ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Prof. Dr. Walter Kaufmann
Institut für Baustatik und Konstruktion
D-BAUG, Studiengang Bauingenieurwissenschaften
Beispiel-Prüfung

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.

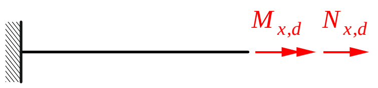
Hilfstabellen

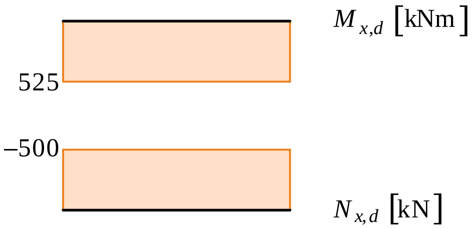
Ø [mm]		**8**	**10**	**12**	**14**	**16**	**18**	**20**	**22**	**26**	**30**
A_s [mm²]		50	79	113	154	201	254	314	380	531	707
a_s [mm²/m]	s = 100 mm	503	785	1130	1540	2010	2544	3141	3801	5309	7069
	s = 125 mm	402	628	904	1232	1608	2036	2513	3041	4247	5655
	s = 150 mm	335	523	753	1027	1340	1696	2094	2534	3539	4712
	s = 200 mm	251	393	565	770	1005	1272	1571	1901	2655	3534

Aufgabe 1

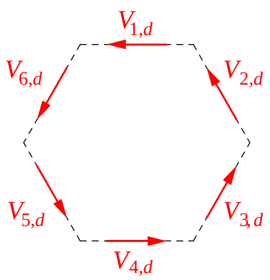
a) <u>Scheibenkräfte</u>

Statisches System und Einwirkung





Umlauftorsion



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

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

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

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

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

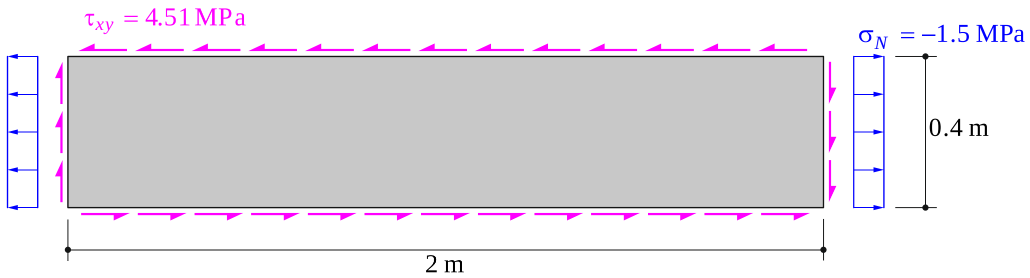
Normalkraftbewehrung (Druck)

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

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

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

Schub- und Normalspannungen



b) Bemessung im Regime 1

Zustand II, Regime 1: $\rho_x \cdot f_s \geq \sigma_x + k \cdot |\tau_{xy}|$

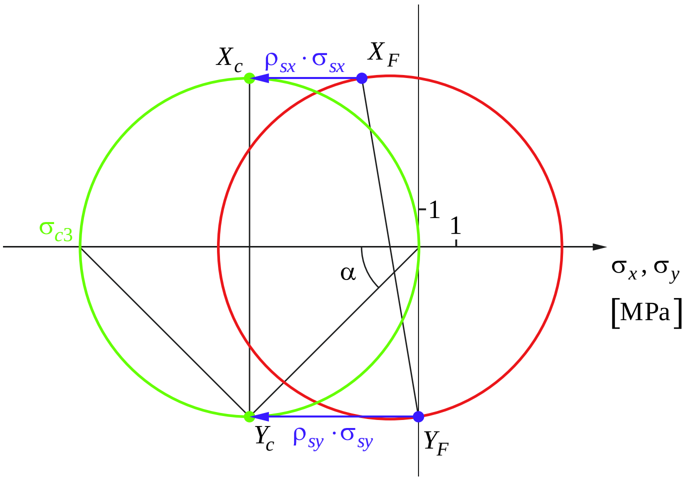
$$\rho_y \cdot f_s \geq \sigma_y + \frac{1}{k} \cdot |\tau_{xy}|$$

wobei $k = \cot(\alpha)$ Wahl: $\alpha = 45° \rightarrow k = \frac{1}{k} = 1$

Beanspruchung

$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 4.51$ MPa, $\sigma_x = -1.5$ MPa, $\sigma_y = 0$

$n_{xy} = n_{yx} = 631.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$, $n_x = -208.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$, $n_y = 0$



Bemessung der Bewehrung → Fliessbedingungen

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

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

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

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

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

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

Nachweis Bewehrung

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

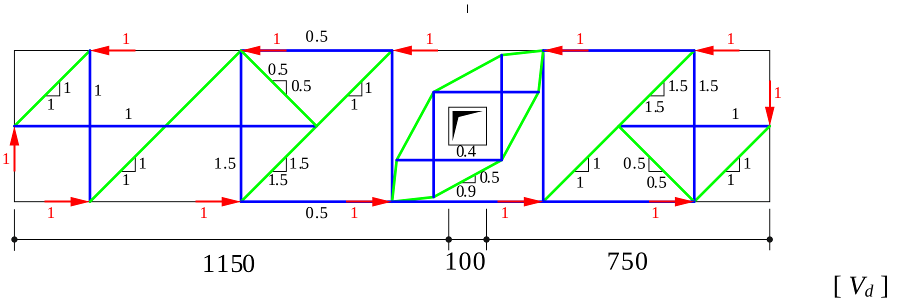
$$\rho_y \cdot f_{sd} = 1.08\% \cdot 435 = 4.69 \text{ MPa} > \sigma_y + \frac{1}{k} \cdot \left|\tau_{xy}\right| = 4.51 \text{ MPa}$$

Nachweis Beton

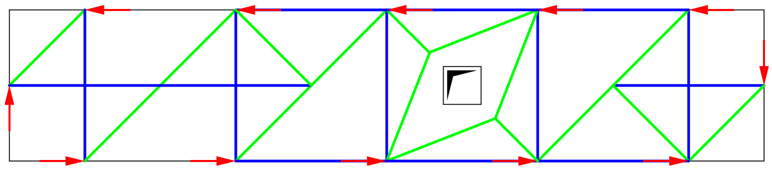
$$\sigma_{c3} \leq k_c \cdot f_{cd}$$

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

c) Fachwerkmodell

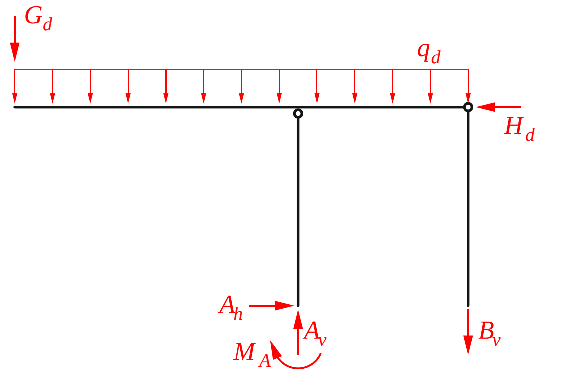


alternative Lösung



Aufgabe 2

a) Schnittgrössen



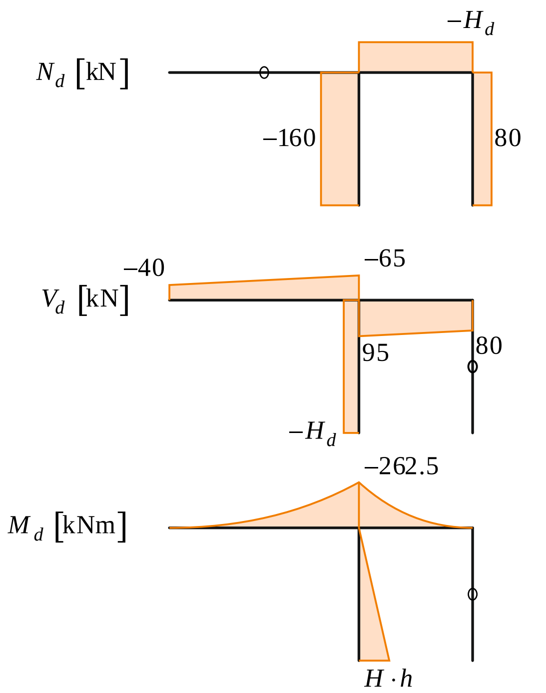
$$A_H = H_d$$

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

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

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

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



b) Rissabschätzung mit Zuggurtmodell

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

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

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

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

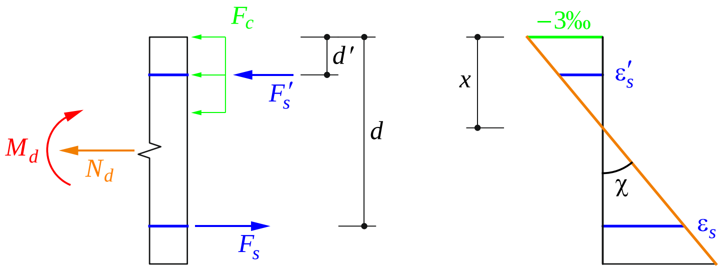
max. Rissabstand $s_{r0} = \dfrac{\text{Ø}_s}{4} \cdot \left(\dfrac{1}{\rho} - 1\right) = 177.6 \text{ mm}$

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

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

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

c) Biegewiderstand 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 $\quad \chi = \dfrac{3‰}{x} \quad \left(= 34 \dfrac{\text{mrad}}{\text{m}} \right)$

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

obere Bewehrung $\quad \varepsilon_s' = -(x - d') \cdot \chi \quad \rightarrow \quad F_s' = \left(|\varepsilon_s'| \cdot E_s - f_{cd} \right) \cdot A_s' \quad (= 145 \text{ kN})$

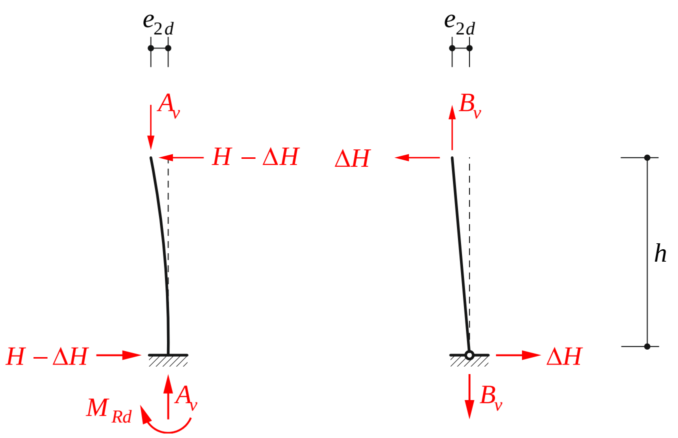
Betondruck $\quad c = 0.85 \cdot x \quad \rightarrow \quad F_c = b \cdot c \cdot f_{cd} \quad (= 300 \text{ kN})$

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

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

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

d) Maximal zulässige Horizontalkraft



Ablenkkraft ΔH

$$\Delta H = B_v \cdot \frac{e_{2d}}{h}$$

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

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

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

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

Aufgabe 3

a) Mindestbewehrung

statische Höhe $d \approx h - c_{nom} - \underbrace{1.5 \cdot Ø_s}_{Ann.\,Ø\,10} = 285\text{ mm}$

mech. Bew.gehalt $\omega_{\min} = 1 - \sqrt{1 - \dfrac{h^2 \cdot 1.3 \cdot f_{ctm}}{3 \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} = 1 - \sqrt{1 - \dfrac{320^2 \cdot 1.3 \cdot 2.9}{3 \cdot 1000 \cdot 285^2 \cdot 20}} = 0.040$

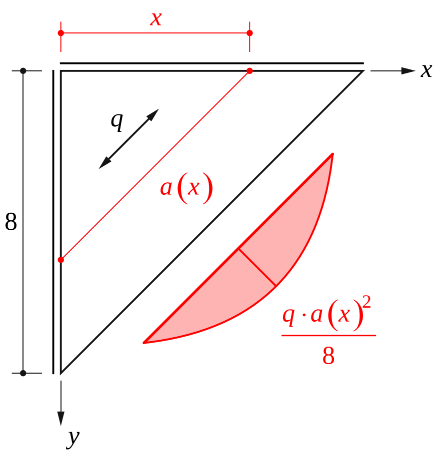
Mindestbewehrung $a_{s,\min} = \omega_{\min} \cdot b \cdot d \cdot \dfrac{f_{cd}}{f_{sd}} = 0.040 \cdot 1000 \cdot 285 \cdot \dfrac{20}{435} = 519 \dfrac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

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

Biegewiderstand $m_{Rd,\min} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left(d - \dfrac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}}\right) = 524 \cdot 435 \cdot \left(285 - \dfrac{524 \cdot 435}{2 \cdot 1000 \cdot 20}\right) = 63.7 \dfrac{\text{kNm}}{\text{m}}$

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

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:

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

Bemessung der Bewehrung mit Abstufung bei $x = 8$ m: $m_d(x = 8\text{ m}) = \dfrac{15.3 \cdot 8^2}{4} = 244.8 \dfrac{\text{kNm}}{\text{m}}$

erforderliche Bewehrung (Annahme $Ø\,20 \rightarrow d = 290$mm)

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

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

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

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

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

erforderliche Bewehrung (Annahme $\varnothing 16 \rightarrow d = 292\text{mm}$)

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

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

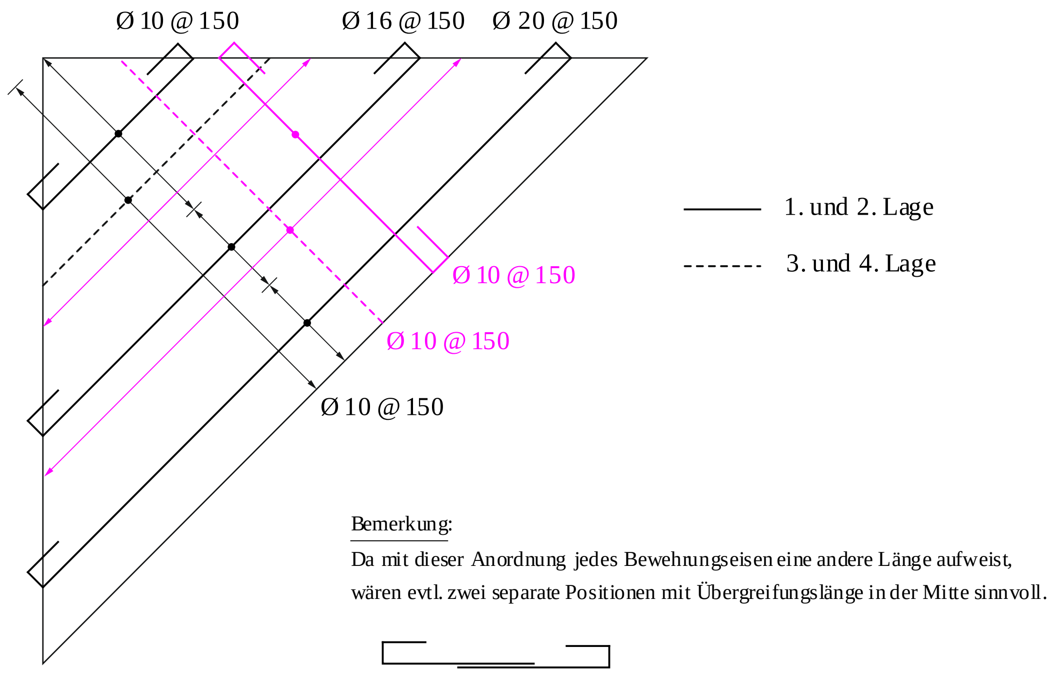
Biegewiderstand $m_{Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left(d - \dfrac{a_s \cdot f_{sd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd}}\right) = 1340 \cdot 435 \cdot \left(292 - \dfrac{1340 \cdot 435}{2 \cdot 1000 \cdot 20}\right) = 161.7\ \dfrac{\text{kNm}}{\text{m}} > m_d = 137.7\ \dfrac{\text{kNm}}{\text{m}}$

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

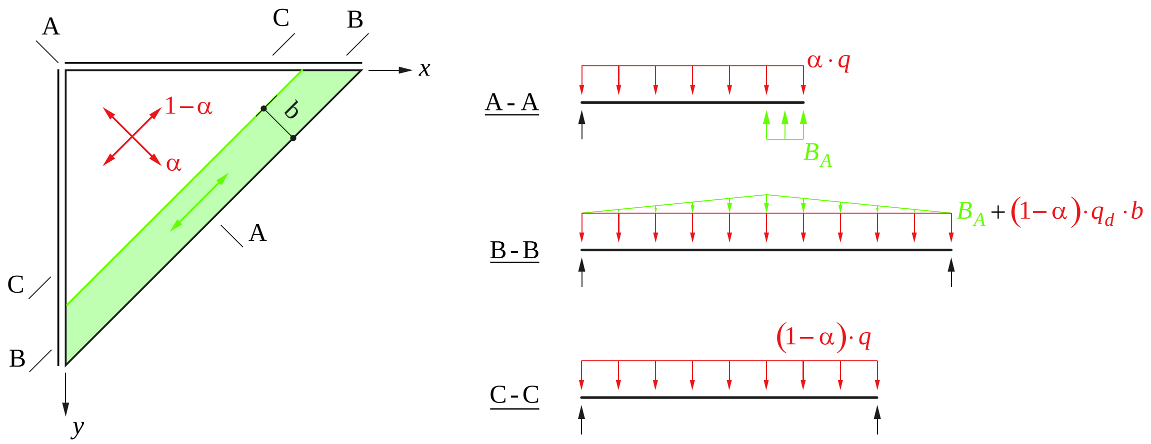
massgebende Querkraft $v_d\left(x = 8\ \text{m}\right) = \dfrac{1}{2} \cdot q_d \cdot x \cdot \sqrt{2} = \dfrac{1}{2} \cdot 15.3 \cdot 8 \cdot \sqrt{2} = 86.6\ \dfrac{\text{kN}}{\text{m}}$

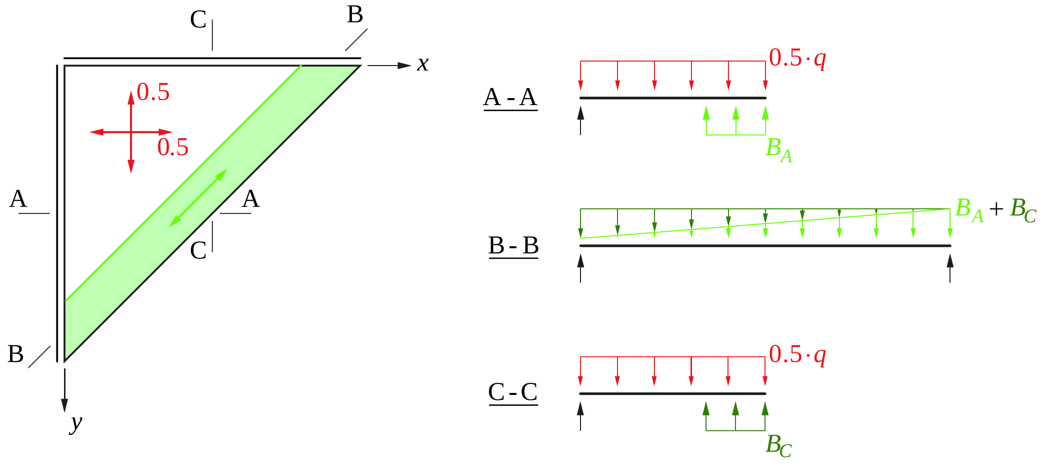
Querkraftwiderstand $v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v = 0.428 \cdot 1.1 \cdot 280 = 132\ \dfrac{\text{kN}}{\text{m}} > 86.6\ \dfrac{\text{kN}}{\text{m}}$

$k_g = \dfrac{48}{16 + D_{\max}} = \dfrac{48}{16 + 16} = 1.5$ $\qquad \varepsilon_v = 1.5 \cdot \dfrac{f_{sd}}{E_s} = 3.18‰$ $\qquad k_d = \dfrac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g} = \dfrac{1}{1 + 3.18‰ \cdot 280 \cdot 1.5} = 0.428$

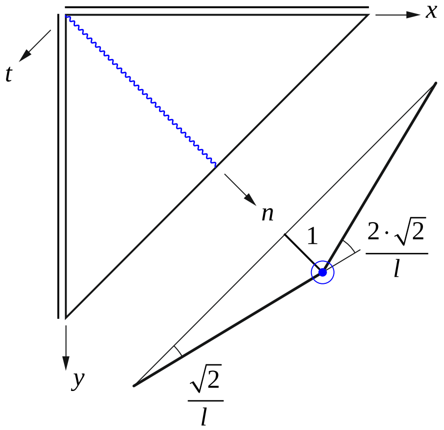


c) alternative Lastabtragung





d) Traglast



Statische Höhe

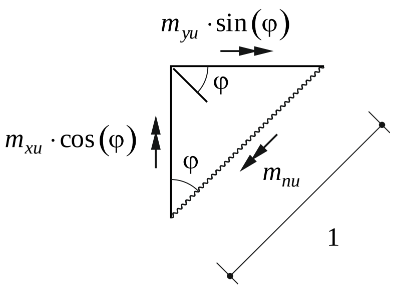
$$d = 0.5 \cdot \left(d_x + d_y\right) = h - c_{nom} - \varnothing_s = 320 - 20 - 12 = 288 \text{ mm}$$

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

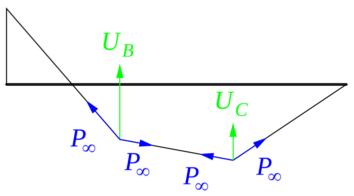
a) Spanngliedgeometrie, so dass P_0 minimal wird und keine vertikale Deformationen entstehen

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

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

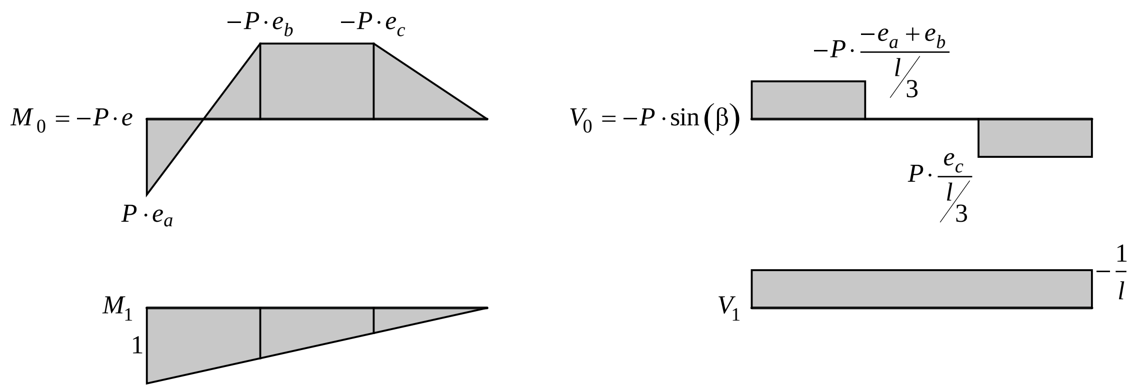
Kompensation der Einzelkräfte in B & C $U_b = 2 \cdot U_c \quad \rightarrow \quad e_c = \dfrac{4 \cdot e_b + 2 \cdot e_d - e_a}{5} = e_{max}$

Erforderliche Vorspannkraft bei $t \rightarrow \infty$ $U_b = G_k \quad \rightarrow \quad P_\infty = \dfrac{G_k \cdot l}{6 \cdot e_{max}} = 796.6\text{ kN}$

Erforderliche Vorspannkraft bei $t = 0$ $P_0 = \dfrac{P_\infty}{0.85} = 937\text{ kN}$

b) Zwängungen

Kraftmethode: Grundsystem und überzählige Grösse

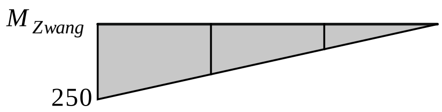


$$\delta_{10} = \int M_1 \cdot \frac{M_0}{EI} \cdot dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{6} \cdot \left[1 \cdot (-2 \cdot P \cdot e_a - P \cdot e_b) + \frac{2}{3} \cdot (-P \cdot e_a - 2 \cdot P \cdot e_b) \right] \\ + \frac{1}{6} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (-2 \cdot P \cdot e_b - P \cdot e_c) +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

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

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

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



c) <u>Spannungsnachweis</u>

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 $M_k = -\dfrac{7}{27} \cdot \left(G_k + Q_k\right) \cdot l - \dfrac{1}{8} \cdot g_{0k} \cdot l^2 = -1798 \text{ kNm}$

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

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

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

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

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

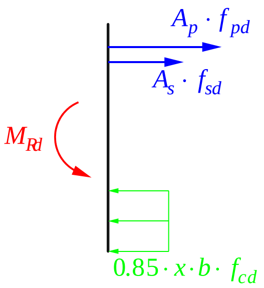
d) <u>Tragsicherheit</u>

Biegetragsicherheit

massgebendes Moment

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

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



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

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

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

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

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

Kontrolle der Dehnungen

$$\chi = \frac{\varepsilon_{c2d}}{x} = \frac{3‰}{400.6\text{mm}} = 7.5 \frac{\text{mrad}}{\text{m}}$$

$$\Delta\varepsilon \approx \frac{0.7 \cdot f_{pk}}{E_p} = 6.67‰$$

$$\varepsilon_p = \chi \cdot (d_p - x) + \Delta\varepsilon \approx 6.10‰ + 6.67‰ = 12.78‰ < \varepsilon_{ud} = 20‰$$

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

$(-q_d \cdot z \cdot \cot(\alpha)$ 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 $V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s}; V_{Rd,c}\} = 774.4 \text{ kN} > V_d + V_{Zwang} = 717 \text{ kN}$