

**Masterprüfung
im Fach****Stahlbau IV****Jahr: 2014**☒ **Frühjahr**☐ **Herbst**

| |
|----------------------|
| Name: |
| Matrikel-Nr.: |
| Unterschrift: |

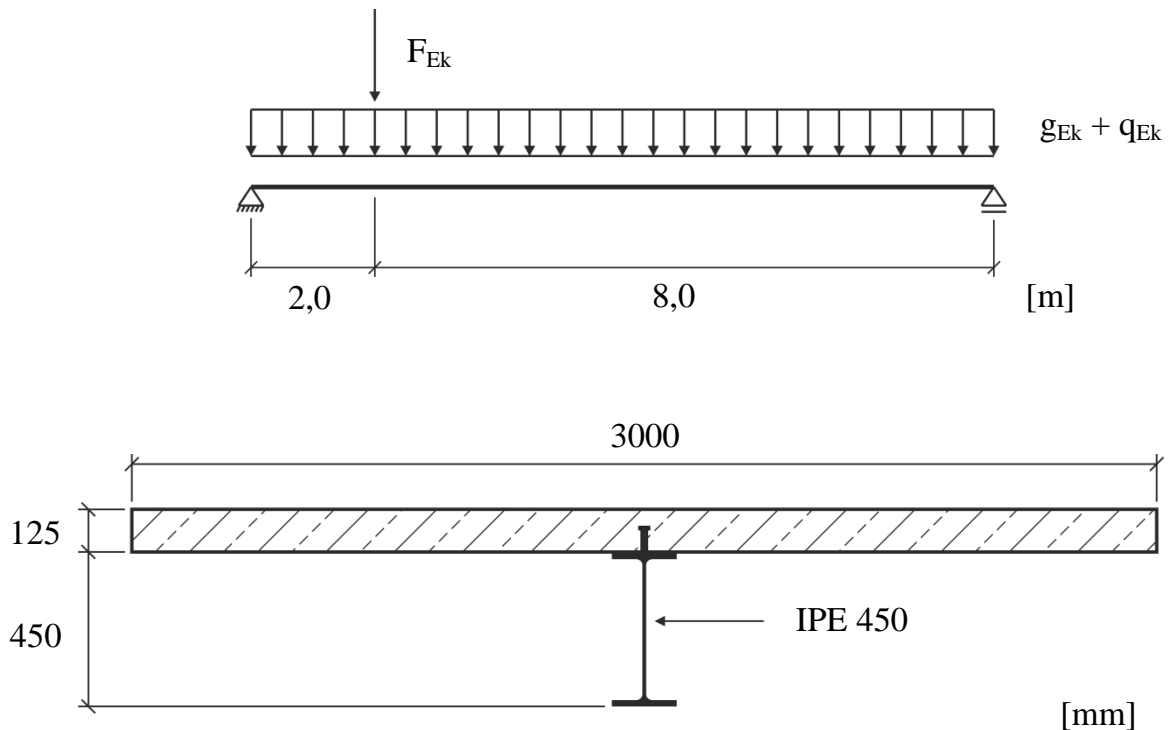
| |
|---|
| Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich mich gesund fühle und in der Lage bin, an der Prüfung teilzunehmen. |
|---|

Dieser Teil wird vom Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau ausgefüllt:

| Stahlbau IV | | | |
|-------------|---|---|--------|
| 1 | 2 | 3 | Gesamt |
| | | | |

Aufgabe 1**18 Punkte****gegeben:**

- Verbundquerschnitt und statisches System unter Last gemäß Skizze:



- Material:

- Beton C 30/37
- Betonstahl BSt 500 S
- Baustahl S 235

- Kopfbolzendübel: $d = 19 \text{ mm}$, $h = 80 \text{ mm}$, $f_u = 450 \text{ N/mm}^2$

- Belastung: ständig: $g_{Ek} = 4 \text{ kN/m}^2$

vorübergehend: $F_{Ek} = 180 \text{ kN}$

$q_{Ek} = 4 \text{ kN/m}^2$

gesucht:

- Weisen Sie den Querschnitt im Grenzzustand der Tragfähigkeit infolge der Momenten- und Querkraftbeanspruchung an den maßgebenden Stellen nach.
- Ermitteln Sie die minimal mögliche Anzahl an Verbundmitteln und ordnen Sie dies an.

Hinweise:

- Zeigen Sie, dass eine plastische Bemessung zulässig ist.
- Das Eigengewicht ist in den charakteristischen Lasten bereits enthalten.
- Überprüfen Sie die Zulässigkeit einer teilweisen Verdübelung.
- Zeigen Sie, dass eine äquidistante Verteilung zulässig ist.

Musterlösung Aufgabe 1**18 Punkte****Materialkennwerte**

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0} = 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0 = 23,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 3,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,5 = 2,0 \text{ kN/cm}^2$$

Schnittgrößenermittlung

Ermittlung der Bemessungslasten:

$$F_{Ed} = 180 \text{ kN} \cdot 1,5 = 270,0 \text{ kN}$$

$$g_{Ed} = 4 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,35 = 16,2 \text{ kN/m}$$

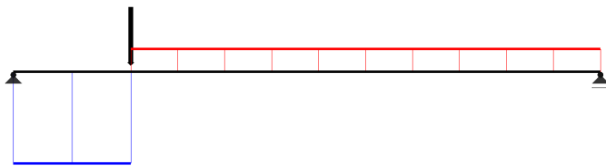
$$q_{Ed} = 4 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,5 = 18,0 \text{ kN/m}$$

$$q^*_{Ed} = g_{Ed} + q_{Ed} = 16,2 \text{ kN/m} + 18,0 \text{ kN/m} = 34,2 \text{ kN/m}$$

infolge Einzellast

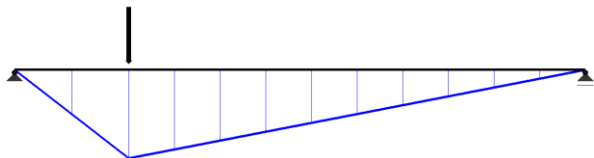
$$V_{Ed,l} = 270,0 \text{ kN} \cdot 8 \text{ m} / 10 \text{ m} = 216,0 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,r} = 270,0 \text{ kN} - 216,0 \text{ kN} = 54,0 \text{ kN}$$



$$M_{Ed,Mitte} = 54,0 \text{ kN} \cdot 5 \text{ m} = 270,0 \text{ kNm}$$

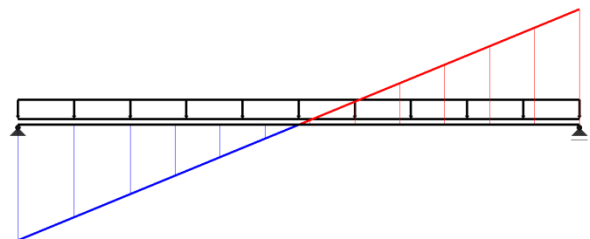
$$M_{Ed,Einzellast} = 216,0 \text{ kN} \cdot 2 \text{ m} = 432,0 \text{ kNm}$$



infolge Streckenlast

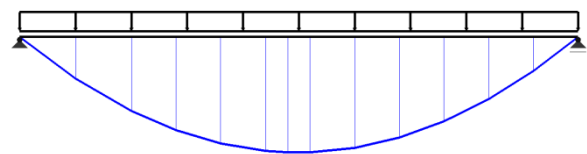
$$V_{Ed,l} = V_{Ed,r} = 34,2 \text{ kN/m} \cdot 10 \text{ m} / 2 = 171,0 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,Einzellast} = 171,0 \text{ kN} \cdot 3 \text{ m} / 5 \text{ m} = 102,6 \text{ kN}$$



$$M_{Ed,Mitte} = 34,2 \text{ kN/m} (10 \text{ m})^2 / 8 = 427,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,Einzellast} = 171,0 \text{ kN} \cdot 2 \text{ m} - 34,2 \text{ kN/m} \cdot (2 \text{ m})^2 / 2 = 273,6 \text{ kNm}$$

**Gesamteinwirkungen**

$$V_{Ed,max} = 216,0 \text{ kN} + 171,0 \text{ kN} = \boxed{387,0 \text{ kN}}$$

$$V_{Ed,Einzellast} = 216 \text{ kN} + 102,6 \text{ kN} = 318,6 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,Mitte,max} = 270 \text{ kNm} + 427,5 \text{ kNm} = 697,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,Einzellast,max} = 432 \text{ kNm} + 273,6 \text{ kNm} = \boxed{705,6 \text{ kNm}}$$

Bestimmung der mittragenden Breite

$$b_0 = 0 \text{ cm (einreihig, siehe Skizze)}$$

$$b_1 = b_2 = 150 \text{ cm}$$

$$L_e = 1,0 \cdot L = 1,0 \cdot 1000 \text{ cm} = 1000 \text{ cm (Einfeldträger)}$$

$$b_{e,i} = L_e / 8 = 125 \text{ cm} < b_{vorh} = 150 \text{ cm}$$

$$b_{eff} = \sum b_{e,i} + b_0 = 2 \cdot 125 \text{ cm} + 0 \text{ cm} = 250 \text{ cm}$$

Bestimmung der Lage der plastischen Nulllinie

Stahlträger

$$z_a = h_a / 2 + h_c = 45 \text{ cm} / 2 + 12,5 \text{ cm} = 35,0 \text{ cm}$$

$$N_{pl,a} = A_a \cdot f_{yd} = 98,8 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 2\,321,8 \text{ kN}$$

Betongurt

$$A_c = b_{eff} \cdot h_c = 250 \text{ cm} \cdot 12,5 \text{ cm} = 3\,125 \text{ cm}^2$$

$$N_{cf} = A_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} = 3\,125 \text{ cm}^2 \cdot 0,85 \cdot 2,0 \text{ kN/cm}^2 = 5\,312,5 \text{ kN}$$

Da $N_{cf} > N_{pl,a} \rightarrow$ Plastische Nulllinie im Betongurt

Da der Stahlträger komplett auf Zug beansprucht wird, ist er Querschnittsklasse 1 zuzuordnen!

 \rightarrow Plastische Bemessung ist zulässig.

$$x_{pl} = \frac{N_{pl,a}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{2\,321,8 \text{ kN}}{0,85 \cdot 2,0 \text{ kN/cm}^2 \cdot 250 \text{ cm}} = 5,46 \text{ cm} < 12,5 \text{ cm} \quad \checkmark$$

Querkraftnachweis

Bei unausgesteiften Trägern besteht Schubbeulgefahr, falls:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon \quad \text{mit} \quad \eta = 1,2 \text{ bis S460} \quad \text{und} \quad \varepsilon = \sqrt{235/f_{yk}} = \sqrt{235/235} = 1,0$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{h - 2 \cdot t_f}{t_w} = \frac{45 \text{ cm} - 2 \cdot 1,46 \text{ cm}}{0,94 \text{ cm}} = 44,8 < \frac{72}{1,2} \cdot 1,0 = 60 \rightarrow \text{keine Schubbeulgefahr}$$

$$A_{vz} = a_{vz} \cdot A_a = 0,5145 \cdot 98,8 \text{ cm}^2 = 50,83 \text{ cm}^2 \quad (\text{mit } a_{vz} \text{ aus Formelsammlung})$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 50,83 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \text{ kN}}{\text{cm}^2} = 689,6 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,max} / V_{pl,Rd} = 387,0 \text{ kN} / 689,6 \text{ kN} = 0,56 < 1 \quad \checkmark$$

Da $V_{Ed} / V_{pl,Rd} > 0,5$: Momenten-Querkraft-Interaktion wäre hier erforderlich! Allerdings ist kein Moment vorhanden.

$$V_{Ed,Einzellast} / V_{pl,Rd} = 318,6 \text{ kN} / 689,6 \text{ kN} = 0,46 < 1 \quad \checkmark$$

Da $V_{Ed} / V_{pl,Rd} < 0,5$: Keine Momenten-Querkraft-Interaktion erforderlich!

Auch links von der Einzellast wird M-V-Interaktion nicht maßgebend sein, da dort das Moment zum Auflager hin wesentlich stärker abnimmt als die Querkraft zunimmt; zudem ist die Abminderung der Momententragfähigkeit infolge gleichzeitig wirkender Querkraft erst bei hohen Querkraftauslastungen stark (hier maximale Querkraftausnutzung von 56 % am Auflager).

Ermittlung der plastischen Tragfähigkeit des Verbundträgers

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left(z_a - \frac{x_{pl}}{2} \right) = 2\,321,8 \text{ kN} \cdot \left(35,0 \text{ cm} - \frac{5,46 \text{ cm}}{2} \right) = 74\,924 \text{ kNcm}$$

Aus obigen Überlegungen keine M-V-Interaktion.

Nachweis der Momententragfähigkeit:

$$M_{Ed,max} / M_{pl,Rd} = 705,6 \text{ kNm} / 749,2 \text{ kNm} = 0,942 < 1 \quad \checkmark$$

Nachweis der Verbundfuge

$$\text{Bedingung für äquidistante Verteilung: } \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \geq 0,4$$

$$M_{pl,a,Rd} = 400 \text{ kNm (IPE 450, S235)} \quad \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{400 \text{ kNm}}{749,2 \text{ kNm}} = 0,53 \geq 0,4 \quad \checkmark$$

$$P_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot 1,25} \text{ (Stahldübelversagen)} \\ \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{1,5} \text{ (Betonversagen)} \end{array} \right\}$$

Duktiler Kopfbolzen?

$$h \geq 4 \cdot d? \quad 8 \text{ cm} \geq 4 \cdot 1,9 \text{ cm} = 7,6 \text{ cm} \quad \checkmark$$

$$16 \text{ mm} \leq d = 19 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$f_u = 450 \text{ N/mm}^2 \leq 500 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark$$

$$\alpha = \begin{cases} 0,2 \cdot \left[\left(\frac{h_{sc}}{d} \right) + 1 \right] & \text{für } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4 \\ 1 & \text{für } \frac{h_{sc}}{d} > 4 \end{cases}$$

$$\frac{h_{sc}}{d} = \frac{8 \text{ cm}}{1,9 \text{ cm}} = 4,21 > 4 \rightarrow \alpha = 1$$

$$P_{Rd} = \min \left\{ \frac{0,8 \cdot 45 \text{ kN/cm}^2 \cdot \pi \cdot (1,9 \text{ cm})^2}{4 \cdot 1,25}, \frac{0,29 \cdot 1 \cdot (1,9 \text{ cm})^2 \cdot \sqrt{3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 3 \cdot 300 \text{ kN/cm}^2}}{1,5} \right\} = \min \left\{ \begin{matrix} 81,6 \text{ kN} \\ 69,4 \text{ kN} \end{matrix} \right\} = 69,4 \text{ kN}$$

Ermittlung der Bemessungslängsschubkraft:

$$V_L = \min \left\{ \begin{matrix} N_{pl,a} = 2 \, 321,8 \text{ kN} \\ N_{cf} = 5 \, 312,5 \text{ kN} \end{matrix} \right\} = 2 \, 321,8 \text{ kN}$$

Diese Längsschubkraft muss über die halbe Trägerlänge übertragen werden können!

Anzahl der erforderlichen Dübel bei voller Verdübelung:

$$n = \frac{V_L}{P_{Rd}} = \frac{2 \, 321,8 \text{ kN}}{69,4 \text{ kN}} = 33,5 \rightarrow \text{Es sind insgesamt } 34 \text{ Dübel erforderlich.}$$

Überprüfen der Zulässigkeit einer teilweisen Verdübelung:

Mindestverdübelungsgrad:

$$L_e = 1000 \text{ cm} \leq 25 \text{ m} : \quad \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]} \right) \cdot (0,75 - 0,03 \cdot L_e [\text{m}]) \geq 0,40$$

$$\eta \geq 1 - \left(\frac{355 \frac{N}{\text{mm}^2}}{235 \frac{N}{\text{mm}^2}} \right) \cdot (0,75 - 0,03 \cdot 10 \text{ m}) = 0,32 \geq 0,40 \rightarrow \eta = 0,40$$

Mindestverdübelung um Tragfähigkeitsnachweis einzuhalten:

Mit $M_{Ed} = M_{Rd, \text{erforderlich}}$:

$$\eta_{erf} = \frac{M_{Ed} - M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}} = \frac{705,6 \text{ kNm} - 400 \text{ kNm}}{749,2 \text{ kNm} - 400 \text{ kNm}} = 0,88$$

Gewählter Verdübelungsgrad $\eta_{gew} = \max(0,40; 0,88) = 0,88$

Anzahl der erforderlichen Dübel $\eta_{gew} \cdot n = 0,88 \cdot 33,5 = 29,5 \rightarrow 30$ Dübel notwendig.

Bestimmung der minimal und maximal erlaubten Dübelabstände:

Längsrichtung

$$e_{l,min} = 5 \cdot d = 5 \cdot 1,9 \text{ cm} = 9,5 \text{ cm}$$

$$e_{l,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6 \cdot h_c = 6 \cdot 12,5 \text{ cm} = 75 \text{ cm} \\ 80 \text{ cm} \end{array} \right\} = 75 \text{ cm}$$

Brücken : $4 \cdot h_c$
allgemeiner Hochbau: $6 \cdot h_c$

Anordnung der Dübel in einer Reihe:

$$e_l = \frac{L/2}{n} = \frac{500 \text{ cm}}{30} = 16,7 \text{ cm}$$

$$\text{Gewählt: } e_l = 16,7 \text{ cm} \left\{ \begin{array}{l} \leq e_{l,max} = 75 \text{ cm} \\ \geq e_{l,min} = 9,5 \text{ cm} \end{array} \right. \checkmark$$

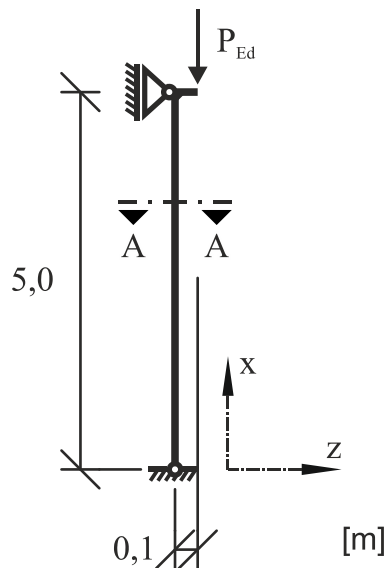
Aufgabe 2

20 Punkte

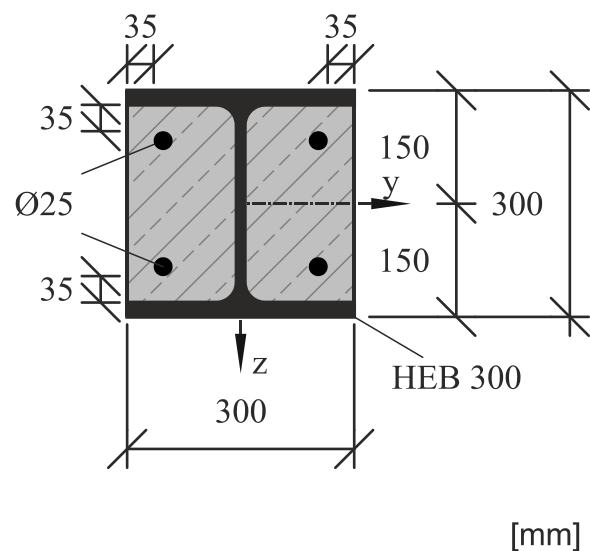
gegeben:

- Verbundstützenquerschnitt und statisches System unter Last gemäß Skizze:

Statisches System



Schnitt A-A



- Material:
 - Beton C 50/60
 - Betonstahl BSt 500 S
 - Baustahl S 460
- Querschnittswerte

| | h | b | t _f | t _w | r | A | I _y |
|----------------|------|------|----------------|----------------|------|--------------------|--------------------|
| | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [cm ²] | [cm ⁴] |
| HEB 300 | 300 | 300 | 19,0 | 11,0 | 27,0 | 149,0 | 25170 |

- Belastung:
 - Einzellast: $P_{Ed} = 5000 \text{ kN}$

gesucht:

- a) Überprüfen Sie, ob die abgebildete Stütze als Verbundstütze bemessen werden darf.
- b) Weisen Sie die Verbundstütze im Grenzzustand der Tragfähigkeit infolge der Einzellast P_{Ed} nach.

Hinweise:

- Der Einfluss aus Kriechen und Schwinden kann vernachlässigt werden.
- Das Langzeitverhalten des Betons ist nicht zu berücksichtigen.
- Geometrische und strukturelle Imperfektionen sind nicht zu berücksichtigen.
- Das Eigengewicht der Konstruktion ist nicht zu berücksichtigen.
- Das Knicken um die z-Achse ist zu vernachlässigen.
- Die Einflüsse aus Theorie II. Ordnung sind wie folgt zu berücksichtigen:

$$(EI)_{eff,II} = 0,9 \cdot (E_a I_a + E_s I_s + 0,5 \cdot E_{cm} I_c)$$

$$M_{Ed,II} = k \cdot M_{Ed,I}$$

mit:

$$k = \frac{0,66}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1,0$$

Musterlösung Aufgabe 2**20 Punkte****Berechnung der Schnittgrößen**

- Einwirkungen:

$$P_{Ed} = 5000,0 \quad [\text{kN}]$$

$$\begin{aligned} N_{Ed} &= P_{Ed} \\ &= 5000,0 \quad [\text{kNm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= P_{Ed} \cdot e \\ &= 5000,0 \cdot 0,1 \\ &= 500,0 \quad [\text{kNm}] \end{aligned}$$

Lastausmitte:

$$e = 0,10 \quad [\text{m}]$$

Ermittlung der Querschnittswerte

- Baustahl: HEB 300

$$h = 300 \quad [\text{mm}]$$

$$b = 300 \quad [\text{mm}]$$

$$t_w = 11,0 \quad [\text{mm}]$$

$$t_f = 19,0 \quad [\text{mm}]$$

$$A_a = 149,0 \quad [\text{cm}^2]$$

$$I_{a,y} = 25170 \quad [\text{cm}^4]$$

$$E_a = 21000 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

aus Tabellenwerk:

z.B. 20. SBT, Tafel
8.169

- Betonstahl: 4 \varnothing 25

$$c_{nom} = 35 \quad [\text{mm}]$$

$$\begin{aligned} A_s &= \pi \cdot \frac{d^2}{4} \\ &= \pi \cdot \frac{6,25}{4} \\ &= 4,9 \quad [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

ein Bewehrungsstab

$$\begin{aligned} I_{s,y} &= 4 \cdot \left[\pi \cdot \frac{r^4}{4} + A_s \cdot \left(\frac{h_c}{2} - t_f - c_{nom} - r \right)^2 \right] \\ &= 4 \cdot \left[\pi \cdot \frac{2,441}{4} + 4,9 \cdot \left(\frac{30,0}{2} - 1,9 - 3,5 - 1,25 \right)^2 \right] \\ &= 1377 \quad [\text{cm}^4] \end{aligned}$$

$$E_s = 21000 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

• Beton:

$$h_c = 300 \quad [\text{mm}]$$

$$b_c = 300 \quad [\text{mm}]$$

$$\begin{aligned} A_c &= b_c \cdot h_c \\ &= 300 \cdot 300 \\ &= 900,0 \quad [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{c,y} &= b_c \cdot \frac{h_c^3}{12} \\ &= 300 \cdot \frac{27000}{12} \\ &= 67500 \quad [\text{cm}^4] \end{aligned}$$

$$E_{cm} = 3700 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

EN 1992-1-1, Tab. 3.1

Ermittlung der Bemessungswerte der Werkstofffestigkeiten

• Baustahl: S 460

$$\begin{aligned} f_{yd} &= \frac{f_{yk}}{\gamma_{Mo}} \\ &= \frac{460,0}{1,0} \\ &= 460,00 \quad [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

• Betonstahl: BSt 500 S

$$\begin{aligned} f_{sd} &= \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \\ &= \frac{50,0}{1,15} \\ &= 435,0 \quad [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

• Beton: C 50/60

$$\begin{aligned} f_{cd} &= \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \\ &= \frac{50,0}{1,5} \\ &= 33,3 \quad [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

Überprüfung der Bemessung als Verbundstütze

• Festigkeitsklasse

$$\text{Beton: } C 20/25 \leq C 50/60 \leq C 50/60$$

$$\text{Baustahl: } S 235 \leq S 460 \leq S 460$$

EN 1994-1-1, Kap. 6.7.1(2)

✓

✓

- Querschnittsparameters δ

EN 1994-1-1, Kap. 6.7.1(4)

$$\begin{aligned} N_{pl,Rd} &= A_a \cdot f_{yd} + 0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd} \\ &= 149 \cdot 46,0 + 0,85 \cdot 900 \cdot 3,3 + 20 \cdot 43,5 \\ &= 10255,6 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

EN 1994-1-1, Gl. (6.30)

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \\ &= \frac{149 \cdot 46,0}{10256} \\ &= 0,668 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

EN 1994-1-1, Gl. (6.38)

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9$$

$$0,2 \leq 0,668 \leq 0,9$$

✓

→ Stütze darf als Verbundquerschnitt bemessen werden!

Überprüfung der Anwendungsgrenzen des vereinfachten Nachweisverfahren

EN 1994-1-1, Kap. 6.7.3.1

- doppelsymmetrischer Verbundquerschnitt

✓

- über die Bauteillänge konstanter Verbundquerschnitt

✓

- maximale rechnerisch zu Berücksichtigende Betondeckung

$$c_z = 0 \quad [\text{mm}] \leq \begin{matrix} \uparrow \\ 0,3 \end{matrix} \cdot h_c = 90 \quad [\text{mm}] \quad \checkmark$$

$$c_y = 0 \quad [\text{mm}] \leq \begin{matrix} \uparrow \\ 0,4 \end{matrix} \cdot b_c = 120 \quad [\text{mm}] \quad \checkmark$$

- bezogener Schlankheitsgrad

$$\begin{aligned} N_{pl,Rk} &= A_a \cdot f_{yk} + 0,85 \cdot A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_{sk} \\ &= 149 \cdot 46,0 + 0,85 \cdot 900 \cdot 5,0 + 20 \cdot 50,0 \\ &= 11660,7 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

EN 1994-1-1, Gl. (6.40)

$$\begin{aligned} (EI_y)_{eff} &= E_a \cdot I_{a,y} + E_s \cdot I_{s,y} + K_e \cdot E_{cm} \cdot I_{c,y} \\ &= 21000 \cdot 25170 + 21000 \cdot 1377 + 0,6 \cdot 3700 \cdot 67500 \\ &= 70733 \quad [\text{kNcm}^2] \cdot 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{cr} &= \frac{(EI_y)_{eff} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} \\ &= \frac{70733 \cdot \pi^2}{25,0} \\ &= 27924,3 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

Euler-Fall 2:

$$0,0H=L_{cr}= 5,00 \quad [\text{m}]$$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \sqrt{\left(\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}} \right)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{11661}{27924} \right)} \quad ! \\ &= 0,646 \quad [-] \quad \leq \quad 2,0 \quad [-]\end{aligned}$$

→ Grenze eingehalten!

✓

- vorhandene Längsbewehrung

$$\begin{aligned}\rho_s &= \frac{4 \cdot A_s}{A_c} \\ &= \frac{4 \cdot 19,6}{900} \quad ! \\ &= 2,18 \quad [\%] \quad \leq \quad 6,0 \quad [\%]\end{aligned}$$

→ Grenze eingehalten!

✓

- Verhältnis von Querschnittshöhe zu -breite

$$\begin{aligned}0,2 &\leq \frac{h}{b} \leq 5,0 \\ 0,2 &\leq \frac{30,0}{30,0} \leq 5,0 \\ 0,2 &\leq 1,0 \leq 5,0\end{aligned}$$

→ Grenze eingehalten!

✓

→ Bemessung der Verbundstütze mit vereinfachtem Nachweisverfahren möglich!

Nachweis gegen örtliches Beulen

EN 1994-1-1, Kap. 6.7.1[9]

$$\begin{aligned}\max\left(\frac{b}{t_f}\right) &= 44 \cdot \sqrt{\left(\frac{235}{f_{yk}}\right)} \\ &= 44 \cdot \sqrt{\left(\frac{235}{460}\right)} \\ &= 31,449 \quad [-]\end{aligned}$$

EN 1994-1-1, Tab. 6.3

$$\begin{aligned}\left(\frac{b}{t_f}\right)_{\text{vorh.}} &= \frac{300}{19} \\ &= 15,789 \quad [-]\end{aligned}$$

→ Der Nachweis gegen örtliches Beulen darf entfallen!

Überprüfe, ob Stütze stabilitätsgefährdet

Es besteht keine Stabilitätsgefahr, wenn:

- $\bar{\lambda} \leq 0,2$
 $\bar{\lambda}_{\text{vorh}} = 0,646$
- $N_{\text{Ed}} \leq 0,04 \cdot N_{\text{cr}}$
 $5000 \leq 1116,97$

→ Die Stabilität der Stütze muss nachgewiesen werden!

Ermittlung des Reduktionsfaktors χ

- Imperfektionsfaktor α
 teilweise einbetonierter I-Querschnitt → (Nickspannungslinie) b
 $\alpha = 0,34$ [-]

- Funktion zur Bestimmung des Abminderungsbeiwertes Φ

$$\begin{aligned}\Phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,65 - 0,2) + 0,42] \\ &= 0,785 \quad [-]\end{aligned}$$

- Reduktionsfaktor χ

$$\begin{aligned}\chi &= \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \\ &= \frac{1}{0,78 + \sqrt{0,62 - 0,42}} \\ &= 0,813 \quad [-]\end{aligned}$$

Tragfähigkeitsnachweis für planmäßig zentrischen Druck (schwache Achse)

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{\chi \cdot N_{\text{pl,Rd}}} = \frac{5000}{0,813 \cdot 10256} = 0,600 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Bestimmung der angenäherten Interaktionskurve (starke Achse)

- Punkt A

$$\begin{aligned}N_A &= N_{\text{pl,Rd}} = 10255,6 \quad [\text{kN}] \\ M_A &= 0,0 \quad [\text{kNm}]\end{aligned}$$

- Punkt B

$$\begin{aligned}N_B &= 0,0 \quad [\text{kN}] \\ M_B &= M_{\text{pl,Rd}} \quad [\text{kNm}]\end{aligned}$$

EN 1993-1-1, Kap. 6.3.1.2

EN 1994-1-1, Tab. 6.5

EN 1993-1-1, Tab. 6.1

EN 1993-1-1, Gl. (6.49)

EN 1994-1-1, Gl. (6.44)

EN 1994-1-1, Bild 6.19

Annahme: Nulllinie liegt im Steg des Baustahlprofils

$$\begin{aligned} N_{pl,a} &= A_a \cdot f_{yd} \\ &= 149,0 \cdot 46,0 \\ &= 6854,0 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_f &= 2 \cdot b \cdot t_f \cdot f_{yd} \\ &= 2 \cdot 30,0 \cdot 1,9 \cdot 46,0 \\ &= 5244,0 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{s,i} &= 2 \cdot A_s \cdot f_{sd} \\ &= 2 \cdot 4,9 \cdot 43,5 \\ &= 427,1 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

eine Bewehrungslage

$$\begin{aligned} x_{pl} &= \frac{N_{pl,a} - N_f + 2 \cdot t_w \cdot t_f \cdot f_{yd}}{0,85 \cdot b_c \cdot f_{cd} + 2 \cdot t_w \cdot f_{yd}} \\ &= \frac{6854 - 5244 + 2 \cdot 1,1 \cdot 1,9 \cdot 46}{0,85 \cdot 30,0 \cdot 3,3 + 2 \cdot 1,1 \cdot 46} \\ &= 9,68 \quad [\text{cm}] \geq t_f = 1,9 \quad [\text{cm}] \quad \checkmark \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{c,f} &= 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x_{pl} \\ &= 0,85 \cdot 3,3 \cdot 30,0 \cdot 9,7 \\ &= 822,3 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_w &= 2 \cdot f_{yd} \cdot t_w \cdot (x_{pl} - t_f) \\ &= 2 \cdot 46,0 \cdot 1,1 \cdot (9,7 - 1,9) \\ &= 787,7 \quad [\text{kN}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{s,s,1,3} &= \frac{h_c}{2} - t_f - c_{nom} - \frac{d_s}{2} \\ &= \frac{30,0}{2} - 1,9 - 3,5 - \frac{2,5}{2} \\ &= 8,35 \quad [\text{cm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd} &= 2 \cdot N_{s,i} \cdot z_{s,s,1,3} + N_{c,f} \cdot \left(\frac{h_c}{2} - \frac{x_{pl}}{2} \right) \\ &\quad + N_f \cdot \left(\frac{h_a}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + N_w \cdot \left(\frac{h_a}{2} - \frac{x_{pl}}{2} - \frac{t_f}{2} + c_z \right) \\ &= 2 \cdot 427 \cdot 8,4 + 822,3 \cdot \left(\frac{30,0}{2} - \frac{9,7}{2} \right) \\ &\quad + 5244 \cdot \left(\frac{30,0}{2} - \frac{1,9}{2} \right) + 788 \cdot \left(\frac{30,0}{2} - \frac{9,7}{2} - \frac{1,9}{2} + 0,0 \right) \\ &= 96416,41 \quad [\text{kNcm}] = 964,16 \quad [\text{kNm}] \end{aligned}$$

Momentensumme um den Verbundstützenschwerpunkt

• Punkt C

$$N_C = N_{pm,Rd}$$

$$M_C = M_{pl,Rd} = 964,16 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{pm,Rd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot A_c$$

$$= 0,85 \cdot 3,3 \cdot 900$$

$$= 2547,45 \quad [\text{kN}] \leq 5000,00 \quad [\text{kN}]$$

$$\rightarrow M_{pl,N,Rd} = 657,39 \quad [\text{kNm}]$$

mit Strahlensatz

Überprüfe die Berechnung nach Theorie I. Ordnung

Berechnung nach Theorie I. Ordnung, wenn:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} \geq 10$$

$$= \frac{27924,3}{5000}$$

$$= 5,58 \quad [-]$$

→ Berechnung nach Theorie II. Ordnung erforderlich

Momentenbeanspruchung nach Theorie II. Ordnung

EN 1994-1-1, Gl. (6.40)

$$(EI_y)_{eff,II} = K_e \cdot (E_a \cdot I_{a,y} + E_s \cdot I_{s,y} + K_{e,II} \cdot E_{cm} \cdot I_{c,y})$$

$$= 0,9 \cdot (21000 \cdot 25170 + 21000 \cdot 1377 + 0,5 \cdot 3700 \cdot 67500)$$

$$= 61412 \quad [\text{kNcm}^2] \cdot 10^4$$

$$N_{cr,II} = \frac{(EI)_{eff,II} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2}$$

$$= \frac{61412 \cdot \pi^2}{25,0^2}$$

$$= 24244,5 \quad [\text{kN}]$$

$$k = \frac{0,66}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}}$$

$$= \frac{0,66}{1 - \frac{5000}{24244}}$$

$$= 0,83 \quad [-] \geq 1,0$$

$$\begin{aligned} M_{Ed,II} &= k \cdot M_{Ed} \\ &= 1,00 \cdot 500 \\ &= 500,00 \quad [\text{kNm}] \end{aligned}$$

Tragfähigkeitsnachweis für Druck und einachsige Biegung (starke Achse)

$$\begin{aligned} \frac{M_{Ed,II}}{M_{pl,N,Rd}} &\leq \alpha_M \\ \frac{500,0}{657,4} &\leq 0,8 \\ 0,76 &\leq 0,8 \quad \checkmark \end{aligned}$$

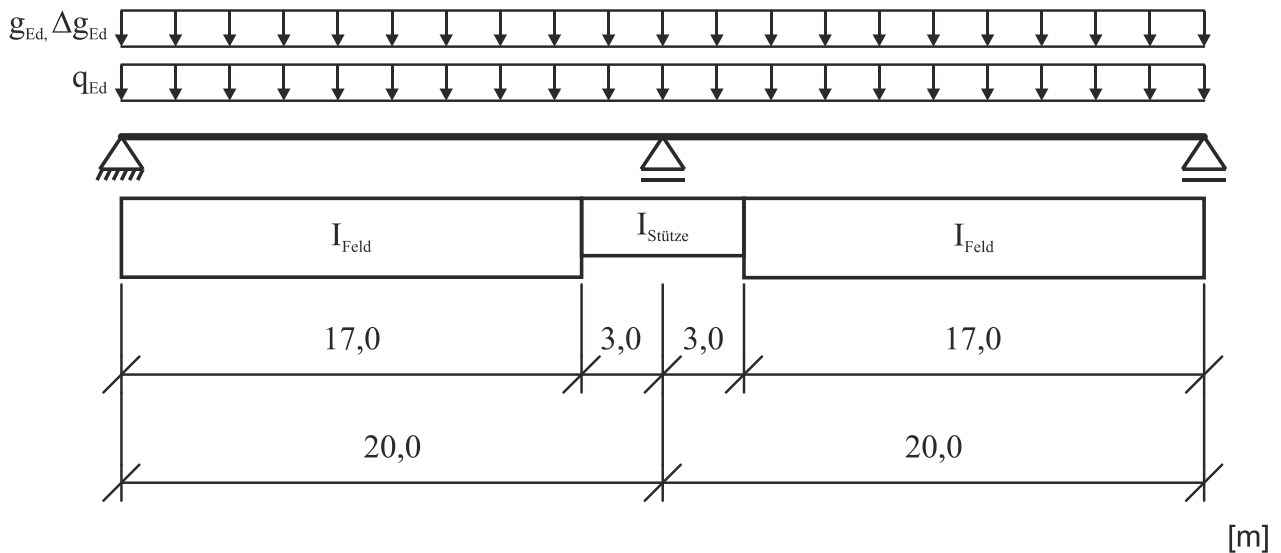
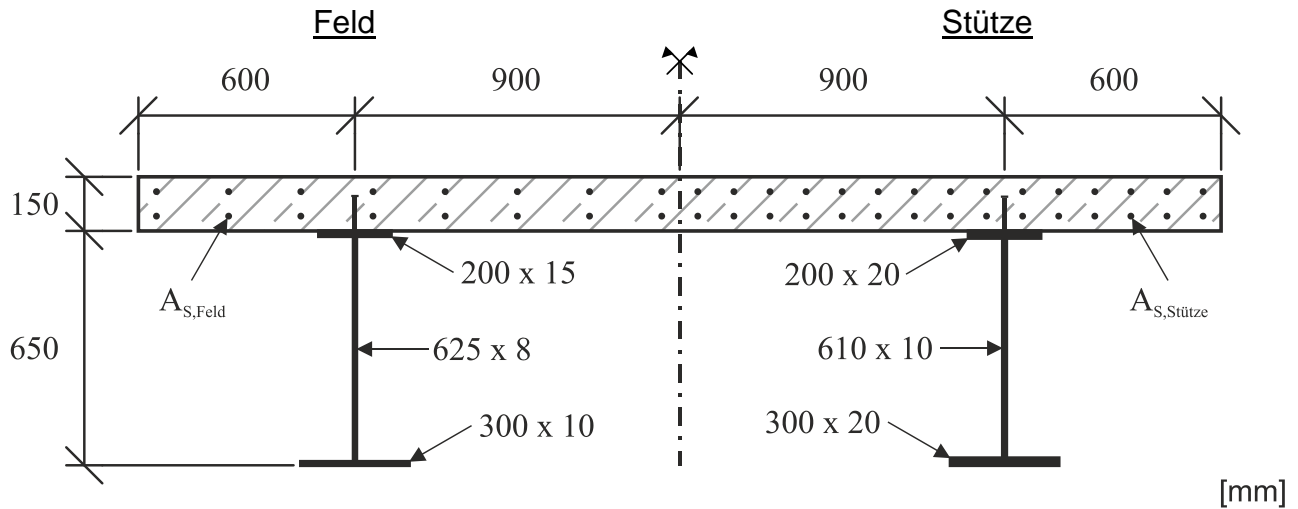
$$\alpha_H = 0,80 \quad [\text{m}]$$

Aufgabe 3

22 Punkte

gegeben:

- Fußgängerbrücke in Verbundbauweise und statisches System unter Last gemäß Skizze:



- Material:

- Beton C 35/45
- Betonstahl BSt 500 S
- Baustahl S 355

– Querschnittswerte – Stahl

| Querschnitt | Z_a | A_a | I_a | Z_{st} | A_{st} | I_{st} |
|---------------|-------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|
| | [cm] | [cm ²] | [cm ⁴] | [cm] | [cm ²] | [cm ⁴] |
| Feld | 40,2 | 110 | 77077 | 34,8 | 127,0 | 101311 |
| Stütze | 43,9 | 161 | 115859 | 36,3 | 194,8 | 169995 |

– Verbundquerschnittswerte – Feld

| Beanspruchung | $n_{i(t_0=1)}$ | $n_{i(t_0=60)}$ | $Z_{i(t_0=1)}$ | $Z_{i(t_0=60)}$ | $S_{i(t_0=1)}$ | $S_{i(t_0=60)}$ | $I_{i(t_0=1)}$ | $I_{i(t_0=60)}$ |
|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | [-] | [-] | [cm] | [cm] | [cm ³] | [cm ³] | [cm ⁴] | [cm ⁴] |
| zeitlich konstant (Index P) | - | 18,0 | - | 17,6 | - | 2483 | - | 179661 |
| Schwinden (Index S) | 17,0 | - | 17,1 | - | 2537 | - | 182020 | - |
| Kriechen (Index PT) | 17,0 | 12,1 | 17,1 | 14,2 | 2537 | 2862 | 182020 | 195766 |

– Verbundquerschnittswerte – Stütze

| Beanspruchung | $n_{i(t_0=1)}$ | $n_{i(t_0=60)}$ | $Z_{i(t_0=1)}$ | $Z_{i(t_0=60)}$ | $S_{i(t_0=1)}$ | $S_{i(t_0=60)}$ | $I_{i(t_0=1)}$ | $I_{i(t_0=60)}$ |
|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | [-] | [-] | [cm] | [cm] | [cm ³] | [cm ³] | [cm ⁴] | [cm ⁴] |
| zeitlich konstant (Index P) | - | 18,0 | - | 22,2 | - | 3483 | - | 272321 |
| Schwinden (Index S) | 17,0 | - | 21,7 | - | 3562 | - | 275997 | - |
| Kriechen (Index PT) | 17,0 | 12,1 | 21,7 | 18,7 | 3562 | 4057 | 275997 | 297975 |

– Bauablauf:

- Verlegen der durchlaufenden Stahlträger
- Betonage des Betongurtes ohne Hilfsunterstützung, Aushärten
- Aufbringen der Ausbaulast Δg (wirkt ab $t_0 = 60$ d)
- Verkehrsfreigabe

- Belastung:
 - Eigengewicht $g_{Ed} = 8,10 \text{ kN/m}$
 - Ausbaulast $\Delta g_{Ed} = 4,75 \text{ kN/m}$
 - Verkehrslast $q_{Ed} = 12,00 \text{ kN/m}$
- Beiwerte zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens.

Schwinden setzt ab dem Zeitpunkt des Betonaushärtens ein, hier kann dabei $t_0 = 1 \text{ d}$ angenommen werden.

Kriechen setzt erst nach $t = 60 \text{ d}$ infolge der Ausbaulast ein.

 - Schwinddehnung für $t = \infty$: $\epsilon_{cs} = -38,5 \cdot 10^{-5}$

gesucht:

Führen Sie den Spannungsnachweis über der Stütze für das Baustahlprofil zum Zeitpunkt $t = \infty$.

Hinweise:

- Nachweise für den Bauzustand sind nicht zu führen.
- Die gegebene Betongurtbreite entspricht der effektiven Breite.
- Die angegebenen Lasten sind Bemessungswerte.
- Der Beton im Stützbereich ist infolge der Ausbau- und Verkehrslast als gerissen anzusehen.
- Gehen Sie bei Ihren Berechnungen von vollem Verbund aus.
- Der Verbundträger ist im Feld der QKL 2 und über der Stütze der QKL 3 zuzuordnen.
- Es ist nur Kriechen infolge der Ausbaulast zu berücksichtigen.

Musterlösung Aufgabe 3**22 Punkte****Ermittlung der Querschnittswerte**

- Beton:

$$h_c = 150 \quad [\text{mm}]$$

$$b_c = 1500 \quad [\text{mm}]$$

$$\begin{aligned} A_c &= h_c \cdot b_c \\ &= 15 \cdot 150 \\ &= 2250 \quad [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{c,y} &= b_c \cdot \frac{h_c^3}{12} \\ &= 150 \cdot \frac{3375}{12} \\ &= 42188 \quad [\text{cm}^4] \end{aligned}$$

- Baustahl:

aus Aufgabenstellung

| | <u>Feld</u> | |
|---------|-------------|--------------------|
| $h =$ | 65 | [cm] |
| $z_a =$ | 40.2 | [cm] |
| $A_a =$ | 110 | [cm ²] |
| $I_a =$ | 77077 | [cm ⁴] |

| | <u>Stütze</u> | |
|---------|---------------|--------------------|
| $h =$ | 65 | [cm] |
| $z_a =$ | 43.9 | [cm] |
| $A_a =$ | 161 | [cm ²] |
| $I_a =$ | 115859 | [cm ⁴] |

- Gesamtstahl:

aus Aufgabenstellung

| | <u>Feld</u> | |
|------------|-------------|--------------------|
| $z_{st} =$ | 34.8 | [cm] |
| $A_{st} =$ | 127 | [cm ²] |
| $I_{st} =$ | 101311 | [cm ⁴] |

| | <u>Stütze</u> | |
|------------|---------------|--------------------|
| $z_{st} =$ | 36.3 | [cm] |
| $A_{st} =$ | 194.8 | [cm ²] |
| $I_{st} =$ | 169995 | [cm ⁴] |

Ermittlung der ideellen Querschnittswerte

- Elastische Querschnittswerte (kurzzeitbeansprucht)

nur im Feld relevant

$$E_{cm} = 3400 \quad [\text{cm}^4]$$

$$E_a = 21000 \quad [\text{cm}^4]$$

Feldbereich:

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{E_a}{E_{cm}} \\ &= \frac{21000}{3400} \\ &= 6.18 \quad [\text{cm}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{c,0} &= \frac{A_c}{n_0} \\
 &= \frac{2250.0}{6.18} \\
 &= 364.3 \quad [\text{cm}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{c,0} &= \frac{I_c}{n_0} \\
 &= \frac{42188}{6.18} \\
 &= 6830 \quad [\text{cm}^4]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{i,0} &= A_{st} + A_{c,0} \\
 &= 127.0 + 364 \\
 &= 491.3 \quad [\text{cm}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{i,0} &= \frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,0}} \\
 &= \frac{127.0 \cdot 34.8}{491.3} \\
 &= 9.00 \quad [\text{cm}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{i,0} &= A_{c,0} \cdot z_{i,0} \\
 &= 364 \cdot 9.00 \\
 &= 3277.1 \quad [\text{cm}^3]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{i,0} &= I_{st} + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{st} \\
 &= 101311 + 6830 + 3277.1 \cdot 34.8 \\
 &= 222185 \quad [\text{cm}^4]
 \end{aligned}$$

- Zeitlich konstante Beanspruchung: ($t_0 = 60 \text{ d}$)

$$I_{i,P} = 179661 \quad [\text{cm}^4]$$

nur im Feld relevant

- Beanspruchungen aus Schwinden: ($t_0 = 1 \text{ d}$)

$$I_{i,S} = 182020 \quad [\text{cm}^4]$$

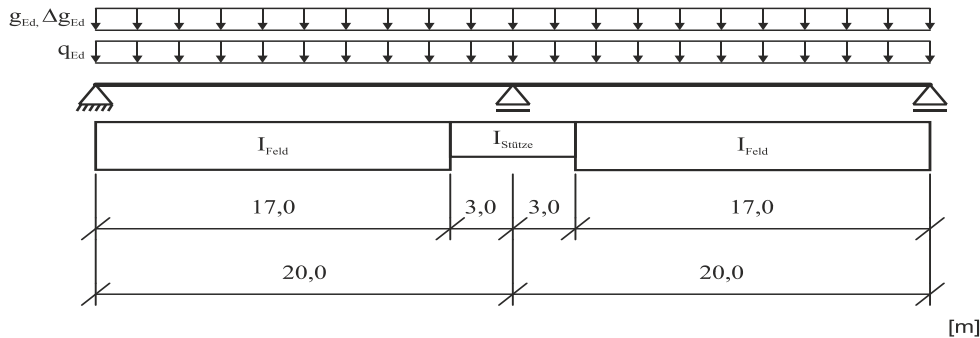
nur im Feld relevant

- Beanspruchungen aus Kriechen:

$$\begin{aligned}
 I_{i,PT} &= 182020 \quad [\text{cm}^4] & (t_0 = 1 \text{ d}) \\
 I_{i,PT} &= 195766 \quad [\text{cm}^4] & (t_0 = 60 \text{ d})
 \end{aligned}$$

nur im Feld relevant

Berechnung des Stützmomentes

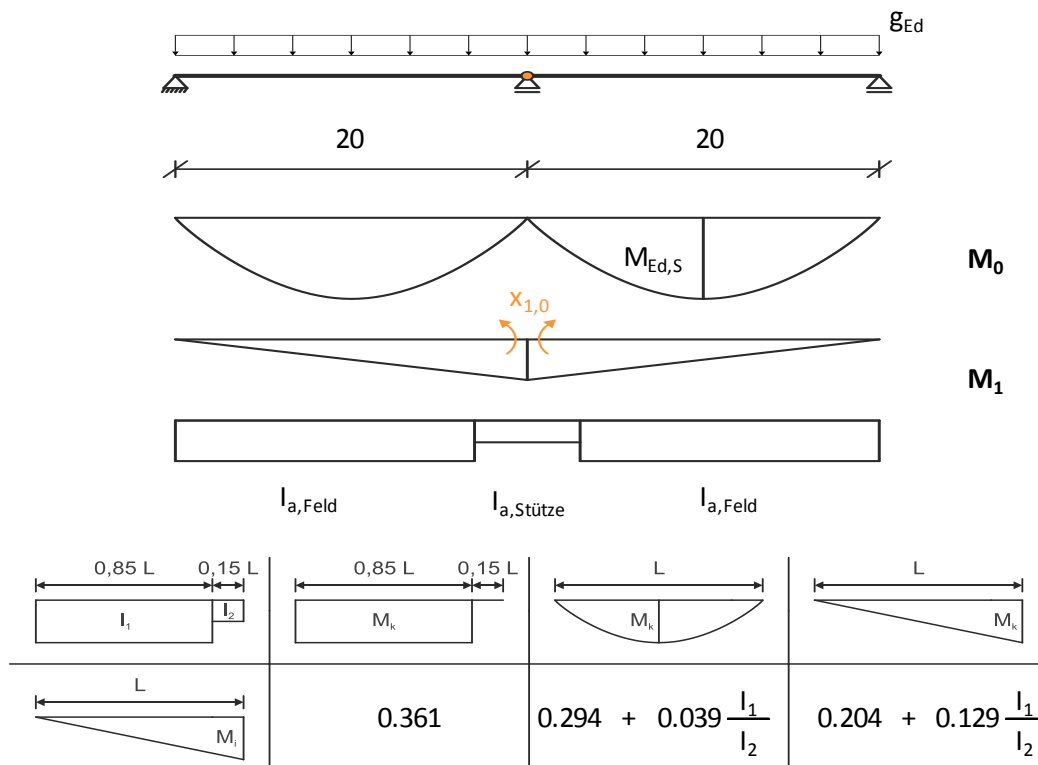


- Einwirkungen:

$$\begin{aligned} g_{Ed} &= 8.1 \quad [\text{kN/m}] \\ \Delta g_{Ed} &= 4.75 \quad [\text{kN/m}] \\ q_{Ed} &= 12 \quad [\text{kN/m}] \end{aligned}$$

- Stützmoment infolge Eigengewicht

Beanspruchung nur auf
Stahlträger



$$E_a I_{a,Feld} \cdot \delta_{10} = 2 \cdot 1.0 \cdot 405 \cdot \left(0.294 + 0.039 \cdot \frac{77077}{115859} \right) \cdot 20$$

$$= 5183.1 \quad [\text{kNm}^2]$$

$$E_a I_{a,Feld} \cdot \delta_{11} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot \left(0.204 + 0.129 \cdot \frac{77077}{115859} \right) \cdot 20$$

$$= 11.59 \quad [\text{m}]$$

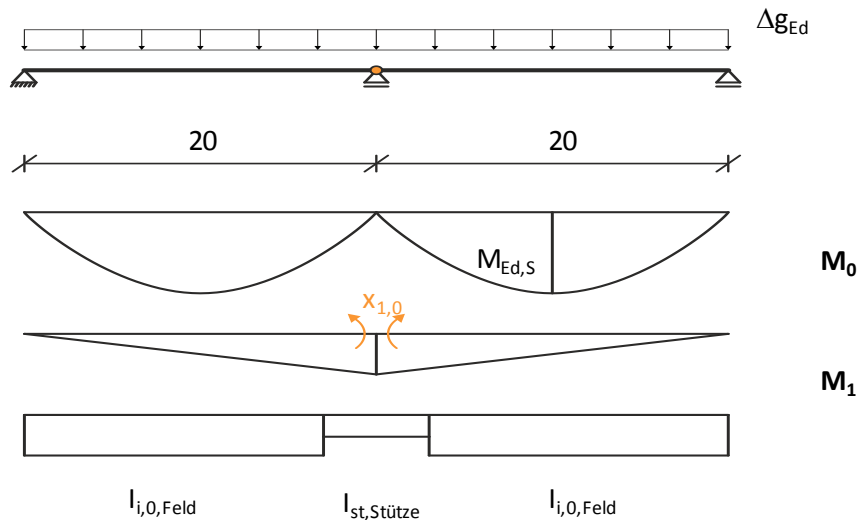
$$x_{1,0} = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{5183.1}{11.59}$$

$$= -447.1 \quad [\text{kNm}]$$

- Stützmoment infolge Ausbaulast:

Beanspruchung auf
Verbundträger

t = 0 (Zustand II)



$$E_a I_{i,0,Feld} \cdot \delta_{10} = 2 \cdot 1.0 \cdot 237.5 \cdot \left(0.294 + 0.039 \cdot \frac{222185}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 3277.2 \quad [\text{kNm}^2]$$

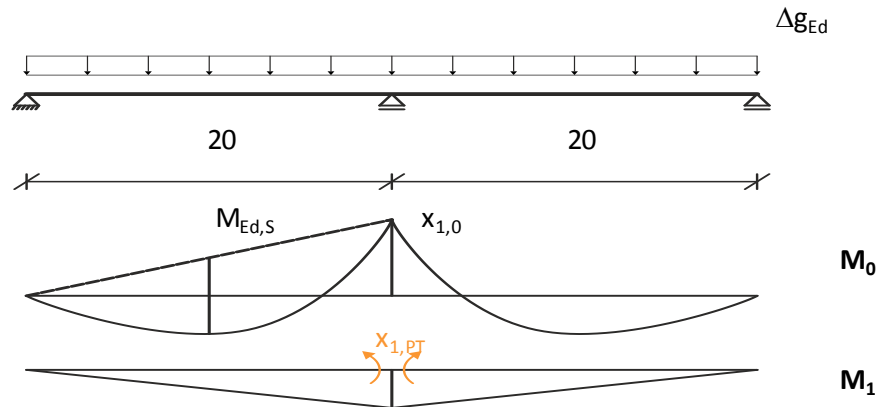
$$E_a I_{i,0,Feld} \cdot \delta_{11} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot \left(0.204 + 0.129 \cdot \frac{222185}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 14.90 \quad [\text{m}]$$

$$x_{1,0} = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{3277.2}{14.90}$$

$$= -219.9 \quad [\text{kNm}]$$

$t = \infty$ (Zustand II)



$$E_a I_{i,P,Feld} \cdot \delta_{10} = 2 \cdot 1.0 \cdot 237.5 \cdot \left(0.294 + 0.039 \cdot \frac{179661}{169995} \right) \cdot 20$$

$$+ 2 \cdot 1.0 \cdot -220 \cdot \left(0.204 + 0.129 \cdot \frac{179661}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 191.1 \quad [\text{kNm}^2]$$

$$E_a I_{i,PT,Feld} \cdot \delta_{11} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot \left(0.204 + 0.129 \cdot \frac{195766}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 14.10 \quad [\text{m}]$$

$$x_{1,PT} = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \cdot \frac{l_{i,PT}}{l_{i,P}} = - \frac{191.1}{14.10} \cdot \frac{195766}{179661}$$

$$= -14.8 \quad [\text{kNm}]$$

$$x_{1,\infty} = x_{1,0} + x_{1,PT}$$

$$= -219.9 + -14.769$$

$$= -234.7 \quad [\text{kNm}]$$

- Stützmoment infolge Verkehr:

Beanspruchung auf
Verbundträger

$t = \infty$ (Zustand II)

$$E_a I_{i,0,\text{Feld}} \cdot \delta_{10} = 2 \cdot 1.0 \cdot 600 \cdot \left(0.294 + 0.039 \cdot \frac{222185}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 8279.4 \quad [\text{kNm}^2]$$

$$E_a I_{i,0,\text{Feld}} \cdot \delta_{11} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot \left(0.204 + 0.129 \cdot \frac{222185}{169995} \right) \cdot 20$$

$$= 14.90 \quad [\text{m}]$$

$$x_{1,0} = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{8279.4}{14.90}$$

$$= -555.5 \quad [\text{kNm}]$$

- Stützmoment infolge Schwinden:

$t = \infty$ (Zustand II)

$$N_s = \varepsilon_{cs} \cdot 10^{-5} \cdot \frac{n_0}{n_s} \cdot E_{cm} \cdot A_c$$

$$= 38.5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{6.176}{17} \cdot 3400 \cdot 2250$$

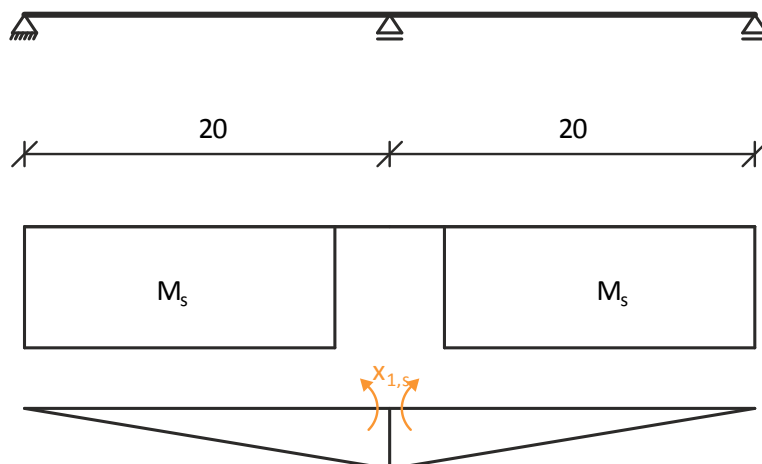
$$= 1070.1 \quad [\text{kN}]$$

$$\varepsilon_{cs} = 38.5 \cdot 10^{-5} [-]$$

$$M_s = N_s \cdot z_{i,s}$$

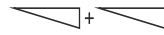
$$= 1070.1 \cdot 17.1$$

$$= 183.0 \quad [\text{kNm}]$$



$$E_a I_{i,S,Feld} \cdot \delta_{10} = 2 \cdot 1.0 \cdot 183.0 \cdot 0.361 \cdot 20$$

$$= 2642.3 \quad [\text{kNm}^2]$$



$$E_a I_{i,S,Feld} \cdot \delta_{11} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot (0.204 + 0.129 \cdot \frac{182020}{169995}) \cdot 20$$

$$= 13.69 \quad [\text{m}]$$

$$x_{1,S} = - \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{2642.3}{13.69}$$

$$= -193.1 \quad [\text{kNm}]$$

- Zusammenstellung der Momente: ($t = \infty$)

$$M_{a,t=\infty} = -447.1 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{c,t=\infty} = -234.7 \quad [\text{kNm}]$$

$$+ -555.5 \quad [\text{kNm}]$$

$$+ -193.1 \quad [\text{kNm}]$$

$$= -983.2 \quad [\text{kNm}]$$

- Spannungen im Baustahl: ($t = \infty$)

$$\sigma_{\text{oben},\infty} = \frac{M_{a,t=\infty}}{I_{a,\text{Stütze}}} \cdot \left(z_a - \frac{h_c}{2} \right) + \frac{M_{c,t=\infty}}{I_{st,\text{Stütze}}} \cdot \left(z_{st} - \frac{h_c}{2} \right)$$

$$= \frac{-447.1}{115859} \cdot \left(43.9 - \frac{15}{2} \right) + \frac{-983.2}{169995} \cdot \left(36.3 - \frac{15}{2} \right)$$

$$= 30.7 \frac{[\text{kN}]}{[\text{cm}^2]} \leq 35.5 \frac{[\text{kN}]}{[\text{cm}^2]} \quad \checkmark$$

$$\sigma_{\text{unten},\infty} = \frac{M_{a,t=\infty}}{I_{a,\text{Stütze}}} \cdot (h_{\text{ges}} - z_a) + \frac{M_{c,t=\infty}}{I_{st,\text{Stütze}}} \cdot (h_{\text{ges}} - z_{st})$$

$$= \frac{-447.1}{115859} \cdot (72.5 - 43.9) + \frac{-983.2}{169995} \cdot (72.5 - 36.3)$$

$$= -32.0 \frac{[\text{kN}]}{[\text{cm}^2]} \leq 35.5 \frac{[\text{kN}]}{[\text{cm}^2]} \quad \checkmark$$