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 5

Musterlösung

Name, Vorname: ______________________________

Studierenden-Nr.: ______________________________

Bemerkungen

1. Sofern nichts anderes angegeben ist, wird von Beton C30/37 (D_{max} = 32 mm, E_c = 33.6 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. Notizen auf der Aufgabenstellung werden nicht berücksichtigt.
4. Sämtliche Unterlagen (Aufgabenstellung, Lösungsblätter) sind nach Prüfungsende mit Namen zu versehen und abzugeben.

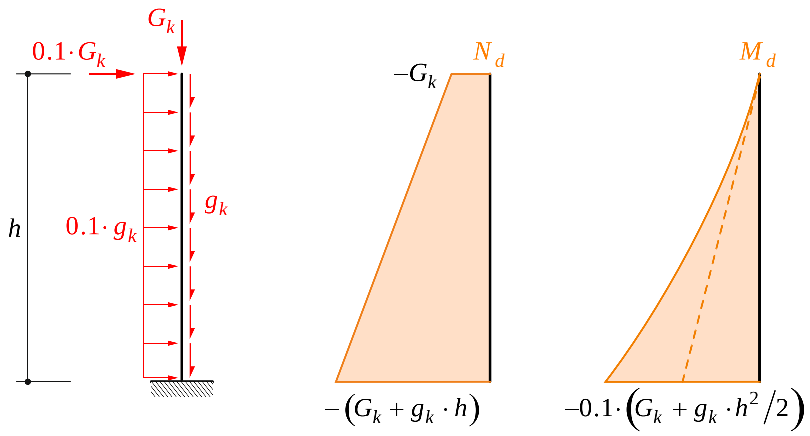
Hilfstabellen

	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) Schnittgrössen

Einwirkungen $g_k = 400 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $G_k = 7 \text{ MN}$

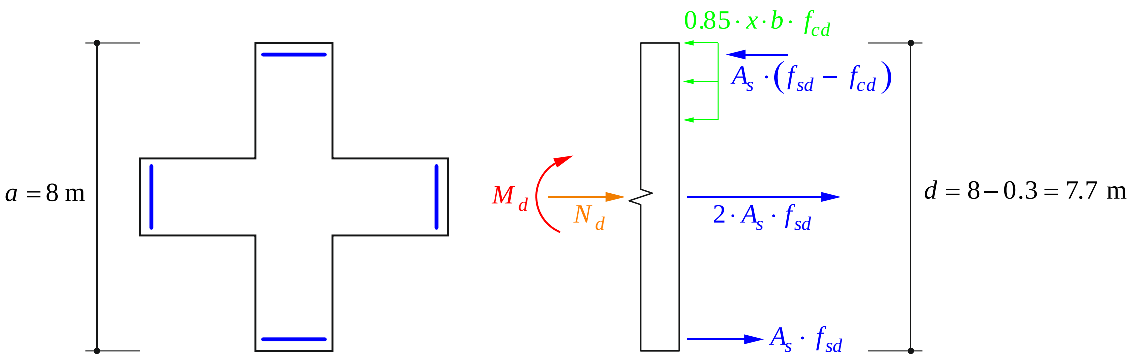


$$N_d^- = (G_k + g_k \cdot h) = (7000 + 400 \cdot 800) = 39 \text{ MN}$$

$$M_d = 0.1 \cdot \left(G_k \cdot h + \frac{g_k \cdot h^2}{2} \right) = 0.1 \cdot \left(7000 \cdot 80 + \frac{700 \cdot 80^2}{2} \right) = 184 \text{ MNm}$$

b) Biegewiderstand unter Normalkraft

QS-Analyse unter Biegung und Normalkraft



Kräfte-Gleichgewicht

$$\sum N = 0: \quad 3 \cdot A_s \cdot f_{sd} + N_d = A_s \cdot (f_{sd} - f_{cd}) + 0.85 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd}$$

$$\Rightarrow \quad x = \frac{3 \cdot A_s \cdot f_{sd} + N_d - A_s \cdot (f_{sd} - f_{cd})}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{3 \cdot 25452 + 39 \cdot 10^6 - 25452 \cdot (435 - 20)}{0.85 \cdot 2000 \cdot 20} = 1813 \text{ mm}$$

Momenten-Gleichgewicht

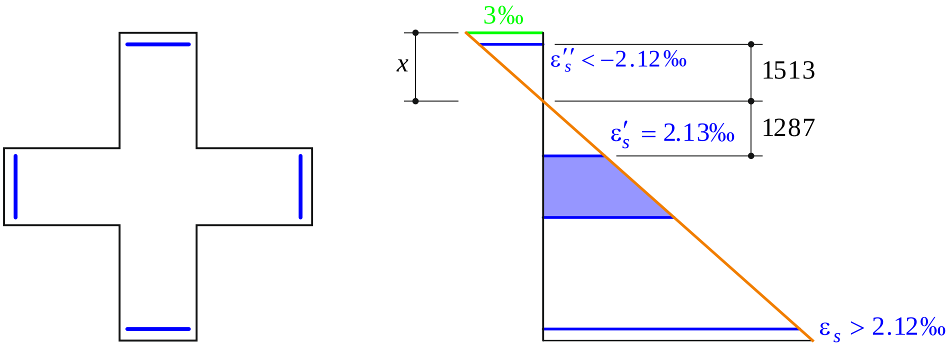
$$\sum M = 0: \quad M_{Rd} = \left[A_s \cdot f_{sd} + A_s \cdot \left(f_{sd} - f_{cd}\right)\right] \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + 0.85 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{0.85 \cdot x}{2}\right)$$

$$= \left[25452 \cdot 435 + 25452 \cdot (435 - 20)\right] \cdot \left(7700 - \frac{8000}{2}\right)$$

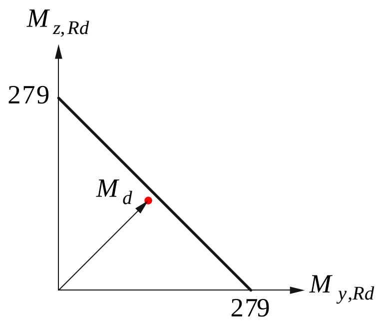
$$+ 0.85 \cdot 1813 \cdot 2000 \cdot 20 \cdot \left(\frac{8000}{2} - \frac{0.85 \cdot 1813}{2}\right)$$

$$M_{Rd} = 279 \text{ MNm}$$

Kontrolle der Dehnungen $\quad \varepsilon_s' = \frac{3‰}{x} \cdot (c - x + 0.1\,\text{m}) = \frac{3‰}{1813} \cdot (3000 - 1813 + 100) = 2.13‰ > 2.12‰$



c) <u>$M_{y,Rd} - M_{z,Rd}$ – Interaktionsdiagramm</u>

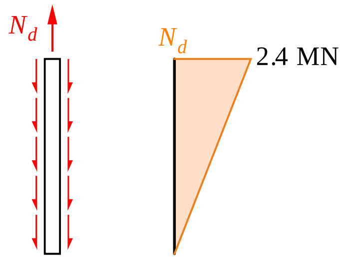


$$M_{y,Rd} = M_{z,Rd} = 279 \text{ MNm}$$

$$M_{Rd} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot M_{y,Rd} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 279 = 197 \text{ MNm}$$

$M_{Rd} > M_d = 184 \text{ MNm}$ <u>ok</u>

d) Normalkraftverlauf im Pfahl



$$A_{Pfahl} = \frac{0.6 \cdot \pi^2}{4} = 0.2827\ \text{mm}^2$$

$$A_s = 15 \cdot 531 = 7965\ \text{mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_{Pfahl}} = \frac{7965}{2.827 \cdot 10^5} = 2.82\%$$

Risslast

$$N_r = A_{Pfahl} \cdot (1-\rho) \cdot f_{ctm} + \rho \cdot A_{Pfahl} \cdot n \cdot f_{ctm} = 2.827 \cdot 10^5 \cdot (1-2.82\%) \cdot 2.9 + 2.82\% \cdot 2.827 \cdot 10^5 \cdot \frac{205}{33.6} \cdot 2.9$$

$$N_r = 938\ \text{kN}$$

gerissene Länge $\quad l_r = l \cdot \left(1 - \frac{N_r}{N_d}\right) = 12 \cdot \left(1 - \frac{938}{2400}\right) = 7.31\ \text{m}$

e) Verlängerung des Pfahls und Risse mit Zuggurtmodell

mittlere Normalkraft im gerissenen Bereich $\quad N_{d,m} = \frac{l - \frac{l_r}{2}}{l} \cdot N_d = \frac{12'000 - \frac{7311}{2}}{12'000} \cdot 2400 = 1669\ \text{kN}$

mittlere Stahlspannungen im gerissenen Bereich $\quad \sigma_{srm} = \frac{N_{d,m}}{A_s} = 209.6\ \text{MPa}$

mittlere Stahldehnungen mit Berücksichtigung der Zugversteifung

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{srm}}{E_s} - \frac{\lambda \cdot f_{ctm} \cdot (1-\rho)}{2 \cdot \rho \cdot E_s} = \frac{209.6}{205 \cdot 10^3} - \frac{1 \cdot 2.9 \cdot (1-2.82\%)}{2 \cdot 2.82\% \cdot 205 \cdot 10^3} = 0.78\%$$

Verlängerung des Pfahls mit Berücksichtigung der Zugversteifung

$$\Delta l = \frac{f_{ctm}}{2 \cdot E_c} \cdot (l - l_r) + \varepsilon_{sm} \cdot l_r = \frac{2.9}{2 \cdot 33.6} \cdot (12 - 7.31) + 0.78\% \cdot 7.31 = 5.9\ \text{mm}$$

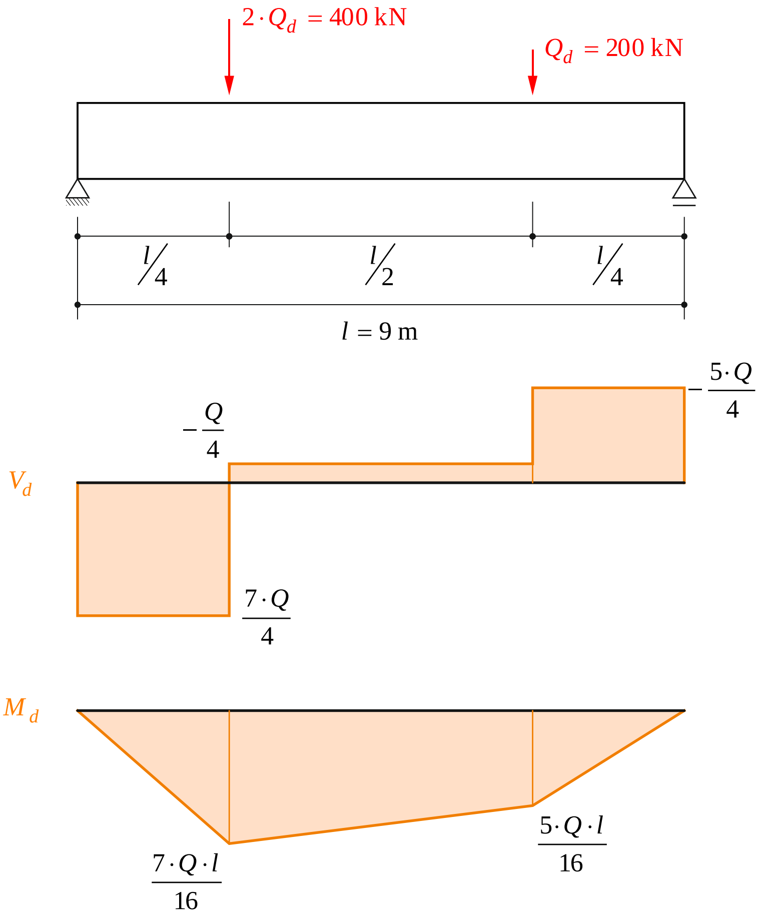
Stahlspannungen bei Rissbildung $\quad \sigma_{sr0} = f_{ctm} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - 1 + n\right) = 2.9 \cdot \left(\frac{1}{2.82\%} - 1 + \frac{205}{33.6}\right) = 117.8\ \text{MPa}$

maximaler Rissabstand $\quad s_{r0} = \frac{\varnothing \cdot f_{ctm} \cdot (1-\rho)}{2 \cdot \tau_{b0} \cdot \rho} = \frac{26 \cdot 2.9 \cdot (1-2.82\%)}{2 \cdot 5.8 \cdot 2.82\%} = 0.224\ \text{m}$

mittlere Rissbreite $\quad w_{rm} = \frac{s_{r0} \cdot (2 \cdot \sigma_{srm} - \sigma_{sr0})}{2 \cdot E_s} = \frac{224 \cdot (2 \cdot 206.9 - 117.8)}{2 \cdot 205 \cdot 10^3} = 0.16\ \text{mm}$

Aufgabe 2

a) Bemessung Biegebewehrung



$$V_d = \frac{7 \cdot Q_d}{4} = \frac{7 \cdot 200}{4} = 350 \text{ kN}$$

$$M_d = \frac{7 \cdot Q_d \cdot l}{16} = \frac{7 \cdot 200 \cdot 9}{16} = 788 \text{ kNm}$$

statische Höhe $d = h - 0.1 \text{ m} = 1.0 \text{ m}$

Bemessung Biegebewehrung $A_{s,erf} \approx \frac{M_d}{0.9 \cdot d \cdot f_{sd}} = \frac{788}{0.9 \cdot 1.0 \cdot 435} = 2057 \text{ mm}^2$

$\rightarrow 6\,Ø\,22: \quad A_s = 6 \cdot \frac{22^2 \cdot \pi}{4} = 2281 \text{ mm}^2$

Druckzonenhöhe $x = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2281 \cdot 435}{0.85 \cdot 300 \cdot 20} = 195 \text{ mm} < 0.35 \cdot d = 350 \text{ mm}$

Biegewiderstand & Nachweis der Biegetragsicherheit

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot \left(d - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) = 2281 \cdot 435 \cdot \left(1000 - \frac{0.85 \cdot 195}{2} \right) = 910 \text{ kNm} > M_d = 788 \text{ kNm}$$

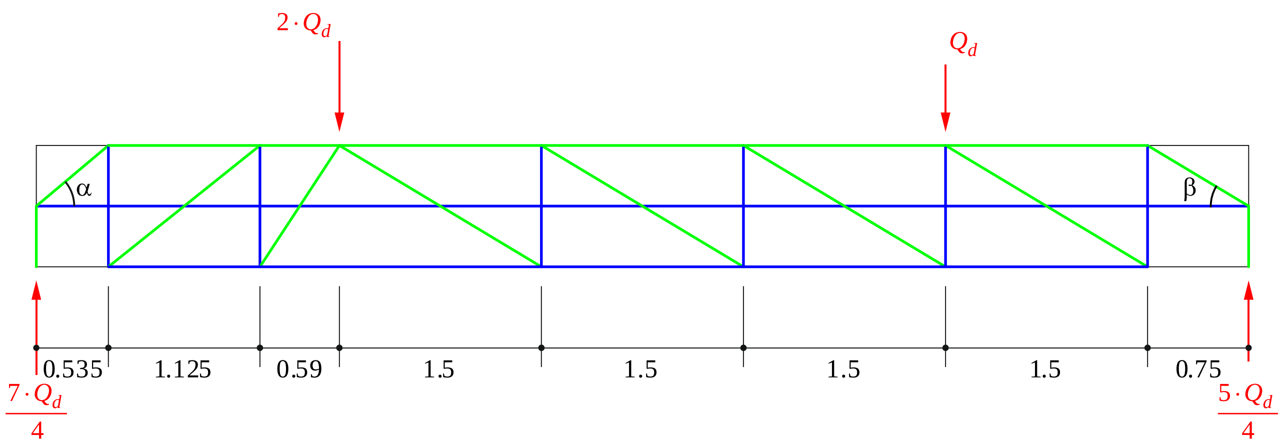
b) Fachwerkmodell und Spannungsfeld

Innerer Hebelarm $z \approx 0.9 \cdot d = 0.9 \text{ m}$

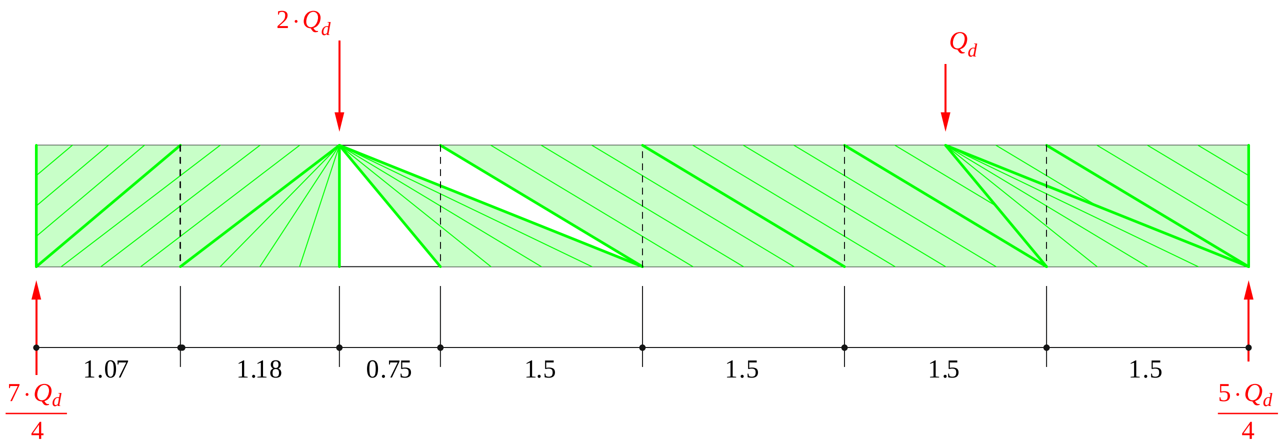
Druckfeldneigung $\alpha = \arctan\left(\frac{0.9}{1.07}\right) = 40°$ $\beta = \arctan\left(\frac{0.9}{1.5}\right) = 31°$

$\rightarrow$ (Horizontalanteil in der letzten Strebe muss bei beiden Auflagern jeweils gleich sein.)

Fachwerkmodell



Spannungsfeld



c) Bemessung der Stegbewehrung

Mindestbewehrung $a_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w = 0.2\% \cdot 200 = 400 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

$$a_{sw,erf} = \frac{V_d}{z \cdot \cot(\alpha) \cdot f_{sd}} = \frac{350}{1.07 \cdot 435} = 752 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$\rightarrow \varnothing 10$ @ 200, 2-schnittig: $a_{sw} = 2 \cdot \frac{10^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.2} = 785 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Bügelwiderstand $V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot f_{sd} \cdot z \cdot \cot(\alpha) = 785 \cdot 435 \cdot 1.07 = 365 \text{ kN}$

Betondruck $V_{Rd,c} = k_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot z \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = 0.55 \cdot 20 \cdot 200 \cdot 0.9 \cdot \sin(40°) \cdot \cos(40°) = 975 \text{ kN}$

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s}; V_{Rd,c}\} = 365 \text{ kN} > V_d = 350 \text{ kN}$$

Längszugbewehrung $T_d = V_d \cdot \cot(\alpha) = 350 \cdot \cot(40°) = 250 \cdot \cot(31°) = 417 \text{ kN}$

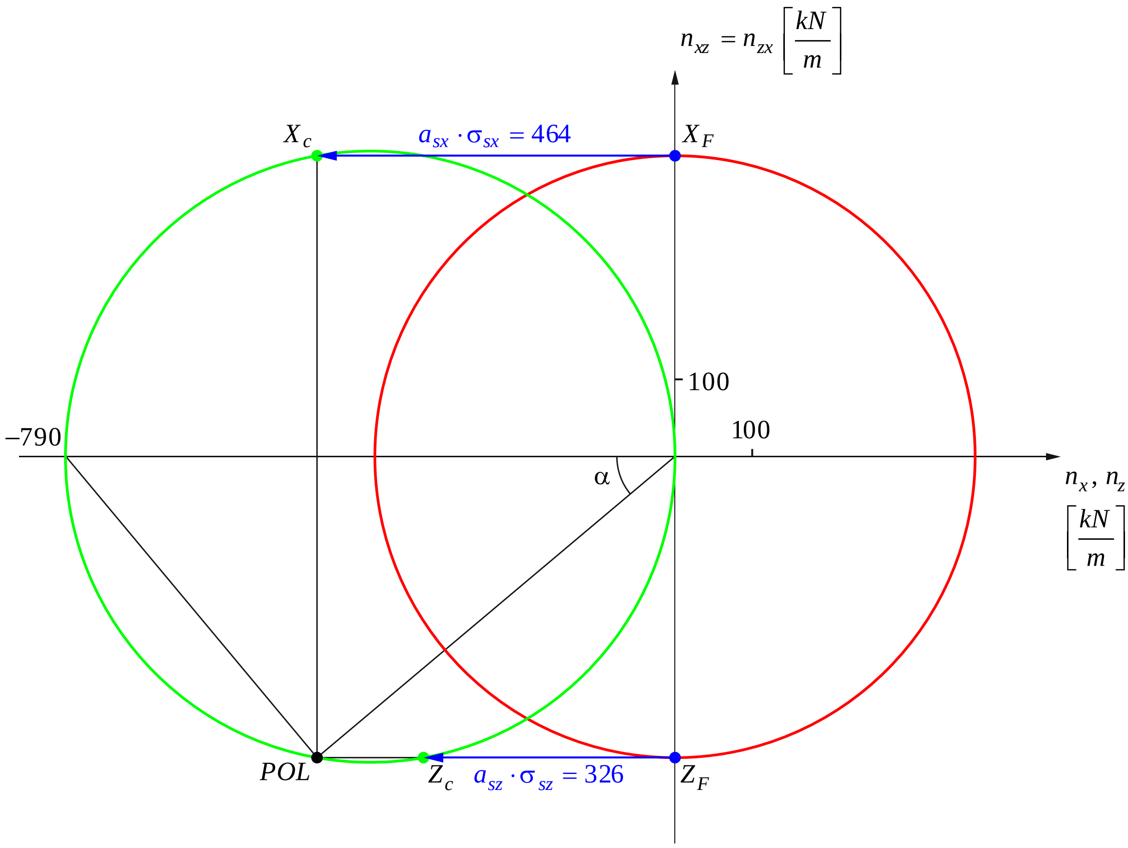
$$a_{sl,erf} = \frac{T_d}{z \cdot f_{sd}} = \frac{417}{0.9 \cdot 435} = 1065 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\rightarrow \text{Ø}12 \text{ @ } 200, 2-\text{schnittig}: \qquad a_{sl} = 2 \cdot \frac{12^2 \cdot \pi}{4 \cdot 0.2} = 1131 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$T_{Rd} = a_{sl} \cdot f_{sd} \cdot z = 1131 \cdot 435 \cdot 0.9 = 443 \text{ kN} > 417 \text{ kN}$$

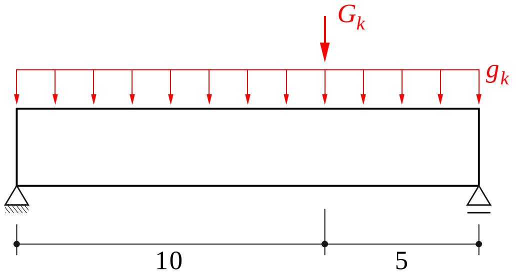
d) Spannungszustand im Mohr'schen Kreis

$$n_x = n_z = 0 \quad n_{xz} = n_{zx} = \frac{V_d}{z} = 389 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



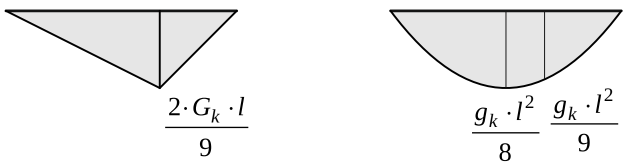
Aufgabe 3

a) <u>Spanngliedgeometrie</u>



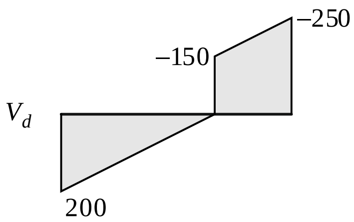
$$g_k = 12 + 8 = 20\ \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

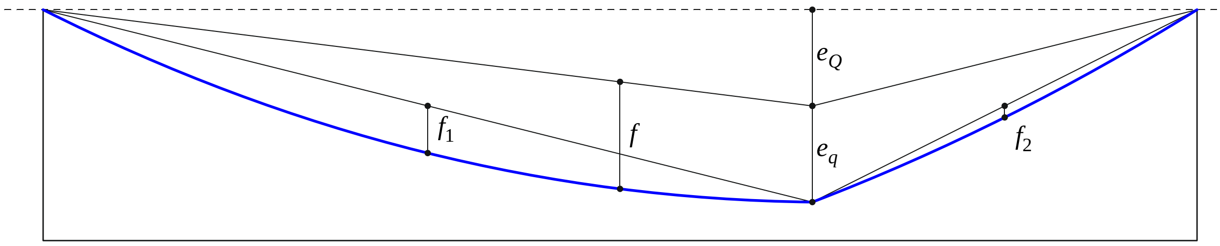
Kabelführung affin zum Momentenverlauf → Superposition von:



max. Spanngliedexzentrizität bei $x = \frac{2 \cdot l}{3}$,

da dort Querkraftnullpunkt





$$P \cdot e_Q = \frac{2 \cdot G_k \cdot l}{9} \quad \rightarrow \quad e_Q = \frac{2 \cdot G_k \cdot l}{9 \cdot P} \qquad\qquad P \cdot e_q = \frac{g_k \cdot l^2}{9} \quad \rightarrow \quad e_q = \frac{g_k \cdot l^2}{9 \cdot P}$$

$$e_{\max} = e_Q + e_q = \frac{2 \cdot G_k \cdot l + g_k \cdot l^2}{9 \cdot P} \quad \rightarrow \quad P_{\infty,erf} = \frac{2 \cdot G_k \cdot l + g_k \cdot l^2}{9 \cdot e_{\max}} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 15 + 20 \cdot 15^2}{9 \cdot 0.503} = 1988\ \text{kN}$$

$$e_Q = \frac{2 \cdot 150 \cdot 15}{9 \cdot 1988} = 251.5\ \text{mm} \qquad f = \frac{g_k \cdot l^2}{8 \cdot P_\infty} = \frac{20 \cdot 15^2}{8 \cdot 1988} = 283\ \text{mm} \qquad P_0 = \frac{P_\infty}{0.85} = \frac{1988}{0.85} = 2339\ \text{kN}$$

$$e_q = \frac{20 \cdot 15^2}{9 \cdot 1988} = 251.5\ \text{mm} \qquad \left(f_1 = f \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 126\ \text{mm}; \quad f_2 = f \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 31\ \text{mm} \right)$$

b) Dekomprimierung des Trägers

Lastausgleich für ständige Lasten! $\rightarrow M(g_k, G_k) - P_\infty \cdot e = 0,$ über ganze Trägerlänge

Spannunganalyse

$$\sigma_c = -\frac{P_\infty}{A_c} + \frac{M_q}{I_c} \cdot \frac{h}{2} < 0$$

$$\rightarrow M_q \leq \frac{P_\infty \cdot 2 \cdot I_c}{A_c \cdot h} = \frac{1988 \cdot 2 \cdot 5.76 \cdot 10^{10}}{480 \cdot 10^3 \cdot 1200} = 397.6 \text{ kNm}$$

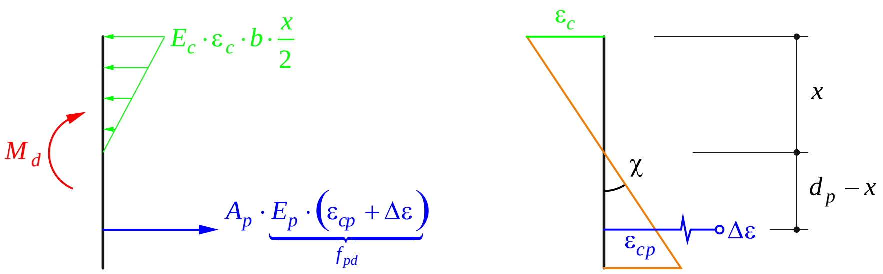
Momentenverlauf für Nutzlast q_k

$$M_q = \frac{q \cdot x \cdot (l - x)}{2} \quad \rightarrow \quad x_{dec} = \frac{1 - \sqrt{l^2 - 8 \cdot \frac{M_q}{q}}}{2} = \frac{1 - \sqrt{15^2 - 8 \cdot \frac{397.6}{20}}}{2} = 3.4 \text{ m}$$

dekomprimiert für: $x_{dec} = 3.4 \text{ m} < x < l - x_{dec} = 11.6 \text{ m}$

c) Spannungs- und Dehnungszustand gerade beim Fliessen der Bewehrung

QS-Analyse im gerissen elastischen Zustand (II)



Kinematische Relationen (*Vorspannkabel erreicht gerade Fliessspannung*)

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cp} + \Delta\varepsilon = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1390}{195'000} = 7.13‰ \qquad \varepsilon_{cp} = (d_p - x) \cdot \chi \quad \rightarrow \quad \chi = (d_p - x)^{-1} \cdot \left(\frac{f_{pd}}{E_p} - \Delta\varepsilon \right)$$

$$\varepsilon_c = x \cdot \chi$$

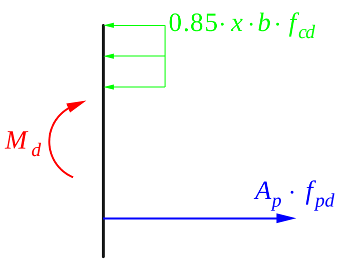
Kräfte-Gleichgewicht $\sum N = 0: \quad A_p \cdot f_{pd} = E_c \cdot b \cdot \frac{x^2}{2} \cdot (d_p - x)^{-1} \cdot \left(\frac{f_{pd}}{E_p} - \Delta\varepsilon \right)$

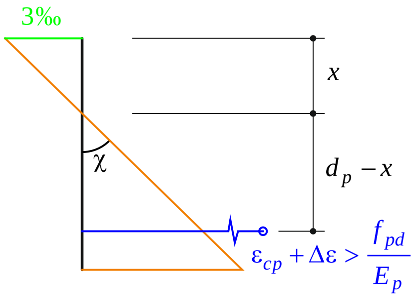
Betondruckzonenhöhe $\rightarrow \quad x = 565 \text{ mm}$

Momenten-Gleichgewicht $\sum M = 0: \quad M_y = A_p \cdot f_{pd} \cdot \left(d_p - \frac{x}{3} \right) = 1800 \cdot 1390 \cdot \left(1103 - \frac{565}{3} \right) = 2289 \text{ kNm}$

Krümmung des QS $\chi = (1103 - 565)^{-1} \cdot (7.13‰ - 6.5‰) = 1.17 \frac{\text{mrad}}{\text{m}}$

d) Biegewiderstand





Betondruckzonenhöhe $$x = \frac{A_p \cdot f_{pd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{1800 \cdot 1390}{0.85 \cdot 400 \cdot 20} = 368 \text{ mm} < 0.35 \cdot d = 386 \text{ mm}$$

Biegewiderstand $$M_{Rd} = A_p \cdot f_{pd} \cdot \left(d_p - \frac{0.85 \cdot x}{2} \right) = 1800 \cdot 1390 \cdot \left(1103 - \frac{0.85 \cdot 368}{2} \right) = 2368 \text{ kNm}$$

Dehnung des QS auf Höhe des Spannkabels $$\varepsilon_{cp} = \frac{3‰}{x} \cdot \left(d_p - x \right) = \frac{3}{368} \cdot (1103 - 368) = 5.99‰$$

Dehnung des Vorspannkabels $$\varepsilon_p = \varepsilon_{cp} + \Delta\varepsilon = 5.99 + 6.5 = 12.49‰$$

Krümmung bei Erreichen des Biegewiderstands $$\chi = \frac{3‰}{x} = \frac{3}{368} = 8.15 \frac{\text{mrad}}{\text{m}}$$

e) Momenten-Krümmungs-Diagramm

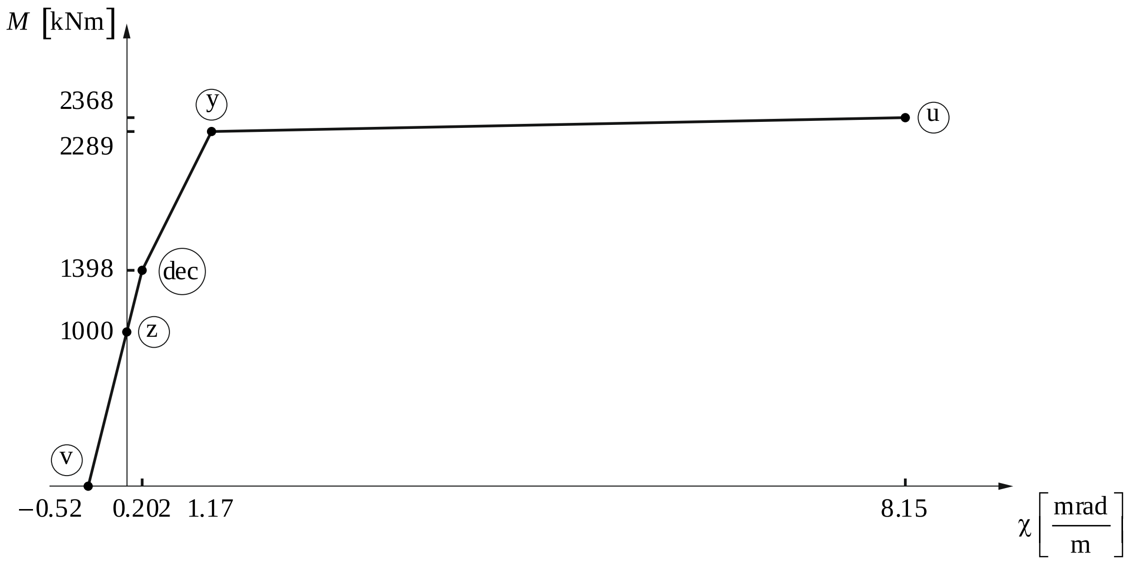
ungerissene Biegesteifigkeit $EI_c = 33.6 \cdot 0.0576 = 1935 \text{ MNm}^2$

Krümmung gerade nach Vorspannen $\chi_0 = \frac{M(g_k, G_k)}{EI_c} = \frac{1988 \cdot 0.503}{1935} = 0.52 \frac{\text{mrad}}{\text{m}}$

Moment bei zentrischem Spannungszustand $M_z = P_\infty \cdot e_{\max} = 1000 \text{ kNm}$

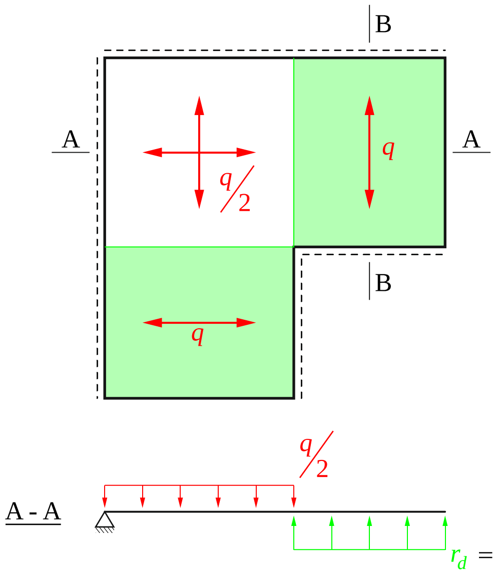
Dekompressionsmoment $M_{dec} = M_z + M_q = 1398 \text{ kNm}$

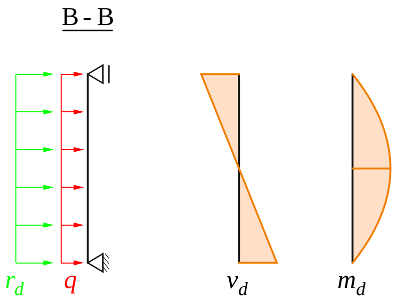
Krümmung bei Dekompression $\chi_{dec} = \frac{M_{dec}}{EI_c} - \chi_0 = \frac{1398}{1935} - 0.52 = 0.202 \frac{\text{mrad}}{\text{m}}$



Aufgabe 4

a) Streifenmethode



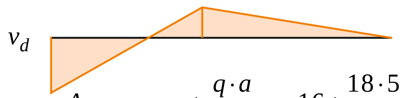


$$v_d = \frac{(q_d + r_d)\cdot a}{2} = 55\ \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$m_d = \frac{(q_d + r_d)\cdot a^2}{8} = 68.8\ \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

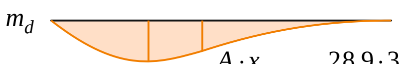
$$r_d = \frac{q_d \cdot a^2}{2\cdot c\cdot(2\cdot a + c)} = \frac{18\cdot 5^2}{2\cdot 4\cdot(2\cdot 5 + 4)} = 4\ \text{kPa}$$

$$-r_d \cdot c = -4\cdot 4 = 16\ \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



$$A_d = -r_d \cdot c + \frac{q\cdot a}{2} = -16 + \frac{18\cdot 5}{2} = 28.9\ \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$x_{\max} = \frac{2\cdot A_d}{q_d} = \frac{2\cdot 28.9}{18} = 3.21\ \text{m}$$



$$m_d = \frac{A\cdot x_{\max}}{2} = \frac{28.9\cdot 3.21}{2} = 46.5\ \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Mindestbewehrung

$$a_{s.\min} = \frac{f_{cd}}{f_{sd}}\cdot b\cdot d\cdot\left(1-\sqrt{1-\frac{h^2\cdot 1.3\cdot f_{ctm}}{3\cdot d^2\cdot f_{cd}}}\right) = \frac{20}{435}\cdot 1000\cdot 215\cdot\left(1-\sqrt{1-\frac{260^2\cdot 1.3\cdot 2.9}{3\cdot 215^2\cdot 20}}\right) = 465\ \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$d = h - c_{nom} - \varnothing = 260 - 35 - 10 = 215\ \text{mm}$$

$$\rightarrow\ \varnothing 10 @ 150: \quad a_{s,\min} = \frac{10^2\cdot\pi}{4\cdot 0.15} = 524\ \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$m_{Rd,\min} = a_s\cdot f_{sd}\cdot\left(d - \frac{a_s\cdot f_{sd}}{2\cdot b\cdot f_{cd}}\right) = 524\cdot 435\cdot\left(215 - \frac{524\cdot 435}{2\cdot 1000\cdot 20}\right) = 47.7\ \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Biegetragsicherheit

<u>A-A</u>

$$m_d = 46.5\,\frac{\text{kNm}}{\text{m}} \le m_{Rd} = 47.7\,\frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

<u>B-B</u>

Bemessung Biegebewehrung

$$a_{s,erf} \approx \frac{m_d}{0.9 \cdot d \cdot f_{sd}} = \frac{68.8}{0.9 \cdot 215 \cdot 435} = 817\,\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\rightarrow \varnothing 10 \text{ @ } 300 + \varnothing 14 \text{ @ } 300: \qquad a_s = \frac{\left(10^2 + 14^2\right) \cdot \pi}{4 \cdot 0.3} = 775\,\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Betondruckzonenhöhe

$$x = \frac{a_s \cdot f_{sd}}{0.85 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{775 \cdot 435}{0.85 \cdot 1000 \cdot 20} = 19.3\text{ mm} < 0.35 \cdot d = 70\text{ mm}$$

Biegewiderstand & Nachweis

$$m_{Rd} = a_s \cdot f_{sd} \cdot \left(d - \frac{0.85 \cdot x}{2}\right) = 775 \cdot 435 \cdot \left(215 - \frac{0.85 \cdot 19.3}{2}\right) = 69.6\,\frac{\text{kNm}}{\text{m}} > m_d = 68.8\,\frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Querkrafttragsicherheit

massgebende Querkraft

$$v_d = v_0 = \sqrt{55^2 + 16^2} = 57.3\,\frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Hauptquerkraftrichtung

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \arctan\left(\frac{16}{55}\right) = 16.2^\circ$$

Querkraftwiderstand & Nachweis

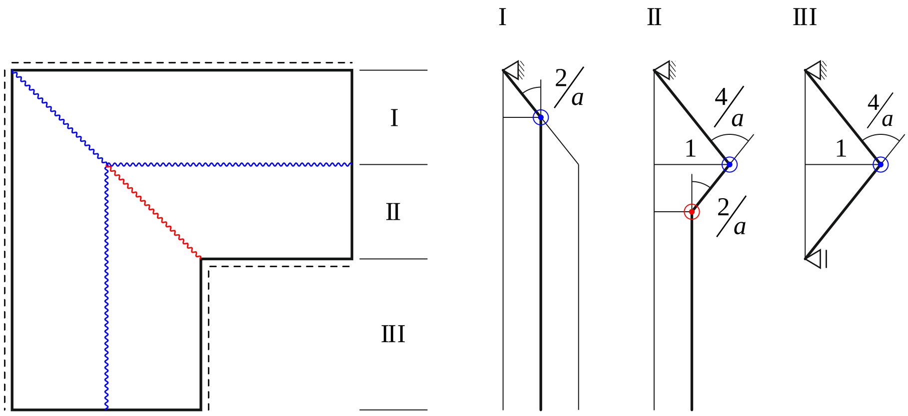
$$k_g = \frac{48}{16 + D_{\max}} = 1.0$$

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \frac{1}{\sin^4(\varphi) + \cos^4(\varphi)} = \underset{konservativ}{1.5} \cdot \frac{435}{205} \cdot \frac{1}{\sin^4(16.2^\circ) + \cos^4(16.2^\circ)} = 3.71‰$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g} = \frac{1}{1 + 3.71‰ \cdot 215 \cdot 1.0} = 0.56$$

$$v_{Rd} = k_d \cdot d \cdot \tau_{cd} = 0.56 \cdot 215 \cdot 1.1 = 132\,\frac{\text{kN}}{\text{m}} > v_d = 57.3\,\frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

b) Fliessgelenklinienmethode



Biegewiderstand $m_u = 67 \dfrac{\text{kNm}}{\text{m}}$

Arbeit der äusseren Kräfte $W = q \cdot \dfrac{1}{2} \cdot \left(a^2 + 2 \cdot a \cdot c\right)$

Dissipationsarbeit $D = m_u \cdot \left[\dfrac{2}{a} \cdot \dfrac{a}{2} + \left(\dfrac{4}{a} + \dfrac{2}{a}\right) \cdot \dfrac{a}{2} + \dfrac{4}{a} \cdot c\right] \cdot 2 = \dfrac{8 \cdot m_u \cdot (a+c)}{a}$

Traglast $W = D \quad \rightarrow \quad q_u = \dfrac{16 \cdot m_u \cdot (a+c)}{a^2 \cdot (a + 2 \cdot c)} = \dfrac{16 \cdot 67 \cdot (5+4)}{5^2 \cdot (5 + 2 \cdot 4)} = 29.7 \text{ kPa} < 30 \text{ kPa}$