h} \leq 0,15$, $a \equiv d_1$
 - Wenn $\frac{a}{h} > 0,15$ Berechnung mit $\frac{a}{h} = 0,15$
- Querschnittsbreite $b \geq h$

2. Berechnung der Bemessungswerte der Einwirkungen im Brandfall: $N_{E,fi,90,d} = \eta_{fi} \cdot N_{Ed}$

- Vereinfacht: $\eta_{fi} = 0,7$
- $\eta_{fi} = \frac{1+\psi_{fi,1} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi}$: Reduktionsfaktor
- $\xi = \frac{Q_k}{G_k}$: Einwirkungsverhältnis
- $\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,50$
- $\psi_{fi} = \begin{cases} 0,3 & \text{Nutzlast in Wohn- u. Bürogebäuden} \\ 0,6 & \text{Nutzlast in Versammlungsbereichen, Verkaufsflächen} \\ 0,0 & \text{Nutzlast auf Dächern, Schnee unter 1000 m, Wind} \\ 0,5 & \text{Wind (als Leiteinwirkung)} \end{cases}$

3. Bezogene Normalkraft: $\nu_{E,fi,d} = \frac{N_{E,fi,90,d}}{A_c \cdot f_{cd}}$

4. Ermittlung der Widerstände im Brandfall: Ablesen von $\mu'_{tot,fi,d,90}$ ($\equiv X_1$) und $\nu'_{R,fi,d,90}$ ($\equiv X_2$) aus Diagramm für h in Abhängigkeit von $\frac{e_1}{h}$ ($\equiv Y$) und $\frac{l_{0,fi}}{h}$

5. Anpassen der Werte aus dem Diagramm (Längen in [mm] einsetzen)

- Einseitige Brandbeanspruchung: $k_{fi} = \min \left\{ \frac{e_1}{h} \right\} \cdot k_1 + h'$
 - $h' = \max \left\{ 4 - \frac{h}{150}, 0,7 \right\}$
 - $k_1 = \max \left\{ 6 - \frac{h}{75}, 0,3 \right\}$
- Dreiseitige Brandbeanspruchung: $k_{fi} = \min \left\{ 0,6 + 0,2 \cdot \frac{e_1}{h}, 0,8 \right\}$
- Achsabstand $0,10 < \frac{a}{h} \leq 0,15$: $k_a = \frac{h'-1}{0,05} \cdot \frac{a}{h} - 2 \cdot h' + 3$
 - $k_a = h'$ für $\frac{a}{h} = 0,15$
 - $h' = \max \left\{ 0,65 \cdot \left(5 - \frac{h}{150} \right) - k_1, 1 \right\}$
 - $k_1 = \max \left\{ 0,65 \cdot \left(1 - \frac{e_1}{h} \right) \cdot \left(3 - \frac{h}{150} \right), 0 \right\}$
- Achsabstand $0,05 \leq \frac{a}{h} < 0,10$: $k_a = \frac{h'-1}{0,05} \cdot \frac{a}{h} + 2 \cdot h' - 1$
 - $h' = 0,3 + \max \left\{ 0,3 \cdot \frac{h-450}{350} + k_1, k_1 \right\}$
 - $k_1 = \max \left\{ \left(1 - \frac{e_1}{h} \right) \cdot k_2, k_2 \right\}$
 - $k_2 = \max \left\{ -0,1 \cdot \frac{h}{150} + 0,4, 0 \right\}$
- Betonfestigkeitsklasse $> C30/37$: $k_c = \frac{k_1-1}{20} \cdot f_{ck} - 1,5 \cdot k_1 + 2,5$
 - $k_1 = \max \left\{ 1,1 \cdot \frac{e_1}{h}, 1 \right\}$
- Betonfestigkeitsklasse $< C30/37$: $k_c = \frac{1-k_1}{10} \cdot f_{ck} + 3 \cdot k_1 - 2$
 - $k_1 = \min \left\{ 0,75 + 0,2 \cdot \frac{e_1}{h}, 0,95 \right\}$
- Bewehrungsgrad $\rho > 2$ %: $k_\rho = \min \left\{ 1 + (\rho - 2) \cdot \frac{e_1}{h}, \frac{\rho}{2} \right\}$, ρ [%]
- Bewehrungsgrad $\rho < 2$ %: $k_\rho = \max \left\{ 0,6 - 0,1 \cdot (\rho + 1) \cdot \frac{e_1}{h}, \frac{\rho}{2} \right\}$, ρ [%]

6. Berechnung des Bauteilwiderstands für die gegebenen Bedingungen

- $\nu_{R,fi,d,90} = k_{fi} \cdot k_a \cdot k_c \cdot k_\rho \cdot \nu'_{R,fi,d,90} [< 0]$
- $\mu_{tot,fi,d,90} = k_{fi} \cdot k_a \cdot k_c \cdot k_\rho \cdot \mu'_{tot,fi,d,90}$

7. Nachweis der Normalkraft im Brandfall: $|\nu_{E,fi,d,90}| \leq |\nu_{R,fi,d,90}|$

8. Nachweis des Moments am Stützenfuß im Brandfall: $\mu_{E,tot,fi,d,90} \leq \mu_{tot,fi,d,90}$

- $\mu_{E,tot,fi,d,90} = \mu_{E,fi,d,1} + \mu_{E,fi,d,2}$
 - $\mu_{E,fi,d,1} = \frac{e_1}{h} \cdot |\nu_{E,fi,d}|$
 - $\mu_{E,fi,d,2} = \nu_{E,fi,d} \cdot \left(\frac{\mu_{tot,fi,d,90}}{\nu_{R,fi,d,90}} + \frac{e_1}{h} \right)$: einwirkendes Moment nach Theorie II. Ordnung

3.3 Rechnerische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer

- Feuerwiderstandsdauer $R = 120 \cdot \left[\frac{R_{\eta,fi} + R_a + R_1 + R_b + R_n}{120} \right]^{1,8}$
 - $R_{eta,fi} = 83 \cdot \left[1,0 - \mu_{fi} \cdot \frac{1+\omega}{\frac{0,85}{\alpha_{cc}} + \omega} \right] = 83 \cdot [1,0 - \mu_{fi}]$
 - * $\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}}$
 - $R_a = 1,60 \cdot (a - 30)$
 - * a : Achsabstand der Längsbewehrung in mm, $25 \leq a \leq 80$
 - $R_1 = 9,60 \cdot (5 - l_{0,fi})$
 - * $l_{0,fi}$: Ersatzlänge der Stütze im Brandfall in m, $[2 \leq] l_{0,fi} \leq 6$
 - $R_b = 0,09 \cdot b'$
 - * $b' = 2 \cdot \frac{A_c}{b+h}$: Ersatzbreite für Rechteckquerschnitte in mm, $200 \leq b' \leq 450$, $h \leq 1,5 \cdot b$
 - * $b' = d_{col}$: Ersatzbreite für Kreisquerschnitte in mm

4 Schnittgrößenermittlung mit Momenten-Umlagerung

4.1 Schnittgrößenermittlung nach Elastizitätstheorie mit begrenzter Umlagerung

- Keine Umlagerung bei Vorspannung, Leichtbeton, hohen Zwangsbeanspruchung und verschieblichen Rahmen
- 1. Linear-elastische Schnittgrößenermittlung und Bestimmung der Umhüllenden
- 2. Bestimmung der maßgebenden Lastkombination und -stellung für das Stützkomment
- 3. Voraussetzungen
 - $0,5 \leq \frac{l_{eff,1}}{l_{eff,2}} \leq 2,0$
 - gleiche Steifigkeit benachbarter Felder
 - durchlaufender Balken, Innenstütze
 - vorwiegend auf Biegung beansprucht
- 4. Wahl des Umlagerungsfaktors $\delta = \frac{M_{st,\delta}}{M_{St,el}} = 1 - \beta$
 - „Umlagerung um $\beta \cdot 100 \%$ “
- 5. Berechnung des Momentenverlauf nach Umlagerung $M_\delta(x)$
 - Stützmoment: $M_{St,\delta} = \delta \cdot M_{St}$
 - Parabelstiche in Feldmitten: $\Delta M_{F,i} = \frac{p d \cdot l_i^2}{8}$
 - Momente in Feldmitten: $M^{(l_i/2)} = \frac{1}{2} (M_{St,l} + M_{St,r}) + \Delta M_{F,i}$

- Bestimmung des parabolischen Momentenverlaufs aus drei Punkten
 - Berechnung der maximalen Feldmomente nach Umlagerung
6. Maßgebende Feldmomente: $M_i = \max\{M_{Ed,i}, M_\delta\}$
7. Biegebemessung für umgelagerten Momentenverlauf
- (a) Auf den Schwerpunkt der Zugbewehrung bezogenes Bemessungsmoment:
 $M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right)$
 - (b) Bezogenes Moment: $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$
 - (c) Bezogener innerer Hebelarm: $\zeta = \frac{z}{d} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Eds}}\right)$
 - (d) Bewehrungsfläche: $A_{s1} = \frac{1}{f_{yd}} \left(\frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d} + N_{Ed}\right)$
 - (e) Bezogene Druckzonenhöhe: $\xi = \frac{x_u}{d} \approx 2.5 \cdot (1 - \zeta)$
8. Nachweis der Umlagerung: $\delta \geq \delta_{lim}$ an der Umlagerungsstelle
- $f_{ck} \leq 50$ MPa: $\delta_{lim} = 0,64 + 0,8 \cdot \frac{x_u}{d} \geq \begin{cases} 0,85 & \text{für B500A} \\ 0,70 & \text{für B500B und B500C} \end{cases}$
 - $f_{ck} > 50$ MPa: $\delta_{lim} = 0,72 + 0,8 \cdot \frac{x_u}{d} \geq 0,80$ für B500B und B500C

4.2 Schnittgrößenermittlung nach Plastizitätstheorie

1. Linear-elastische Schnittgrößenermittlung und Bestimmung der Umhüllenden
2. Bestimmung der maßgebenden Lastkombination und -stellung für das Stützmoment
3. Voraussetzungen/Annahmen
 - Ausbildung eines plastischen Gelenks der Länge $1,2 \cdot h$ an den Stützen
 - Keine Verwendung von B500A
 - $\frac{x_u}{d} \leq \begin{cases} 0,25 & \text{für } \leq \text{C50/60} \\ 0,15 & \text{für } \geq \text{C55/67} \end{cases}$
4. Wahl des Umlagerungsfaktors $\delta = \frac{M_{st,\delta}}{M_{st,el}} = 1 - \beta$
 - „Umlagerung um $\beta \cdot 100$ %“
5. Berechnung des Momentenverlauf nach Umlagerung $M_\delta(x)$
 - Stützmoment: $M_{St,\delta} = \delta \cdot M_{St}$
 - Parabelstiche in Feldmitten: $\Delta M_{F,i} = \frac{p_d \cdot l_i^2}{8}$
 - Momente in Feldmitten: $M^{(l_i/2)} = \frac{1}{2}(M_{St,l} + M_{St,r}) + \Delta M_{F,i}$
 - Bestimmung des parabolischen Momentsnverlaufs aus drei Punkten
 - Berechnung der maximalen Feldmoments nach Umlagerung
6. Maßgebende Feldmomente: $M_i = \max\{M_{Ed,i}, M_\delta\}$
7. Biegebemessung für umgelagerten Momentenverlauf
 - (a) Auf den Schwerpunkt der Zugbewehrung bezogenes Bemessungsmoment:
 $M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right)$
 - (b) Bezogenes Moment: $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$
 - (c) Bezogener innerer Hebelarm: $\zeta = \frac{z}{d} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Eds}}\right)$
 - (d) Bewehrungsfläche: $A_{s1} = \frac{1}{f_{yd}} \left(\frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d} + N_{Ed}\right)$
 - (e) Bezogene Druckzonenhöhe: $\xi = \frac{x_u}{d} \approx 2.5 \cdot (1 - \zeta)$
8. Rechenwerte der Baustoffkenngrößen

- Beton: $f_{cR} = 0,85 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$, $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$
- Stahl: $f_{yR} = 1,1 \cdot f_{yk}$, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$

9. Iterative Berechnung der Kräfteverhältnisse im Querschnitt des plastischen Gelenks

- Durchführen für Stütze und beide angrenzenden Felder

(a) Vorgegebene Stahlspannung: $\varepsilon_s = \frac{f_{yR}}{E_{sm}} \stackrel{i.d.R.}{=} 2,75 \cdot 10^{-3}$

(b) Stahlzugkraft: $Z_{sR} = f_{yR} \cdot A_{s1}$

(c) Annahme der Betondehnung ε_c (für jeden Iterationsschritt)

(d) Betondruckkraft $F_{cR} = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cR}$

i. Beiwert $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$

ii. Beiwert $k = 1,05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cR}}$

iii. Völligkeitsbeiwert $\alpha_R = \frac{k}{k-2} \cdot \left(1 - \frac{\ln A}{A-1}\right) - \frac{1}{\eta} \cdot \underbrace{\frac{1}{(k-2)^3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot A^2 - 2 \cdot A + \ln A + \frac{3}{2}\right)}_{=B}$

- $A = 1 + (k-2) \cdot \eta$

iv. Beiwert $k_a = 1 - \frac{1}{\alpha_R \cdot \eta^2} \cdot \left[k \cdot B - \frac{1}{(k-2)^4} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot A^3 - \frac{3}{2} \cdot A^2 + 3 \cdot A - \ln A - \frac{11}{6} \right) \right]$

v. Druckzonenhöhe $x = \frac{|\varepsilon_c|}{|\varepsilon_c| + \varepsilon_{yR}}$

(e) Überprüfung $F_{cR} \approx F_{sR}$

10. Lage der Druckresultierenden $a = k_a \cdot x$

11. Fließmoment $M_{Fl,R} = \frac{F_{sR} + F_{cR}}{2} \cdot z$ mit $z = d - a$

12. Rissmoment $M_{cr} = f_{ctm} \cdot W_c$

13. Mittlere Stahldehnung unter Berücksichtigung der Zugversteifung

- $M_\delta < M_{cr}$: Zustand I $\rightarrow \varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s1}$ aus Biegebemessung (ω -Verfahren)
- $M_{cr} \leq M_\delta < M_{Fl,R}$: Zustand II $\rightarrow \varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_t \cdot (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1})$
 - $\varepsilon_{sr1} = \varepsilon_c \cdot \frac{z_s - d_1}{z_s}$: Stahldehnung bei Erreichen des Rissmoments mit $\varepsilon_c = \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}$
 - $\varepsilon_{sr2} = \frac{\sigma_{sr2}}{E_s}$: Stahldehnung im Zustand II mit $\sigma_{sr2} = \sigma_{flr2} = \frac{M_{cr}}{z_{II} \cdot A_{s1}}$
 - * $z_{II} \approx d - \frac{x_{II}}{3}$ nach Dutulescu
 - $\beta_t = \begin{cases} 0,4 & \text{für Einzelbelastung} \\ 0,25 & \text{für Dauerbelastung} \end{cases}$
 - $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s}$ (vereinfacht), oder aus Zulassung
- $M_\delta \geq M_{Fl,R}$: Zustand III $\rightarrow \varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sy} - \beta_t \cdot (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) + \delta \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sr}}{f_y}\right) \cdot (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{sy})$
 - $\delta = \begin{cases} 0,8 & \text{B500A} \\ 0,6 & \text{B500B} \end{cases}$
 - $\sigma_{sr} = \frac{F_{sR}}{A_{s1}}$

14. Mittlere Krümmung: $(1/r)_m = \frac{\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{c(u)}}{d}$

15. Ausnutzung des Fließmoments: $(1/r)_{mB} = (1/r)_m \cdot \frac{M_\delta}{M_{Fl,R}}$

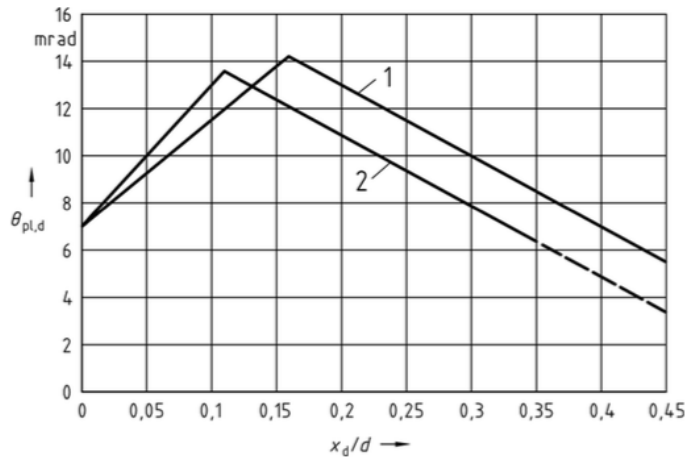
16. Ermittlung des Krümmungsverlaufs entlang des Trägers (vereinfacht: Krümmungen in den Feldern und über der Stütze berechnet, Randauflager $\kappa = 0$)

17. Ermittlung des Krümmungsverlaufs durch Stützenabsenkung durch Einheitsverkrümmung $\kappa = 1$ über der Stütze, linearer Verlauf zu den Randauflagern

18. Berechnung der Rotation θ_s [mrad] im plastischen Gelenk durch Koppeln des Krümmungsverlaufs mit der Einheitskrümmung

$$19. \text{ Zulässige Rotation: } \theta_{pl,d} = \min \begin{cases} [(0,15 - 3 \cdot \varepsilon_{cu1}) \cdot \frac{x_d}{d} + 0,007] \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{3}} \cdot 10^3 & \text{für Stahlversagen} \\ [(0,0043 + 4,2 \cdot \varepsilon_{cu1}) - 0,03 \cdot \frac{x_d}{d}] \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{3}} \cdot 10^3 & \text{für Betonversagen} \end{cases}$$

- $\lambda = \frac{\Delta x}{d}$ mit Δx : Abstand zwischen Momentennullpunkt und Momentenmaximum (= Stützmoment) nach Umlagerung (Mittelwert aus beiden Feldern)
- Alternativ: $\theta_{pl,d} = \theta'_{pl,d} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{3}}$ mit $\theta'_{pl,d}$ aus Diagramm



1: C12/15 – C50/60, 2: C100/115

$$20. \text{ Nachweis: } \theta_s \leq \theta_{pl,d}$$

5 Ermüdung

- Ermüdungsnachweis entfällt für $N \leq 10^4$

1. Bestimmung der maßgebenden Bemessungsstelle x_B : maximales Feldmoment durch Ermüdungsbeanspruchung über Einflusslinie

2. Maximales Feldmoment der nichtzyklischen Belastung (häufige EWK):

$$M_{0,F,req} = \sum_j M_{g,k,j} + \psi_{1,1} \cdot M_{q,k,1} + \sum_i \psi_{2,i} \cdot M_{q,k,i}$$

- Allgemein: Feldmoment an Bemessungsstelle

3. Feldmomente durch zyklische Belastung an der Bemessungsstelle: $\left\{ \begin{array}{l} M_{fat,max} \\ M_{fat,min} \end{array} \right\} = TW \cdot Q_k \cdot l \cdot \frac{1}{10}$

- $Q_k = \varphi \cdot F_{fat}$
 - $\varphi = 1,4$: Schwingbeiwert, falls kein genauer Nachweis geführt wird
 - F_{fat} : zyklische Einzellast
- Tafelwert aus Tafeln für Einflusslinien

4. Momentenschwingbreite

- Oberlast: $\max M(x_B) = M_{o,F} + M_{fat,max}$
- Unterlast: $\min M(x_B) = M_{o,F} + M_{fat,min}$

5. Spannungsschwingbreiten im Betonstahl und Beton

- Druckzonenhöhe x_{II} und innerer Hebelarm $z_{II} \simeq d - \frac{x_{II}}{3}$ im Zustand II nach Dutulescu
- Stahlspannung bei Oberlast: $\sigma_{s2r,max} = \frac{\max M}{z_{II} \cdot A_s}$
- Stahlspannung bei Unterlast: $\sigma_{s2r,min} = \frac{\min M}{z_{II} \cdot A_s}$
- Spannungsschwingbreite: $\Delta \sigma_{S,max} = \max \sigma_{s2r} - \min \sigma_{s2r}$
- Betonspannung bei Grundmoment: $\Delta \sigma_{c2} = -\frac{2 \cdot M_{o,F}}{b \cdot x_{II} \cdot z_{II}}$

(f) Betonspannung bei Oberlast: $\sigma_{c2,max} = \sigma_{cd,max,equ} = -\frac{2 \cdot \max M}{b \cdot x_{II} \cdot z_{II}}$

(g) Betonspannung bei Oberlast: $\sigma_{c2,min} = \sigma_{cd,min,equ} = -\frac{2 \cdot \min M}{b \cdot x_{II} \cdot z_{II}}$

6. Ermüdungsfestigkeit des Betons: $f_{cd,fat} = 1,0 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$

- $\beta_{cc}(t_0) = \exp\left(s \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t_0}}\right]\right)$: Festigkeitsbeiwert für die Festigkeit bei Erstbelastung (t_0)

$$- s = \begin{cases} 0,38 & \text{CEM 32,5 N} \\ 0,25 & \text{CEM 32,5 R, CEM 42,5 N} \\ 0,20 & \text{CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R} \\ 0,20 & \text{alle Betone mit } f_{cd} \geq 55 \text{ MPa} \end{cases}$$

7. Vereinfachter Nachweis

- Voraussetzung: Schwingspielzahl $N < 10^8$
- Stahl: maximale Spannungsschwingbreite: $\Delta\sigma_{S,max} \leq 70 \text{ MPa}$
- Beton: maximale Ober- und Unterspannung: $\max \left\{ \frac{|\sigma_{c,max}^*|}{f_{cd,fat}}, 0,5 + 0,45 \cdot \frac{|\sigma_{c,min}^*|}{f_{cd,fat}} \right\} \leq \begin{cases} 0,9 & \leq \text{C50/60} \\ 0,8 & > \text{C50/60} \end{cases}$
 - $\sigma_{c,max}^*$ mit $\max M^* = M_{o,F} + \psi_{1,1} \cdot M_{fat,max}$, $\sigma_{c,min}^*$ entsprechend

8. Nachweis der schädigungsäquivalenten Spannungen

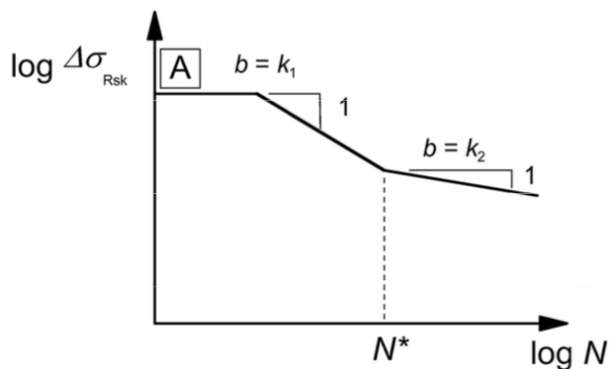
- Stahl: $\gamma_{F,fat} \cdot \Delta\sigma_{S,equ}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{S,fat}}$
 - $\gamma_{F,fat} = 1,0$, $\gamma_{S,fat} = 1,15$
 - $\Delta\sigma_{S,equ}(N^*) = \Delta\sigma_{S,max}$ für übliche Hochbauten
 - $\log \Delta\sigma_{Rsk}(N) = \log \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) + \frac{1}{m} \cdot \log\left(\frac{N^*}{N}\right)$
 - * $m = \begin{cases} k_1 & \text{für } N < N^* \\ k_2 & \text{für } N > N^* \end{cases}$

Art der Bewehrung	N^*	Spannungsexponent		$\Delta\sigma_{Rsk}$ bei N^* Zyklen N/mm ²
		k_1	k_2	
gerade und gebogene Stäbe ^a	10^6	5	9 ^c	175
geschweißte Stäbe und Betonstahlmatten ^b	10^6	4	5	85

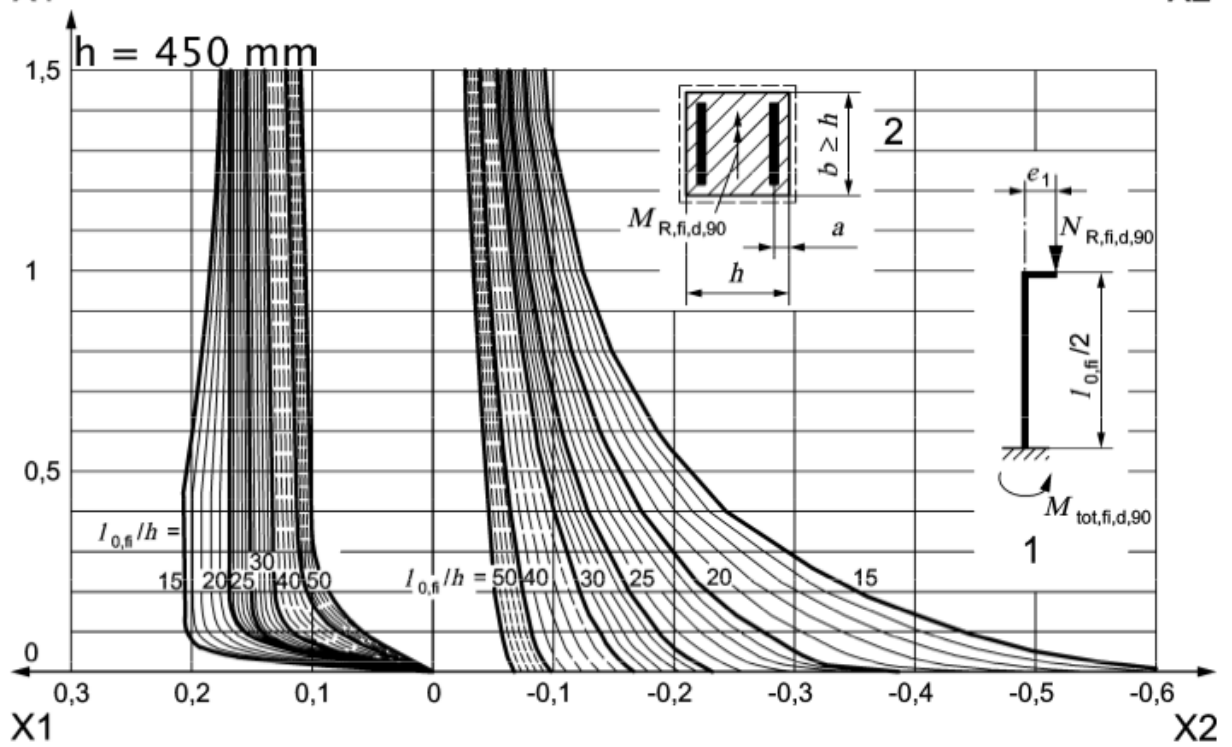
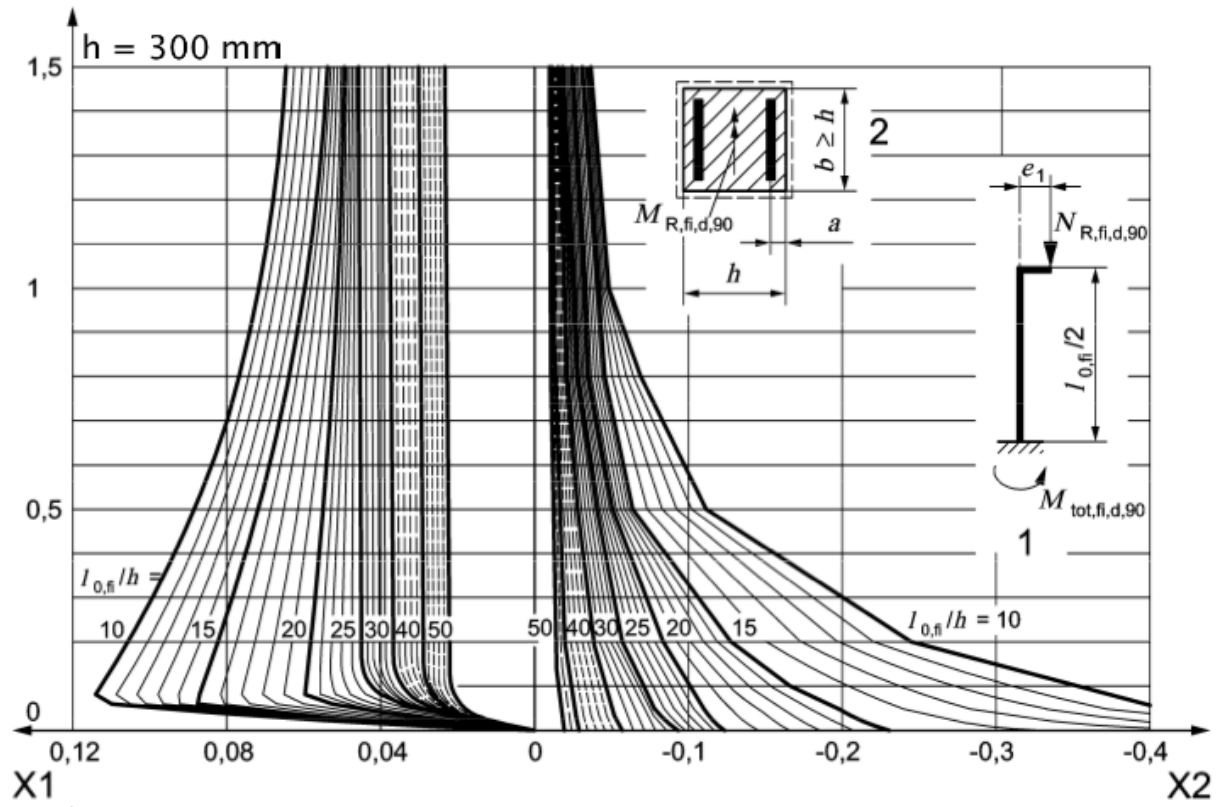
^a Für gebogene Stäbe mit $D < 25\phi$ ist $\Delta\sigma_{Rsk}$ mit dem Reduktionsfaktor $\zeta_1 = 0,35 + 0,026 D / \phi$ zu multiplizieren. Für Stäbe $\phi > 28 \text{ mm}$ ist $\Delta\sigma_{Rsk} = 145 \text{ N/mm}^2$ (gilt nur für hochduktilen Betonstähle). Dabei ist D der Biegerollendurchmesser, ϕ der Stabdurchmesser.

^b Sofern nicht andere Wöhlerlinien durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall festgelegt werden.

^c In korrosiven Umgebungsbedingungen (XC2, XC3, XC4, XS, XD) sind weitere Überlegungen zur Wöhlerlinie anzustellen. Wenn keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, ist für k_2 ein reduzierter Wert $5 \leq k_2 < 9$ anzusetzen.



- Beton: $E_{cd,max,equ} + 0,43 \cdot \sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1,0$
 - $E_{cd,max,equ} = \frac{|\sigma_{cd,max,equ}|}{f_{cd,fat}}$
 - $R_{equ} = \frac{\sigma_{cd,min,equ}}{\sigma_{cd,max,equ}}$



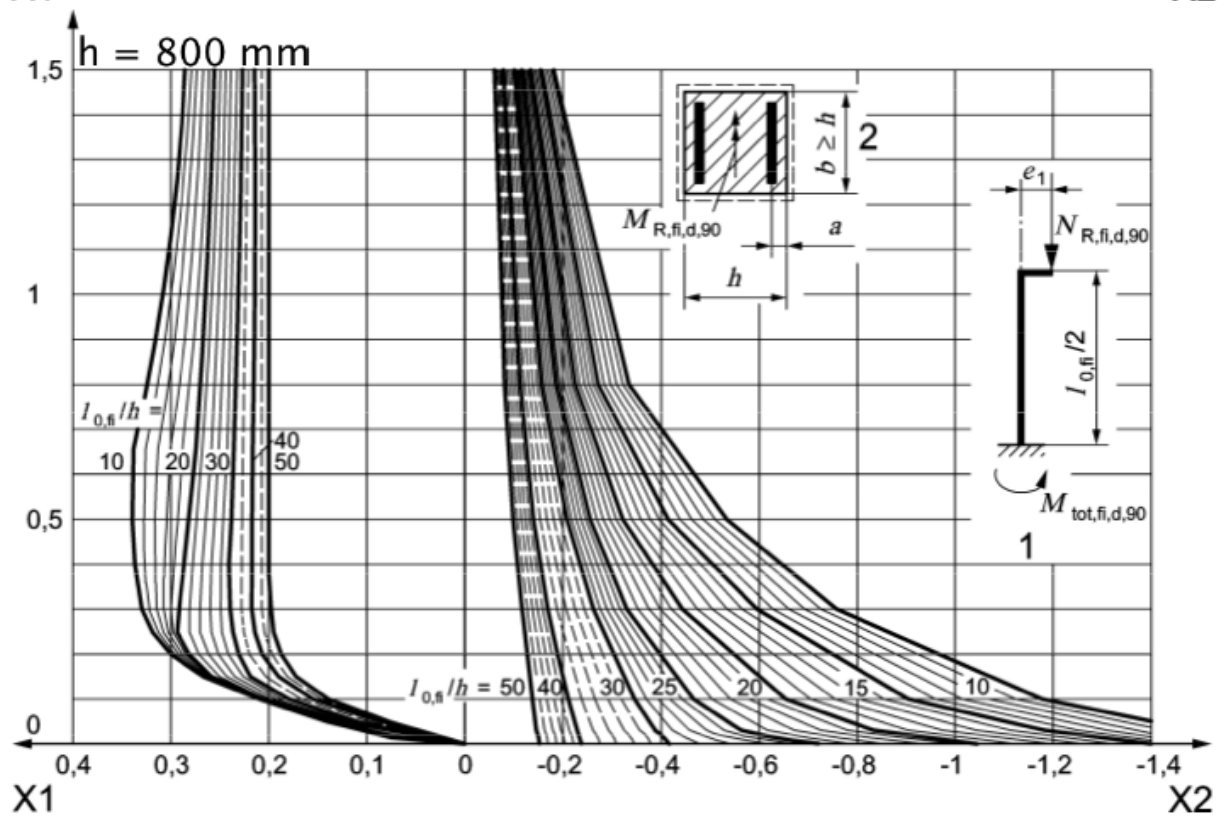
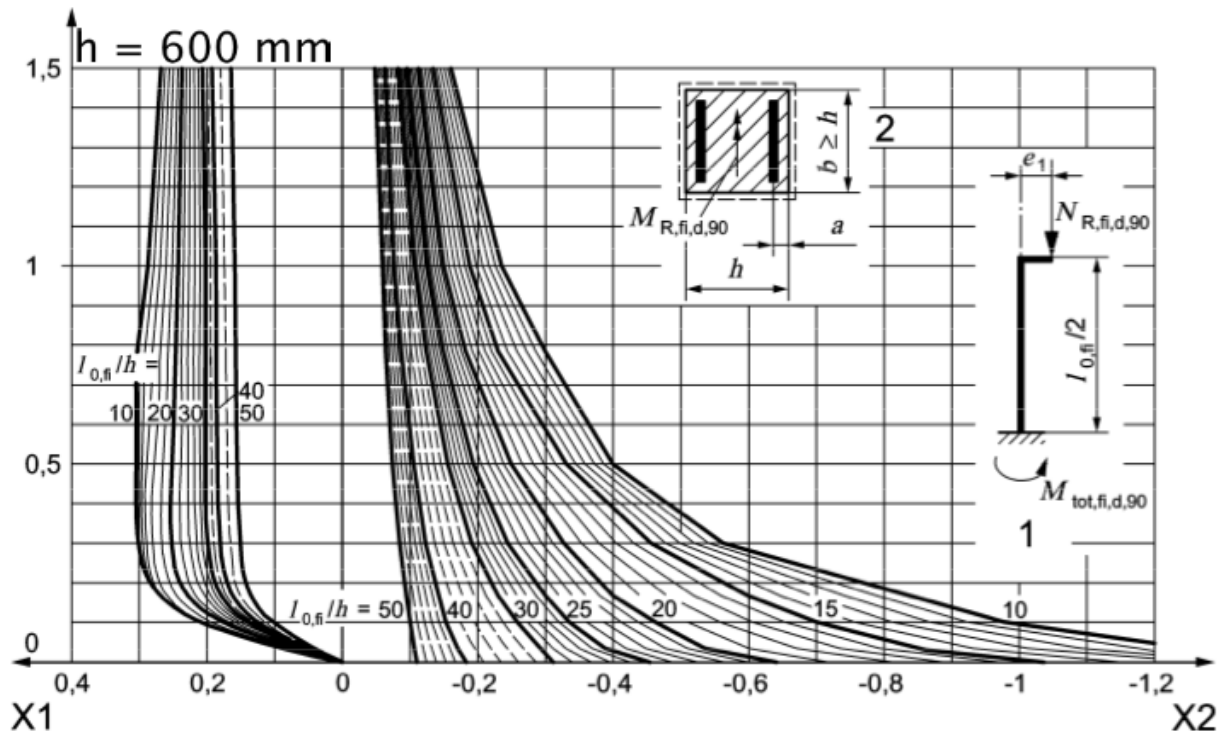


Tabelle 3.1 — Festigkeits- und Formänderungskennwerte für Beton

Betontfestigkeitsklasse										analytische Beziehung						
	12	16	20	25	30	35	40	45	50		55	60	70	80	90	
f_{ck}	N/mm ²	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$	N/mm ²	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm}	N/mm ²	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	
f_{ctm}	N/mm ²	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	
$f_{ctk,0,05}$	N/mm ²	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	
$f_{ctk,0,95}$	N/mm ²	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	
$F_{ctm} \cdot 10^{-3}$	N/mm ²	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	
ϵ_{ct1}	%	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	
ϵ_{cu1}	%	3,5										3,2	3,0	2,8	2,8	
ϵ_{t2}	%	2,0										2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2}	%	3,5										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n		2,0										1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\epsilon_{c3}^{(0/100)}$	%	1,75										1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3}	%	3,5										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

$$f_{cm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln [1 + (f_{cm}^{1/10})] > C50/60$$

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad 5\% \text{ Quantil}$$

$$f_{ctk,0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm} \quad 95\% \text{ Quantil}$$

$$F_{ctm} = 22 \cdot (f_{ctm}/10)^{0,3}$$

$$[AC] \epsilon_{ct1}^{(0/100)} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 [AC]$$

$$\text{Siehe Bild 3.2 für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{cu1}^{(0/100)} = 2,8 + 27 [(98 - f_{cm})/100]^4$$

$$\text{Siehe Bild 3.3 für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{c2}^{(0/100)} = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}$$

$$\text{Siehe Bild 3.3 für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{cu2}^{(0/100)} = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$$

$$\text{für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

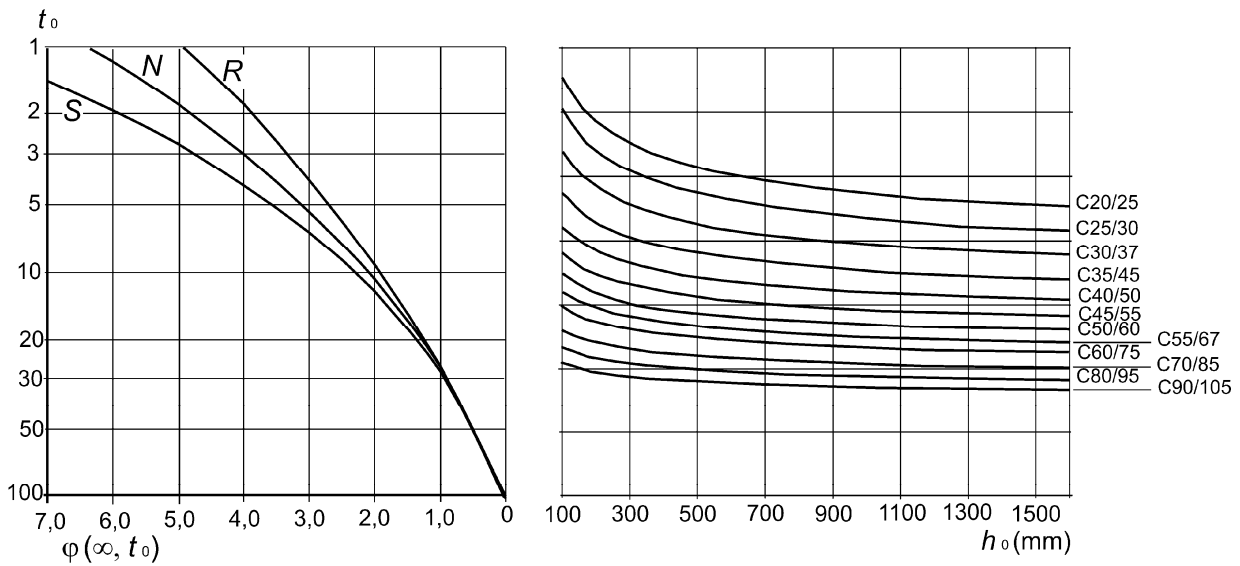
$$n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$$

$$\text{Siehe Bild 3.4 für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

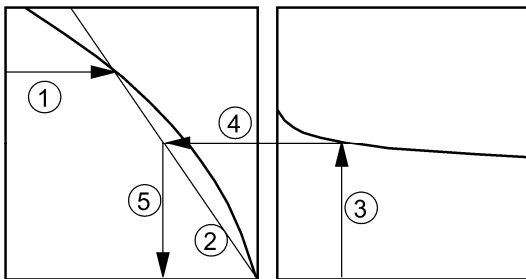
$$\epsilon_{c3}^{(0/100)} = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50) / 40]$$

$$\text{Siehe Bild 3.4 für } f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{cu3}^{(0/100)} = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$$

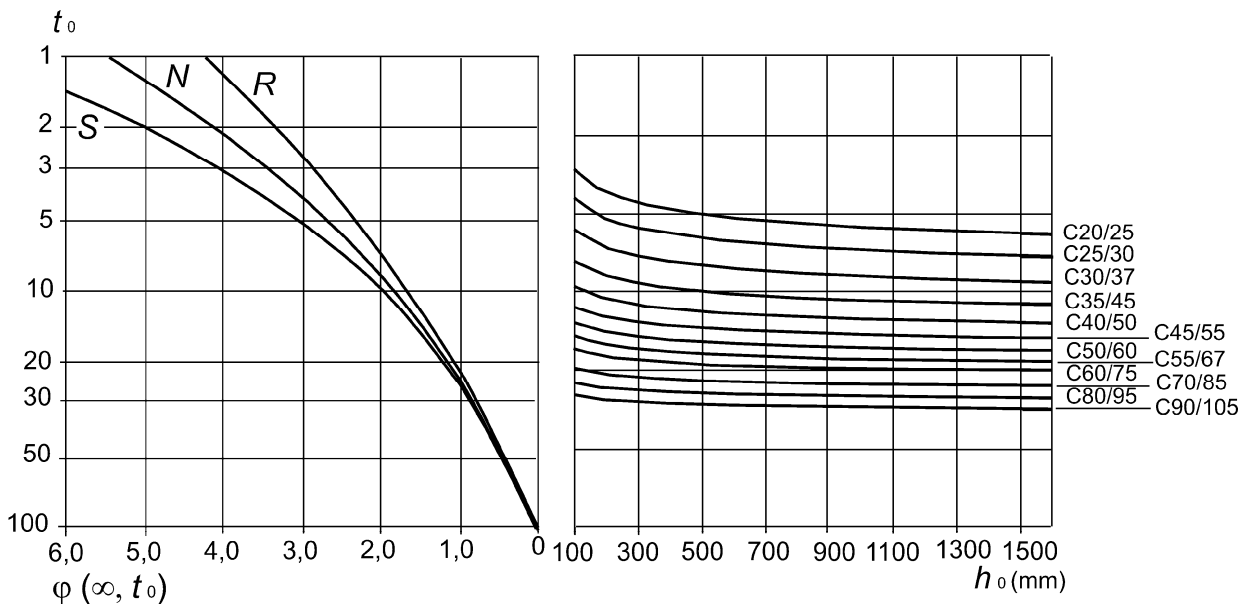


a) trockene Innenräume, relative Luftfeuchte = 50%



ANMERKUNG

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



b) Außenluft, relative Luftfeuchte = 80%

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

TABELLE ED8 Rechteckquerschnitte & Plattenbalken im Zustand II auf Biegung beansprucht. Lage der Nulllinie & ideoles Trägheitsmoment.

	$x \equiv x_{II}$: Druckzonenhöhe im Zustand II	I_I : Ideelles Trägheitsmoment um NL
	$\begin{cases} b_{eff} = b \\ A_{s2} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{B}_1 = +\frac{1}{b} \alpha_e A_{s1} \\ \bar{C} = -\frac{1}{b} 2 \alpha_e A_{s1} d \end{cases} \rightarrow \boxed{x = -\bar{B}_1 + \sqrt{\bar{B}_1^2 - \bar{C}}}$	$I_I = +\frac{1}{3} b x^3 + \alpha_e A_{s1} (d - x)^2$
	$\begin{cases} b_{eff} = b \\ A_{s2} > 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{B}_1 = +\frac{1}{b} \alpha_e (A_{s1} + A_{s2}) \\ \bar{C} = -\frac{1}{b} 2 \alpha_e (A_{s1} d + A_{s2} d_2) \end{cases} \rightarrow \boxed{x = -\bar{B}_1 + \sqrt{\bar{B}_1^2 - \bar{C}}}$	$I_I = +\frac{1}{3} b x^3 + \alpha_e [A_{s1} (d - x)^2 + A_{s2} (d_2 - x)^2]$
	$\begin{cases} b_{eff} \neq b \\ A_{s2} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{B}_1 = +\frac{1}{b} [\alpha_e A_{s1} + h_f (b_{eff} - b)] \\ \bar{C} = -\frac{1}{b} [2 \alpha_e (A_{s1} d) + h_f^2 (b_{eff} - b)] \end{cases} \rightarrow \boxed{x = -\bar{B}_1 + \sqrt{\bar{B}_1^2 - \bar{C}}}$	$I_I = +\frac{1}{3} b x^3 + (b_{eff} - b) h_f (x^2 - x h_f + \frac{1}{3} h_f^2) + \alpha_e A_{s1} (d - x)^2$
	$\begin{cases} b_{eff} \neq b \\ A_{s2} > 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{B}_1 = +\frac{1}{b} [\alpha_e (A_{s1} + A_{s2}) + h_f (b_{eff} - b)] \\ \bar{C} = -\frac{1}{b} [2 \alpha_e (A_{s1} d + A_{s2} d_2) + h_f^2 (b_{eff} - b)] \end{cases} \rightarrow \boxed{x = -\bar{B}_1 + \sqrt{\bar{B}_1^2 - \bar{C}}}$	$I_I = +\frac{1}{3} b x^3 + (b_{eff} - b) h_f (x^2 - x h_f + \frac{1}{3} h_f^2) + \alpha_e [A_{s1} (d - x)^2 + A_{s2} (d_2 - x)^2]$

TABELLE ED9 Rechteckquerschnitte & Plattenbalken im Zustand II auf Biegung mit Normalkraft beansprucht. Lage der Nulllinie & Verkrümmung bzw. Biegesteifigkeitsmodul.

$e_{c2} = e_0 + z_G$ $e_{s1} = e_{c2} - d$ $e_{s2} = e_{c2} - d_2$	$x \equiv x_{II}$: Druckzonenhöhe im Zustand II	$S_{I,NL}$: Ideelles statisches Moment um Nulllinie
	$D = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2})$ $E = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2)$ $F = 0$ $G = 0$ $x = \frac{E}{D} \equiv \frac{A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2}{A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2}} \leq 0$	$S_{I,NL} = A_{s1} (x - d) + A_{s2} (x - d_2)$ $\chi = -\frac{N_{Ed}}{E_s S_{I,NL}} \Leftrightarrow B_{II} = -E_s e_0 S_{I,NL} \equiv \frac{M_{Ed}}{\chi}$
	$A = -3e_{c2}$ $B = -\frac{6}{b_{eff}} D = -\frac{6}{b_{eff}} \alpha_e (A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2})$ $C = +\frac{6}{b_{eff}} E = +\frac{6}{b_{eff}} \alpha_e (A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2)$ $X^3 + AX^2 + BX + C = 0 \cap (0, h_f]$	$D = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2})$ $E = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2)$ $F = 0$ $G = 0$ $S_{I,NL} = \frac{1}{2} b_{eff} x^2 + \alpha_e A_{s1} (x - d) + \alpha_e A_{s2} (x - d_2)$ $\chi = -\frac{N_{Ed}}{E_c S_{I,NL}} \Leftrightarrow B_{II} = -E_c e_0 S_{I,NL} \equiv \frac{M_{Ed}}{\chi}$
	$A = -3e_{c2}$ $B = -\frac{3}{b} (2D + 2F - G)$ $C = +\frac{1}{b} [6E + h_f (3F - G)]$ $X^3 + AX^2 + BX + C = 0 \cap (h_f, h)$	$D = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2})$ $E = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2)$ $F = h_f (b_{eff} - b) e_{c2}$ $G = h_f^2 (b_{eff} - b)$ $S_{I,NL} = \frac{1}{2} b_{eff} x^2 + (b_{eff} - b) h_f (x - \frac{1}{2} h_f) + \alpha_e A_{s1} (x - d) + \alpha_e A_{s2} (x - d_2)$ $\chi = -\frac{N_{Ed}}{E_c S_{I,NL}} \Leftrightarrow B_{II} = -E_c e_0 S_{I,NL} \equiv \frac{M_{Ed}}{\chi}$
	$x = \frac{1}{3} \frac{b h^2 (3e_{c2} - 2h) + 6E + h_f (3F - 2G)}{b \cdot h (2e_{c2} - h) + 2D + 2F - G} \geq h$	$D = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} + A_{s2} e_{s2})$ $E = \alpha_e (A_{s1} e_{s1} d + A_{s2} e_{s2} d_2)$ $F = h_f (b_{eff} - b) e_{c2}$ $G = h_f^2 (b_{eff} - b)$ $S_{I,NL} = b \cdot h (x - \frac{1}{2} h_f) + h_f (b_{eff} - b) (x - \frac{1}{2} h_f) + \alpha_e A_{s1} (x - d) + \alpha_e A_{s2} (x - d_2)$ $\chi = -\frac{N_{Ed}}{E_c S_{I,NL}} \Leftrightarrow B_{II} = -E_c e_0 S_{I,NL} \equiv \frac{M_{Ed}}{\chi}$