

## Stahlbeton I+II – Sessionsprüfung

(101-0126-01J)

# Beispiel-Prüfung 3

**Musterlösung**

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Studenten-Nr.: \_\_\_\_\_

### Bemerkungen

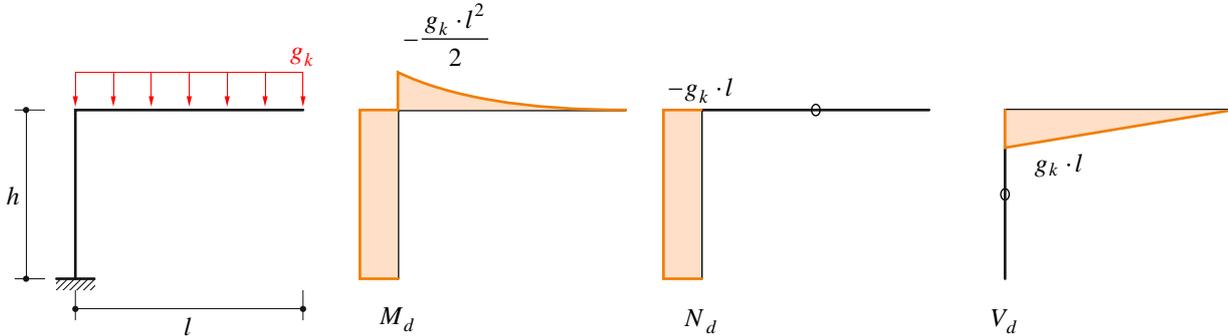
1. Sofern nichts anderes angegeben ist, wird von Beton C30/37 ( $D_{max} = 32$  mm,  $E_c = 33$  GPa), Betonstahl B500B und einer Bewehrungsüberdeckung  $c_{nom} = 35$  mm ausgegangen.
2. Der Abbiegeradius der Bügel und die Rippen der Bewehrungsstäbe dürfen für die Ermittlung der statisch wirksamen Höhe  $d$  vernachlässigt werden.
3. Für jede Aufgabe soll ein separater Papierbogen A3 verwendet werden.
4. Sämtliche Unterlagen (Aufgabenstellung, Lösungsblätter) sind nach Prüfungsende mit Namen zu versehen und abzugeben.
5. Hilfsmittel: 10 Seiten selbständig verfasste Zusammenfassung, Normen SIA 260, 261, 262, Taschenrechner (ohne externe Kommunikationsmöglichkeiten), Zirkel und Lineal.

### Hilfstabellen

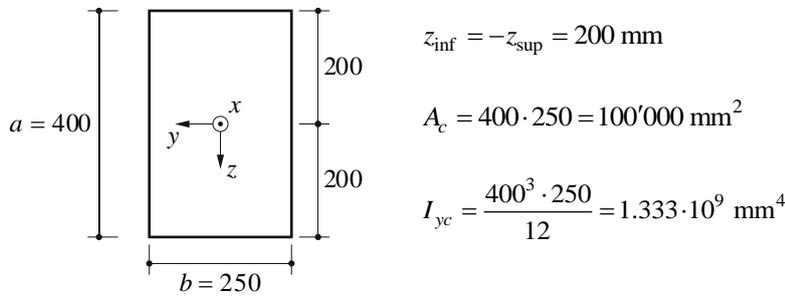
$\emptyset$ [mm]	8	10	12	14	16	18	20	22	26	30	
$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	50	79	113	154	201	254	314	380	531	707	
$a_s$ [mm <sup>2</sup> /m]	$s = 100$ mm	503	785	1130	1540	2010	2544	3141	3801	5309	7069
	$s = 125$ mm	402	628	904	1232	1608	2036	2513	3041	4247	5655
	$s = 150$ mm	335	523	753	1027	1340	1696	2094	2534	3539	4712
	$s = 200$ mm	251	393	565	770	1005	1272	1571	1901	2655	3534

## Aufgabe 1

### a) Risslast



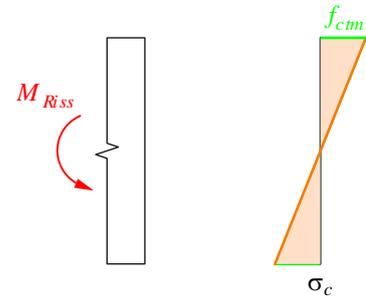
Querschnittswerte (reiner Betonquerschnitt):



### Reissen des Riegels (nur Biegung)

Rissmoment  $M_{\text{Riss},r} = \frac{I_{yc}}{z_{\text{sup}}} \cdot f_{ctm} = \frac{1.333 \cdot 10^9}{-200} \cdot 2.9 = -19.33 \text{ kNm}$

Risslast  $g_{k,\text{Riss},R} = \frac{-M_{\text{Riss},R} \cdot 2}{l^2} = \frac{19.33 \cdot 2}{5^2} = 1.547 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



### Reissen der Stütze (Biegung + Normalkraft)

Spannungsanalyse  $\sigma_{c,\text{sup}} = \frac{N}{A} + \frac{M_{\text{Riss},S}}{I_{yc}} \cdot z_{\text{sup}} = f_{ctm}$

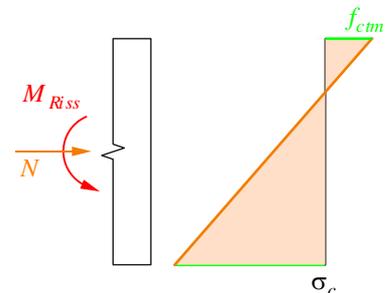
Rissmoment

$$M_{\text{Riss},S} = \frac{-g_{k,\text{Riss},S} \cdot l^2}{2} = \frac{I_{yc}}{z_{\text{sup}}} \cdot \left( f_{ctm} - \frac{N}{A_c} \right) = \frac{I_{yc}}{z_{\text{sup}}} \cdot \left( f_{ctm} - \frac{-g_{k,\text{Riss},S} \cdot l}{A_c} \right)$$

Risslast

$$g_{k,\text{Riss},S} = \frac{\frac{I_{yc}}{z_{\text{sup}}} \cdot f_{ctm}}{\frac{l^2}{2} - \frac{I_{yc}}{z_{\text{sup}}} \cdot \frac{l}{A_c}} = 1.589 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

→ sehr kleiner Effekt der Normalkraft (≈ 3%)



b) Traglast gemäss SIA 262

statische Höhe  $d = 400 - 35 - 8 - \frac{26}{2} = 344 \text{ mm}$   $d' = 35 + 8 + \frac{10}{2} = 48 \text{ mm}$

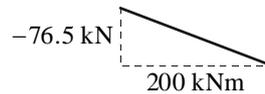
Moment 1. Ordnung  $M_{1d} - \frac{g_{0d} \cdot l^2}{2} \rightarrow e_{1d} = \frac{M_{1d}}{N_d} = \frac{\frac{-g_{0d} \cdot l^2}{2}}{-g_{0d} \cdot l} = \frac{l}{2} = 2.5 \text{ m}$

Anfangsimperfektion  $e_{0d} = \max \left\{ \alpha_i \cdot \frac{l_{cr}}{2}; \frac{d}{30} \right\} = \max \left\{ \frac{1}{200} \cdot \frac{8}{2}; \frac{344}{30} \right\} = \max \{ 20 \text{ mm}; 11 \text{ mm} \} = 20 \text{ mm}$

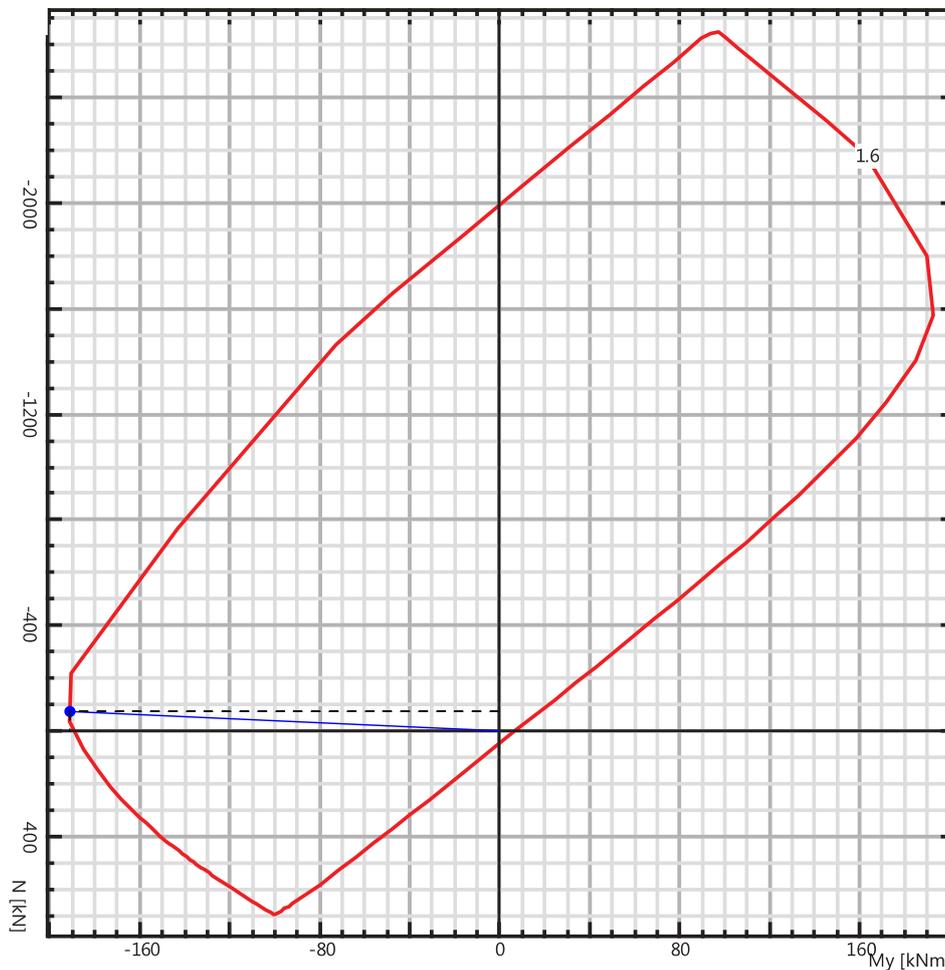
Verf. 2. Ordnung  $e_{2d} = \chi_d \cdot \frac{l_{cr}^2}{c} = \frac{2 \cdot f_{sd}}{E_s \cdot (d - d')} \cdot \frac{(2 \cdot h)^2}{\pi^2} = \frac{2 \cdot 435}{205000 \cdot (0.344 - 0.048)} \cdot \frac{8^2}{\pi^2} = 0.093 \text{ m}$

totales Moment  $M_d = -N_d \cdot (e_{0d} + e_{1d} + e_{2d}) = -N_d \cdot (2.5 + 0.02 + 0.093) = -N_d \cdot 2.613 \text{ m}$

Steigung Gerade in  $M$ - $N$ -Interaktionsdiagramm:



Aus Diagramm:  $M_{Rd} \approx 192 \text{ kNm}$   $N \approx 73.5 \text{ kN}$   $\rightarrow q_{ud} = \frac{N_{Rd}}{l} = 14.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



c) Traglast 1. Ordnung ohne M-N-Interaktion (reine Biegung)

$$\text{Biege widerstand} \quad M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{A_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}} \right) = 1593 \cdot 435 \cdot \left( 344 - \frac{1593 \cdot 435}{2 \cdot 250 \cdot 20} \right) = 190.3 \text{ kNm}$$

$$\text{zulässige Last} \quad q_{ud} = \frac{M_{Rd} \cdot 2}{l^2} = 15.23 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\approx 4\% \text{ höher als Berechnung 2. Ord.})$$

Bei der betrachteten Abfangkonstruktion ist die Biegung dominant; Normalkraft und Effekte 2. Ordnung beeinflussen das Verhalten fast nicht:  $e_{0d} + e_{2d} \ll e_{1d}$ .

Im Gegensatz spielen bei Druckgliedern die Effekte 2. Ordnung eine wesentliche Rolle.

d) Gerissene Biegesteifigkeit

$$\text{Wertigkeit} \quad n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{205}{33} = 6.21$$

$$\text{Bewehrungsgehalt} \quad \rho = \frac{A_s}{d \cdot b} = \frac{\frac{26^2 \cdot \pi \cdot 3}{4}}{344 \cdot 250} = 1.852\%$$

$$\text{Betondruckzonenhöhe} \quad x = d \cdot \left( \sqrt{n^2 \cdot \rho^2 + 2 \cdot n \cdot \rho} - n \cdot \rho \right) = 130.1 \text{ mm}$$

$$\text{gerissene Biegesteifigkeit} \quad EI^{\text{II}} = A_s \cdot E_s \cdot (d - x) \cdot \left( d - \frac{x}{3} \right) = 20'995 \text{ kNm}^2$$

e) Rissabstand und Rissbreiten

äquivalenter Bewehrungsgehalt für biegebeanspruchte Bauteile

$$\rho_t = \frac{1}{\frac{M_{\text{Riss},R} \cdot (d - x) \cdot E_s}{f_{ctm} \cdot EI^{\text{II}}} + 1 - n} = \frac{1}{\frac{19.33 \cdot (0.344 - 0.130) \cdot 205000}{2.9 \cdot 20995} + 1 - 6.21} = 11.48\%$$

$$\text{Stahlspannung im Riss bei Risslast} \quad \sigma_{sr0} = f_{ctm} \cdot \left( \frac{1}{\rho_t} + n - 1 \right) = 40.38 \text{ MPa}$$

$$\text{maximale und minimale Rissabstände} \quad s_{r0} = \frac{\varnothing_s \cdot (1 - \rho_t)}{4 \cdot \rho_t} = \frac{26 \cdot (1 - 0.1148)}{4 \cdot 0.1148} = 50.12 \text{ mm}$$

$$s_{r,\text{min}} = 0.5 \cdot s_{r0} = 25.06 \text{ mm}$$

→ Rissabstände zwischen 25.1 mm und 50.1 mm

**Rissbreiten**

*einwirkendes Moment*

$$M_d = \frac{g_k \cdot l^2}{2} = \frac{8 \cdot 5^2}{2} = 100 \text{ kNm}$$

*Stahlspannung im Riss*

$$\sigma_{sr} = \frac{M_d \cdot (d - x) \cdot E_s}{EI^{\text{II}}} = \frac{100 \cdot (0.344 - 0.130) \cdot 205000}{20995} = 209 \text{ MPa}$$

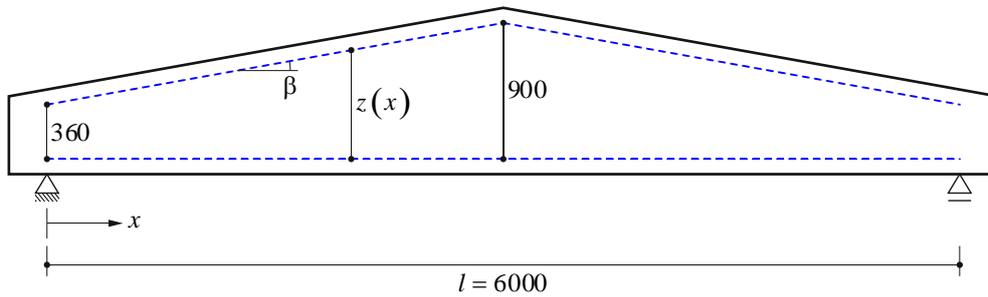
*min. Rissbreite*

$$w_{r,\text{min}} = \frac{s_{r0}}{2 \cdot E_s} \cdot \left( \sigma_{sr} - \frac{\sigma_{sr0}}{4} \right) = \frac{50.1}{2 \cdot 205000} \cdot \left( 209 - \frac{40.38}{4} \right) = 0.024 \text{ mm}$$

*max. Rissbreite*

$$w_{r,\text{max}} = \frac{s_{r0}}{E_s} \cdot \left( \sigma_{sr} - \frac{\sigma_{sr0}}{2} \right) = \frac{50.1}{205000} \cdot \left( 209 - \frac{40.38}{2} \right) = 0.046 \text{ mm}$$

**Aufgabe 2**



$$\tan(\beta) = \frac{9}{50} \quad \rightarrow \quad \beta = 10.2^\circ$$

a) Nullpunkt der Stegquerkraft

vertikale Komponente der Gurtkräfte bei x:

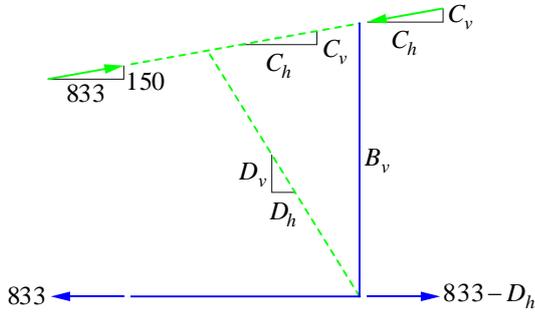
$$F_v(x) = \frac{M(x)}{z(x)} \cdot \tan(\beta) = \frac{\frac{q_d \cdot l}{2} \cdot x - \frac{q_d \cdot x^2}{2}}{0.36 + x \cdot \tan(\beta)} \cdot \tan(\beta)$$

Querkraft bei x:  $V(x) = \frac{q_d \cdot l}{2} - q_d \cdot x$

$$\rightarrow F_v(x) = V(x) \quad \rightarrow \quad x = \frac{0.36 - \sqrt{0.36^2 + l \cdot \tan(\beta) \cdot 0.36}}{\tan(\beta)} = 2 \text{ m}$$

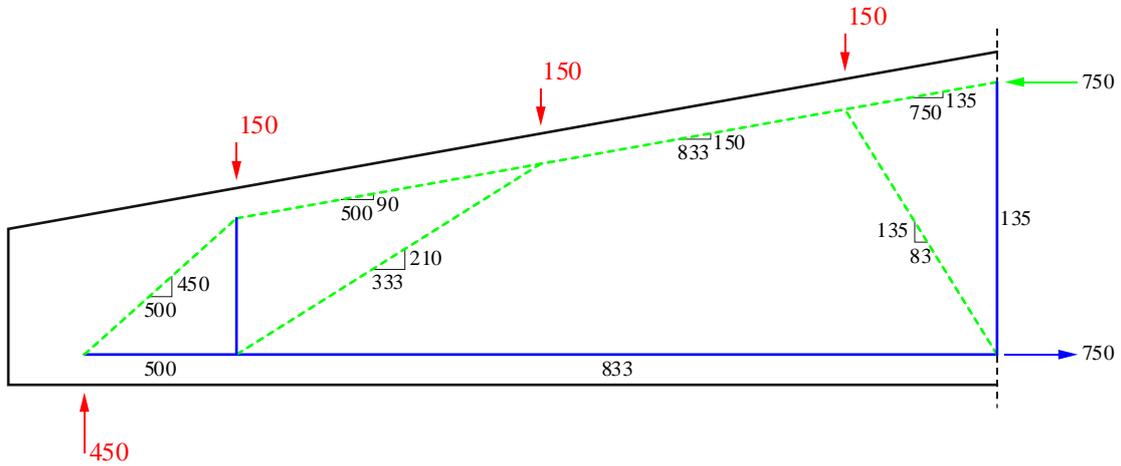
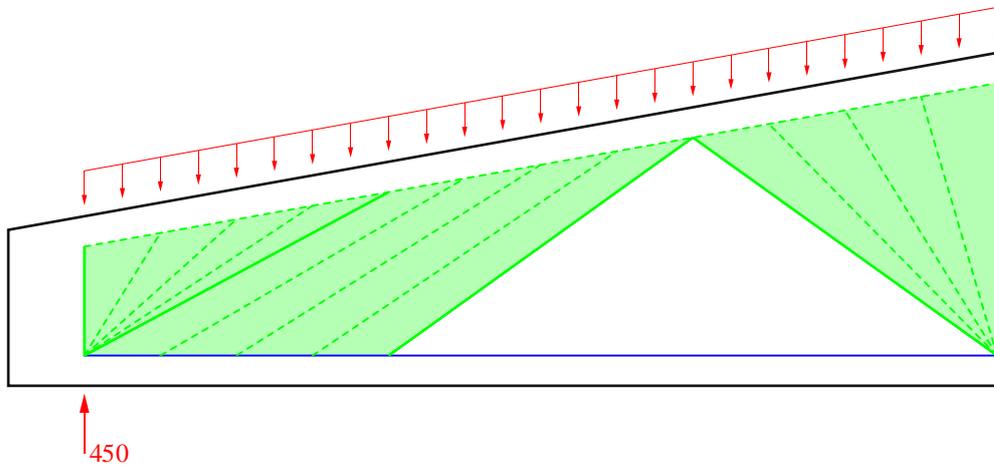
b) Spannungsfeld und Fachwerkmodell

mittlerer Teil des Fachwerkmodells



$$\begin{cases} D_v = B_v = C_v \\ D_h + C_h = 833 \rightarrow D_v \cdot \frac{500}{810} + C_v \cdot \frac{50}{9} = 833 \end{cases}$$

$\rightarrow D_v = B_v = C_v = 135 \text{ kN}$   
 $\rightarrow D_h = 83 \text{ kN}, \quad C_h = 750 \text{ kN}$



c) Bemessung der Bewehrung

**Biegetragsicherheit**

*Biegebewehrung*

$$A_s = \frac{T_d}{f_{sd}} = \frac{833}{435} = 1915 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad \text{Wahl: } 4 \text{ } \varnothing 26 \quad \rightarrow \quad A_s = 4 \cdot \frac{26^2 \cdot \pi}{4} = 2124 \text{ mm}^2$$

$$T_{Rd} = 2124 \cdot 435 = 924 \text{ kN} > T_d = 833 \text{ kN}$$

**Querkrafttragsicherheit**

*Mindestbewehrung*  $a_{sw, \min} = \rho_{\min} \cdot b_w = 0.2\% \cdot 160 = 320 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Wahl:  $\varnothing 8 @ 250 \text{ mm}, 2\text{-schnittig} \rightarrow a_{sw} = 402 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

*beim Auflager*  $a_{sw} = \frac{V_d}{z \cdot \cot(\alpha) \cdot f_{sd}} = \frac{210}{1 \cdot 435} = 483 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Wahl:  $\varnothing 8 @ 200 \text{ mm}, 2\text{-schnittig} \rightarrow a_{sw} = 503 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

*Bügelwiderstand*  $V_{Rd} = a_{sw} \cdot f_{sd} \cdot z \cdot \cot(\alpha) = 503 \cdot 435 \cdot 1 = 219 \text{ kN} > V_d = 210 \text{ kN}$

*Betondruckdiagonale (am flachsten geneigte Strebe im Parallelfeld)*

$$\sigma_c = \frac{V_d}{b_w \cdot z \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{210}{160 \cdot 540 \cdot \sin(28.4^\circ) \cdot \cos(28.4^\circ)} = 5.8 \text{ MPa} < k_c \cdot f_{cd} = 0.55 \cdot 20 = 11 \text{ MPa}$$

*Konzentrierte Aufhängebewehrung in Feldmitte*

$$A_{s, \text{erf}} = \frac{F_{w,d}}{f_{sd}} = \frac{2 \cdot 135}{435} = 621 \text{ mm}^2 \quad \rightarrow \quad \text{Wahl: } 4 \text{ } \varnothing 16 \quad \rightarrow \quad A_s = 4 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4} = 804 \text{ mm}^2$$

$$F_{w,Rd} = 804 \cdot 435 = 350 \text{ kN} > F_{w,d} = 270 \text{ kN}$$

d) Anordnung der Aussparung

Aussparung bei  $x = 2 \text{ m}$ , da dort der Steg unbeanspruch ist.

**Aufgabe 3**

a) Mindestbewehrung

mech. Bew.gehalt.  $\omega_{\min} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Riss}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 25.13 \cdot 10^{-3}}{0.176^2 \cdot 20}} = 0.0414$

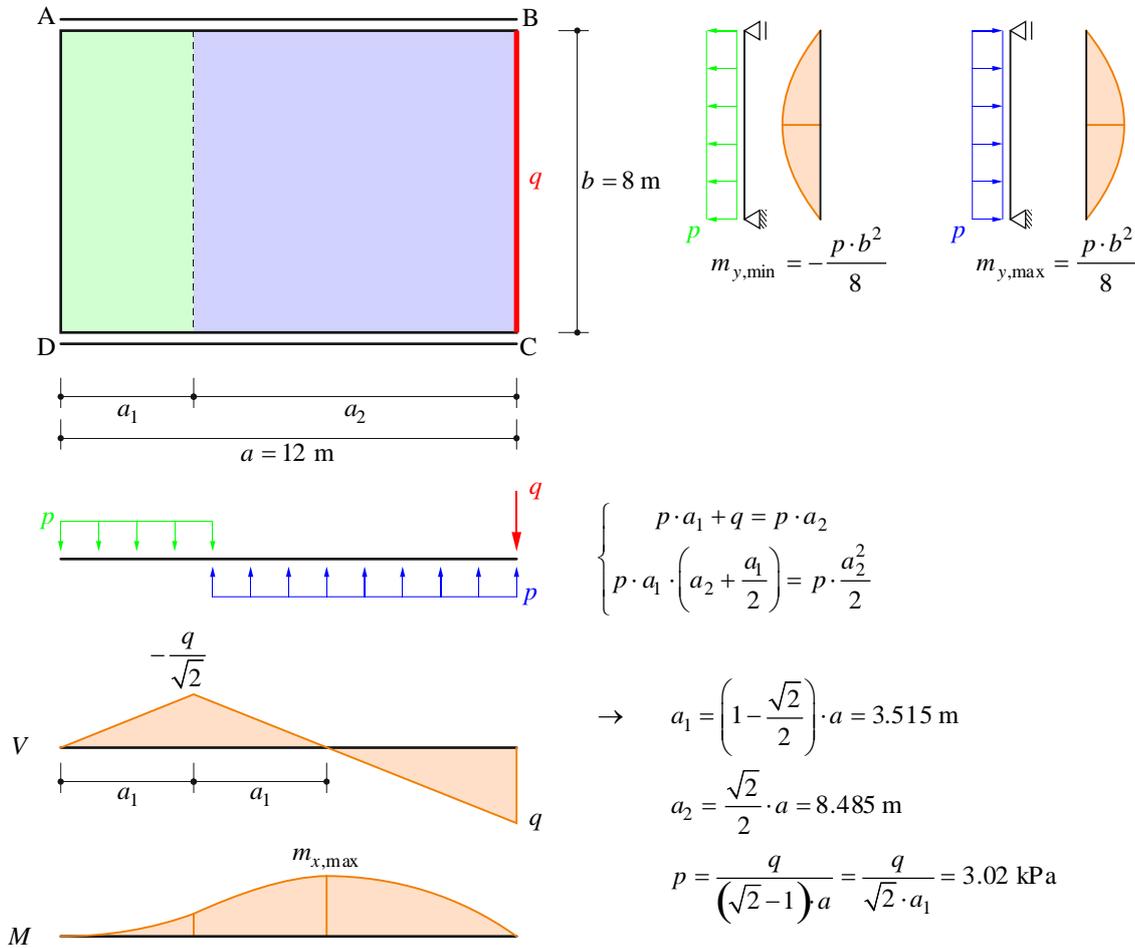
statische Höhe  $d = h - c_{nom} - \frac{\varnothing_s}{2} = 200 - 20 - \frac{8}{2} = 176 \text{ mm}$

Rissmoment  $M_{Riss} = \frac{I_{yc}}{z_{inf}} \cdot f_{ctd} = \frac{h^3 \cdot b}{12 \cdot \frac{h}{2}} \cdot 1.3 \cdot f_{ctm} = 25.13 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$  (Annahme:  $k_t = 1$ )

erforderliche Mind.bew.  $a_{s,\min} = \omega_{\min} \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{sd}} = 0.0414 \cdot 176 \cdot \frac{20}{435} = 335 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

→ Wahl:  $\varnothing 8 @ 150 \text{ mm}$  →  $a_{s,\min} = \frac{8^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 335 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

b) Streifenmethode



### Biegetragsicherheit

*Bewehrungsquerschnitt*  $a_s = \frac{10^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 524 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

*statische Höhe*  $d = 200 - 20 - 10 = 170 \text{ mm}$

*Biegewiderstand*  $m_{x,Rd} = m_{y,Rd} = m'_{x,Rd} = m'_{y,Rd} = m_{Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}} \right) = 37.4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

*Beanspr. in x-Richtung*  $m_{x,d} = -q \cdot (a_2 - a_1) + p \cdot \frac{(a_2 - a_1)^2}{2} = \frac{1 - \sqrt{2}}{2} \cdot a \cdot q = -37.3 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} > -m_{Rd} = -37.4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

*Beanspr. in y-Richtung*  $m_{y,d} = |m_{y,\min}| = \frac{p \cdot b^2}{8} = \frac{b^2}{8 \cdot a \cdot (\sqrt{2} - 1)} \cdot q = 24.1 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} < m_{Rd} = 37.4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

### Querkrafttragsicherheit

*Hauptquerkraft*  $v_0 = \sqrt{q^2 + \left( p \cdot \frac{b}{2} \right)^2} = \sqrt{15^2 + \left( 3 \cdot \frac{8}{2} \right)^2} = 19.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

*Hauptquerkraftfrichtung*  $\varphi = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \arctan\left(\frac{3 \cdot 4}{15}\right) = 38.7^\circ$

*Querkraftwiderstand*  $v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v = 0.49 \cdot 1.1 \cdot 170 = 92 \frac{\text{kN}}{\text{m}} > v_d = v_0 = 19.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

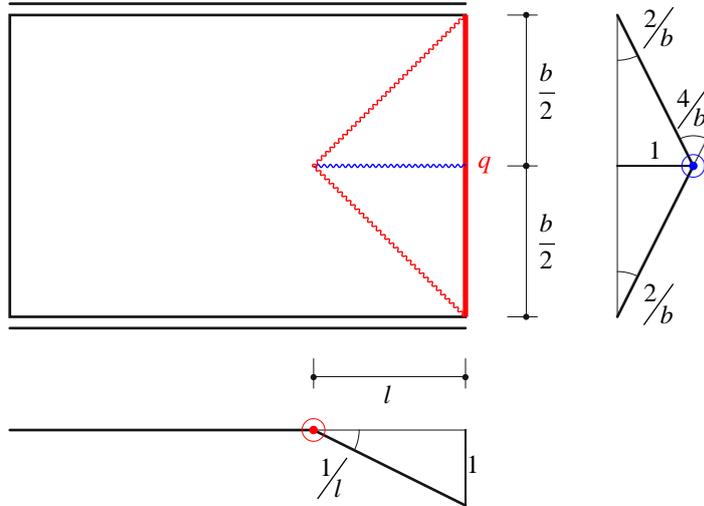
$$k_g = \frac{48}{16 + D_{\max}} = \frac{48}{16 + 16} = 1.5$$

$$\varepsilon_v = \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \frac{m_d}{m_{Rd}} \cdot \frac{1}{\sin^4(\varphi) + \cos^4(\varphi)} = 4.05\%$$

=1 (konservativ)

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g} = \frac{1}{1 + 4.05\% \cdot 170 \cdot 1.5} = 0.49$$

c) Fließgelenklinienmethode



Biegewiderstand  $m_{xu} = m_{yu} = m'_{xu} = m'_{yu} = m_u = 37.4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Arbeit der äusseren Kräfte

Dissipationsarbeit

$$W = \frac{1}{2} \cdot b \cdot l \cdot q = \frac{b \cdot q}{2}$$

$$D = m_{yu} \cdot \frac{4}{b} \cdot l + \left( m'_{yu} \cdot \frac{2}{b} \cdot l \right) \cdot 2 + \left( m'_{xu} \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{b}{2} \right) \cdot 2 = \left( \frac{b}{l} + \frac{8 \cdot l}{b} \right) \cdot m_u$$

Traglast

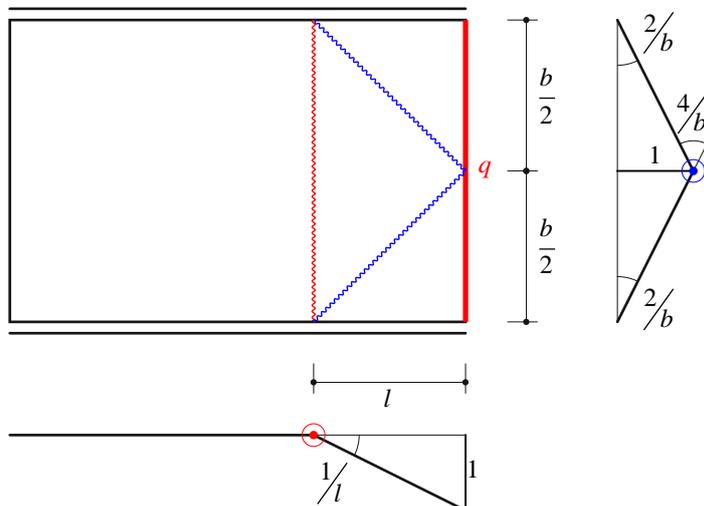
$$W = D \rightarrow q_u = \frac{2 \cdot (b^2 + 8 \cdot l^2)}{b^2 \cdot l} \cdot m_u$$

kritische Länge

$$l = 4 \text{ m} \rightarrow q_u = 56.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

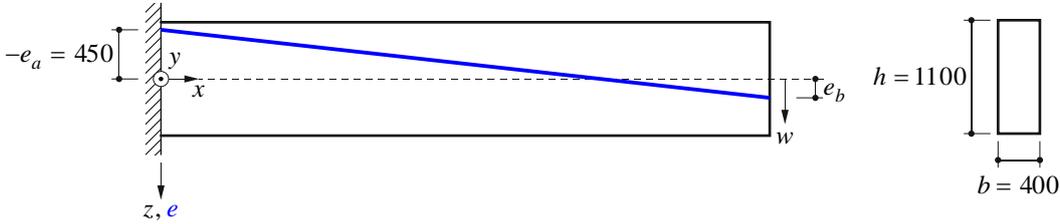
$$l = 3 \text{ m} \rightarrow q_u = 53.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} < 55 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

alternativer Mechanismus



**Aufgabe 4**

a) erforderliche Vorspannkraft

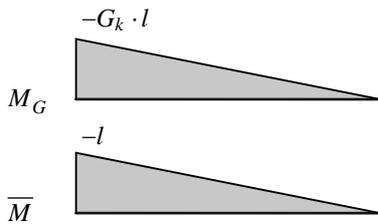


Querschnittswerte (reiner Beton-QS)

$$EI = E_{c,\infty} \cdot I_{yc} = \frac{E_c}{1+\varphi} \cdot \frac{h^3 \cdot b}{12} = \frac{33 \cdot 10^6}{1+2} \cdot \frac{1.1^3 \cdot 0.4}{12} = 4.88 \cdot 10^5 \text{ kNm}^2$$

$$k_{\text{sup}} = k_{\text{inf}} = \frac{h}{6} = 183 \text{ mm}$$

Durchbiegung am Balkenende infolge  $G_k$



$$w_G = \frac{1}{3} \cdot G_k \cdot l \cdot \frac{l}{EI} = \frac{1}{3} \cdot \frac{G_k \cdot l^3}{EI} \quad (= 118 \text{ mm})$$

Betrachtung als Eigenspannungszustand	Betrachtung als Anker- und Umlenkkräfte

<p>Durchbiegung am Balkenende infolge Vorspannung</p> $w_P = \frac{1}{6} \cdot (-l) \cdot (-2 \cdot P_h \cdot e_a - P_h \cdot e_b) \cdot \frac{l}{EI}$ $= -\frac{1}{6} \cdot \frac{l^2}{EI} \cdot P_\infty \cdot \cos(\beta) \cdot (-2 \cdot e_a - e_b)$ <p>erforderliche Vorspannkraft um Durchbiegung <math>w_G</math> zu kompensieren</p> $w_P + w_G = 0$ $\rightarrow P_\infty = \frac{2 \cdot G_k \cdot l}{\cos(\beta) \cdot (-2 \cdot e_a - e_b)}$	<p>Durchbiegung am Balkenende infolge vertikaler Komponente der Ankerkraft</p> $w_{P_v} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{l^3}{EI} \cdot P_\infty \cdot \sin(\beta)$ <p>Durchbiegung am Balkenende infolge horizontaler Komponente der Ankerkraft</p> $w_{P_h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{l^2}{EI} \cdot P_\infty \cdot \cos(\beta) \cdot e_b$ <p>erforderliche Vorspannkraft um Durchbiegung <math>w_G</math> zu kompensieren</p> $w_{P_v} + w_{P_h} + w_G = 0$ $\rightarrow P_\infty = \frac{G_k \cdot l}{l \cdot \sin(\beta) - \frac{3}{2} \cdot \cos(\beta) \cdot e_b}$
--	---

$$l \cdot \tan(\beta) = e_b - e_a$$

→ beide Ausdrücke identisch!

Variante i  $e_b = 0$   $\beta = \arctan\left(\frac{e_b - e_a}{l}\right) = 2.12^\circ$

$$\rightarrow P_{\infty,i} = 2698 \text{ kN} = 1.2 \cdot P_{\infty,iii}$$

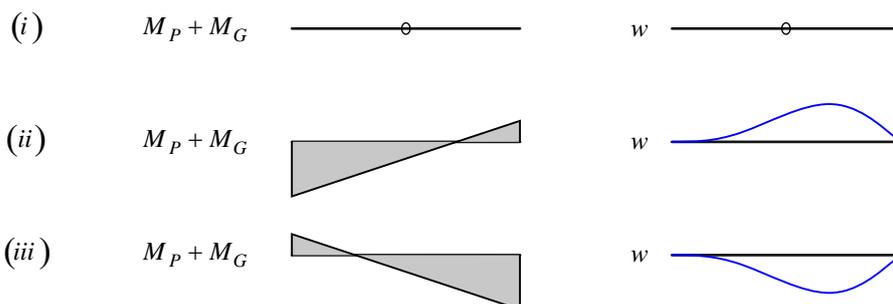
Variante ii  $e_b = k_{\text{inf}} = 183 \text{ mm}$   $\beta = \arctan\left(\frac{e_b - e_a}{l}\right) = 3.0^\circ$

$$\rightarrow P_{\infty,i} = 3401 \text{ kN} = 1.5 \cdot P_{\infty,iii}$$

Variante iii  $e_b = -k_{\text{sup}} = -183 \text{ mm}$   $\beta = \arctan\left(\frac{e_b - e_a}{l}\right) = 1.25^\circ$

$$\rightarrow P_{\infty,i} = 2237 \text{ kN} \rightarrow \text{effizienteste Lösung!}$$

## b) Biegelinie



c) Zwangsschnittgrößen

statisch bestimmtes System  $\rightarrow M_{ps}(x) = V_{ps}(x) = N_{ps}(x) = 0$

d) Spannungsnachweis

Vorspannkraft  $A_p = 16 \cdot 150 = 2400 \text{ mm}^2$

$$P_\infty = 0.85 \cdot P_0 = 0.85 \cdot 0.7 \cdot f_{pk} \cdot A_p = 2656 \text{ kN}$$

Schnittgrößen  $M_k = -G_k \cdot l - \frac{g_{0k} \cdot l^2}{2} = -1992 \text{ kNm}$

Spannungen am oberen Rand

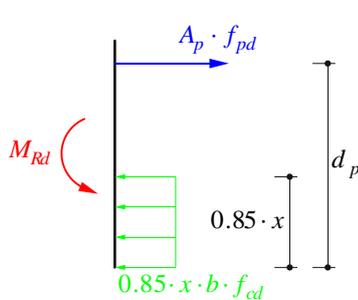
$$\sigma_{\text{sup},\infty} = \frac{-P_\infty}{A_c} + \frac{M_k - P_\infty \cdot e_a}{I_{yc}} \cdot z_{\text{sup}} = \frac{-2656 \cdot 10^3}{1100 \cdot 400} + \frac{-1992 \cdot 10^6 - 2656 \cdot 10^3 \cdot -445}{4.437 \cdot 10^{10}} \cdot -550 = 4 \text{ MPa} > f_{ctm} = 2.9 \text{ MPa}$$

$\rightarrow$  gerissen!

e) Tragsicherheit

**Biegetragsicherheit**

massgeb. Moment  $M_d = \gamma_G \cdot M_k = 1.35 \cdot 1992 = -2689 \text{ kNm}$



Kontrolle ohne schlaffe Bewehrung:

statische Höhe  $d_p = \frac{h}{2} + |e_a| = 995 \text{ mm}$

Betondruckzonenhöhe

$$x = \frac{A_p \cdot f_{pd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2400 \cdot 1390}{400 \cdot 20} = 491 \text{ mm} < 0.5 \cdot d = 498 \text{ mm}$$

( $\frac{x}{d} < 0.35$  nicht erfüllt, es werden jedoch auch keine Schnittgrößen umgelagert, daher  $\frac{x}{d} < 0.5$  auch in Ordnung)

Biege widerstand  $M_{Rd} = A_p \cdot f_{pd} \cdot \left( d_p - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) = 2624 \text{ kNm} \approx M_d = 2689 \text{ kNm}$

Der Nachweis ist knapp nicht erfüllt. Mit Berücksichtigung der schlaffen konstruktiven Bewehrung, (welche zum Einlegen der Bügel erforderlich ist,) wäre der Nachweis erfüllt.

**Querkrafttragsicherheit**

*massgeb. Querkraft*  $V_d = \gamma_G \cdot [G_k + g_k \cdot (l - z \cdot \cot(\alpha))] = 302 \text{ kN}$

*erforderliche Bewehrung*  $a_{sw,erf} = \frac{V_d - P_\infty \cdot \sin(\beta)}{z \cdot \cot(\alpha) \cdot f_{sd}} = \frac{301.5 - 2656 \cdot \sin(2.12^\circ)}{0.787 \cdot 1 \cdot 435} = 594 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

$$\rho_s = 0.15\% < \rho_{\min} = 0.2\%$$

*Mindestbewehrung*  $a_{sw,erf} = \rho_{\min} \cdot b_w = 0.2\% \cdot 400 = 800 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Wahl:  $\emptyset 12 @ 250 \text{ mm}, 2\text{-schnittig} \rightarrow a_{sw} = 2 \cdot \frac{12^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.25} = 905 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

*Bügelwiderstand*  $V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot f_{sd} \cdot z \cdot \cot(\alpha) + P_\infty \cdot \sin(\beta) = 408 \text{ kN} > V_d = 302 \text{ kN}.$

*Betondruck*  $V_{Rd,c} = b_w \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot z \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + P_\infty \cdot \sin(\beta) = 1834 \text{ kN} > V_d = 302 \text{ kN}$