

## Stahlbeton I+II – Sessionsprüfung

(101-0126-01J)

# Beispiel-Prüfung 2

**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. Für jede Aufgabe soll ein separater Papierbogen A3 verwendet werden.
3. Notizen auf der Aufgabenstellung werden nicht bewertet.
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, Zirkel und Lineal.

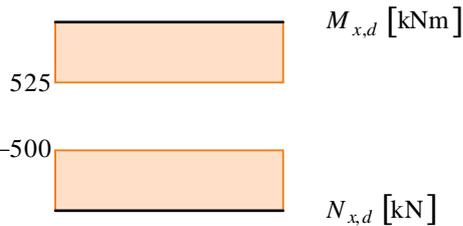
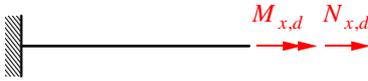
### Hilftabellen

$\emptyset$ [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

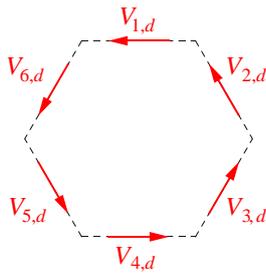
## Aufgabe 1

### a) Scheibenkräfte

Statisches System und Einwirkung



Umlauf torsion



$$A_0 = 2 \cdot z_i \cdot z_i \cdot \cos(30^\circ) + 2 \cdot z_i \cdot \sin(30^\circ) \cdot \cos(30^\circ) = 415'692 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow V_i = \frac{525}{2 \cdot 415'692} \cdot 400 = 252.6 \text{ kN}$$

$$\tau_d = \frac{V_i}{t_i \cdot z_i} = 4.51 \text{ MPa}$$

$$V_i = \frac{T}{2 \cdot A_0} \cdot z_i$$

$$v_d = \frac{V_i}{z_i} = 631.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

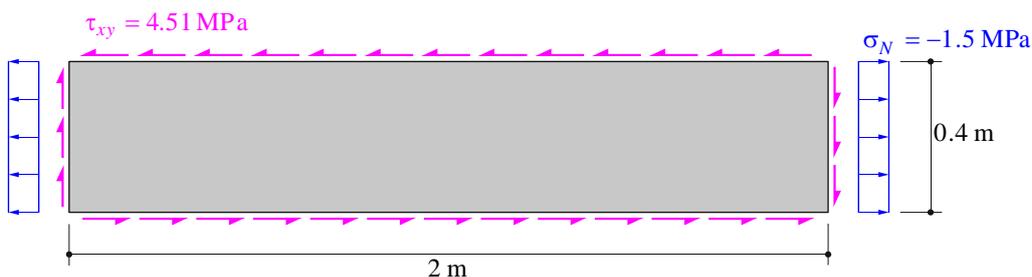
Normalkraftbewehrung (Druck)

$$N_{x,d} = -500 \text{ kN}$$

$$\rightarrow \sigma_N = \frac{N_{x,d}}{A_c} = -\frac{500}{6 \cdot 140 \cdot 400} = -1.5 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow n_x = \sigma_N \cdot t_i = -1.5 \cdot 140 = -208.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Schub- und Normalspannungen



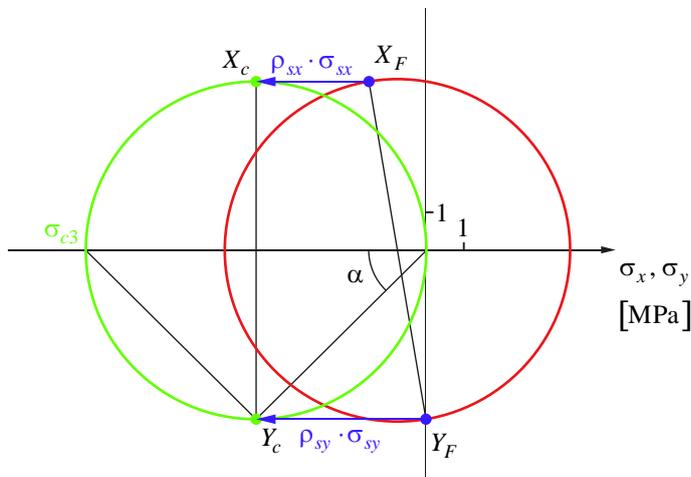
## b) Bemessung im Regime 1

$$\begin{aligned} \text{Zustand II, Regime 1:} \quad \rho_x \cdot f_s &\geq \sigma_x + k \cdot |\tau_{xy}| \\ \rho_y \cdot f_s &\geq \sigma_y + \frac{1}{k} \cdot |\tau_{xy}| \end{aligned}$$

$$\text{wobei } k = \cot(\alpha) \quad \text{Wahl: } \alpha = 45^\circ \rightarrow k = \frac{1}{k} = 1$$

### Beanspruchung

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= 4.51 \text{ MPa}, \quad \sigma_x = -1.5 \text{ MPa}, \quad \sigma_y = 0 \\ n_{xy} = n_{yx} &= 631.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}, \quad n_x = -208.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}, \quad n_y = 0 \end{aligned}$$



### Bemessung der Bewehrung → Fließbedingungen

$$\rho_x \cdot f_{sd} \geq \sigma_x + k \cdot |\tau_{xy}| = -1.5 + 4.51 = 2.99 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad \rho_{x,erf} = 0.69\%$$

$$a_{sx,erf} = \rho_{x,erf} \cdot t_i = 0.69\% \cdot 140 = 962 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Wahl: } 2 \times \emptyset 10 @ 150 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad a_{sx} = 2 \cdot \frac{10^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 1047 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad \rho_x = \frac{1047}{140 \cdot 1000} = 0.75\%$$

$$\rho_y \cdot f_{sd} \geq \sigma_y + \frac{1}{k} \cdot |\tau_{yx}| = 0 + 4.51 = 4.51 \text{ MPa} \quad \rightarrow \quad \rho_{y,erf} = 1.04\%$$

$$a_{sy,erf} = \rho_{y,erf} \cdot t_i = 1.04\% \cdot 140 = 1452 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Wahl: } 2 \times \emptyset 12 @ 150 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad a_{sy} = 2 \cdot \frac{12^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 1508 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \quad \rho_y = \frac{1508}{140 \cdot 1000} = 1.08\%$$

*Nachweis Bewehrung*

$$\rho_x \cdot f_{sd} = 0.75\% \cdot 435 = 3.25 \text{ MPa} > \sigma_x + k \cdot |\tau_{xy}| = 2.99 \text{ MPa}$$

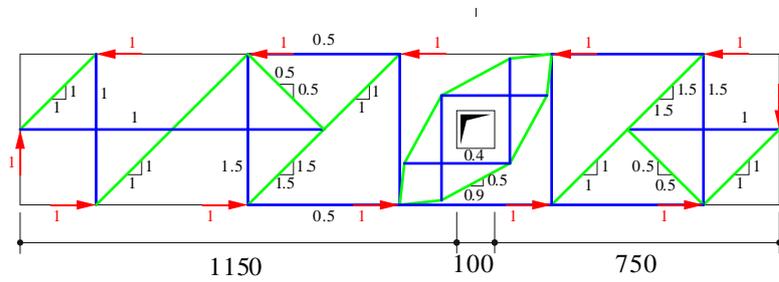
$$\rho_y \cdot f_{sd} = 1.08\% \cdot 435 = 4.69 \text{ MPa} > \sigma_y + \frac{1}{k} \cdot |\tau_{xy}| = 4.51 \text{ MPa}$$

*Nachweis Beton*

$$\sigma_{c3} \leq k_c \cdot f_{cd}$$

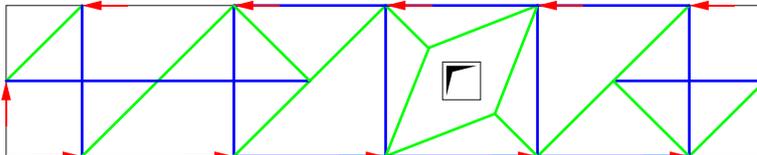
$$\rightarrow 2 \cdot \tau_{xy} = 9.02 \text{ MPa} < 0.55 \cdot 20 = 11 \text{ MPa}$$

c) Fachwerkmodell



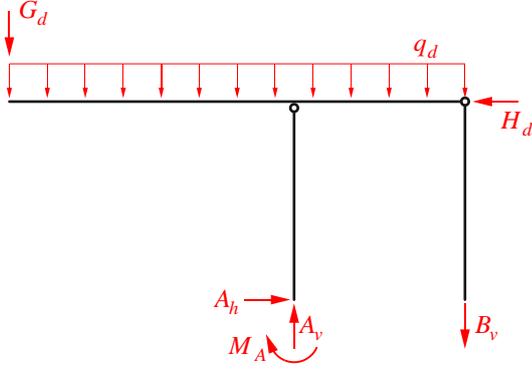
[  $V_d$  ]

*alternative Lösung*



**Aufgabe 2**

a) Schnittgrößen



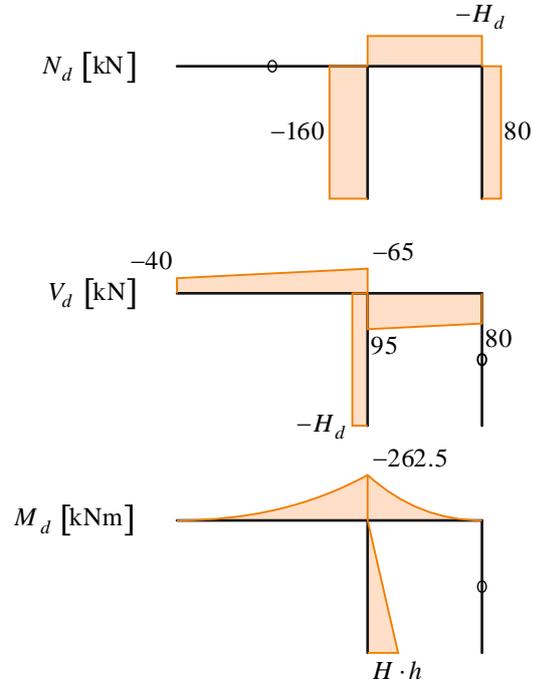
$$A_H = H_d$$

$$M_A = A_H \cdot h = H_d \cdot h$$

$$M_A + B_v \cdot a - H_d \cdot h - q_d \cdot l \cdot \left(\frac{l}{2} - a\right) - G_d \cdot (l - a) = 0$$

$$\rightarrow B_v = q_d \cdot l \cdot \left(\frac{l}{2 \cdot a} - 1\right) + G_d \cdot \frac{l - a}{a} = 80 \text{ kN}$$

$$A_v = B_v + q_d \cdot l + G_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{a} \cdot (2 \cdot G_d + q_d \cdot l) = 160 \text{ kN}$$



b) Rissabschätzung mit Zuggurtmodell

Bewehrungsgehalt  $\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{4 \cdot \frac{10^2 \cdot \pi}{4}}{150 \cdot 150} = 1.4\%$

Wertigkeit  $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{205}{33} = 6.2$

Stahlspannung im Riss  $\sigma_{sr} = \frac{B_v}{A_s} = 254.6 \text{ MPa}$

Stahlspannung im Riss bei Risslast  $\sigma_{sr0} = f_{ctm} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - 1 + n\right) = 222.8 \text{ MPa}$

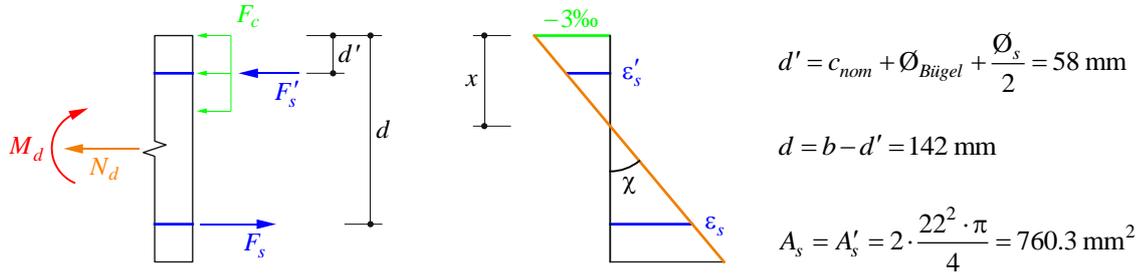
max. Rissabstand  $s_{r0} = \frac{\emptyset_s}{4} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - 1\right) = 177.6 \text{ mm}$

Rissabstände zwischen  $88.3 \text{ mm} \leq s_r \leq 176.6 \text{ mm}$

Rissbreiten  $\frac{s_{r0}}{2 \cdot E_s} \cdot \left(\sigma_{sr} - \frac{\sigma_{sr0}}{4}\right) \leq w_r \leq \frac{s_{r0}}{E_s} \cdot \left(\sigma_{sr} - \frac{\sigma_{sr0}}{2}\right)$

$0.086 \text{ mm} \leq w_r \leq 0.123 \text{ mm}$

c) Biege widerstand  $M_{Rd}$  bei  $N_d = -160$  kN



$$d' = c_{nom} + \varnothing_{Bügel} + \frac{\varnothing_s}{2} = 58 \text{ mm}$$

$$d = b - d' = 142 \text{ mm}$$

$$A_s = A'_s = 2 \cdot \frac{22^2 \cdot \pi}{4} = 760.3 \text{ mm}^2$$

Krümmung  $\chi = \frac{3\text{‰}}{x} \quad \left( = 34 \frac{\text{mrad}}{\text{m}} \right)$

untere Bewehrung  $\varepsilon_s = (d - x) \cdot \chi \quad \rightarrow \quad F_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s \quad (= 285 \text{ kN})$

obere Bewehrung  $\varepsilon'_s = -(x - d') \cdot \chi \quad \rightarrow \quad F'_s = (|\varepsilon'_s| \cdot E_s - f_{cd}) \cdot A'_s \quad (= 145 \text{ kN})$

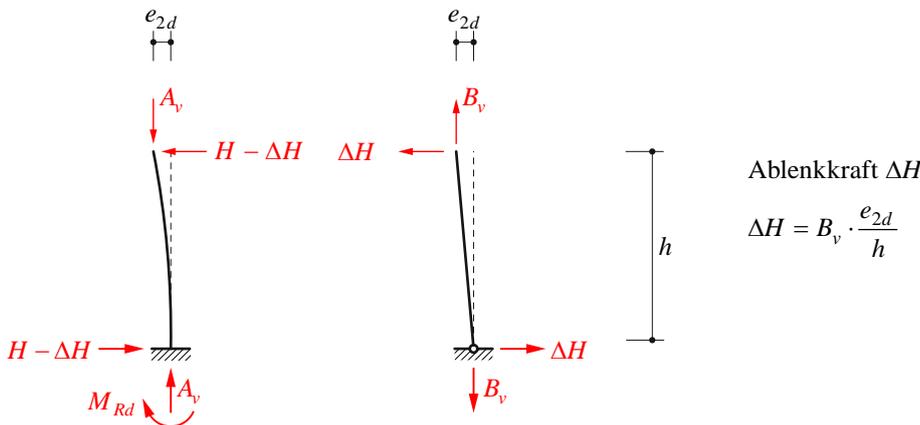
Betondruck  $c = 0.85 \cdot x \quad \rightarrow \quad F_c = b \cdot c \cdot f_{cd} \quad (= 300 \text{ kN})$

horizontales Kräftegleichgewicht  $\sum H = 0: \quad F_s - F'_s - F_c = N_d$

Betondruckzonenhöhe  $\rightarrow \quad x = 88.23 \text{ mm}$

Momentengleichgewicht  $\sum M = 0: \quad M_{Rd} = (F_s + F'_s) \cdot \frac{d - d'}{2} + F_c \cdot \left( \frac{b}{2} - \frac{c}{2} \right) = 36.8 \text{ kNm}$

d) Maximal zulässige Horizontalkraft



Verf. 2. Ordnung  $e_{2d} = \chi_d \cdot \frac{l_{cr}^2}{c} = 34 \cdot \frac{(2 \cdot 3500)^2}{\pi^2} = 168.8 \text{ mm}$

totales Moment  $M_d = H \cdot h + A_v \cdot e_{2d} - \Delta H \cdot h = H \cdot h + A_v \cdot e_{2d} - B_v \cdot e_{2d} = \underbrace{H \cdot h}_{\text{Mom. 1. Ordnung}} + \underbrace{(A_v - B_v) \cdot e_{2d}}_{\text{Effekte 2. Ordnung}}$

zulässige Horizontalkraft  $H_{\max}: \quad M_d = M_{Rd,y} \quad \rightarrow \quad H \cdot h + (A_v - B_v) \cdot e_{2d} = M_{Rd,y}$

$$\rightarrow \quad H_{\max} = \frac{M_{Rd,y} - (A_v - B_v) \cdot e_{2d}}{h} = \frac{36.8 \cdot 10^3 - (160 - 80) \cdot 168.8}{3500} = 6.66 \text{ kN}$$

## Aufgabe 3

### a) Mindestbewehrung

statische Höhe  $d \approx h - c_{nom} - \varnothing_s = 295 \text{ mm}$   
Ann.  $\varnothing 10$

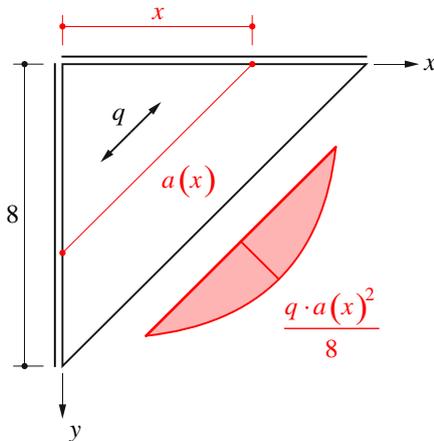
mech. Bew.gehalt  $\omega_{min} = 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 \cdot 1.3 \cdot f_{ctm}}{3 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{320^2 \cdot 1.3 \cdot 2.9}{3 \cdot 1000 \cdot 295^2 \cdot 20}} = 0.038$

Mindestbewehrung  $a_{s,min} = \omega_{min} \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{sd}} = 0.038 \cdot 1000 \cdot 295 \cdot \frac{20}{435} = 511 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Wahl:  $\varnothing 10 @ 150 \text{ mm} \rightarrow a_s = \frac{10^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 524 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Biege widerstand  $m_{Rd,min} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}} \right) = 524 \cdot 435 \cdot \left( 295 - \frac{524 \cdot 435}{2 \cdot 1000 \cdot 20} \right) = 65.9 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

### b) Streifenmethode



$$a(x) = x \cdot \sqrt{2}$$

$$m_{d,max}(x) = \frac{q_d \cdot x^2}{4}$$

$$q_d = \gamma_G \cdot h \cdot \gamma_c + \gamma_G \cdot q_k = 1.35 \cdot 0.32 \cdot 25 + 1.5 \cdot 3 = 15.3 \text{ kPa}$$

Mindestbewehrung reicht bis:  $m_{Rd,min} = \frac{q_d \cdot x^2}{4} \rightarrow x = 4.15 \text{ m} \quad m_{Rd,min} = 65.9 \text{ kN} \geq m_{d,max} = 65.9 \text{ kN}$

### Bemessung der Bewehrung mit Abstufung

bei  $x = 8 \text{ m}$ :  $m_d(x = 8 \text{ m}) = \frac{15.3 \cdot 8^2}{4} = 244.8 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

### erforderliche Bewehrung

$$a_{s,erf} = b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{sd}} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right) = 1000 \cdot 290 \cdot \frac{20}{435} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 244.8 \cdot 10^6}{1000 \cdot 290^2 \cdot 20}} \right) = 2107 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Wahl:  $\varnothing 20 @ 150 \text{ mm} \rightarrow a_s = \frac{20^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 2094 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Betondruckzonenhöhe  $x = \frac{a_s \cdot f_{sd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2094 \cdot 435}{0.85 \cdot 1000 \cdot 20} = 53.6 \text{ mm} < 0.35 \cdot d = 101.5 \text{ mm}$

Biege­widerstand  $m_{Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) = 2094 \cdot 435 \cdot \left( 290 - \frac{0.85 \cdot 53.6}{2} \right) = 243.4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} \approx m_d = 244.8 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Abstufung bei  $x = 6 \text{ m}$ :  $m_d(x = 6 \text{ m}) = \frac{15.3 \cdot 6^2}{4} = 137.7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

erforderliche Bewehrung

$$a_{s, \text{erf}} = b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{sd}} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right) = 1000 \cdot 292 \cdot \frac{20}{435} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 137.7 \cdot 10^6}{1000 \cdot 292^2 \cdot 20}} \right) = 1132 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Wahl:  $\text{Ø}16 @ 150 \text{ mm} \rightarrow a_s = \frac{16^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 1340 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Biege­widerstand  $m_{Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}} \right) = 1340 \cdot 435 \cdot \left( 292 - \frac{1340 \cdot 435}{2 \cdot 1000 \cdot 20} \right) = 161.7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} > m_d = 137.7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Querkraft­tragsicherheit für  $x = 8 \text{ m}$ :

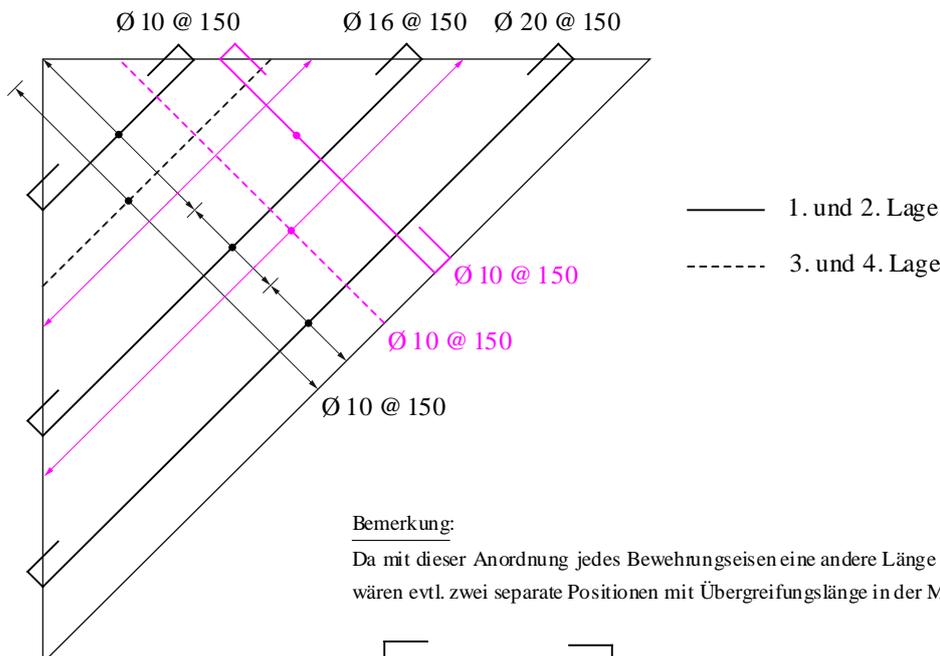
massgebende Querkraft  $v_d(x = 8 \text{ m}) = \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot x \cdot \sqrt{2} = \frac{1}{2} \cdot 15.3 \cdot 8 \cdot \sqrt{2} = 86.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Querkraft­widerstand  $v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v = 0.420 \cdot 1.1 \cdot 290 = 134 \frac{\text{kN}}{\text{m}} > 86.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

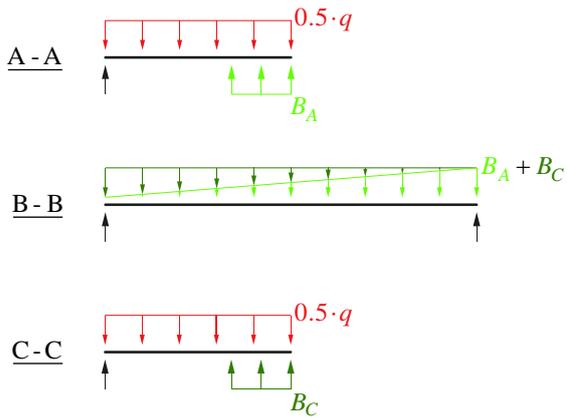
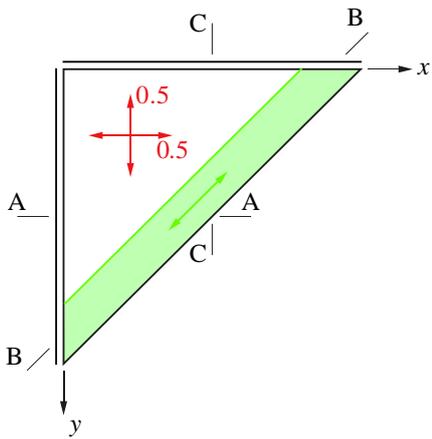
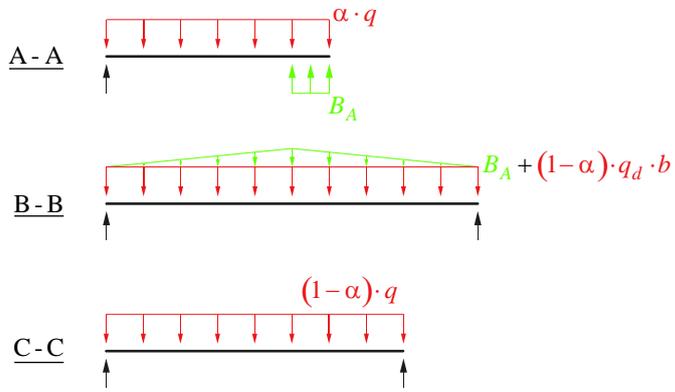
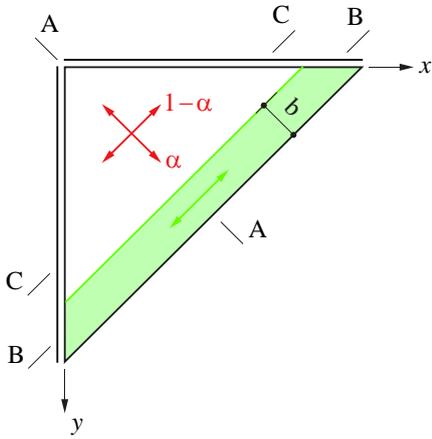
$$k_g = \frac{48}{16 + D_{\text{max}}} = \frac{48}{16 + 16} = 1.5$$

$$\epsilon_v = 1.5 \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} = 3.18\text{‰}$$

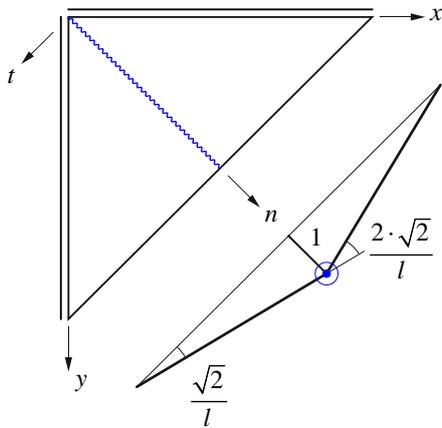
$$k_d = \frac{1}{1 + \epsilon_v \cdot d \cdot k_g} = \frac{1}{1 + 3.18\text{‰} \cdot 290 \cdot 1.5} = 0.420$$



c) alternative Lastabtragung



d) Traglast



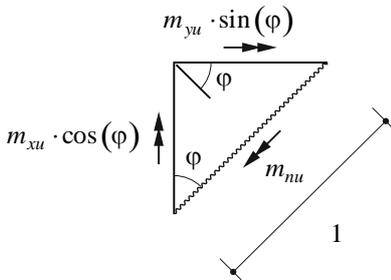
Statische Höhe

$$d = 0.5 \cdot (d_x + d_y) = h - c_{nom} - \varnothing_s = 320 - 20 - 12 = 288 \text{ mm}$$

Bewehrungsquerschnitt

$$a_s = \frac{12^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.15} = 754 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Biegewiderstand  $m_u = m_{x,Rd} = m_{y,Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}} \right) = 754 \cdot 435 \cdot \left( 288 - \frac{754 \cdot 435}{2 \cdot 1000 \cdot 20} \right) = 91.8 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$



Transformation in n-Richtung

$$m_{nu} = m_{x,Rd} \cdot \cos^2(\varphi) + m_{y,Rd} \cdot \sin^2(\varphi) = m_u$$

Äussere Arbeit

$$W = \frac{1}{2} \cdot l^2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} \cdot q = \frac{q \cdot l^2}{6}$$

Dissipationsarbeit

$$D = m_u \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{l} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot l}{2} = 2 \cdot m_u$$

Traglast

$$q_u = \frac{12 \cdot m_u}{l^2} = \frac{12 \cdot 91.8}{8^2} = 17.2 \text{ kPa}$$

**Aufgabe 4**

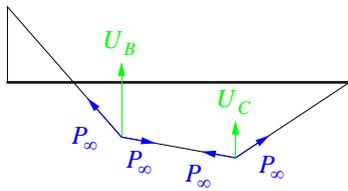
a) Spannliedgeometrie, so dass  $P_0$  minimal wird und keine vertikale Deformationen entstehen

Exzentrizität bei Einspannung  $e_a = -e_{\max} = -565 \text{ mm}$

Exzentrizität bei freiem Ende  $e_d = 0$  (damit kein Moment bzw. Verformungen infolge Ankerkraft)

Exzentrizität bei B  $e_b = e_{\max} = 565 \text{ mm}$  (so dass ganze Trägerhöhe ausgenützt ist  $\rightarrow P_0$  minimal)

Exzentrizität  $e_c$  ist so gewählt, dass die Umlenkkräfte die ständig wirkenden Anteile der Einzellasten kompensieren:



Umlenkkräfte in B und C

$$U_b = P_\infty \cdot \left( \frac{e_b - e_a}{l/3} - \frac{e_c - e_b}{l/3} \right) \quad U_c = P_\infty \cdot \left( \frac{e_c - e_b}{l/3} + \frac{e_c - e_d}{l/3} \right)$$

Kompensation der Einzelkräfte in B & C

$$U_b = 2 \cdot U_c \quad \rightarrow \quad e_c = \frac{4 \cdot e_b + 2 \cdot e_d - e_a}{5} = e_{\max}$$

Erforderliche Vorspannkraft bei  $t \rightarrow \infty$

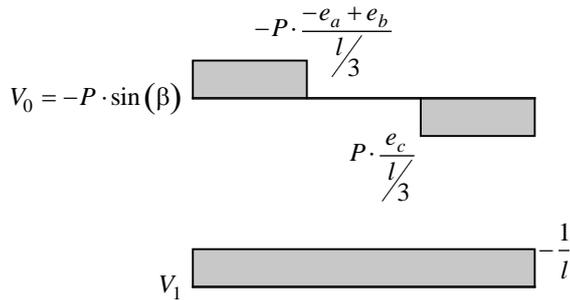
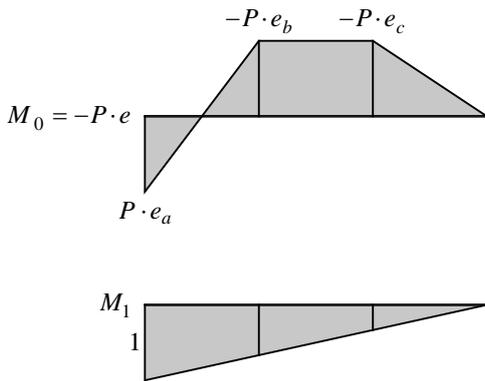
$$U_b = G_k \quad \rightarrow \quad P_\infty = \frac{G_k \cdot l}{6 \cdot e_{\max}} = 796.6 \text{ kN}$$

Erforderliche Vorspannkraft bei  $t = 0$

$$P_0 = \frac{P_\infty}{0.85} = 937 \text{ kN}$$

b) Zwängungen

Kraftmethode: Grundsystem und überzählige Grösse



$$\delta_{10} = \int M_1 \cdot \frac{M_0}{EI} \cdot dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{6} \cdot \left[ 1 \cdot (-2 \cdot P \cdot e_a - P \cdot e_b) + \frac{2}{3} \cdot (-P \cdot e_a - 2 \cdot P \cdot e_b) \right] \\ + \frac{1}{6} \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot (-2 \cdot P \cdot e_b - P \cdot e_c) + \frac{1}{3} \cdot (-P \cdot e_b - 2 \cdot P \cdot e_c) \right] \\ + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{3} \cdot (-2 \cdot P \cdot e_c - P \cdot e_d) \end{array} \right\} \cdot \frac{l}{3} \cdot \frac{1}{EI}$$

Verformung am Grundsystem  $\delta_{10} = \frac{P \cdot l (8 \cdot e_a + 12 \cdot e_b + 6 \cdot e_c + e_d)}{54 \cdot EI}$

Verformung infolge überzähliger Grösse  $\delta_{11} = \int M_1 \cdot \frac{M_1}{EI} \cdot dx = \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{l}{EI} = \frac{l}{3 \cdot EI}$

Zwangsmoment  $X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = P \cdot \frac{8 \cdot e_a + 12 \cdot e_b + 6 \cdot e_c + e_d}{18} \rightarrow X_1 = P \cdot \frac{5 \cdot e_{\max}}{9} = 250 \text{ kNm}$



### c) Spannungsnachweis

Querschnittsfläche  $A_p = 7 \cdot 150 = 1050 \text{ mm}^2$

Vorspannkraft  $P_\infty = 0.85 \cdot 0.7 \cdot f_{pk} \cdot A_p = 0.85 \cdot 0.7 \cdot 1860 \cdot 1050 = 1162 \text{ kN}$

Moment aus äusseren Lasten  $M_k = -\frac{7}{27} \cdot (G_k + Q_k) \cdot l - \frac{1}{8} \cdot g_{0k} \cdot l^2 = -1798 \text{ kNm}$

Zwangsmoment  $M_{Zwang} = 250 \text{ kNm}$

Moment aus Vorspannung  $-P_\infty \cdot e_a = -1162 \cdot 0.565 = 656.6 \text{ kNm}$

Flächenträgheitsmoment  $I_{yc} = \frac{1300^3 \cdot 350}{12} = 6.408 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$   $z_{\text{sup}} = -\frac{h}{2} = -650 \text{ mm}$

Spannung am oberen QS-Rand  $\sigma_{c,\text{sup},\infty} = -\frac{P_\infty}{A_c} + \frac{M_k + M_{Zwang} - P_\infty \cdot e_a}{I_{yc}} \cdot z_{\text{sup}} = 6.49 \text{ MPa}$

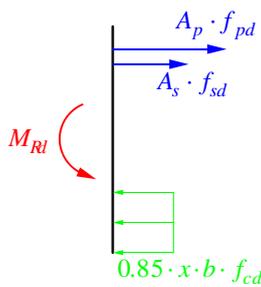
$\sigma_{c,\text{sup},\infty} > f_{cm} = 2.9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Risse !}$

d) Tragsicherheit

**Biegetragsicherheit**

massgebendes Moment  $M_d = -\frac{7}{27} \cdot (\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k) \cdot l - \frac{1}{8} \cdot \gamma_G \cdot g_{0k} \cdot l^2 = -2544 \text{ kNm}$

$M_{Zwang} = 250 \text{ kNm}$



$A_s = 4 \cdot \frac{26^2 \cdot \pi}{4} = 2124 \text{ mm}^2$

$d_s = h - c_{nom} - \varnothing_{Bügel} - \varnothing_s - \frac{34}{2} = 1210 \text{ mm}$

$d_p = \frac{h}{2} + 565 \text{ mm} = 1215 \text{ mm}$

Betondruckzonenhöhe  $x = \frac{A_s \cdot f_{sd} + A_p \cdot f_{pd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2124 \cdot 435 + 1050 \cdot 1390}{0.85 \cdot 350 \cdot 20} = 400.6 \text{ mm} < 0.35 \cdot d = 423.5 \text{ mm}$

**Biege­widerstand**

$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d_s - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) + A_p \cdot f_{pd} \cdot \left( d_p - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) = 2485 \text{ kNm} > |M_d + M_{Zwang}| = 2294 \text{ kNm}$

**Querkraft­tragsicherheit**

innerer Hebelarm  $z = \frac{A_s \cdot f_{sd} \cdot d_s + A_p \cdot f_{pd} \cdot d_p}{A_s \cdot f_{sd} + A_p \cdot f_{pd}} - \frac{0.85 \cdot x}{2} = 1043 \text{ mm}$

massgebende Querkraft  $V_d = \frac{59}{54} \cdot (\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k) + \frac{5}{8} \cdot \gamma_G \cdot g_{0k} \cdot l = 737 \text{ kN}$

$(-q_d \cdot z \cdot \cot(\alpha))$  vernachlässigt

$V_{Zwang} = -20 \text{ kN}$

**Bügel­querschnitt**

$a_{sw} = 2 \cdot \frac{12^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.2} = 1131 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

**Bügel­widerstand**

$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot f_{sd} \cdot z \cdot \cot(\alpha) + P_\infty \cdot \sin(\beta_p) = 774.4 \text{ kN}$

**Betondruck**

$V_{Rd,c} = b \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot z \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + P_\infty \cdot \sin(\beta_p) = 2269 \text{ kN}$

**Querkraft­nachweis**

$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s}; V_{Rd,c}\} = 774.4 \text{ kN} > V_d + V_{Zwang} = 717 \text{ kN}$