

Modulprüfung SoSe 2023

Teil 2: Stahl- und Verbundtragwerke

Prüfungszeit 120 Minuten

Prof. Dr.-Ing. habil. Marcus Rutner

Institut für Metall- und Verbundbau

Hamburg, den 20. September 2023

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Berechnungsnorm: **DIN EN 1994**

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punktzahl
1)	75	
2)	45	
Summe	120	
		Note:

Bearbeitungshinweise:

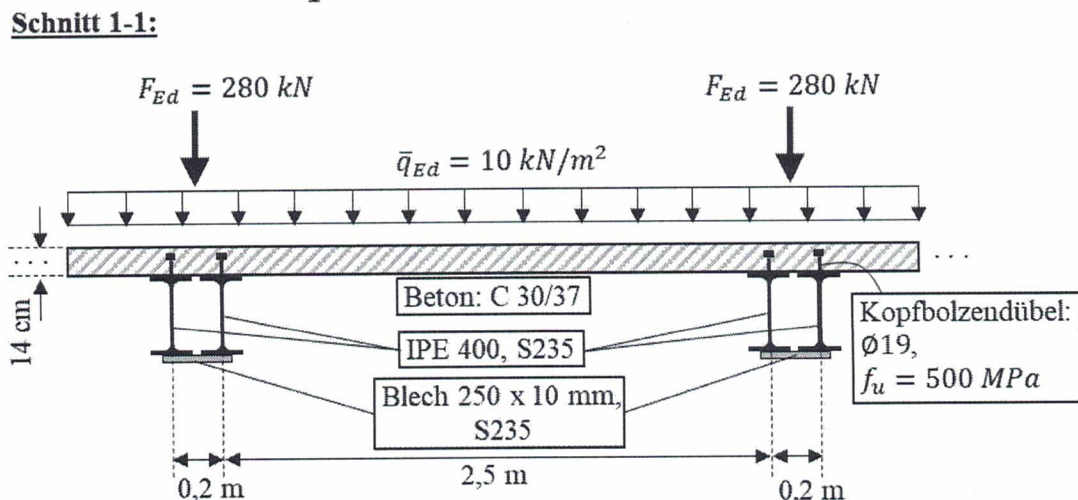
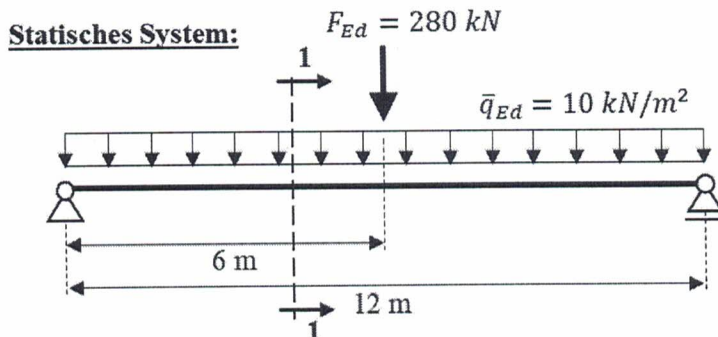
- Alle Blätter sind mit Namen und Matrikelnummer zu versehen.
- Es dürfen keine grünen Farbstifte verwendet werden.
- Lösungen sind so darzustellen, dass der Lösungsweg lückenlos nachvollziehbar ist.
- Hilfsmittel sind zugelassen, jedoch keine elektronischen Geräte außer dem Taschenrechner.
- Das Mitführen von Kommunikationsmitteln ist untersagt.

Aufgabe 1 (75 Punkte):

Gegeben ist das unten dargestellte Einfeldsystem, ausgeführt in Verbundbauweise. Jeder Stahlträger besteht aus zwei nebeneinander verlaufenden IPE 400 Profilen, die unten durch ein Verstärkungsblech miteinander verbunden sind.

Die Herstellung erfolgt im Eigengewichtsverbund. Die Stahlträger sind im Bau- und Endzustand seitlich ausreichend gehalten, so dass Biegedrillknicken ausgeschlossen werden kann. Die angegebenen Lastwerte sind Bemessungswerte und enthalten alle zu berücksichtigenden Lastanteile.

- Führen Sie den Nachweis der Biege- und Querkrafttragfähigkeit eines Trägers an den möglichen maßgebenden Stellen. Es ist von einer Vollverdübelung auszugehen.
- Bestimmen Sie die erforderliche Anzahl von Kopfbolzendübeln für eine Vollverdübelung und machen Sie einen Vorschlag für die Dübelverteilung. Berücksichtigen Sie dabei Folgendes: Im vorliegenden System ist eine äquidistante Dübelanordnung nicht über die volle Spannweite L , sondern nur über $L/4$ zulässig.
- Bestimmen Sie die Trägerdurchbiegung in Feldmitte zum Zeitpunkt $t \rightarrow \infty$ und legen Sie eine Trägerüberhöhung fest. Gehen Sie von einer Endkriechzahl $\varphi_\infty = 2,5$ und einem Endschwindmaß $\varepsilon_{cs,\infty} = 5 \times 10^{-3}$ aus. Die angegebenen Bemessungslastwerte sind durch den Faktor 1.4 zu teilen, um die erforderlichen charakteristischen quasi-ständigen Werte zu erhalten.

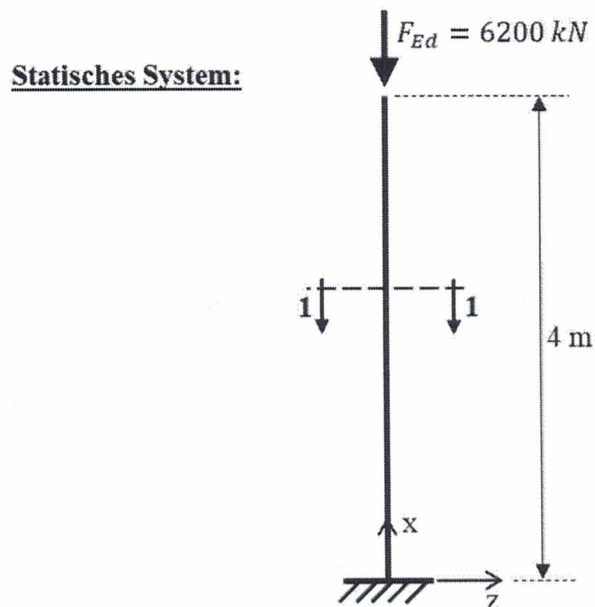


Aufgabe 2 (45 Punkte):

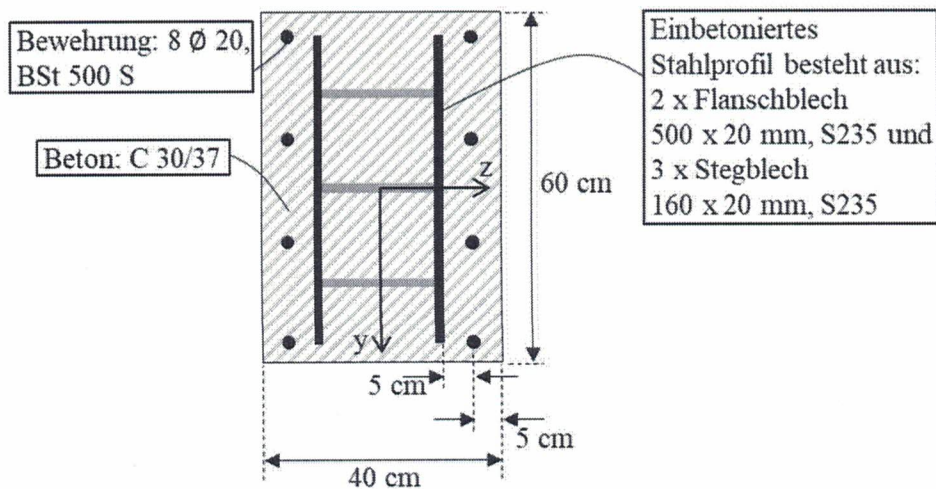
Gegeben ist die unten dargestellte Kragstütze mit doppelsymmetrischem Verbundquerschnitt. Erstellen Sie das $N - M_y$ Interaktionsdiagramm für diesen Querschnitt und führen Sie den Tragfähigkeitsnachweis der Stütze für den Zeitpunkt $t \rightarrow \infty$. Berücksichtigen Sie dabei den Einfluss einer Anfangsschiefstellung des Stütze von $1/200$.

Folgende Informationen sind noch zu berücksichtigen:

- Der angegebene Wert für die Stützendruckkraft ist der Bemessungswert. 70 % dieses Wertes stammen aus ständiger Belastung.
- Die Endkriechzahl φ_∞ beträgt 2,5.
- Ein Ausweichen der Stütze aus der Zeichenebene heraus ist ausgeschlossen.



Schnitt 1-1:



Verbandbau

Aufg. 1

Es wird eine äquidistante Anordnung jeweils im ersten und zweiten Viertel gewählt. In jedem dieser Bereiche muss die jeweilige Resultierende von T aufgenommen werden.

Bereich 1: $0 \leq x \leq L/4$

$$T_{res,1} = \frac{1040 + 759}{2} \cdot 3m = 2695 \text{ kN} \rightarrow \text{erf } n = \frac{2695}{69,4} = 39$$

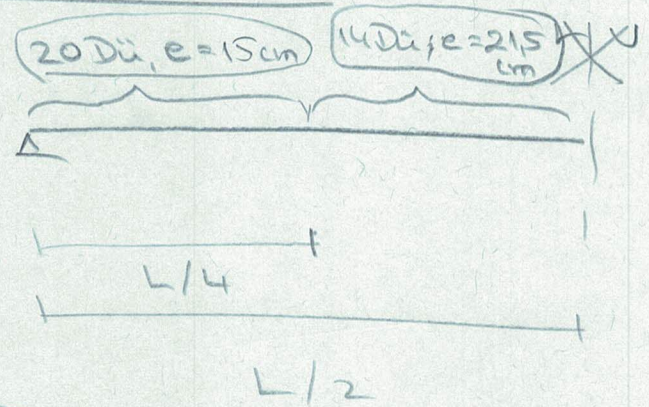
Bereich 2 $L/4 < x \leq L/2$

$\Rightarrow 20 \text{ Pro}$
IPE-Träger

$$T_{res,2} = \frac{759 + 478}{2} \cdot 3m = 1856 \text{ kN} \rightarrow \text{erf } n = \frac{1856}{69,4} = 27$$

Kontrolle $T_{res,1} + T_{res,2} = 4555 \approx N_{pl,a} \checkmark$ IPE-Träger $\Rightarrow 14 \text{ Pro}$

Dübel pro Träger IPE400:



10

c) Berechnen Sie die Durchbiegung in Feldmitte für $t = \infty$. Es ist mit $\varphi_0 = 2,5$ und legen Sie eine Überhöhung fest. Relevante Größen $E_{cm,00} = 0,5 \cdot 10^5$ zu rechnen.

Relevante Größen

$$E_{cm} = 3300 \text{ kN/cm}^2$$

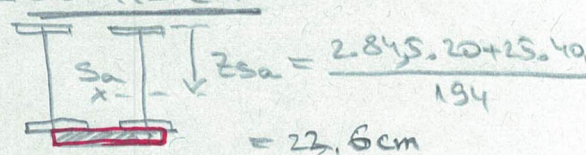
$$A_c = 270 \cdot 14 = 3780 \text{ cm}^2$$

$$I_c = 270 \cdot 14^3 / 12 = 61740 \text{ cm}^4$$

$$A_a = 2 \cdot 84,5 + 25 = 194 \text{ cm}^2$$

$$I_a = 2 \cdot 23130 + 2 \cdot 84,5 \cdot 26^2 + 25 \cdot (405 - 226)^2 = 55413 \text{ cm}^4$$

$$a = 14/2 + 226 = 231,6 \text{ cm}$$



2 $E_p = \frac{E_{cm}}{n_c} = \frac{3300}{1 + 1,1 \cdot 2,5} = 880 \text{ kN/cm}^2$

2 $E_s = \frac{E_{cm}}{n_s} = \frac{3300}{1 + 0,5 \cdot 2,5} = 1390 \text{ kN/cm}^2$

10

Verbundbau Aufg 1

$$EI_p = 10^{-4} \left[21000 \cdot 55413 + 880 \cdot 61740 + \frac{21000 \cdot 194 \cdot 280 \cdot 3780}{21000 \cdot 194 + 880 \cdot 3780} \cdot 29,6^2 \right]$$

EI_s

$$= 282 \cdot 10^5 \text{ kNm}^2 \quad (3)$$

$$3,26 \cdot 10^5 \text{ kNm}^2 \quad (3)$$

Beanspruchung aus Schwinden:

$$N_{cs} = E_{cs} \cdot A_c \cdot \epsilon_s = 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 3780 \cdot 1390 = 2627 \text{ kN}$$

$$a_{cs} = \frac{E_a A_a}{E_a A_a + E_s A_c} \cdot a = \frac{21000 \cdot 194}{21000 \cdot 194 + 1390 \cdot 3780} \cdot 29,6$$

$$= \underline{\underline{12,9 \text{ cm}}}$$

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot a_{cs} = 2627 \cdot 0,129 = 339 \text{ kNm} \quad (4)$$

Durchbiegungsanteile:

- aus Belastung (Division der Bemessungswerte durch 4,4 - Vorgabe in der Aufgabenstellung)

$$f_{\infty}^{\text{Belastung}} = \frac{1}{282 \cdot 10^5} \left(\frac{5}{384} \cdot \frac{27}{1,4} \cdot 12^4 + \frac{1}{48} \cdot \frac{280}{1,4} \cdot 12^3 \right) \cdot 10^2$$

$$= \underline{\underline{4,4 \text{ cm}}} \quad (8)$$

$$f_{\infty}^{\text{Schwinden}} = \frac{M_{cs} \cdot L^2}{8 EI_s} = \frac{339 \cdot 12^2}{8 \cdot 3,26 \cdot 10^5} \cdot 10^2 = \underline{\underline{1,9 \text{ cm}}} \quad (3)$$

$$f_{\infty}^{\text{ges}} = 4,4 + 1,9 = 6,3 \text{ cm}$$

erforderliche Überhöhung: $\frac{L}{250} - f_{\infty}^{\text{ges}} = \underline{\underline{1,5 \text{ cm}}}$

(2)

Aufgabe 2 (45 P)

- Berechnung der Stützpunkte A-D im $M_y - N$ Interaktionsdiagramm.

Erforderliche Querschnittswerte: (Biegung um die y -Achse)

$$A_a = 2 \cdot 50 \cdot 2 + 3 \cdot 16 \cdot 2 = 296 \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,a} = 50 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 9 + 3 \cdot 16^2 \cdot 2 / 4 = 2184 \text{ cm}^3$$

$$I_a = 3 \cdot 16^3 \cdot 2 / 12 + 2 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 9^2 = 18248 \text{ cm}^4$$

$$A_s = 8 \cdot \pi \cdot 2^2 / 4 = 251 \text{ cm}^2 = 8 \cdot \pi$$

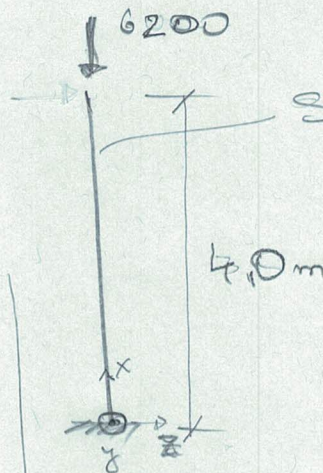
$$W_{pl,s} = 4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 15 = 377 \text{ cm}^3$$

$$I_s = 4 \cdot \pi \cdot 15^2 \cdot 2 = 5655 \text{ cm}^4$$

$$A_c = 40 \cdot 60 - 296 - 251 = 2079 \text{ cm}^2$$

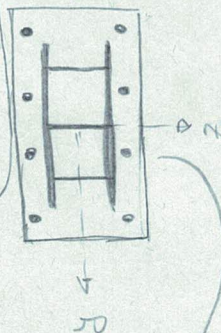
$$W_{pl,c} = \frac{40^2 \cdot 60}{4} - 2184 - 377 = 21439 \text{ cm}^3$$

$$I_c = \frac{40^3 \cdot 60}{12} - 18248 - 5655 = 296097 \text{ cm}^4$$



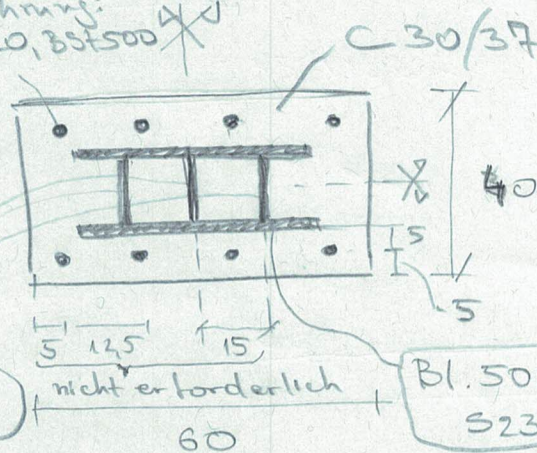
Schiefstellung:

$\frac{1}{200}$ = Vorgabe
in der
Aufgaben-
stellung



Vergrößerte Darstellung mit Abmessungen im cm

Bewehrung: 8 $\phi 20$, BSt500



Bl. 16x2
5235

nicht erforderlich

Bl. 50x2
5235

- Punkt A:

7

$M_A = 0$

Enthält die Punkte für die Berechnung der erforderlichen Querschnittswerte (s.o.). Das gilt auch für die Punktvergabe bei den anderen Diagrammpunkten B bis D (s.u.).

$N_{pl,a} = 6324 \text{ kN}$

$$N_{pl,Rd} = N_A = N_{pl,a} + N_{pl,s} + N_{c,Rd} = 23,5 \cdot \frac{296}{1,1} + 50 \cdot \frac{25}{1,15}$$

$$+ 3 \cdot 98,5 \cdot \frac{2079}{1,15} = \underline{\underline{10946 \text{ kN}}}$$

$$\frac{N_{pl,a}}{N_{pl,Rd}} = \frac{6324}{10946} = 0,58 \left\{ \begin{array}{l} > 0,2 \checkmark \\ < 0,9 \checkmark \end{array} \right.$$

Aufgabe 2

- Punkt D: $N_a = N_b = 0$
 $= M_{\max, rd}$

$$M_D = \cancel{M_a} + \cancel{M_b} + \cancel{M_c} = M_{pl, a} + M_{pl, b} + M_{pl, c}$$

$$= (21,36 \cdot 2184 + 43,5 \cdot 377 + \frac{1,7 \cdot 21439}{2}) / 100 = \underline{\underline{813 \text{ kNm}}}$$

⑥

$$N_D = N_{c, rd} / 2 = 1,7 \cdot 2079 / 2 = 3534 / 2 = \underline{\underline{1767 \text{ kN}}}$$

- Punkt B:

$$N_B = 0$$

Berechnung von x_0 :

Annahme: FNA im Steg

⑧

$$x_0 = \frac{N_{c, rd} / 2}{2 \cdot t_w \cdot f_{yd} + (b_c - t_w) \cdot f_{cd}} = \frac{1767}{2 \cdot (3 \cdot 2) \cdot 21,36 + (60 - 6) \cdot 1,7} = \underline{\underline{5,4 \text{ cm}}} < b_c / 2$$

⇒ Annahme richtig ✓

$$M_0 = x_0^2 \cdot t_w \cdot f_{yd} + x_0^2 \cdot (b_c - t_w) \cdot \frac{f_{cd}}{2}$$

$$= (5,4^2 \cdot 6 \cdot 21,36 + 5,4^2 \cdot 54 \cdot 1,7 / 2) / 100 = \underline{\underline{46 \text{ kNm}}}$$

$$M_B = M_{pl, rd} = M_{\max, rd} - M_0 = 813 - 46 = \underline{\underline{767 \text{ kNm}}}$$

- Punkt C:

$$M_C = M_{pl, rd} = \underline{\underline{767 \text{ kNm}}}$$

$$N_C = N_{c, rd} = \underline{\underline{3534 \text{ kN}}}$$

③

Aufgabe 2

- Endwertzahl: $\beta = 2,5$ - Vorgabe in der Aufgabenstellung

$$E_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + \textcircled{0,7} \varphi} = 33000 \frac{1}{1 + \textcircled{0,7} \cdot 2,5} = 12000 \text{ N/cm}^2$$

↳ ständiger Anteil
der Stützen normalkraft:
Vorgabe in der Aufgabenstellung (4)

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

$$= (21000 \cdot 18248 + 20000 \cdot 5655 + 0,5 \cdot 12000 \cdot 296097) \cdot 0,9$$

$$= \underline{\underline{6,12 \cdot 10^8 \text{ KNcm}^2}} \quad \Rightarrow N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 6,1 \cdot 10^8}{(2400)^2} = \underline{\underline{9407 \text{ kN}}} \quad (4)$$

- Schnittgrößen nach Th. 2. O.:

$$N_{Ed} = 6200 \text{ kN}$$

$$M_{Ed}^{II} = M_{Ed}^I \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = \frac{6200}{200} \cdot 40 \cdot \frac{1}{1 - \frac{6200}{9407}} = 363 \text{ kNm}$$

2,93 (7)

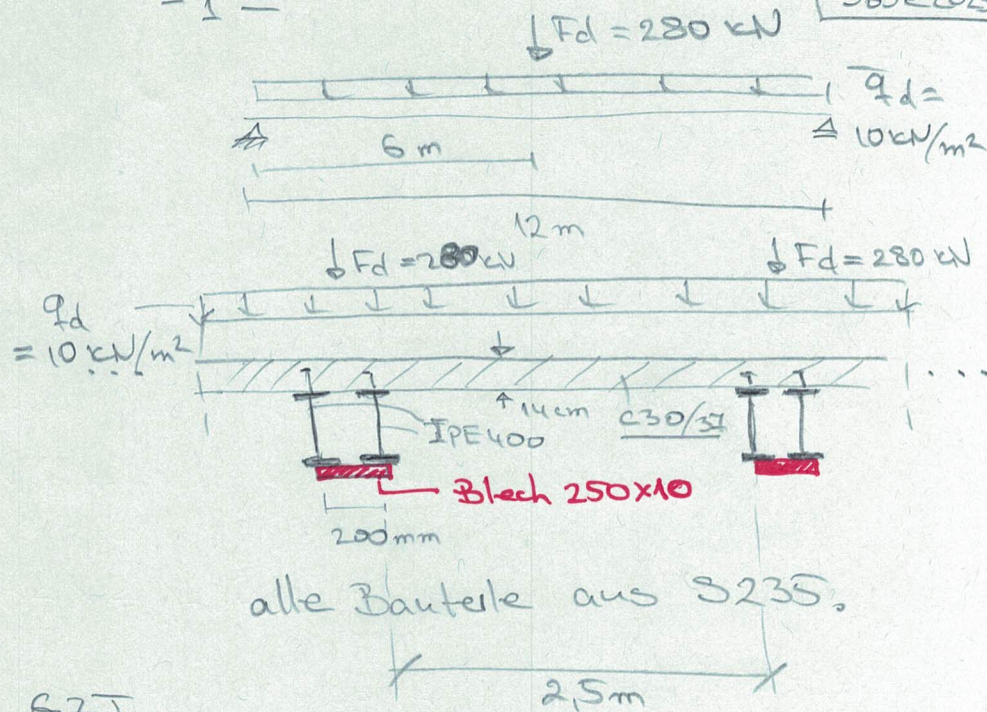
- Nachweis:

$$M_{pl,N,rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed} - N_{c,rd}}{N_{pl,rd} - N_{c,rd}} \right) \cdot M_{pl,rd}$$

$$= \left(1 - \frac{6200 - 3534}{10346 - 3534} \right) \cdot 767 = \underline{\underline{491 \text{ kNm}}} \quad (6)$$

$$\frac{M_{Ed}^{II}}{\alpha_{M} \cdot M_{pl,N,rd}} = \frac{363}{0,9 \cdot 491} = \underline{\underline{0,822}} \checkmark \text{ Nachweis erfüllt}$$

Aufgabe 1 (75 P)



a) Nachweise im GZT

a) Mitwirkende Plattenbreite:

$$b_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 + 2,5 = \underline{2,7 \text{ m}} \\ 2 + 2 \cdot 12/8 = 3,2 \text{ m} \end{array} \right. \quad (4)$$

• Vollplastisches Moment

$$\begin{aligned} N_{pl,a} &= 23,5 \cdot (2 \cdot 84,5 + 25 \cdot 1) = 4559 \text{ kN} \\ N_{pl,c} &= 0,85 \cdot \frac{3}{1,5} \cdot 270 \cdot 14 = 6426 \text{ kN} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \Rightarrow \text{PNA im Beton}$$

$$z_{pl} = \frac{N_{pl,a}}{f_{cd} \cdot b_{eff}} = \frac{4559}{1,7 \cdot 270} = \underline{9,93 \text{ cm}} \quad (5) \quad (5)$$

$$M_{pl,Rd} = 2 \cdot N_{pl,IPE400} \cdot \left(\frac{h_{IPE400}}{2} + h_c - z_{pl}/2 \right) + N_{pl,Blech} \cdot \left(h_{IPE400} + t_{pl}/2 + h_c - z_{pl}/2 \right)$$

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot 235 \cdot 84,5 \cdot \left(0,4/2 + 0,14 - 0,0993/2 \right) \\ &+ 235 \cdot 25 \cdot 1,0 \cdot \left(0,4 + 0,005 + 0,14 - 0,0993/2 \right) \\ &= 1153,7 + 291,1 \approx \underline{1445 \text{ kNm}} \quad (6) \quad (7) \end{aligned}$$

$$M_{max,Ed} = F_d \cdot L/4 + \bar{q}_d \cdot 2,7 \cdot L^2/8 = 280 \cdot 12/4 + 10 \cdot 2,7 \cdot 12^2/8 \quad (4)$$

$$= 1326 \text{ kNm} < 1445 \text{ kNm} \quad \checkmark$$

$$V_{Rd,Ed}(l/2) = 280/2 = 140 \text{ kN} < 0,5 \cdot \frac{2 \cdot 2,7 \cdot 235 \cdot \sqrt{3}}{2} = 579 \text{ kN} \rightarrow \text{keine M-V-Interaktion}$$

Aufgabe 1

(4)

$V_{z,Ed\ max} = 280/2 + 27 \cdot 12/2 = 302\ kN < N_{pl,z,d} = 1158\ kN$ ✓

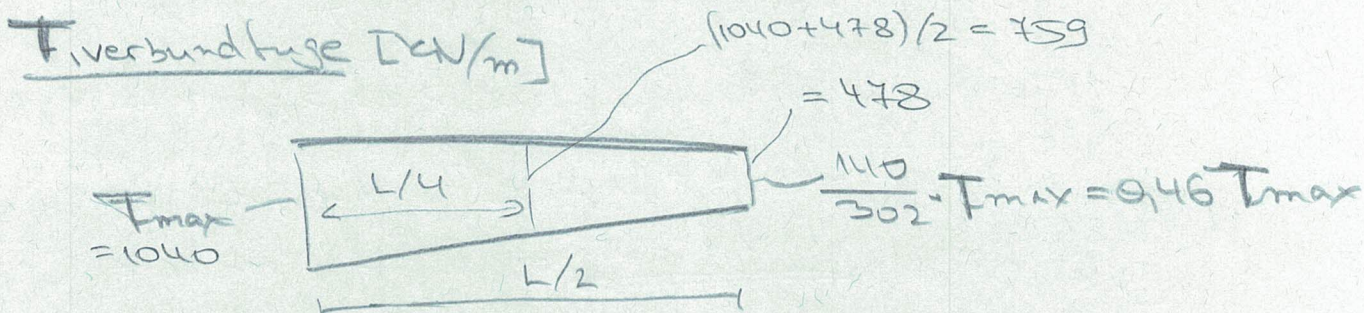
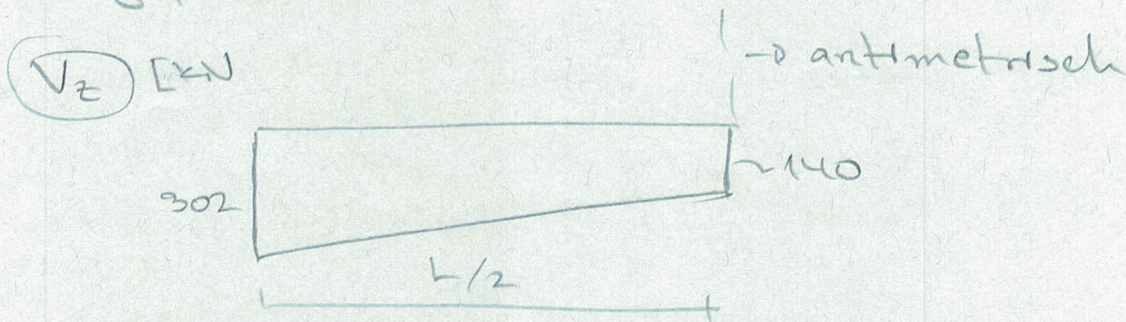
b) Anzahl und Verteilung der Dübel für eine Vollverdübelung; Dübel: $\phi 19, f_u = 500\ MPa$

Vorgabe: eine äquidistante Anordnung ist nicht über die gesamte Länge, sondern nur über $L/4$ zulässig.

erforderliche Dübelanzahl für eine Trägerhälfte:

erf $n = \frac{N_{pl,z}}{P_{kd}} = 4559 / 69,4 = 66$ Dübel \rightarrow 33 Dübel
 IPE10-Träger (4)

Die Anordnung wird am Schubkraftverlauf in der Verbundfuge (der affin zum V_z -verlauf ist) angepasst:



$T_{max} \cdot \frac{(1 + 0,46) \cdot L/2}{2} \stackrel{!}{=} N_{pl,z} \rightarrow T_{max} = \frac{4 \cdot N_{pl,z}}{(1 + 0,46) \cdot L} = \frac{1040}{kN/m}$