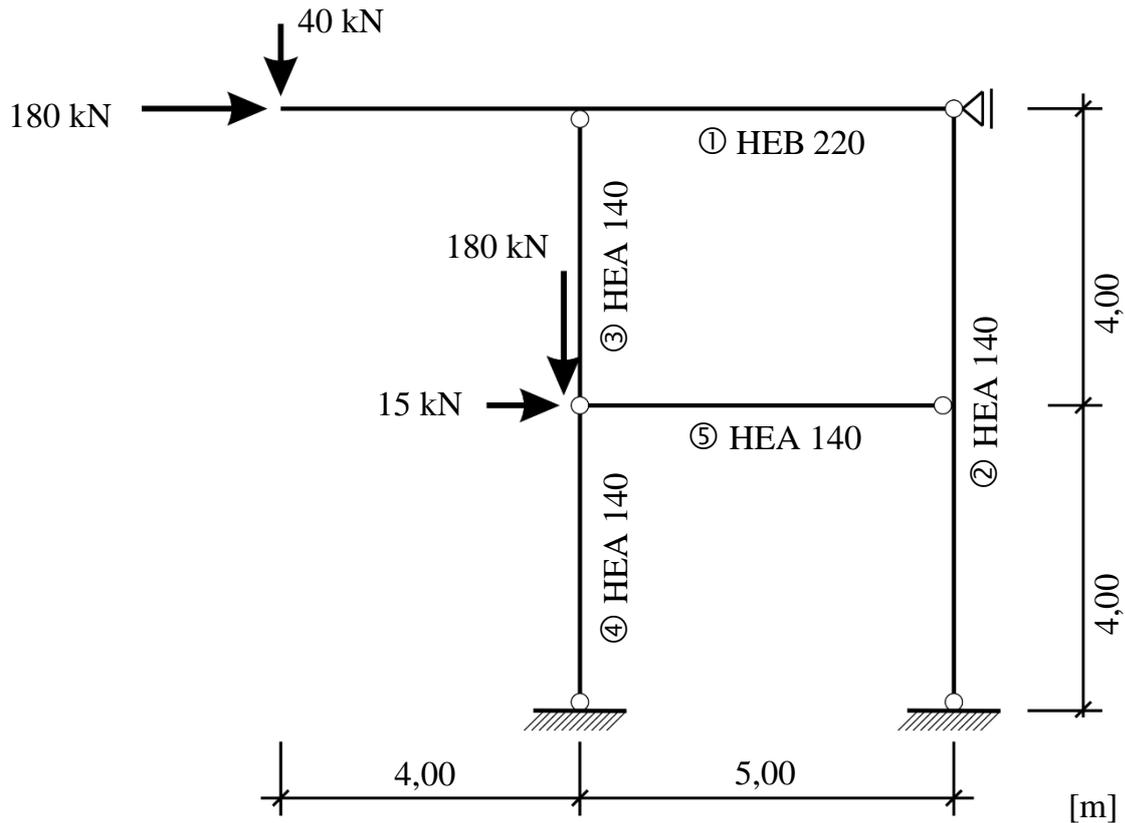


Aufgabe 2

22 Punkte

gegeben:

- System und Bemessungswerte der Belastung:



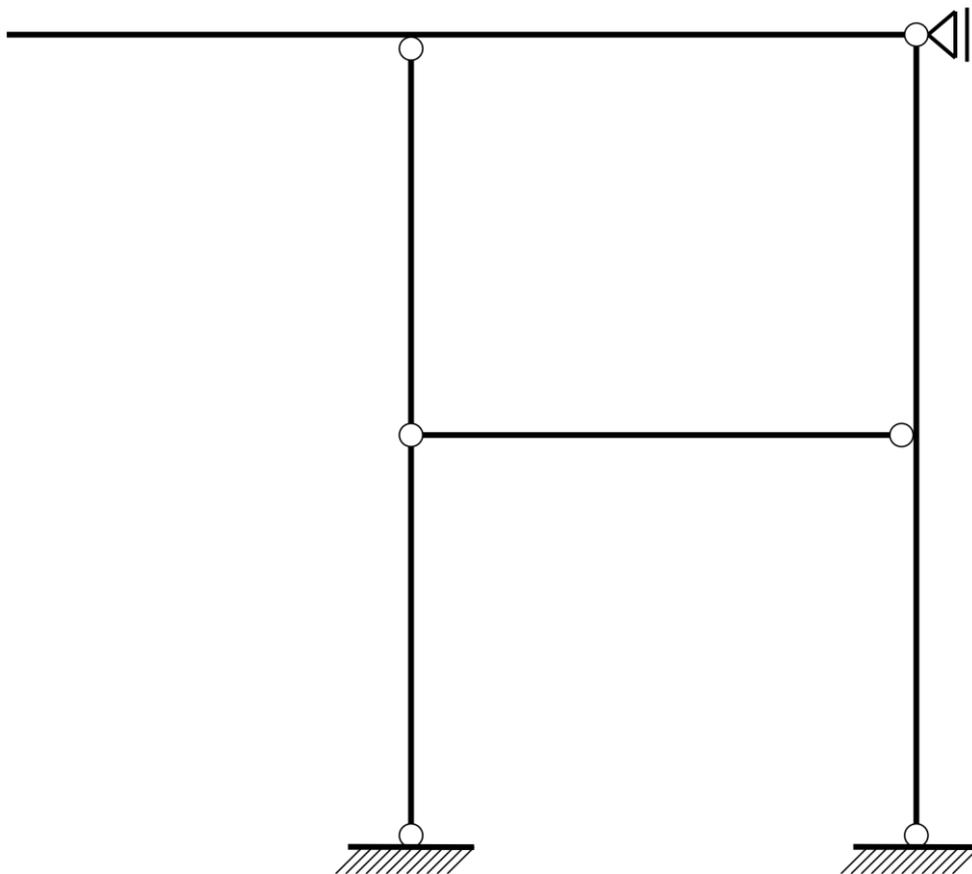
- Alle Positionen: S 355

gesucht:

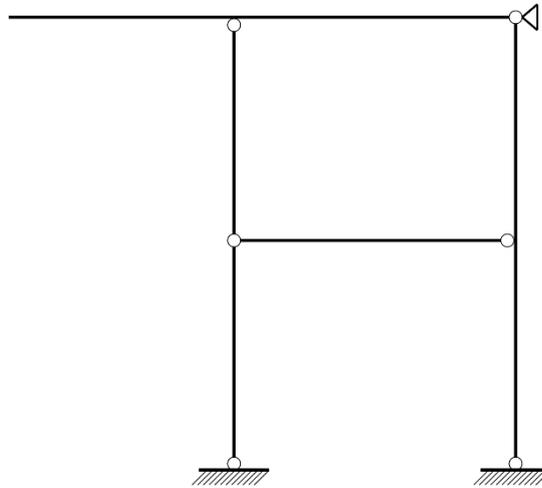
- Qualitative Darstellung des verformten Systems in Anlage 2.1.
- Berechnung der Schnittgrößenverläufe nach Theorie II. Ordnung (Anlage 2.2).
- Querschnittsnachweise für Stab 1 und Stab 2 mit elastischen Widerstandsgrößen (Klasse 3).

Hinweise:

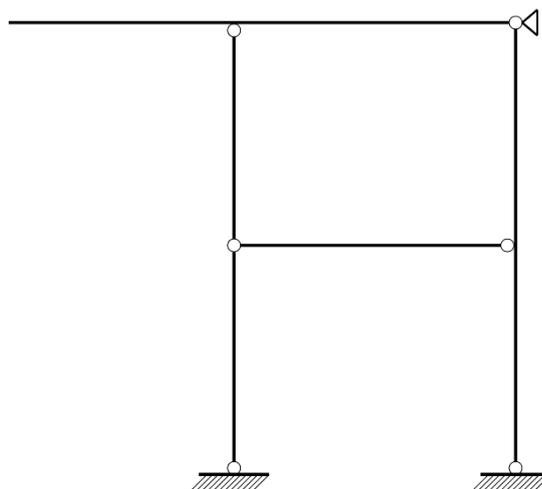
- Es handelt sich um ein ebenes Problem.
- Biegung der Profile erfolgt um die starke Achse.
- Die Effekte von Anfangsimperfektionen sind in den Lastannahmen enthalten.
- Längsdehnungen der Stäbe und deren Eigengewicht sind zu vernachlässigen.
- Die Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie 2. Ordnung ist mit dem ΔM -Verfahren durchzuführen (geometrische Reihe).

Anlage 2.1:

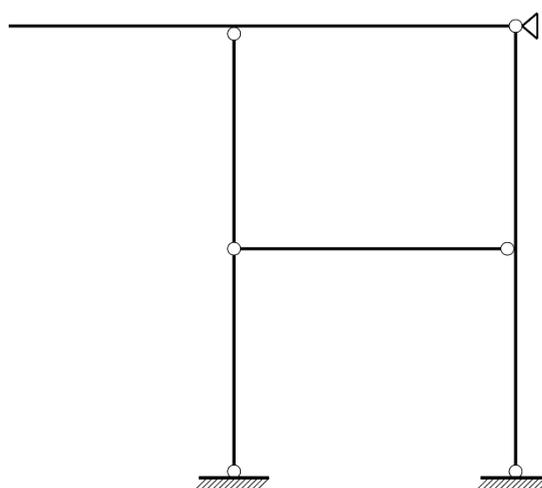
Anlage 2.2:



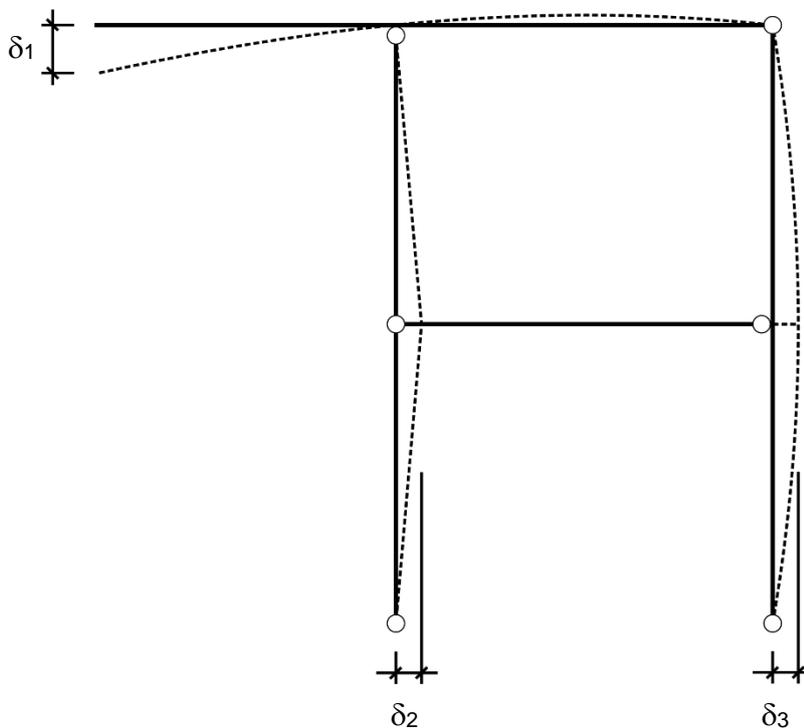
N



Q



M

Musterlösung Aufgabe 2Profildaten:HEB 220, S355: $I_y = 8.090 \text{ cm}^4$; $N_{pl,Rd} = 3.231 \text{ kN}$; $V_{pl,Rd} = 571 \text{ kN}$; $M_{el,Rd} = 261 \text{ kNm}$ HEA 140, S355: $I_y = 1.030 \text{ cm}^4$; $N_{pl,Rd} = 1.115 \text{ kN}$; $V_{pl,Rd} = 207 \text{ kN}$; $M_{el,Rd} = 55 \text{ kNm}$ **a) Qualitative Darstellung des verformten Systems**

Die Verformungen δ_2 und δ_3 sind gleich groß, da die Längenänderung der Stäbe vernachlässigt werden darf.

b) Berechnung der Schnittgrößenverläufe nach Theorie II. Ordnung (Anlage 2.2).

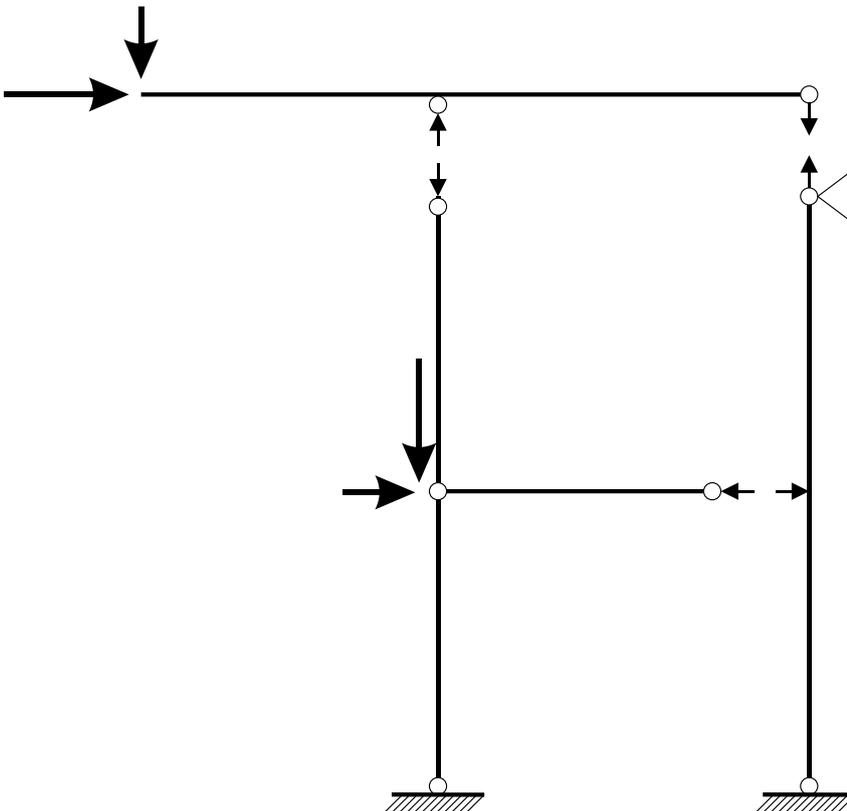
Für die Berechnung nach Theorie 2. Ordnung wird zunächst geprüft, wo Abtriebskräfte aus Verformungen auftreten:

- Im Riegel (Pos 1) durch Verformung δ_1 zusammen mit angreifenden H-Last.
- In der rechten Stütze (Pos 2) durch Verformung δ_3 in Zusammenhang mit der Normalkraft in der Stütze.

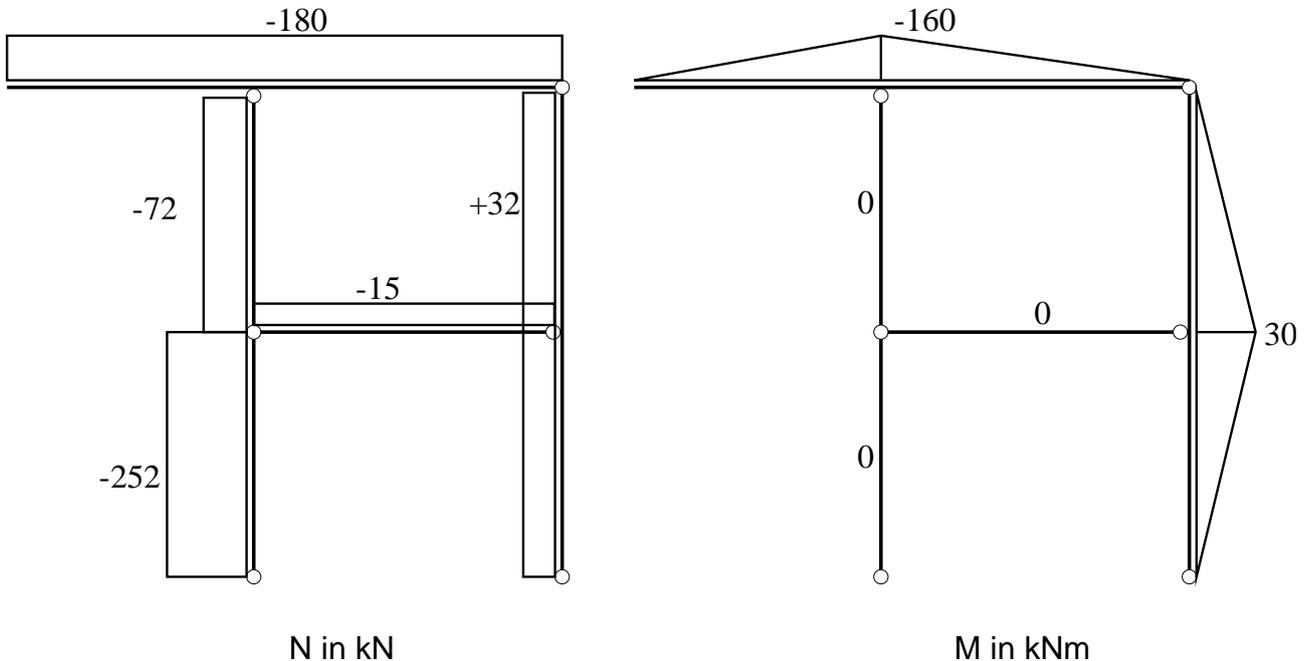
- In der linken Stütze (Pos 3 und Pos 4) durch Verformung δ_2 in Zusammenhang mit den jeweiligen Normalkräften in den Pendelstützen.

Diese Verformungen, die Momentverläufe und Normalkräfte sind zu berechnen.

Dafür kann das System z.B. wie folgt zerlegt werden:



Schnittgrößen nach Theorie 1. Ordnung (Querkräfte sind nicht erforderlich):



Berechnung von δ_1 :

(System: Einfeldträger mit Kragarm – hier mit Kraftgrößenverfahren berechnet)

$$EI \delta_1 = \frac{4}{3} 160 \cdot 4 + \frac{5}{3} 160 \cdot 4 = 1920 \Rightarrow \delta_1 = \frac{1920}{2,1 \cdot 8090} = 0,113m$$

Anmerkung: Häufig erfolgt die Berechnung der Schnittgrößen in „kN“ und „m“. Das Flächenträgheitsmoment wird im Stahlbau aber häufig in „cm⁴“ angegeben. Eine einfache Umrechnung der Einheiten von „EI“ erfolgen, indem für „E“ 2,1 und I in cm⁴ eingesetzt wird. Das entspricht der Angabe von „EI“ mit kN und m.

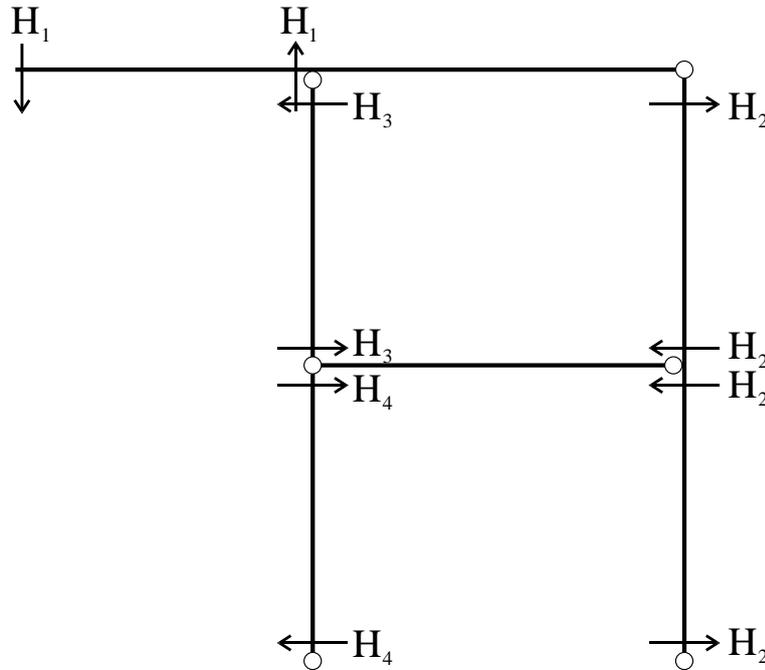
Berechnung von δ_2 :

(System: Einfeldträger– hier mit Formel aus Tabellenwerken \Rightarrow Schneider Bautabellen etc.)

$$EI \delta_2 = \frac{F \cdot L^3}{48} = \frac{15 \cdot 8^3}{48} = 160 \Rightarrow \delta_2 = \frac{160}{2,1 \cdot 1030} = 0,074m$$

Ansatz der Abtriebskräfte:

Abtriebskräfte werden an den Stäben angesetzt, die durch Normalkraft beansprucht werden und sich gleichzeitig schief stellen. Sie treten immer paarweise auf.



Berechnung der Abtriebskräfte:

$$\Delta H = N \cdot \phi = N \cdot \frac{\delta}{L}$$

Auf Pos. 1 wirkt nur ΔH_1 :

$$\Delta H_1 = 180 \cdot \frac{0,113}{4,00} = 5,1 \text{ kN}$$

Auf Pos. 2 wirken die restlichen Abtriebskräfte und lassen sich zusammenfassen zu:

$$\Delta H = \Delta H_3 + \Delta H_4 - 2 \Delta H_2 = 4,81 \text{ kN}$$

mit:

$$\Delta H_2 = 32 \cdot \frac{0,074}{4,00} = 0,59 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = 72 \cdot \frac{0,074}{4,00} = 1,33 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = 252 \cdot \frac{0,074}{4,00} = 4,66 \text{ kN}$$

Berechnung des Zusatzmomentes aus Abtriebskräften:

$$\text{Pos. 1: } \Delta M = 4 \cdot 5,1 = 20,4 \text{ kNm}$$

$$\text{Pos. 2: } \Delta M = \frac{4,81 \cdot 8,0}{4} = 9,6 \text{ kNm}$$

Verbesserung des Ergebnisses durch Anwendung des Reihenansatzes:

$$M'' = \frac{M'}{1 - \frac{\Delta M}{M'}}$$

$$\text{Pos. 1: } M'' = \frac{160}{1 - \frac{20,4}{160}} = \frac{160}{1 - 0,13} = 183 \text{ kNm}$$

$$\delta_1'' = \frac{0,113}{1 - 0,13} = 0,130 \text{ m}$$

$$\text{Damit ist } \Delta H_1 = 180 \cdot \frac{0,130}{4,00} = 5,85 \text{ kN}$$

$$\text{Pos. 2: } M'' = \frac{30}{1 - \frac{9,6}{30}} = \frac{30}{1 - 0,32} = 44,1 \text{ kNm}$$

$$\delta_2'' = \frac{0,074}{1 - 0,32} = 0,109 \text{ m}$$

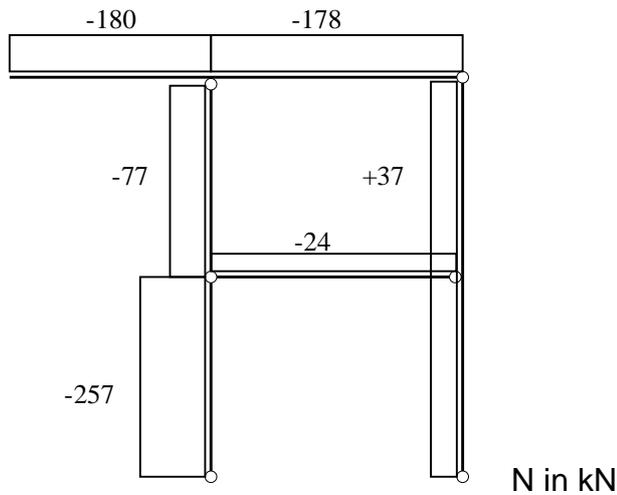
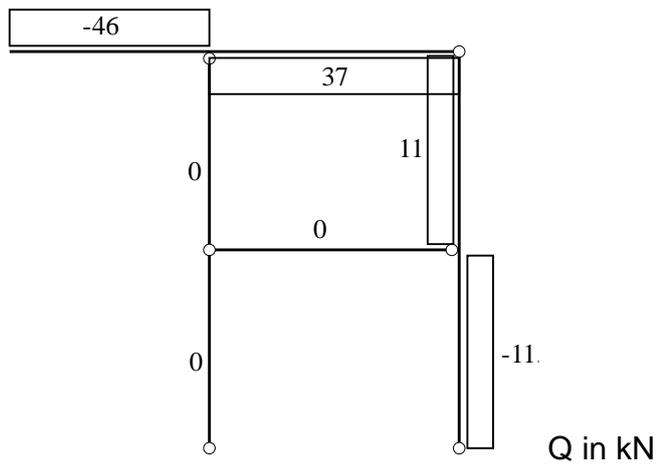
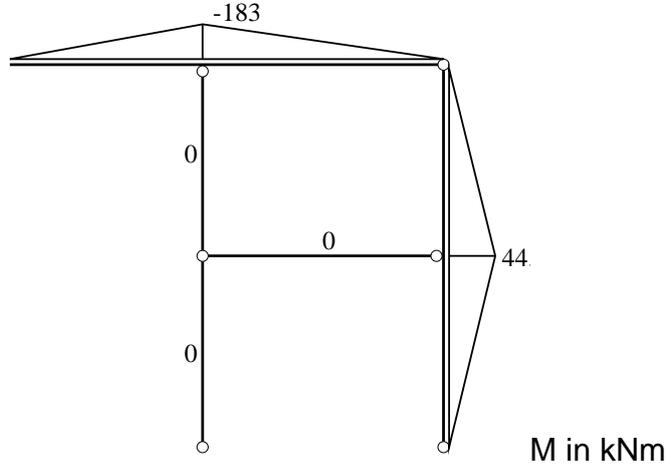
$$\text{Damit ist } \Delta H_2 = 32 \cdot \frac{0,109}{4,00} = 0,87 \text{ kN}$$

$$\Delta H_3 = 72 \cdot \frac{0,109}{4,00} = 1,96 \text{ kN}$$

$$\Delta H_4 = 252 \cdot \frac{0,109}{4,00} = 6,87 \text{ kN}$$

Eine weitere Iteration ist im Rahmen der Klausur im Allgemeinen nicht verlangt. Das hier ermittelte Ergebnis ist also eine erste Näherung. (Zur Information hier die genaue Lösung: Pos. 1 $M'' = 183,7 \text{ kNm}$, Pos. 2 $M'' = 43,8 \text{ kNm}$)

Angabe der Schnittgrößenverläufe nach Theorie 2. Ordnung (unter Berücksichtigung der verbesserten Abtriebskräfte):



c) Querschnittsnachweise für Stab 1 und Stab 2 mit elastischen Widerstandsgrößen (Klasse 3).Querschnittsnachweis für Stab 1 (HEB 220, S355)

M-V Interaktion:

$$V_{Ed} = 46 < 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

⇒ keine M-V Interaktion erforderlich!

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{180}{3.231} + \frac{183}{261} = 0,06 + 0,70 = 0,76 < 1$$

⇒ Nachweis erbracht!

Querschnittsnachweis für Stab 2 (HEA 140, S355)

M-V Interaktion:

$$V_{Ed} = 11 < 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

⇒ keine M-V Interaktion erforderlich!

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{37}{1.115} + \frac{44}{55} = 0,03 + 0,80 = 0,83 < 1$$

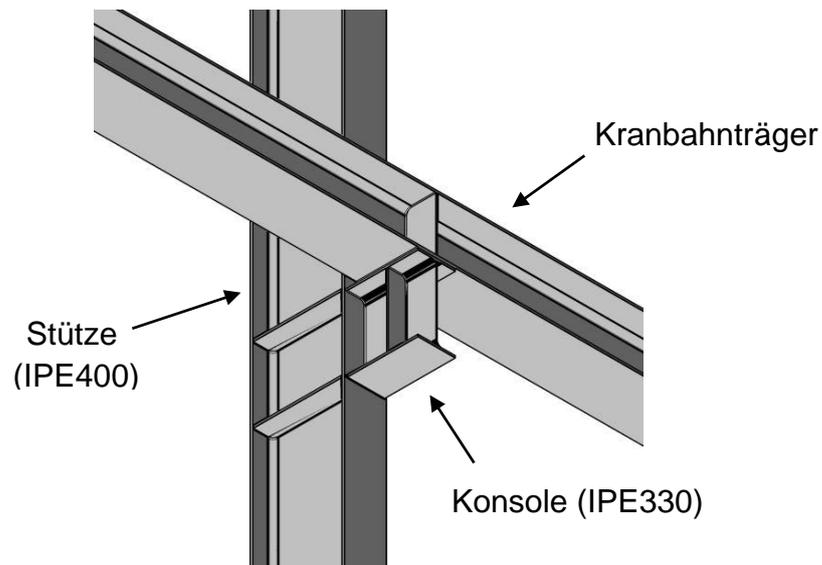
⇒ Nachweis erbracht!

Aufgabe 3

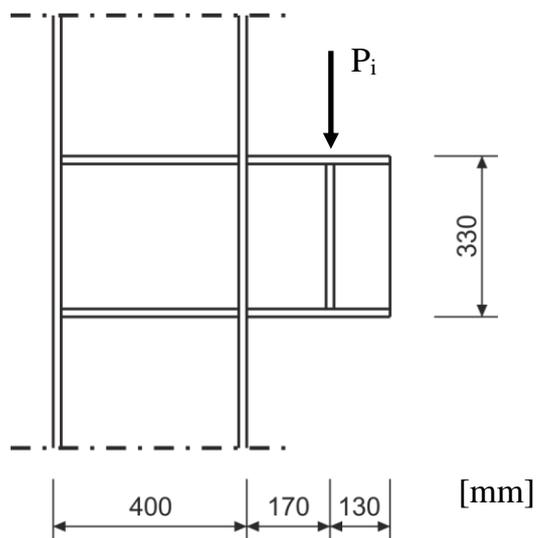
20 Punkte

gegeben:

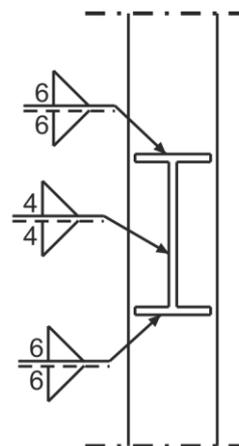
- Konsole für einen Kranbahnträger



- Seitenansicht:



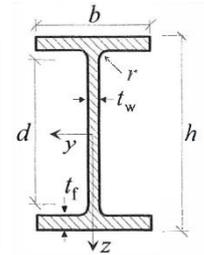
- Anschluss:



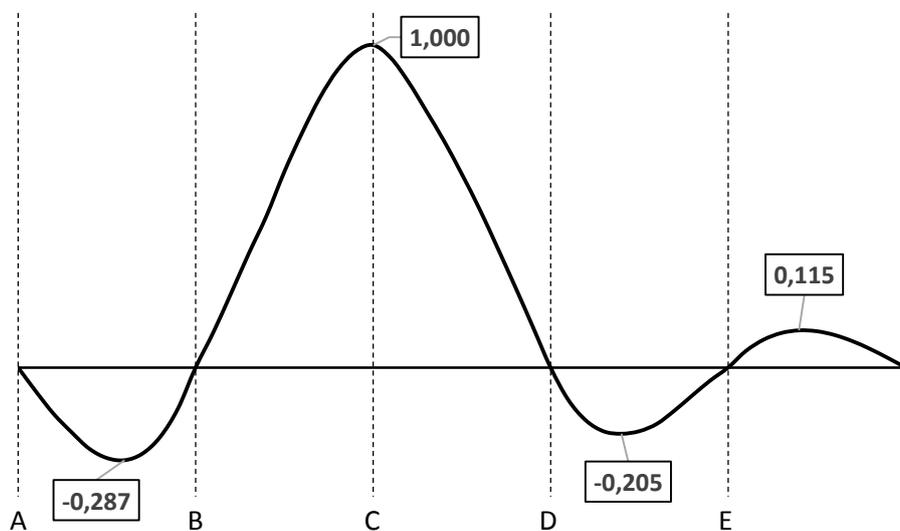
- Material: S 355
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Ff} = 1,0$ $\gamma_{Mf} = 1,15$
- Überfahrten: $n_i = 1.250$ pro Jahr
- Belastung: $P_i = 250 \text{ kN} \cdot \text{Ordinate Einflusslinie}$

Profilmaße:

	h [mm]	b [mm]	t _w [mm]	t _f [mm]	r [mm]	d [mm]	I _y [cm ⁴]
IPE330	330	160	7,5	11,5	18	271	11.770
IPE400	400	180	8,6	13,5	21	331	23.130



Einflusslinie bei einem 5-Feldträger für die Auflagerkraft bei Auflager C:



gesucht:

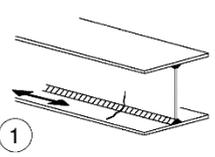
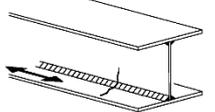
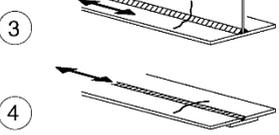
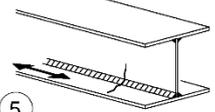
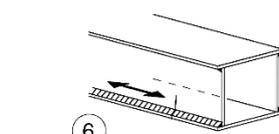
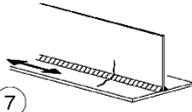
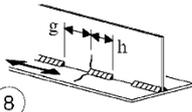
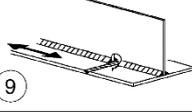
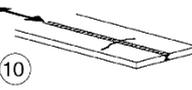
Führen Sie den Ermüdungsnachweis für den Anschluss der Konsole an die Stütze für eine geplante Betriebsdauer von 40 Jahren.

Hinweise:

- Eine Auswahl möglicher Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9 ist in Anlage 3.1 und Anlage 3.2 gegeben.
- Der Ermüdungsnachweis ist mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.
- Es gilt die Annahme, dass Biegemomente über die Schweißnähte am Flansch und Querkräfte über die Schweißnähte am Steg abgetragen werden.

Anlage 3.1:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.2

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125		Durchgehende Längsnähte: 1) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert AC beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.	Kerbfälle 1) und 2): Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.
112	 	3) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert AC einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerbgruppe 100 zuzuordnen.
100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) AC Von Hand oder mit Automaten oder voll mechanisiert AC einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.	5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschragen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
100		7) AC Ausgebesserte automaten- oder voll mechanisiert geschweißte AC oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte nach Kerbfall 1) bis 6).	7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.
80	 $gh \leq 2,5$	8) Unterbrochene Längsnähte.	8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
71		9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.	9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnäht, beidseitig in Lastrichtung blechen geschliffen, 100 % ZFP.	
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.	
90		10) Mit Ansatzstellen.	
140		11) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) AC gestrichener Text AC Wanddicke $t \leq 12,5$ mm
125		11) AC Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte AC Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Wanddicke $t > 12,5$ mm
90		11) Mit Ansatzstellen.	

Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfalkategorien für Automaten-schweißung.

Anlage 3.2:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.5

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen		
80	$l < 50$	alle t	Kreuz- und T-Stöße: 1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.	1) Nach Prüfung frei von Diskontinuitäten und Exzentrizitäten außerhalb der Toleranzen nach EN 1090. 2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln. 3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 mit Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w , zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.		
71	$50 < l \leq 80$	alle t				
63	$80 < l \leq 100$	alle t				
56	$100 < l \leq 120$	alle t				
56	$l > 120$	$t \leq 20$				
50	$120 < l \leq 200$ $l > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$				
45	$200 < l \leq 300$ $l > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$	2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.	Kerbfälle 1) bis 3): Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.		
40	$l > 300$	$t > 50$				
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	verformbares Anschlussblech					
36*					3) Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005. AC	
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>Spannungsfläche im Hauptblech: Neigung = 1/2</p>				Anschlüsse mit überlappenden Bauteilen: 4) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	4) Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche. 5) Berechnung von $\Delta\sigma$ in den überlappenden Laschen.
45*					5) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	Kerbfälle 4) und 5): - Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubarriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall 8) zu überprüfen.
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$	Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern: 6) Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirnnaht.	6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirnnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich. Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm. Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.		
50	$t \leq 20$	-				
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$				
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$				
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$				
36	-	$t > 50$				
56	verstärkte Stirnnaht			7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. 5) t_c ist die Minillänge der Verstärkungsnaht.		
80 $m=5$					8) Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern. 9) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	8) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen. 9) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.

Musterlösung Aufgabe 3

Führen Sie den Ermüdungsnachweis für den Anschluss der Konsole an die Stütze für eine geplante Betriebsdauer von 40 Jahren.

Kerbfälle und Ermüdungsfestigkeitskurven:

Riss am Schweißnahtübergang ($\ell < 50 \text{ mm}$) \Rightarrow Kerbfall 80

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 80/1,15 = 69,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_D = m \sqrt{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = 3 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 69,6 = 51,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_D = 5 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_L = m \sqrt{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = 5 \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 51,3 = 28,2 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

Wurzelriss \Rightarrow Kerbfall 36*

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 36/1,15 = 31,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_D = m \sqrt{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = 3 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 31,3 = 23,1 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_D = 5 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_L = m \sqrt{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = 5 \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 23,1 = 12,7 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

Schubspannungen in Schweißnaht \Rightarrow Kerbfall 80

$$\Delta\tau_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 80/1,15 = 69,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\tau_L = m \sqrt{\frac{N_C}{N_L}} \cdot \Delta\tau_C = 5 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 69,6 = 31,8 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

Spannungsschwingbreiten und zul. Schwingspiele

Schwingbreiten Einflusslinie:

$$\Delta EL_1 = 1,000 + 0,287 = 1,287$$

$$\Delta EL_2 = 0,115 + 0,205 = 0,320$$

Spannungsschwingbreiten Schweißnahtübergang:

$$\Delta M_i = \Delta E L_i \cdot 250 \text{ kN} \cdot 0,17 \text{ m} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta \sigma_i = \frac{\Delta M_i}{I_{y, \text{Konsole}}} \cdot \frac{h_{\text{Konsole}}}{2}$$

Spannungsschwingbreiten Wurzelriss:

$$\Delta M_i = \Delta E L_i \cdot 250 \text{ kN} \cdot 0,17 \text{ m} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta \sigma_i = \frac{\Delta M_i}{I_{a, F}} \cdot \frac{h_{\text{Konsole}}}{2}$$

$$\text{mit: } I_{a, F} = 2 \cdot b_F \cdot a_{w, F} \cdot (h_{\text{Konsole}}/2)^2 + 4 \cdot (b_F - 2 \cdot r - t_w) / 2 \cdot a_{w, F} \cdot ((h_{\text{Konsole}} - 2 \cdot t_F) / 2)^2$$

$$\Rightarrow I_{a, F} = 85.212.026 \text{ mm}^4$$

Spannungsschwingbreiten Stegnaht:

$$\Delta P_i = \Delta E L_i \cdot 250 \text{ kN} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta \tau_i = \frac{\Delta P_i}{2 \cdot d \cdot a_{w, S}}$$

Lebensdauer als Anzahl der Spannungsschwingspiele:

$$N_{i, \sigma} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_D}{\Delta \sigma_i} \right)^{3 \text{ bzw. } 5} \quad \text{und} \quad N_{i, \tau} = N_L \cdot \left(\frac{\Delta \tau_L}{\Delta \tau_i} \right)^5$$

	ΔM bzw. ΔP [kNm bzw. kN]	Anzahl pro Fahrt [-]	$\Delta \sigma$ bzw. $\Delta \tau$ [N/mm ²]	m [-]	N_i [-]
$\Delta M_{SÜ,1}$	54,7	1	76,7	3	1.496.015
$\Delta M_{SÜ,2}$	13,6	1	19,1	-	-
$\Delta M_{WR,1}$	54,7	1	105,9	3	51.894
$\Delta M_{WR,2}$	13,6	1	26,3	3	3.387.963
$\Delta P_{SN,1}$	321,75	1	148,4	5	45.182
$\Delta P_{SN,2}$	80,0	1	36,9	5	47.533.935

Ermüdungsnachweis Schweißnahtübergang:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1.250 \cdot 40}{1.496.015} = 0,03 \stackrel{!}{\leq} 1,0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{Nachweis eingehalten!}$$

Ermüdungsnachweis Wurzelriss:

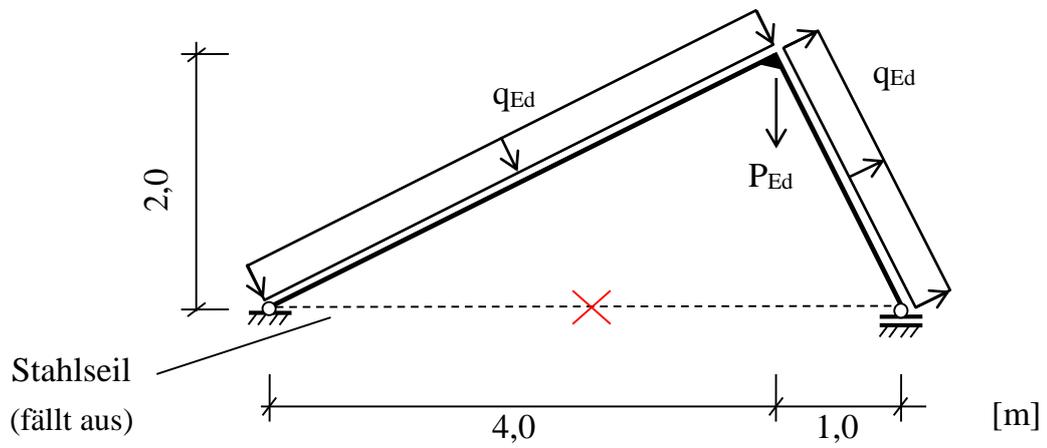
$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1.250 \cdot 40}{51.894} + \frac{1.250 \cdot 40}{3.387.963} = 0,98 \stackrel{!}{\leq} 1,0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{Nachweis eingehalten!}$$

Ermüdungsnachweis Stegnaht:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1.250 \cdot 40}{45.182} + \frac{1.250 \cdot 40}{47.533.935} = 1,11 \stackrel{!}{\leq} 1,0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{Nachweis nicht eingehalten!}$$

Aufgabe 2**20 Punkte****gegeben:**

- Statisches System unter Last gemäß Skizze:



- Bemessungswerte der Lasten: $P_{Ed} = 27,5 \text{ kN}$
 $q_{Ed} = 1,5 \text{ kN / m}$
- Alle Positionen: IPEa 160
S 355

gesucht:

Bei der angegebenen Tragstruktur eines Pultdaches fällt das Stahlseil aus. Weisen Sie das neue statische System nach Theorie 2. Ordnung nach.

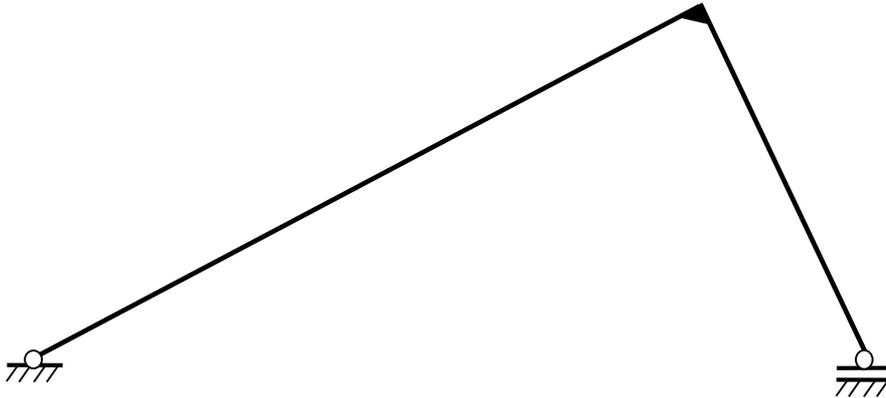
Dokumentieren Sie folgende Schritte:

- Schnittgrößenverläufe nach Theorie 1. Ordnung.
- Qualitative Verformungsfigur des Systems (Anlage 2.1)
- Systemskizze mit Abtriebskräften

Hinweise:

- Es sind keine Vorimperfektionen anzusetzen.
- Bei zugbelasteten Stäben sind keine Abtriebskräfte anzusetzen.
- Infolge von Verkrümmungen sind keine Abtriebslasten (Δw und ΔH_w) anzusetzen.
- Längsdehnungen der Profile sind zu vernachlässigen.
- Die Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie 2. Ordnung ist mit dem ΔM -Verfahren durchzuführen (geometrische Reihe).
- Bei Querschnittsnachweisen dürfen im Falle einer M-N-V Interaktion die Normalkraft und Querkraft vereinfacht nach Theorie 1. Ordnung verwendet werden.

Anlage 2.1:



Musterlösung Aufgabe 2

Die Schnittgrößen werden zwecks einfacherer Überlagerung bei der Verformungsberechnung nach Lastfall getrennt ermittelt.

Auflagerkräfte inf. q_{Ed}

$$B_V = 1/5 \cdot q_{Ed} \cdot \left(\frac{2^2}{2} + \frac{4^2}{2} - 1 \cdot 4,5 \right) = 2,25 \text{ kNm}$$

$$A_V = -1,0 \cdot q_{Ed} + 4,0 \cdot q_{Ed} - B_V = 2,25 \text{ kNm}$$

$$A_h = q_{Ed} \cdot 2 \cdot 2 = 6 \text{ kNm}$$

Auflagerkräfte inf. P_{Ed}

$$B_V = 1/5 \cdot 4 \cdot P_{Ed} = 8 \text{ kNm}$$

$$A_V = P_{Ed} - B_V = 2 \text{ kNm}$$

$$A_h = 0 \text{ kNm}$$

Geometrie:

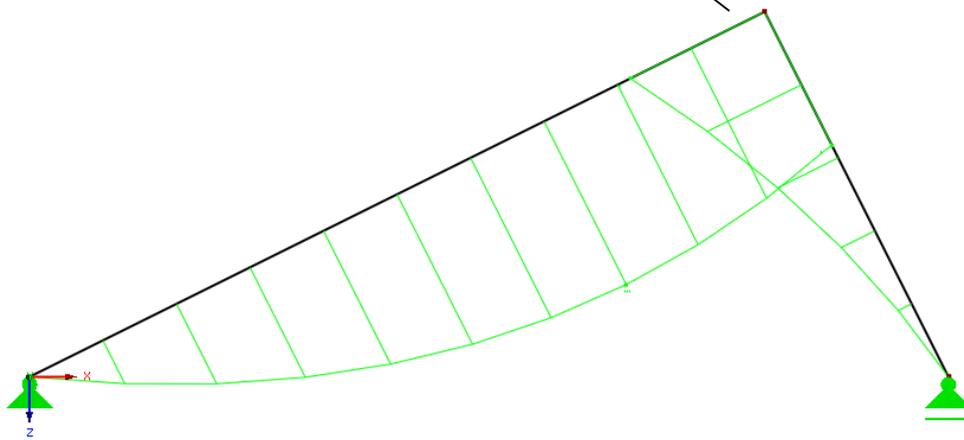
$$l_l = \sqrt{200^2 + 400^2} = 447,2 \text{ cm}$$

$$l_r = \sqrt{200^2 + 100^2} = 223,6 \text{ cm}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{200}{400}\right) = 26,57^\circ$$

Verlauf des Biegemoments nach Theorie 1. Ordnung inf. q_{Ed}

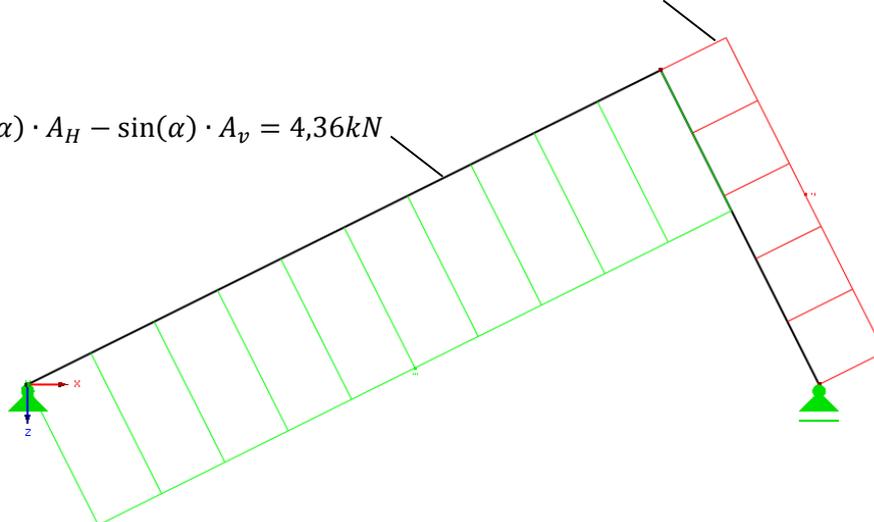
$$B_V \cdot 100 + q_{Ed} \cdot \left(\frac{200^2}{2} + \frac{100^2}{2} \right) = 600 \text{ kNcm}$$



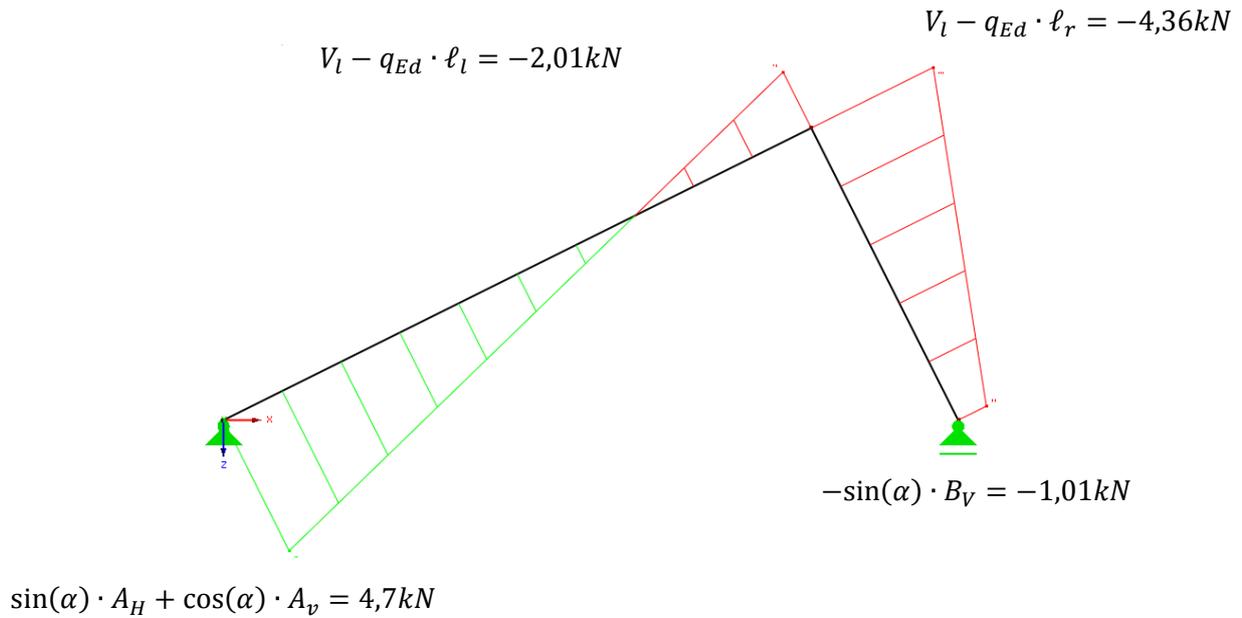
Verlauf der Normalkraft nach Theorie 1. Ordnung inf. q_{Ed}

$$-\cos(\alpha) \cdot B_V = -2,01 \text{ kN}$$

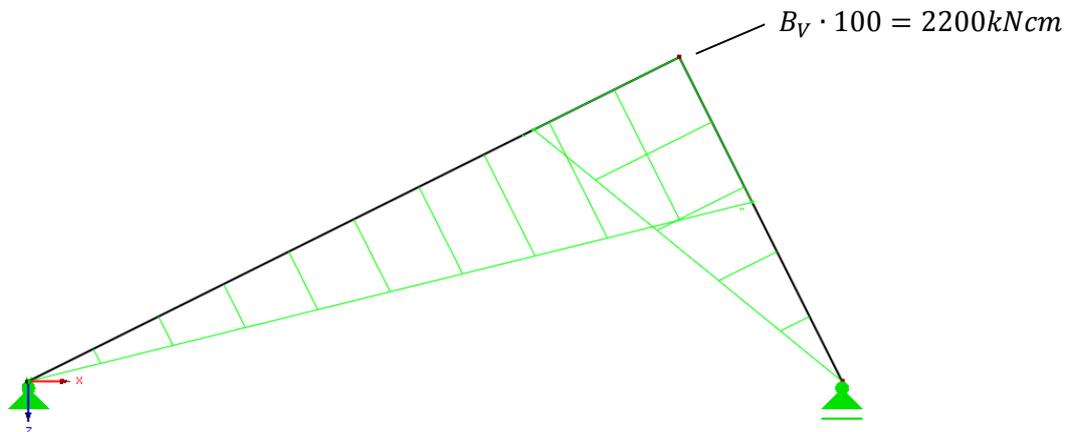
$$\cos(\alpha) \cdot A_H - \sin(\alpha) \cdot A_V = 4,36 \text{ kN}$$



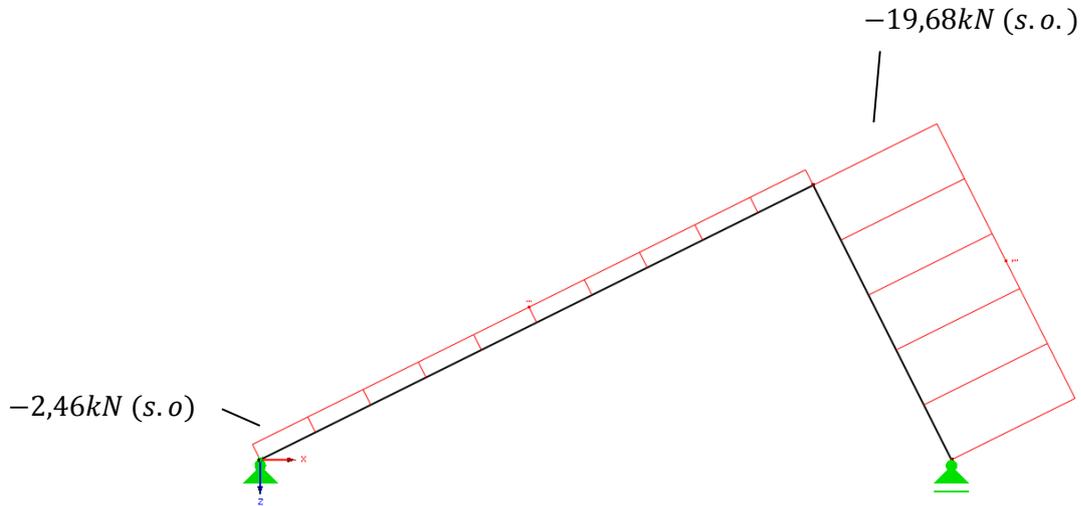
Verlauf der Querkraft nach Theorie 1. Ordnung inf. q_{Ed}



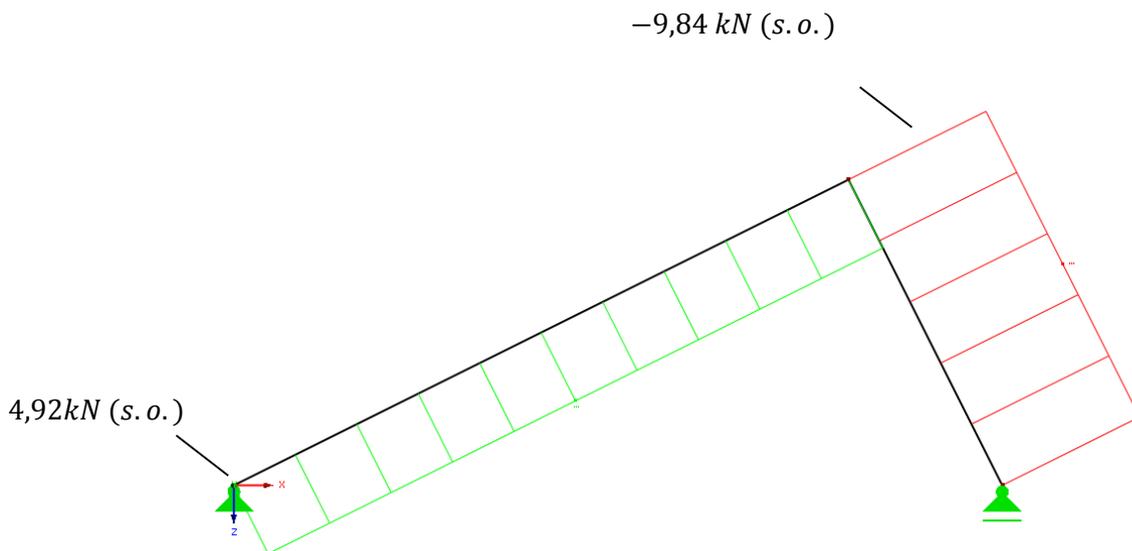
Verlauf des Biegemoments nach Theorie 1. Ordnung inf. P_{Ed}



Verlauf der Normalkraft nach Theorie 1. Ordnung inf. P_{Ed}

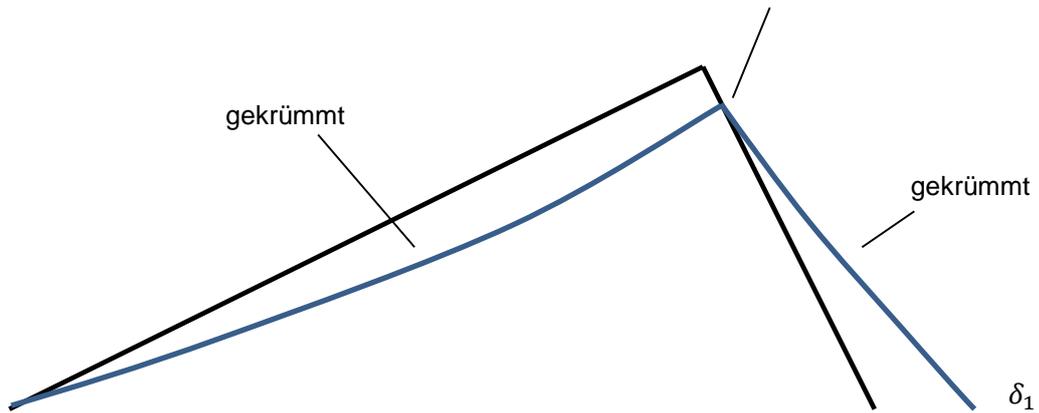


Verlauf der Querkraft nach Theorie 1. Ordnung inf. P_{Ed}

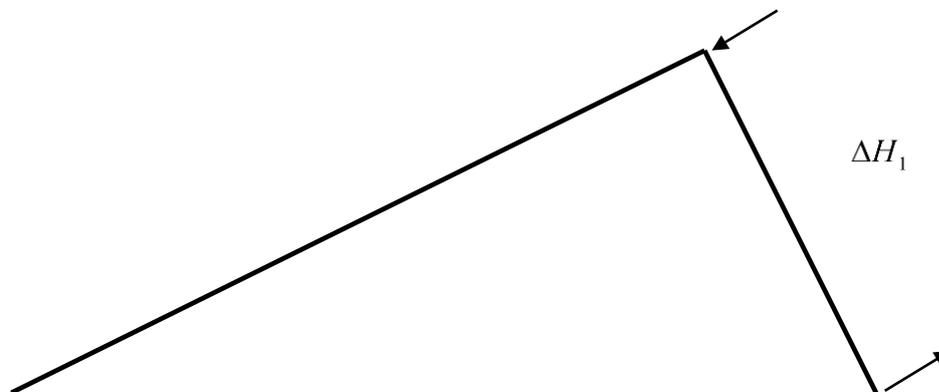


Verformungsfigur

Die Rahmenecke bewegt sich aufgrund der Projektionskonstanz auf einer Linie entlang des rechten Riegels.

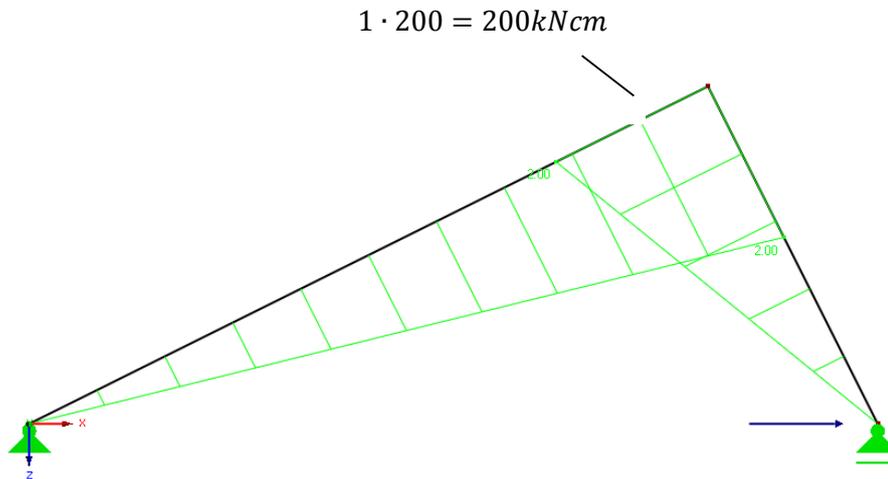


Systemskizze mit Abtriebskräften



Bestimmung der horizontalen Verschiebung δ_1

Verlauf des Biegemoments inf. 1-Last



$$\delta_1 = \frac{200}{EI} \left(\ell_l \cdot \left(\frac{1}{3} 2200 + \frac{1}{3} 600 + \frac{1}{3} q_{Ed} \cdot \frac{\ell_l^2}{8} \right) + \ell_r \cdot \left(\frac{1}{3} 2200 + \frac{1}{3} 600 - \frac{1}{3} q_{Ed} \cdot \frac{\ell_r^2}{8} \right) \right) = 9,3 \text{ cm}$$

mit

$$EI = 21000 \cdot 689 = 1446,9 \cdot 10^4 \text{ kNcm}^2$$

Abtriebskräfte

$$\Delta H_1 = N_1 \cdot \left(\frac{\cos(\alpha) \cdot \delta_1}{H} \right) = (19,68 + 2,01) \cdot \left(\frac{\cos(26,57^\circ) \cdot 9,3}{\ell_r} \right) = 0,81 \text{ kN}$$

Ermittlung des zusätzlichen Biegemomentes ΔM

$$\Delta M = 200 \cdot \Delta H_1 = 162 \text{ kNm}$$

Moment nach Th. II. Ordnung für Pos.1:

$$M'' = \frac{M'}{1 - \frac{\Delta M'}{M'}} = \frac{2800}{1 - \frac{162}{2800}} = 2972 \text{ kNcm}$$

Querschnittsnachweis

M-V Interaktion:

$$V_{Ed} = 14,2 < 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

⇒ keine M-V Interaktion erforderlich!

N-V Interaktion:

$$N_{Ed} = 21,7 < \begin{cases} 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 130,5 \text{ kN} \\ 0,5 \cdot a \cdot N_{pl,Rd} = 104,9 \text{ kN} \end{cases}$$

⇒ keine M-N Interaktion erforderlich!

Nachweis nach Theorie zweiter Ordnung:

$$M_{pl,Rd} = 32,0 \text{ kNm} > M_{Ed} = 29,72 \text{ kNm}$$

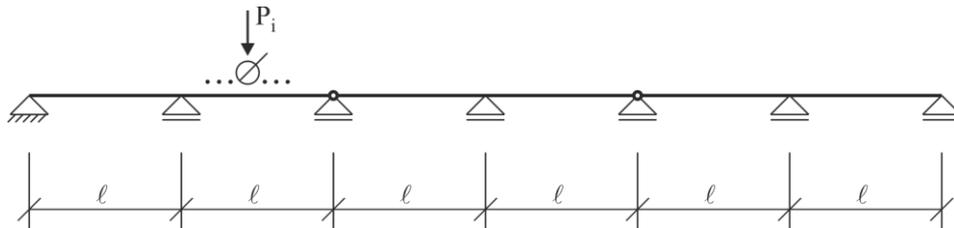
⇒ Nachweis erbracht!

Aufgabe 3

20 Punkte

gegeben:

- Kranbahnträger mit wandernder Einzellast P_i



- Material: S 355
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Mf} = 1,0$ $\gamma_{Ff} = 1,0$
- Querschnitt:



- Stützweite: $l = 5 \text{ m}$
- Einzellast: $P_i = 500 \text{ kN}$ (Hinfahrt)
 $= 0 \text{ kN}$ (Rückfahrt)
- Überfahrten: $n_i = 50.000$ pro Jahr

gesucht:

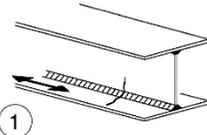
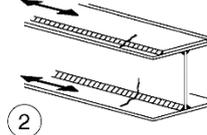
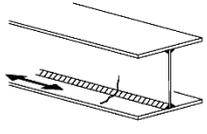
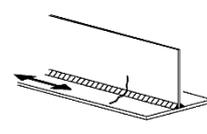
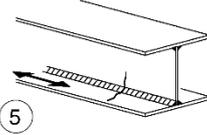
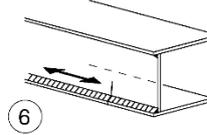
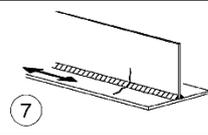
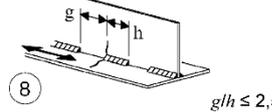
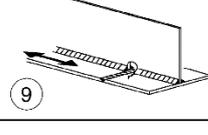
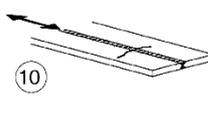
- a) Führen Sie den Ermüdungsnachweis des Kranbahnträgers in Feldmitte und im Stützbereich für eine Betriebsdauer von 10 Jahren.
- b) Nach 10 Jahren Betrieb soll die Belastung P_i um 50 % gesteigert werden. Bestimmen Sie hierfür die mögliche Restnutzungsdauer.
- c) Nennen und erläutern Sie 2 Ertüchtigungsmöglichkeiten um die Restnutzungsdauer zu verlängern.

Hinweise:

- Die Kranbahnschiene ist auf dem Kranbahnträger aufgeklemmt und trägt nicht zum Lastabtrag bei.
- Eine Auswahl möglicher Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9 ist in Anlage 3.1 und Anlage 3.2 gegeben.
- Für die Bestimmung der Momenten- und Querkraft-Einflusslinien sind Anlage 3.3 (Stützbereich) und Anlage 3.4 (Feldmitte) zu verwenden.
- Das Flächenmoment 1. Grades darf in Höhe der Schweißnaht zu $S_y = 726,6 \text{ cm}^3$ angenommen werden. Die wirksame Schweißnahtdicke beträgt $a_w = 4 \text{ mm}$.
- Der Ermüdungsnachweis ist mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.

Anlage 3.1:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.2

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125	 	<u>Durchgehende Längsnähte:</u> 1) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert $\overline{\text{AC}}$ beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte $\overline{\text{AC}}$ Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.	<u>Kerbfälle 1) und 2):</u> Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.
112	 	3) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte $\overline{\text{AC}}$ Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert $\overline{\text{AC}}$ einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerbgruppe 100 zuzuordnen.
100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) $\overline{\text{AC}}$ Von Hand oder mit Automaten oder voll mechanisiert $\overline{\text{AC}}$ einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.	5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschrägen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
100		7) $\overline{\text{AC}}$ Ausgebesserte automaten- oder voll mechanisiert geschweißte $\overline{\text{AC}}$ oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte nach Kerbfall 1) bis 6).	7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.
80		8) Unterbrochene Längsnähte.	8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
71		9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.	9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnäht, beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, 100 % ZFP.	
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.	
90		10) Mit Ansatzstellen.	
140		11) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte $\overline{\text{AC}}$ Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) $\overline{\text{AC}}$ gestrichener Text $\overline{\text{AC}}$ Wanddicke $t \leq 12,5$ mm
125		11) $\overline{\text{AC}}$ Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte $\overline{\text{AC}}$ Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Wanddicke $t > 12,5$ mm
90		11) Mit Ansatzstellen.	

Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfalkategorien für Automaten-schweißung.

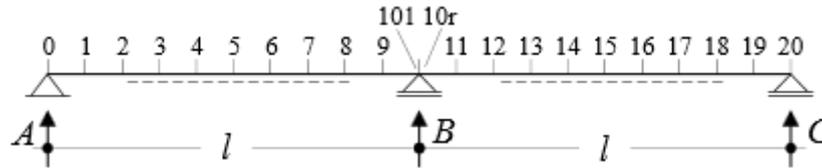
Anlage 3.2:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.5

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$l < 50$	alle t		<p><u>Kreuz- und T-Stöße:</u></p> <p>1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.</p> <p>2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln.</p> <p>3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 mit Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w, zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.</p>
71	$50 < l \leq 80$	alle t		
63	$80 < l \leq 100$	alle t		
56	$100 < l \leq 120$	alle t		
56	$l > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < l \leq 200$ $l > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$		
45	$200 < l \leq 300$ $l > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$	<p>2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.</p>	<p><u>Kerbfälle 1) bis 3):</u></p> <p>Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.</p>
40	$l > 300$	$t > 50$		
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>verformbares Anschlussblech</p>		<p>3) Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005. $\Delta\sigma$</p>	<p>4) Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche.</p> <p>5) Berechnung von $\Delta\sigma$ in den überlappenden Laschen.</p> <p><u>Kerbfälle 4) und 5):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. Ein Schubarriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall 8) zu überprüfen.
36*				
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>Spannungsfläche im Hauptblech: Neigung = 1/2</p>		<p>5) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.</p>	<p>6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirrnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich.</p> <p>Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm.</p> <p>Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.</p>
45*				
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p>7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. $5t_c$ ist die Minimallänge der Verstärkungsnaht.</p> <p>7) Die Stirrnaht ist blecheben zu schleifen. Zusätzlich ist für $t_c > 20$ mm die Lamelle mit einer Neigung $< 4^\circ$ auszubilden.</p>
50	$t \leq 20$	-		
45	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
40	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
36	-	$t > 50$		
56	<p>verstärkte Stirrnaht</p>		<p>8) Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern.</p> <p>9) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.</p>	<p>8) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen.</p> <p>9) $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.</p>
80 $m=5$				

Anlage 3.3:

Einflusslinie für einen Zweifeldträger mit gleichen Stützweiten



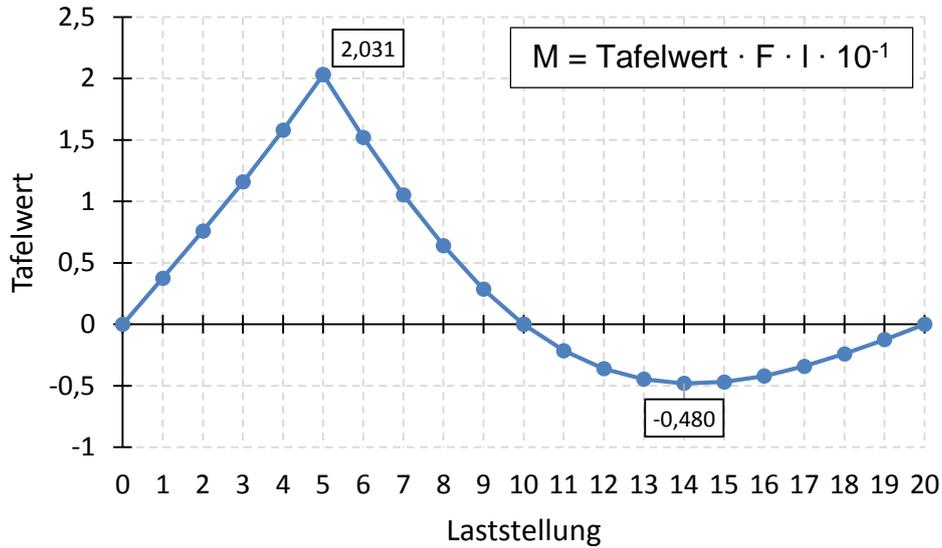
ergibt die Biegemomente $M = \text{Tafelwert} \cdot F \cdot l \cdot 10^{-1}$ in den Punkten

$V = \text{Tafelwert} \cdot F \cdot 10^{-1}$

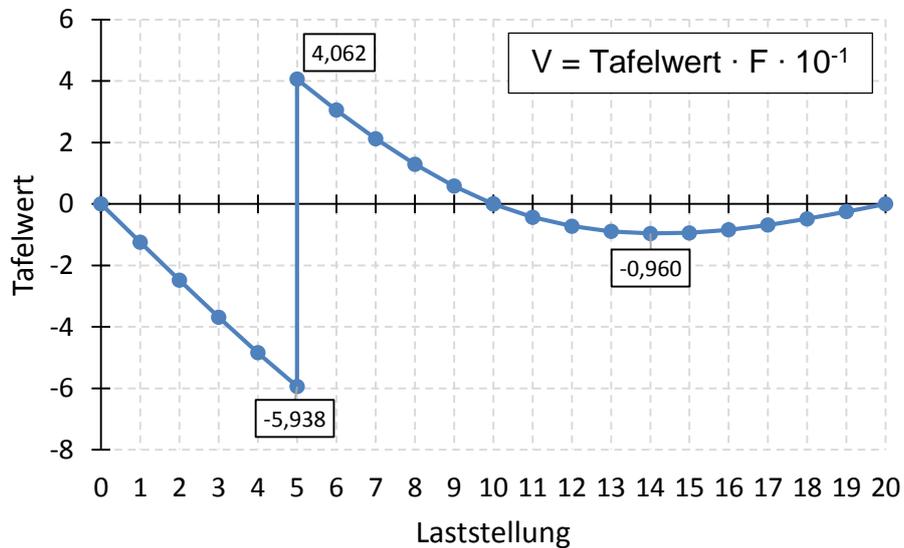
Einzellast F in Punkt											V_0	V_{10l}	V_{10r}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0
1	0,875	0,751	0,626	0,501	0,376	0,252	0,127	0,002	-0,123	-0,248	8,753	-1,248	0,248
2	0,752	1,504	1,256	1,008	0,760	0,512	0,264	0,016	-0,232	-0,480	7,520	-2,480	0,480
3	0,632	1,264	1,895	1,527	1,159	0,791	0,422	0,054	-0,314	-0,683	6,318	-3,683	0,683
4	0,516	1,032	1,548	2,064	1,580	1,096	0,612	0,128	-0,356	-0,840	5,160	-4,840	0,840
5	0,406	0,812	1,219	1,625	2,031	1,438	0,844	0,250	-0,344	-0,938	4,063	-5,938	0,938
6	0,304	0,608	0,912	1,216	1,520	1,824	1,128	0,432	-0,264	-0,960	3,040	-6,960	0,960
7	0,211	0,422	0,632	0,843	1,054	1,265	1,475	0,686	-0,103	-0,893	2,108	-7,893	0,893
8	0,128	0,256	0,384	0,512	0,640	0,768	0,896	1,024	0,152	-0,720	1,280	-8,720	0,720
9	0,057	0,115	0,172	0,229	0,286	0,344	0,401	0,458	0,515	-0,428	0,573	-9,430	0,428
10 _l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-10,0	0,0
10 _r	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0
11	-0,043	-0,086	-0,128	-0,171	-0,214	-0,257	-0,299	-0,432	-0,385	-0,428	-0,428	-0,428	9,428
12	-0,072	-0,144	-0,216	-0,288	-0,360	-0,432	-0,504	-0,576	-0,648	-0,720	-0,720	-0,720	8,720
13	-0,089	-0,179	-0,268	-0,357	-0,446	-0,536	-0,625	-0,714	-0,803	-0,893	-0,893	-0,893	7,893
14	-0,096	-0,192	-0,288	-0,384	-0,480	-0,576	-0,672	-0,768	-0,864	-0,960	-0,960	-0,960	6,960
15	-0,094	-0,188	-0,281	-0,375	-0,469	-0,563	-0,656	-0,750	-0,844	-0,938	-0,938	-0,938	5,938
16	-0,084	-0,168	-0,252	-0,336	-0,420	-0,504	-0,588	-0,676	-0,756	-0,840	-0,840	-0,840	4,840
17	-0,068	-0,137	-0,205	-0,273	-0,341	-0,410	-0,478	-0,546	-0,614	-0,683	-0,683	-0,683	3,683
18	-0,048	-0,096	-0,144	-0,192	-0,240	-0,288	-0,336	-0,384	-0,432	-0,480	-0,480	-0,480	2,480
19	-0,025	-0,050	-0,074	-0,099	-0,124	-0,149	-0,173	-0,198	-0,223	-0,248	-0,248	-0,248	1,248
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Anlage 3.4:

Momenten-Einflusslinie in **Feldmitte** für einen Zweifeldträger mit gleichen Stützweiten



Querkraft-Einflusslinie in **Feldmitte** für einen Zweifeldträger mit gleichen Stützweiten



Musterlösung Aufgabe 3

- a) Führen Sie den Ermüdungsnachweis des Kranbahnträgers in Feldmitte und im Stützbereich für eine Betriebsdauer von 10 Jahren.

Querschnittswerte Kranbahnträger:

$$I_{y,ges} = I_{HEA} + 2 \cdot I_{BI} = 141.200 + 2 \cdot \frac{1,5 \cdot 56,5^3}{12} = 186.291 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,ges} = \frac{I_{y,ges}}{z} = \frac{186.291}{(56,5/2)} = 6.594 \text{ cm}^3 \quad (\text{auf Höhe der Schweißnaht!})$$

Kerbfälle und Ermüdungsfestigkeitskurven:

Normalspannungen in Schweißnaht \Rightarrow Kerbfall 100

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 100 / 1,0 = 100,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 100,0 = 73,7 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_D = 5 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 73,7 = 40,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

Schubspannungen in Schweißnaht \Rightarrow Kerbfall 80

$$\Delta\tau_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 80 / 1,0 = 80,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\tau_L = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_L}} \cdot \Delta\tau_C = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 80,0 = 36,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

Spannungsschwingbreiten und zul. Schwingspiele

ΔM und ΔQ aus Anlage 3.3 und Anlage 3.4 mit $F = 500 \text{ kN}$ und $l = 5 \text{ m}$

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{W_{y,ges}} \quad \text{und} \quad \Delta\tau = \frac{\Delta Q \cdot S_y}{I_{y,ges} \cdot a_w}$$

$$N_{i,\sigma} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^{3 \text{ bzw. } 5} \quad \text{und} \quad N_{i,\tau} = N_L \cdot \left(\frac{\Delta\tau_L}{\Delta\tau_i} \right)^5$$

	ΔM bzw. ΔQ [kNm bzw. kN]	Anzahl pro Fahrt [-]	$\Delta\sigma$ bzw. $\Delta\tau$ [N/mm ²]	m [-]	N_i [-]
$\Delta M_{F,1}$	627,75	1	95,2	3	2.318.392
$\Delta Q_{F,1}$	500,0	1	48,8	5	23.790.677
$\Delta Q_{F,2}$	48,0	1	4,7	-	-
$\Delta M_{S,1}$	240,0	2	36,4	-	-
$\Delta Q_{S,1}$	500,0	1	48,8	5	23.790.677
$\Delta Q_{S,2}$	48,0	1	4,7	-	-

Ermüdungsnachweis Feldmitte:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot 500.000}{2.318.392} + \frac{1 \cdot 500.000}{23.790.677} = 0,24 \stackrel{!}{\leq} 1,0 \Rightarrow \text{Nachweis eingehalten!}$$

Ermüdungsnachweis Stützbereich:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot 500.000}{23.790.677} = 0,02 \stackrel{!}{\leq} 1,0 \Rightarrow \text{Nachweis eingehalten!}$$

- b) Nach 10 Jahren Betrieb soll die Belastung P_i um 50 % gesteigert werden. Bestimmen Sie hierfür die mögliche Restnutzungsdauer.

Ermüdungsnachweis in Feldmitte maßgebend (vgl. Aufgabenteil a)!

ΔM und ΔQ aus Anlage 3.3 und Anlage 3.4 mit $F = 750$ kN und $l = 5$ m bzw. Werte aus Aufgabenteil a) mit 1,5 multiplizieren!

	ΔM bzw. ΔQ [kNm bzw. kN]	Anzahl pro Fahrt [-]	$\Delta\sigma$ bzw. $\Delta\tau$ [N/mm ²]	m [-]	N_i [-]
$\Delta M_{F,1}$	941,63	1	142,8	3	686.931
$\Delta Q_{F,1}$	750,0	1	73,1	5	3.132.929
$\Delta Q_{F,2}$	72,0	1	7,0	-	-

Ermüdungsnachweis Feldmitte:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot 500.000}{2.318.392} + \frac{1 \cdot x}{686.931} + \frac{1 \cdot 500.000}{23.790.677} + \frac{1 \cdot x}{3.132.929} = 1,0$$

$$\Rightarrow x = 430.052$$

Die Restlebensdauer beträgt 430.052 Überfahrten bzw. 8,6 Jahre!

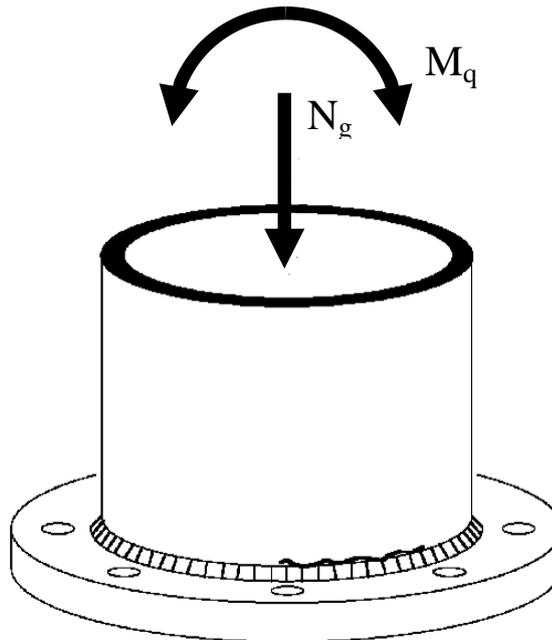
c) Nennen und erläutern Sie 2 Ertüchtigungsmöglichkeiten um die Restnutzungsdauer zu verlängern.

- 1.) Flächenträgheitsmoment bzw. Widerstandsmoment durch anschweißen von zusätzlichen Laschen erhöhen.
 - Reduziert die Normalspannungen in den Schweißnähten!
- 2.) Schweißnahtmaß a_w erhöhen.
 - Reduziert die Schubspannungen in den Schweißnähten!
- 3.) Zusätzliche Zwischenaufleger einfügen.
 - Reduziert die resultierenden Biegemomente. In der Praxis jedoch meistens nur bedingt umsetzbar!
- 4.) Berücksichtigung der genauen Lastverteilung aus der Kranbahn.
 - Reduziert die Schnittgrößen insgesamt!
- 5.) Seitliche Bleche durch Laschen ersetzen (Flächenträgheitsmoment bzw. Widerstandsmoment mindestens erhalten).
 - Günstigerer Kerbfall (100 \Rightarrow 125)!

Aufgabe 3**16 Punkte**

gegeben:

- Ringflanschanschluss mit ständiger Last N_g und veränderlicher Last M_q



- Experimentell ermittelte Wöhlerlinie:

Lastniveau $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Spannungsschwingspiele N [-]
245,0	10.000
50,3 ($\Delta\sigma_D$)	3.000.000
24,5 ($\Delta\sigma_L$)	300.000.000

- Schrauben: 8 x M30-10.9
- Material: S 355
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Mf} = 1,0$ $\gamma_{Ff} = 1,0$
- Querschnittswerte:
 - Außendurchmesser: $D_a = 1.500$ mm
 - Blechdicke: $t = 40$ mm

- Ständige Belastung: $N_g = 4.500 \text{ kN}$
- Lastkollektiv für M_q :

	Moment ΔM_q [kNm]	Schwingspiele [-]
1	4.830	80.000
2	3.650	300.000
3	2.800	1.600.000
4	2.220	8.000.000
5	1.830	30.000.000
6	1.560	60.000.000
7	1.370	120.000.000
8	1.170	250.000.000
9	980	500.000.000

gesucht:

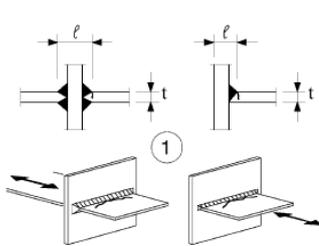
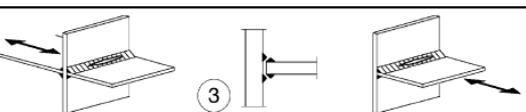
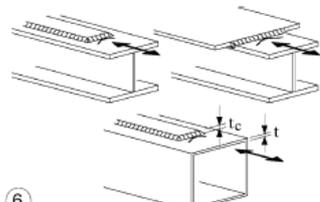
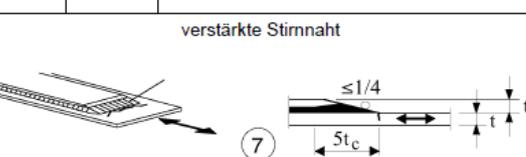
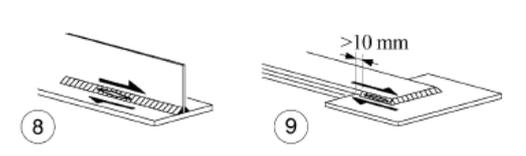
- a) Bestimmen Sie den Kerbfall und die charakteristischen Punkte der Wöhlerlinie für die Ringflanschverbindung (vgl. Anlage 3.1).
- b) Zeichnen Sie sowohl die normative als auch die experimentell ermittelte Wöhlerlinie in Anlage 3.2 ein.
- c) Bestimmen Sie abschnittsweise die Steigung m der experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeitskurve. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit darf zu 10^8 Spannungsschwingspielen angenommen werden.
- d) Führen Sie den Ermüdungsnachweis für die Ringflanschverbindung anhand der experimentell ermittelten Wöhlerlinie.

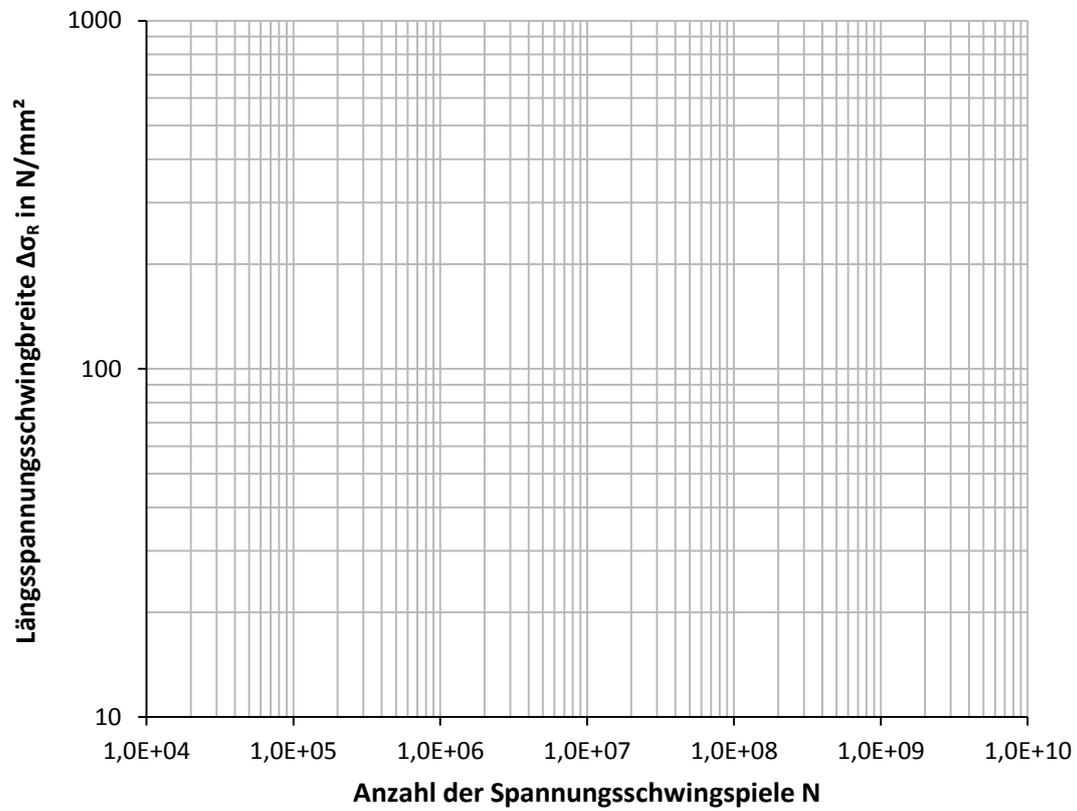
Hinweise:

- Die Schweißnaht der Ringflanschverbindung ist als Kehlnaht ausgeführt.
- Der Ermüdungsnachweis ist mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.
- $a^x = b \Rightarrow x = \frac{\ln b}{\ln a}$

Anlage 3.1:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.5

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$\ell < 50$	alle r		<p>Kreuz- und T-Stöße:</p> <p>1) Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.</p> <p>2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln.</p> <p>3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 mit Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w, zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$	alle r		
63	$80 < \ell \leq 100$	alle r		
56	$100 < \ell \leq 120$	alle r		
56	$\ell > 120$	$r \leq 20$		
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$r > 20$ $20 < r \leq 30$		
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$r > 30$ $30 < r \leq 50$		
40	$\ell > 300$	$r > 50$		
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>verformbares Anschlussblech</p> 		<p>2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3):</p> <p>Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.</p>
36*			<p>3) Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005. <small>(A2)</small></p>	
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p>6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirnnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich.</p> <p>Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm.</p> <p>Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.</p>
50	$t \leq 20$	–		
45	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
40	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
36	–	$t > 50$		
56	<p>verstärkte Stirnnaht</p> 		<p>7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. $5 t_c$ ist die Minillänge der Verstärkungsnaht.</p>	<p>7) Die Stirnnaht ist blecheben zu schleifen. Zusätzlich ist für $t_c > 20$ mm die Lamelle mit einer Neigung $< 4^\circ$ auszubilden.</p>
80 $m=5$			<p>8) Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern.</p> <p>9) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.</p>	<p>8) Δr ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen.</p> <p>9) Δr ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.</p>
71			<p>11) Ringflansanschluss mit zu 80 % durchgeschweißten Stumpfnähten.</p>	<p>11) Der Schweißnahtübergang ist zu überschleifen. $\Delta\sigma$ wird am Rohrquerschnitt berechnet.</p>
40			<p>12) Ringflansanschluss mit Kehlnähten</p>	<p>12) $\Delta\sigma$ wird am Rohrquerschnitt berechnet.</p>

Anlage 3.2:

MUSTERLÖSUNG Aufgabe 3

- a) Bestimmen Sie den Kerbfall und die charakteristischen Punkte der Wöhlerlinie für die Ringflanschverbindung (vgl. Anlage 3.1).

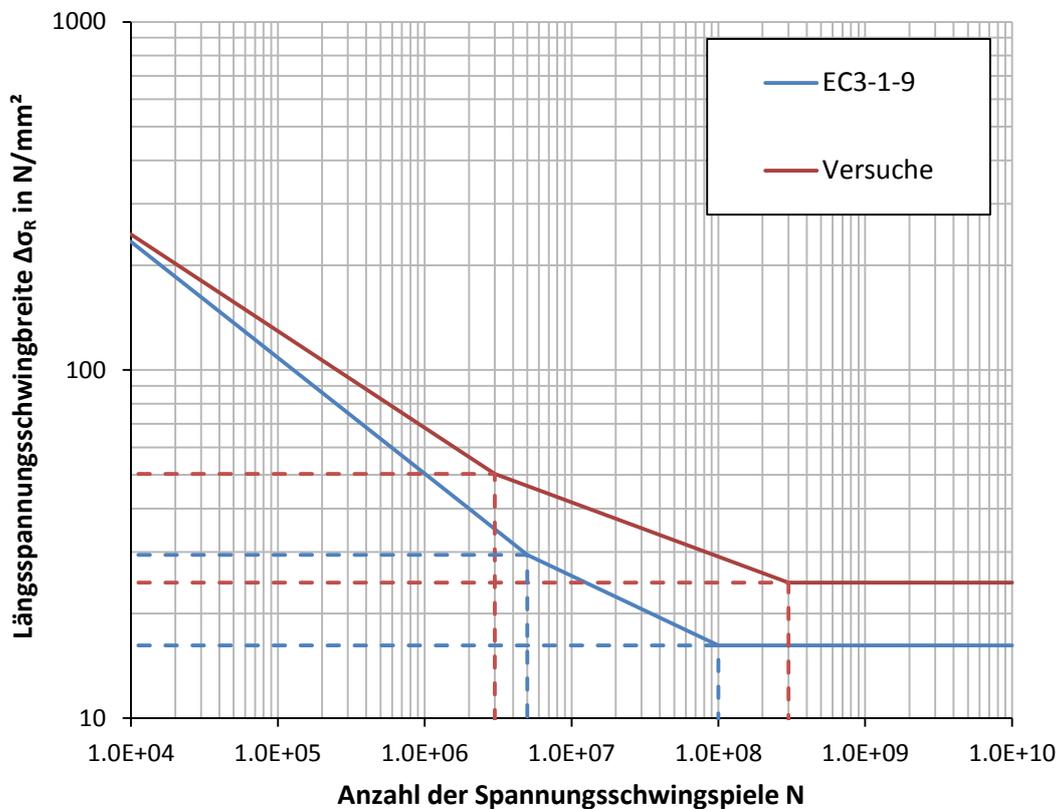
Ringflanschverbindung \Rightarrow Kerbfall 40

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 40 / 1,0 = 40,0 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_C = 2 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 40,0 = 29,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_D = 5 \times 10^6)$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 29,5 = 16,2 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{bei } N_L = 1 \times 10^8)$$

- b) Zeichnen Sie sowohl die normative als auch die experimentell ermittelte Wöhlerlinie in Anlage 3.2 ein.



- c) Bestimmen Sie abschnittsweise die Steigung m der experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeitskurve. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit darf zu 10^8 Spannungsschwingspielen angenommen werden.

HINWEIS:

Die Beziehung zwischen 2 Punkten einer Ermüdungsfestigkeitskurve auf einem Abschnitt mit einheitlicher Steigung m lautet:

$$\Delta\sigma_A^m \cdot N_A = \Delta\sigma_B^m \cdot N_B$$

woraus folgende Gleichung folgt:

$$\Delta\sigma_B = \Delta\sigma_A \cdot \left(\frac{N_A}{N_B} \right)^{1/m}$$

Sind 2 Punkte einer Ermüdungsfestigkeitskurve bekannt kann die Ausgangsgleichung zur Bestimmung der Steigung m verwendet werden:

$$\frac{\Delta\sigma_A^m}{\Delta\sigma_B^m} = \frac{N_B}{N_A} \Rightarrow m = \frac{\text{LN}\left(\frac{N_B}{N_A}\right)}{\text{LN}\left(\frac{\Delta\sigma_A}{\Delta\sigma_B}\right)}$$

$$m_1 = \frac{\text{LN}\left(\frac{3 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^4}\right)}{\text{LN}\left(\frac{245,0}{50,3}\right)} = 3,6 \quad m_2 = \frac{\text{LN}\left(\frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^6}\right)}{\text{LN}\left(\frac{50,3}{24,5}\right)} = 6,4$$

- d) Führen Sie den Ermüdungsnachweis für die Ringflanschverbindung anhand der experimentell ermittelten Wöhlerlinie.

Spannungsschwingbreiten und zul. Schwingspiele:

$$I_y = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_A}{2} \right)^4 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_I}{2} \right)^4 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1.500}{2} \right)^4 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1.500 - 2 \cdot 40}{2} \right)^4 = 4,8922 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{(D_A/2)} = \frac{4,8922 \cdot 10^{10}}{(1500/2)} = 6,52293 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{W_y}$$

$$N_i = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^m = 3 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{50,3}{\Delta\sigma_i} \right)^m$$

	ΔM_q [kNm]	Schwingspiele [-]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m [-]	N_i [-]
1	4.830	80.000	74,0	3,6	744.937
2	3.650	300.000	56,0	3,6	2.043.561
3	2.800	1.600.000	42,9	6,4	8.277.874
4	2.220	8.000.000	34,0	6,4	36.582.533
5	1.830	30.000.000	28,1	6,4	126.012.739
6	1.560	60.000.000	23,9	-	-
7	1.370	120.000.000	21,0	-	-
8	1.170	250.000.000	17,9	-	-
9	980	500.000.000	15,0	-	-

Ermüdungsnachweis nach Palmgren-Miner:

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = 0,904 \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad \text{Nachweis eingehalten!}$$

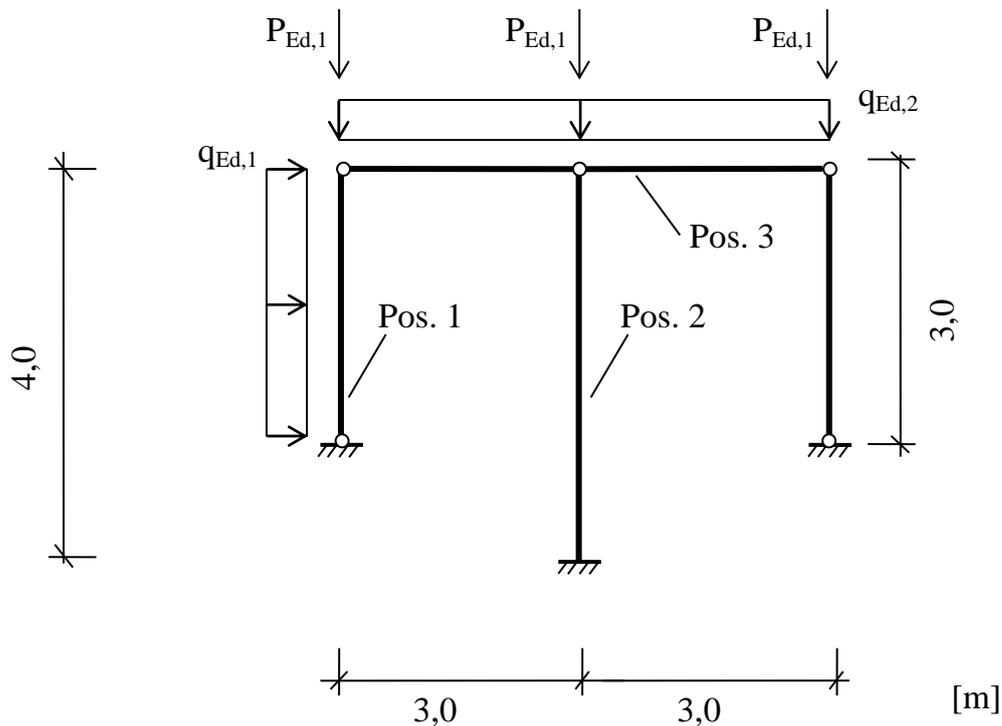
Aufgabe 2

18 Punkte

gegeben:

- Statisches System unter Last gemäß Skizze:

Die Imperfektionen werden in der Musterlösung erst bei der Berechnung nach Theorie II Ordnung angesetzt. Eigentlich müssten diese jedoch schon bei der Berechnung nach Theorie I Ordnung berücksichtigt werden.



- Bemessungswerte der Lasten: $q_{Ed,1} = 3,0 \text{ kN/m}$
 $q_{Ed,2} = 5,0 \text{ kN/m}$
 $P_{Ed,1} = 50 \text{ kN}$
- Pos. 1: IPE 160
S 235
- Pos. 2: IPE 220
S 235
- Pos. 3: IPE 200
S 235

gesucht:

- a) Bemessen Sie Pos. 1 nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der dafür notwendigen Imperfektionen.
- b) Bemessen Sie Pos. 2 nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der dafür notwendigen Imperfektionen.

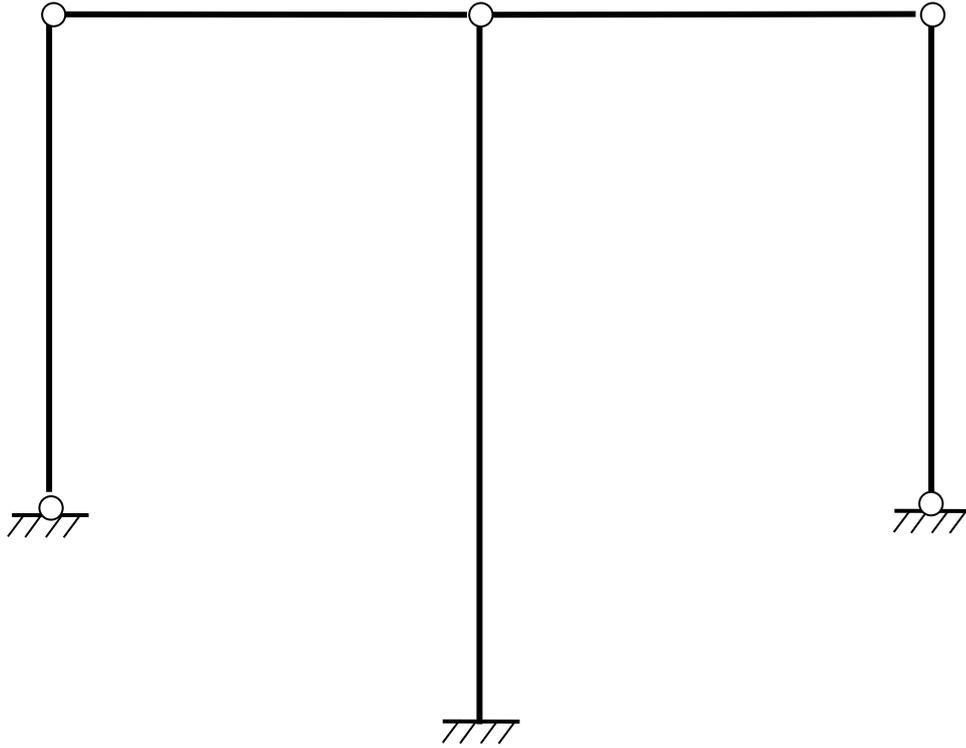
Dokumentieren Sie folgende Schritte:

- Schnittgrößenverläufe nach Theorie 1. Ordnung.
- Qualitative Verformungsfigur des Systems (Anlage 2.1)
- Systemskizzen mit Abtriebskräften
- Angabe der nach DIN EN 1993-1-1 anzusetzenden Imperfektionen (Anlage 2.2)

Hinweise:

- Längsdehnungen der Pfosten und des Riegels sind zu vernachlässigen.
- Die Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie 2. Ordnung ist mit dem ΔM -Verfahren durchzuführen (geometrische Reihe).
- Bei Querschnittsnachweisen darf im Falle einer M-N Interaktion die Normalkraft vereinfacht nach Theorie 1. Ordnung verwendet werden.

Anlage 2.1:



Anlage 2.2:

a) globale Anfangsschiefstellung, siehe Bild 5.2:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

Dabei ist

ϕ_0 der Ausgangswert: $\phi_0 = 1/200$;

α_h der Abminderungsfaktor für die Höhe h von Stützen:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \text{ jedoch } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

h die Höhe des Tragwerks, in m;

α_m der Abminderungsfaktor für die Anzahl der Stützen in einer Reihe: $\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$

m Anzahl der Stützen in einer Reihe, unter ausschließlicher Betrachtung der Stützen, die eine Vertikalbelastung größer 50 % der durchschnittlichen Stützenlast in der betrachteten vertikalen Richtung übernehmen.

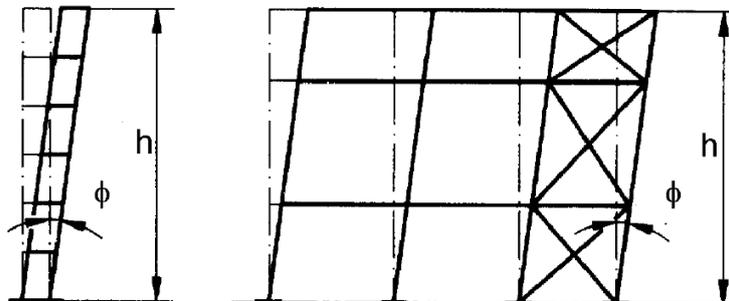


Bild 5.2 — Äquivalente Stützenschiefstellung

b) eingeprägte Vorkrümmung von Bauteilen

$$e_{0,d}/L$$

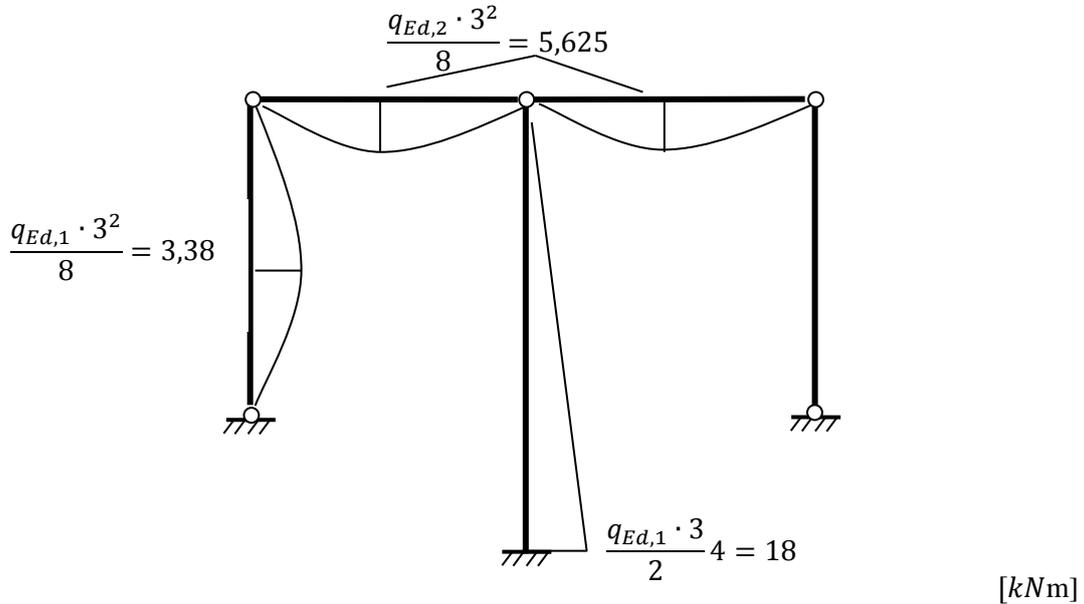
Dabei ist L die Bauteillänge.

Tabelle NA.1 —Vorkrümmung e_0/L von Bauteilen

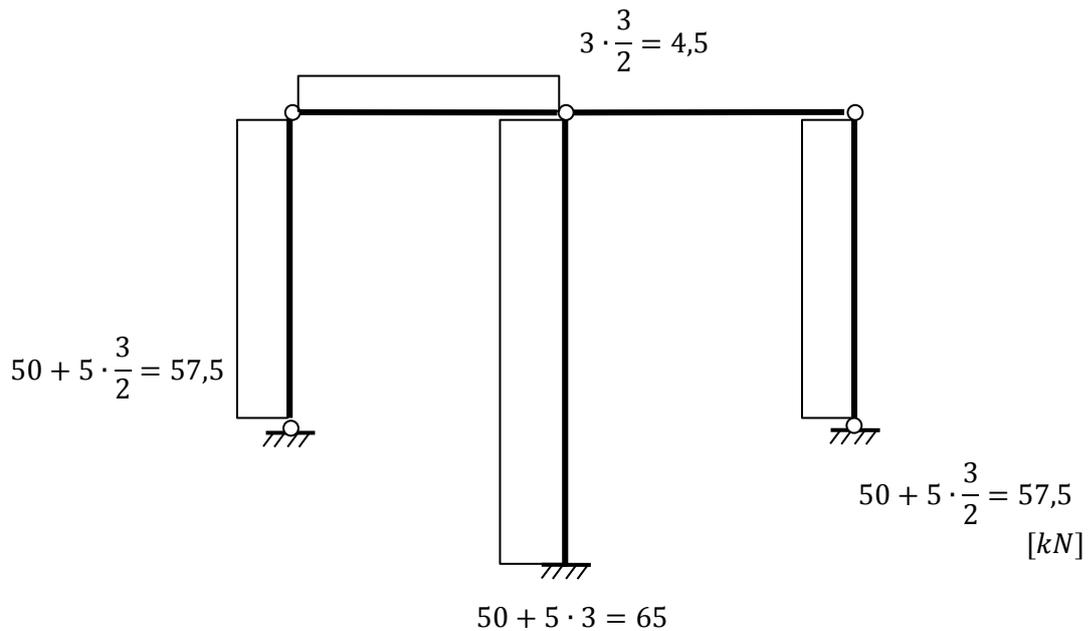
Knicklinie nach DIN EN 1993-1-1:2010-12, Tabelle 6.1	elastische Querschnitts- ausnutzung	plastische Querschnitts- ausnutzung
	e_0/L	e_0/L
a ₀	1 / 900	wie bei elastischer Querschnitts- ausnutzung, jedoch $\frac{M_{pl,k}}{M_{el,k}}$ -fach
a	1 / 550	
b	1 / 350	
c	1 / 250	
d	1 / 150	

Musterlösung Aufgabe 2:

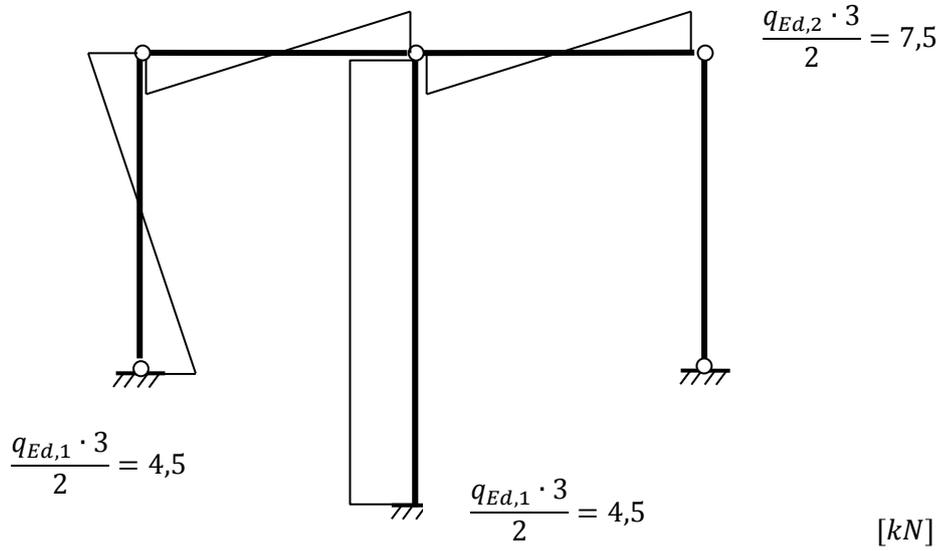
Verlauf des Biegemoments nach Theorie 1. Ordnung



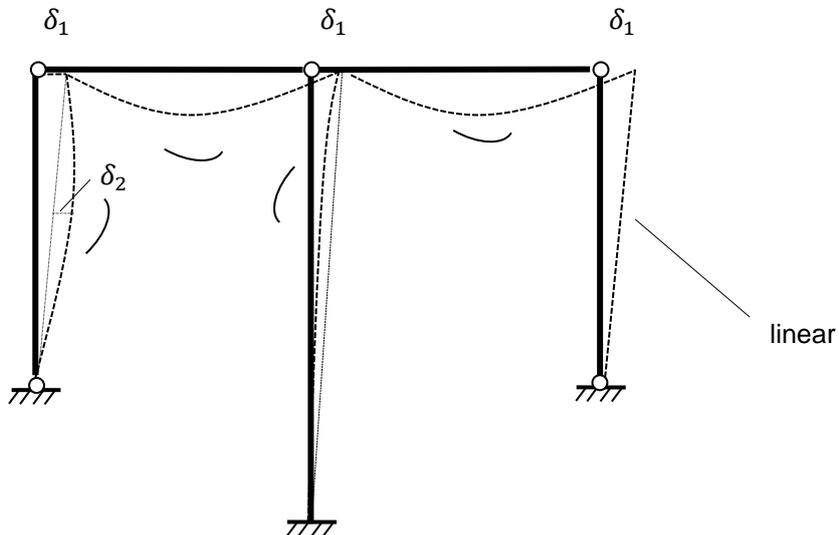
Verlauf der Normalkraft nach Theorie 1. Ordnung



Verlauf der Querkraft nach Theorie 1. Ordnung



Verformungsfigur



- a) Bemessen Sie Pos. 1 nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der dafür notwendigen Imperfektionen.

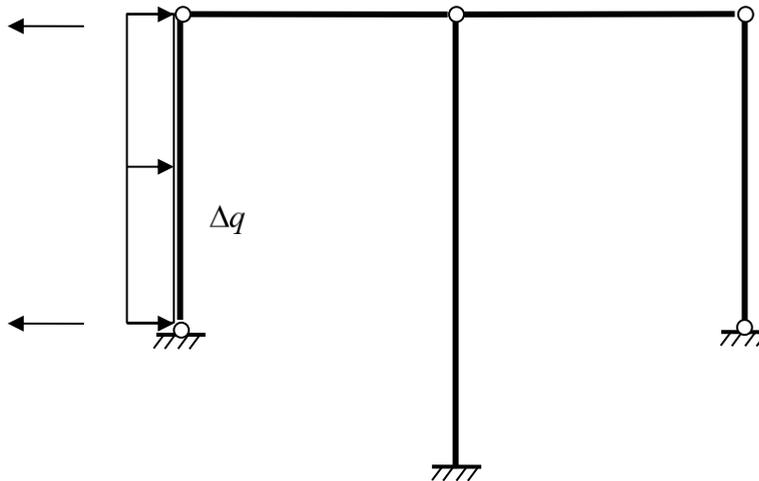
Bestimmung der Vorkrümmung

Plastische Bemessung:

$$e_{0,d} / l = \frac{1}{550} \cdot \frac{M_{pl}}{M_{el}} = \frac{1}{482}$$

$$e_{0,d} = 0,62 \text{ cm}$$

Systemskizze mit Abtriebskräften



Bestimmung der horizontalen Verschiebung δ_2

$$\delta_2 = \frac{1}{EI_{Pos.1}} \frac{5 \cdot q_{Ed,1} \cdot 3^3}{384} = 0,17 \text{ cm}$$

.

mit

$$EI_{Pos.1} = 21000 \cdot 869 \cdot 10^{-4} = 1824,9 \text{ kNm}^2$$

Abtriebskraft

$$\Delta q = \frac{8 \cdot N_1 \cdot (e_{0,d} + \delta_2)}{l^2} = \frac{8 \cdot 57,5 \cdot (0,006 + 0,0017)}{3^2} = 0,4 \text{ kN/m}$$

Ermittlung des zusätzlichen Biegemomentes ΔM

$$\Delta M = \frac{\Delta q \cdot l^2}{8} = 0,45 \text{ kNm}$$

Moment nach Th. II. Ordnung für Pos.1:

$$M'' = \frac{M^I}{1 - \frac{\Delta M^I}{M^I}} = \frac{3,38}{1 - \frac{0,45}{3,38}} = 3,89 \text{ kNm}$$

Querkraft im Punkt des Momentenmaximums = 0 → keine M-V Interaktion!

Querschnittsnachweis

$$N_{\text{Ed}} = 57,5 \leq \begin{cases} 0,25 \cdot N_{\text{pl,Rd}} = 118,0 \text{ kN} \\ 0,5 \cdot a \cdot N_{\text{pl,Rd}} = 93,5 \text{ kN} \end{cases}$$

-> keine M-N Interaktion erforderlich

Nachweis nach Theorie zweiter Ordnung:

$$M_{\text{pl,Rd}} = 29,1 \text{ kNm} > M_{\text{Ed}} = 3,89 \text{ kNm}$$

-> Nachweis erbracht.

b) Bemessen Sie Pos. 2 nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung der dafür notwendigen Imperfektionen.

Hinweis: Die Stützenkopferschiebungen infolge Imperfektionen müssen identisch sein, es werden daher 2 Fälle untersucht.

Bestimmung der Schiefstellung

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

mit: $\phi_0 = \frac{1}{200}$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{3,0}} = 1,15 > 1 \quad \text{und} \quad \alpha_m = \frac{2}{\sqrt{4,0}} = 1,0$$

Da beide Abminderungsfaktoren 1 sind, „erzeugt“ Pos. 2 eine größere Stützenkopfverschiebung.

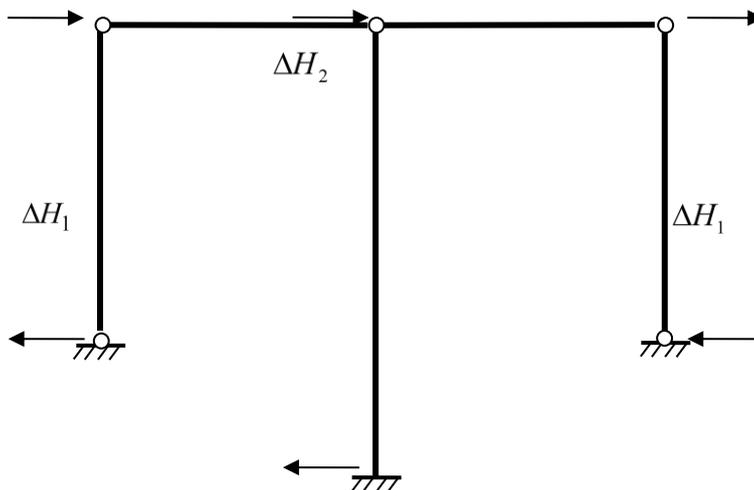
$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right)} = 0,816$$

Stützenkopfverschiebung:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,004$$

$$\delta_i = \phi \cdot 400 = 1,6 \text{ cm}$$

Systemskizze mit Abtriebskräften



Bestimmung der horizontalen Verschiebung δ_1

$$\delta_1 = \frac{1}{EI_{\text{Pos.2}}} \frac{4,5 \cdot 4^3}{3} \cdot 100 = 1,65 \text{ cm}$$

.

mit

$$EI_{\text{Pos.2}} = 21000 \cdot 2770 \cdot 10^{-4} = 5817 \text{ kNm}^2$$

Abtriebskräfte

$$\Delta H_1 = N_1 \cdot \left(\frac{\delta_1 + \delta_i}{H} \right) = 57,5 \cdot \left(\frac{3,25}{300} \right) = 0,62 \text{ kN}$$

$$\Delta H_2 = N_2 \cdot \left(\frac{\delta_1 + \delta_i}{H} \right) = 65 \cdot \left(\frac{3,25}{400} \right) = 0,46 \text{ kN}$$

Ermittlung des zusätzlichen Biegemomentes ΔM

$$\Delta M = 4,0 \cdot (2 \cdot \Delta H_1 + \Delta H_2) = 6,8 \text{ kNm}$$

Moment nach Th. II. Ordnung für Pos.1:

$$M'' = \frac{M^I}{1 - \frac{\Delta M^I}{M^I}} = \frac{18}{1 - \frac{6,8}{18}} = 28,93 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 4,5 \leq 0,5 \cdot V_{z,pl,Rd}$$

→ M-V Interaktion muss nicht nachgewiesen zu werden.

Querschnittsnachweis

$$N_{Ed} = 65 \leq \begin{cases} 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 196,1 \text{ kN} \\ 0,5 \cdot a \cdot N_{pl,Rd} = 154,3 \text{ kN} \end{cases}$$

-> keine M-N Interaktion erforderlich

Nachweis nach Theorie zweiter Ordnung:

$$M_{pl,Rd} = 67,1 \text{ kNm} > M_{Ed} = 29 \text{ kNm}$$

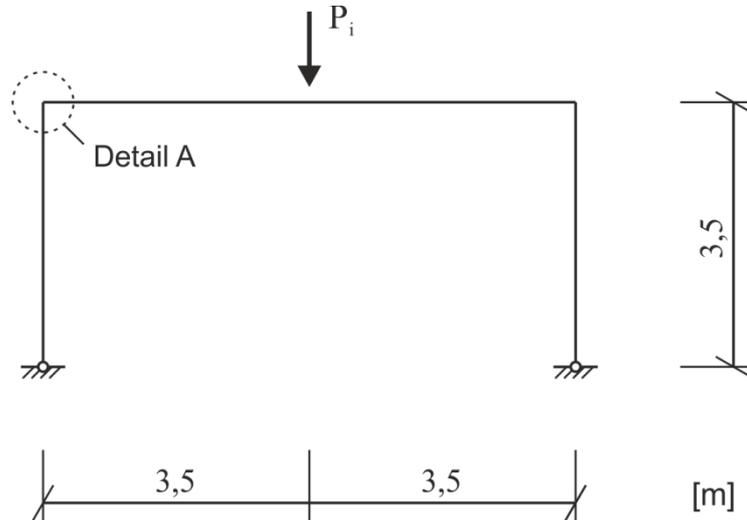
-> Nachweis erbracht.

Aufgabe 3

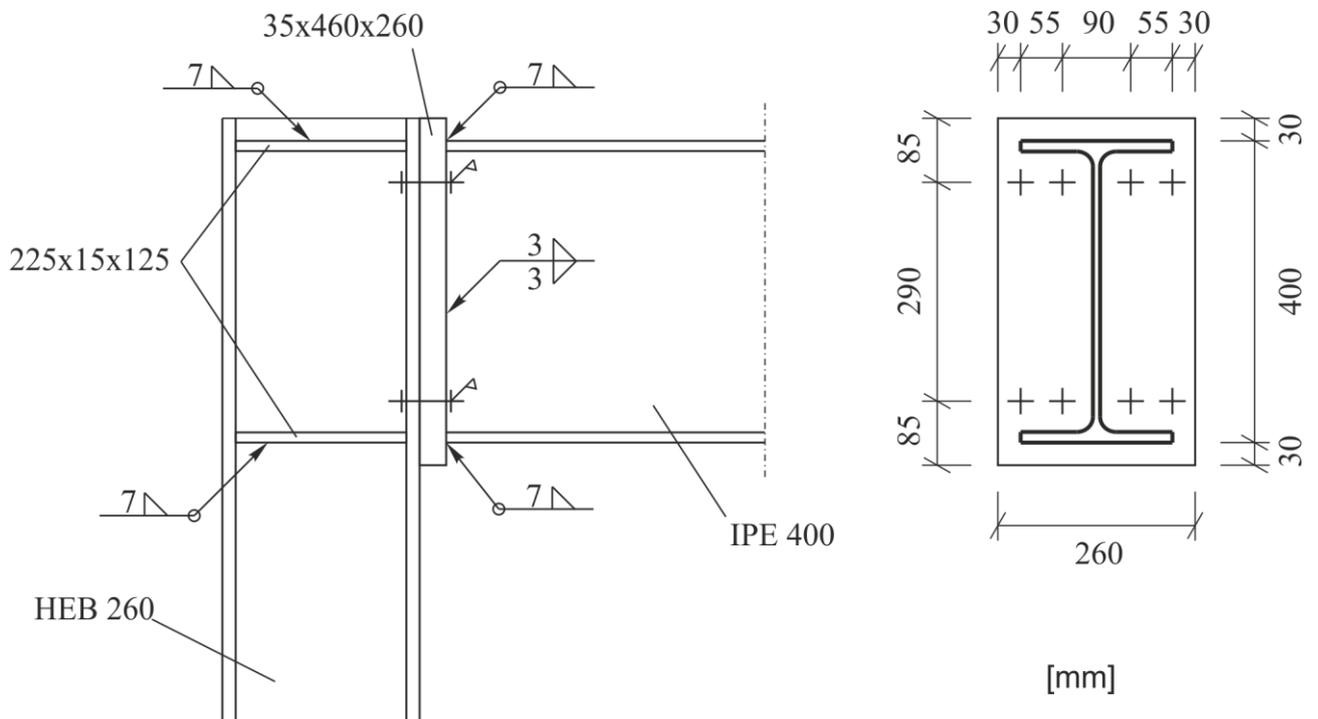
24 Punkte

gegeben:

- Statisches System eines Rahmentragwerks mit veränderlicher Einzellast P_i



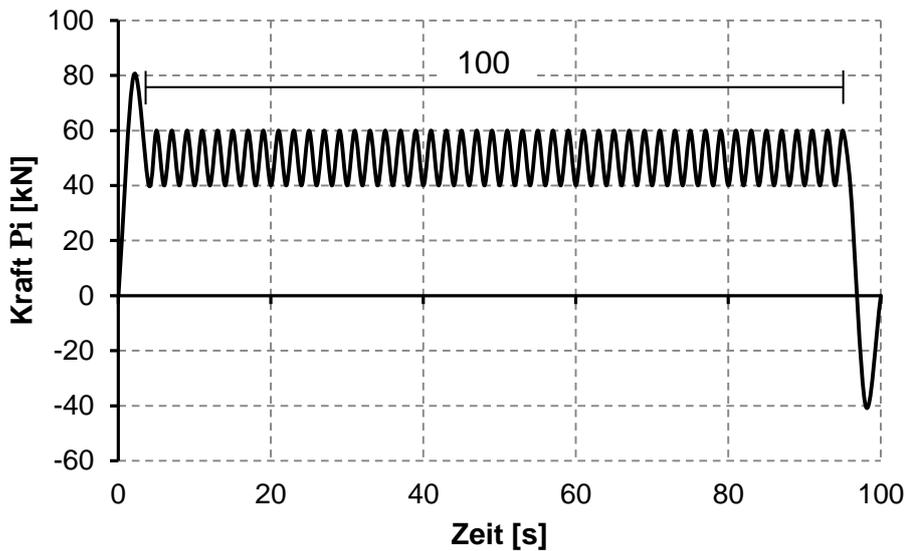
- Biegesteife Rahmenecke (Detail A):



- Schrauben: 8 x M20-8.8

- Material: S 355
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Ff} = 1,0$ $\gamma_{Mf} = 1,35$
- Querschnittswerte:
 - Riegel (IPE 400):
 $I_y = 23.130 \text{ cm}^4$
 $W_{y,el} = 1.160 \text{ cm}^3$
 $A = 84,5 \text{ cm}^2$
 - Stütze (HEB 260):
 $I_y = 14.920 \text{ cm}^4$
 $W_{y,el} = 1.150 \text{ cm}^3$
 $A = 118,0 \text{ cm}^2$
 - Schweißnaht:
 $I_y = 18.196 \text{ cm}^4$
 $W_{y,el} = 910 \text{ cm}^3$
 $A = 63,2 \text{ cm}^2$
 - Schrauben (M20):
 $A = 3,14 \text{ cm}^2$
 $A_S = 2,45 \text{ cm}^2$

- 1 Belastungsverlauf:



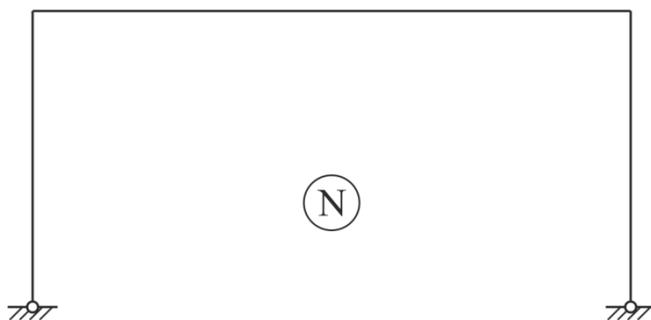
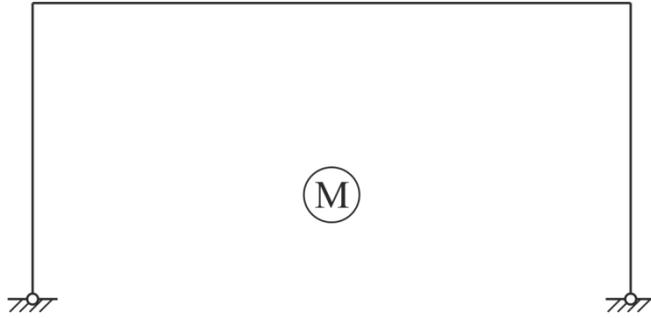
gesucht:

- a) Bestimmen Sie für das dargestellte Rahmentragwerk die Schnittgrößenverläufe infolge einer „1“-Last im Lastangriffspunkt von P_i .
- b) Ermitteln Sie die maximal zulässige Anzahl an Belastungsverläufen für die Schweißnaht und den Schweißnahtübergang des Kopfplattenanschlusses.
- c) Ermitteln Sie die maximal zulässige Anzahl an Belastungsverläufen für die Schraubverbindung.

Hinweise:

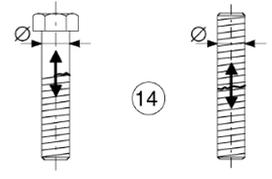
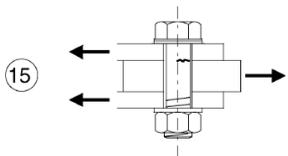
- Der Einfluss aus Schubbeanspruchung darf für den Nachweis der Schweißnaht (Aufgabenteil b) vernachlässigt werden.
- Für die Ermittlung der Schraubenkräfte (Aufgabenteil c) darf die Normalkraft in der Rahmenecke vernachlässigt werden. Des Weiteren darf angenommen werden, dass die resultierende Druckkraft infolge Momentenbelastung im Schwerpunkt des Flansches angreift.
- Die Ermittlung der Spannungskollektive soll nach der Reservoir-Methode erfolgen.
- Der Ermüdungsnachweis ist mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.

Anlage 3.1:



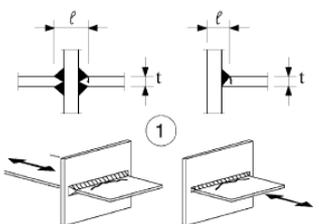
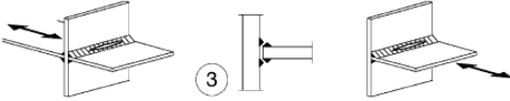
Anlage 3.2:

Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.1

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50	<p>Größenabhängigkeit für $\phi > 30$ mm: $k_s = (30/\phi)^{0,25}$</p> 	<p>14) Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenen Gewinde unter Zug. Bei großen Durchmessern (Ankerschrauben) muss der Größen effekt mit k_s berücksichtigt werden.</p>	<p>14) $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen (z. B. sekundäre Biegespannungen) sind zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.</p>
100 $m=5$		<p>Schrauben in ein- oder zweiseitigen Scher-Lochleibungsverbindungen (Gewinde nicht in der Scherfläche)</p> <p>15) – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr (Schraubengüten 5.6, 8.8 oder 10.9)</p>	<p>15) Δr ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln.</p>

Anlage 3.3:

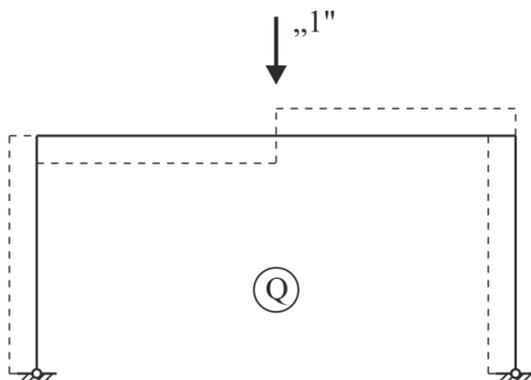
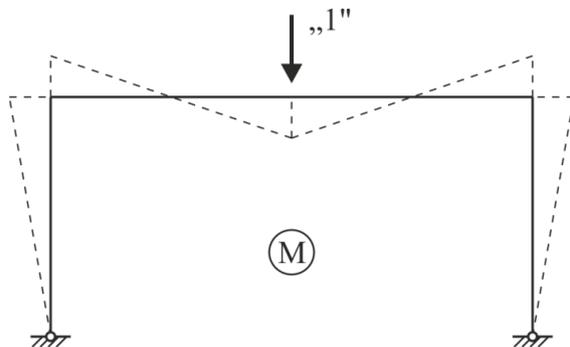
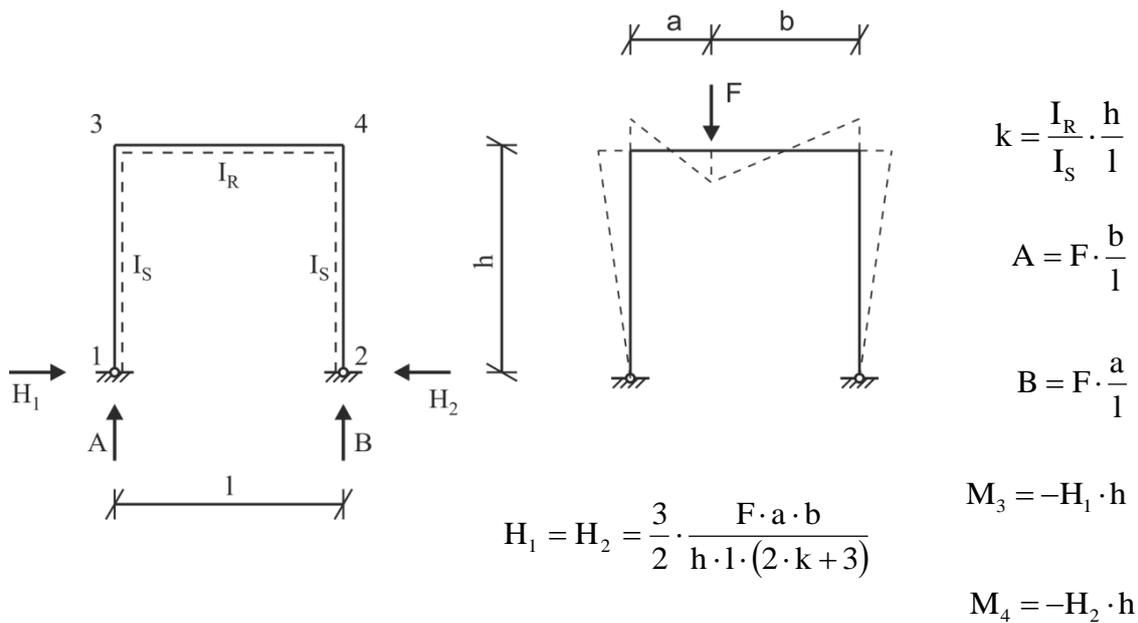
Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.5

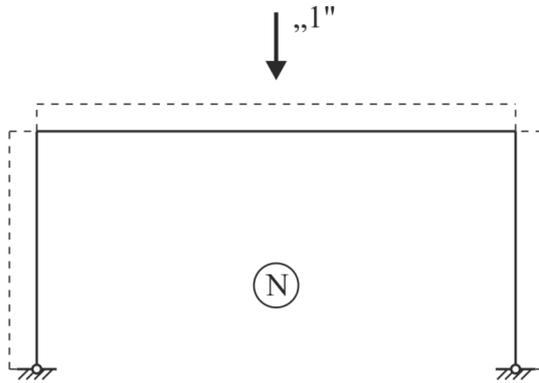
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$\ell < 50$	alle r	
71	$50 < \ell \leq 80$	alle r	
63	$80 < \ell \leq 100$	alle r	
56	$100 < \ell \leq 120$	alle r	
56	$\ell > 120$	$r \leq 20$	
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$r > 20$ $20 < r \leq 30$	
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$r > 30$ $30 < r \leq 50$	
40	$\ell > 300$	$r > 50$	
wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	<p>verformbares Anschlussblech</p> 	<p>2) Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.</p>	<p>1) Nach Prüfung frei von Diskontinuitäten und Exzentrizitäten außerhalb der Toleranzen nach EN 1090. 2) $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungsschwingbreiten zu ermitteln. 3) Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 mit Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w, zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen.</p> <p>Kerbfälle 1) bis 3):</p> <p>Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.</p>
36*		<p>3) Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen oder Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005. [AC]</p>	

Musterlösung Aufgabe 3:

a) Bestimmen Sie für das dargestellte Rahmentragwerk die Schnittgrößenverläufe infolge einer „1“-Last im Lastangriffspunkt von P_1 .

Die Schnittgrößenverläufe können mit Hilfe von Rahmenformeln für Zweigelenrahmen (Schneider Bautabellen o. ä.) ermittelt werden.





$$N_{St} = -0,5 \text{ kN}$$

$$N_{Ri} = -0,165 \text{ kN}$$

- b) Ermitteln Sie die maximal zulässige Anzahl an Belastungsverläufen für die Schweißnaht und den Schweißnahtübergang des Kopfplattenanschlusses.

Ermüdungsnachweis Schweißnaht

Kerbfall:

Kerbdetail 3 Tabelle 8.5 \Rightarrow Kerbfall 36

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 36 / 1,35 = 26,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 26,7 = 19,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 19,7 = 10,8 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsschwingbreiten:

	ΔP	$\Delta\sigma$	Steigung m	Anzahl
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	120	79,2	3	1
2	20	13,2	5	100

mit:
$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P \cdot N_{Ri}}{A_{Naht}} + \frac{\Delta P \cdot M_3}{W_{y,el,Naht}}$$

Ermüdungsnachweis nach Palmgren-Miner:

$$N_{\sigma,1} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{19,7}{79,2} \right)^3 = 76.947$$

$$N_{\sigma,2} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^5 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{19,7}{13,2} \right)^5 = 37.019.579$$

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot x}{76.947} + \frac{100 \cdot x}{37.019.579} \leq 1,0$$

$$\Rightarrow x = 63.706$$

Hinweis: Der Einfluss aus Schubbeanspruchung darf laut Aufgabenstellung für den Nachweis der Schweißnaht vernachlässigt werden!

Ermüdungsnachweis Schweißnahtübergang

Kerbfall:

Kerbdetail 1 Tabelle 8.5 \Rightarrow Kerbfall 80 ($l \approx 45\text{mm}$)

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 80 / 1,35 = 59,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 59,3 = 43,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 43,7 = 24,0 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsschwingbreiten:

	ΔP	$\Delta\sigma$	Steigung m	Anzahl
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	120	62,0	3	1
2	20	10,3	-	100

mit:
$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P \cdot N_{Ri}}{A_{\text{Riegel}}} + \frac{\Delta P \cdot M_3}{W_{y,el,\text{Riegel}}}$$

Ermüdungsnachweis nach Palmgren-Miner:

$$N_{\sigma,1} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i} \right)^3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{43,7}{62,0} \right)^3 = 1.750.810$$

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot x}{1.750.810} \stackrel{!}{\leq} 1,0$$

$$\Rightarrow x = 1.750.810$$

- c) Ermitteln Sie die maximal zulässige Anzahl an Belastungsverläufen für die Schraubverbindung.

Kerbfälle:

Kerbdetail 14 Tabelle 8.1 \Rightarrow Kerbfall 50

$$\Delta\sigma_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 50 / 1,35 = 37,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 37,0 = 27,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 27,3 = 15,0 \text{ N/mm}^2$$

Kerbdetail 15 Tabelle 8.1 \Rightarrow Kerbfall 100

$$\Delta\tau_C = \text{Kerbfall} / \gamma_{Mf} = 100 / 1,35 = 74,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\tau_L = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_L}} \cdot \Delta\tau_C = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 74,1 = 33,9 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsschwingbreiten:

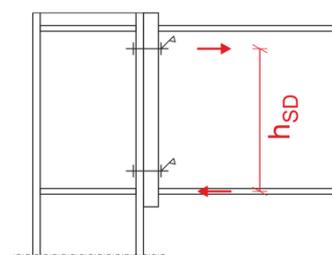
Hinweis: Im Schraubenanschluss werden die Druckkräfte direkt über die Kopfplatten ins angrenzende Profil übertragen. Lediglich Zugkräfte müssen über die Schrauben übertragen werden. Für die Momentenbelastung muss daher eine Fallunterscheidung in „obere“ und „untere“ Schraubenreihe vorgenommen werden. Bei dem gegebenen Belastungsverlauf entstehen die größeren

Kraftamplituden ΔF im positiven Bereich von P_i wobei Zugkräfte in der oberen Schraubenreihe auftreten. Aus diesem Grund werden für den Ermüdungsnachweis die oberen Schrauben maßgebend.

	ΔP	$\Delta \sigma$	Steigung m	Anzahl
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	80	139,2	3	1
2	20	34,8	3	100

mit:
$$\Delta \sigma = \frac{\Delta P \cdot M_3}{h_{SD} \cdot 4 \cdot A_{S, \text{Schrauben}}}$$

$$h_{SD} = 290 + 85 - 30 - 13,5 / 2 = 338,25 \text{ mm}$$



	ΔP	$\Delta \tau$	Steigung m	Anzahl
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	120	23,9	-	1
2	20	4,0	-	100

mit:
$$\Delta \tau = \frac{\Delta P \cdot Q_{3, Ri}}{8 \cdot A_{\text{Schrauben}}}$$

Ermüdungsnachweis nach Palmgren-Miner:

$$N_{\sigma,1} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_D}{\Delta \sigma_i} \right)^3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{27,3}{139,2} \right)^3 = 37.717$$

$$N_{\sigma,2} = N_D \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_D}{\Delta \sigma_i} \right)^3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{27,3}{34,8} \right)^3 = 2.413.905$$

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1 \cdot x}{37.717} + \frac{100 \cdot x}{2.413.905} \leq 1,0$$

$$\Rightarrow x = 14.719$$

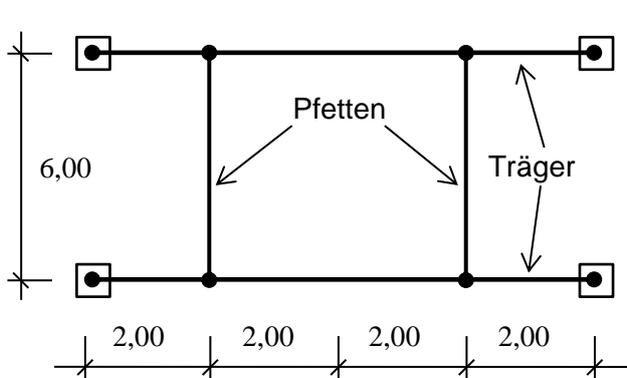
Aufgabe 3

18 Punkte

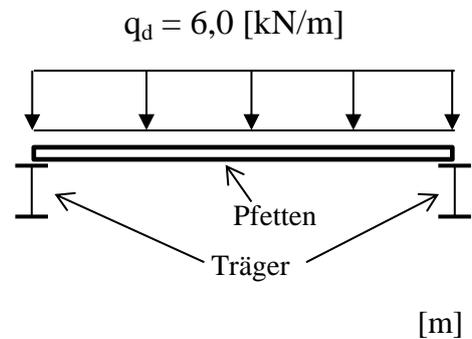
Eine gleichmäßige Linienlast q_d soll über zwei 6,0 m lange Pfetten auf Stahlträgern mit jeweils 8,0 m Spannweite gelenkig auf dem Obergurt aufgebracht werden, welche an ihren Enden durch Gabelager gestützt werden.

gegeben:

Statisches System unter Last gemäß Skizze:

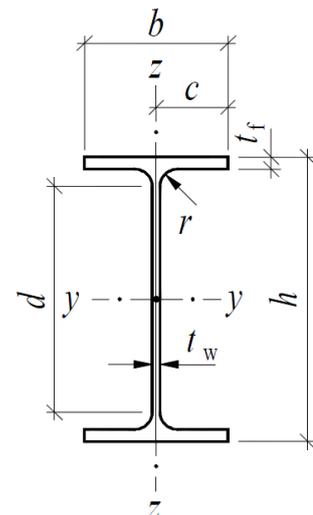


Seitenansicht:



Verfügbare Profile: IPE 200, IPE 240, IPE 270, IPE 300

	IPE 200	IPE 240	IPE 270	IPE 300	Einheit
h	200	240	270	300	mm
b	100	120	135	150	mm
A	28,58	39,10	45,90	53,80	cm ²
I_y	1940	3890	5790	8360	cm ⁴
$W_{pl,y}$	220,60	366,60	484,00	628,40	cm ⁶
KSL_y	a	a	a	a	-
I_z	142	284	420	604	cm ⁴
$W_{pl,z}$	44,61	73,92	96,95	125,20	cm ⁶
KSL_z	B	b	b	b	-
I_t	6,98	12,90	15,90	20,10	cm ⁴
I_w	12990	37390	70580	125900	cm ⁶
$N_{pl,Rd}$	669,35	919,27	1079,76	1265,00	kN
$M_{pl,y,Rd}$	51,85	86,16	113,74	147,62	kNm
$M_{pl,z,Rd}$	10,48	17,37	22,78	29,43	kNm
QKL	1	1	2	2	-



Material: S 235

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2; G = 81\,000 \text{ N/mm}^2, \rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Hinweise:

- Gelenkige Gabelagerung an allen Auflagern ohne Wölbbehinderung.
- Keine seitliche Stabilisierung der Träger oder der Pfetten vorhanden.
- Die Anlage 3.2 beinhaltet eine Tabelle mit der Beziehung zwischen der Schlankheit gegen BDK (λ_{LT}) und dem entsprechenden Abminderungsfaktor gegen BDK (χ_{LT}).
- Die Linienlast wirkt nur auf die Pfetten.

Gesucht:

- a) Optimieren Sie die Pfetten und Träger im Hinblick auf das Gewicht. Sie dürfen nur die angegebenen Profile der IPE Reihe verwenden. Ein Versagen auf Biegedrillknicken ist für diese Konstruktion maßgebend. Verwenden Sie für die Ermittlung von M_{cr} die Anlage 3.1.
- b) Zeichnen Sie die Knickfigur des in Aufgabenteil a) gewählten Systems. Ab welcher Linienlast q_d ist dieses Versagen zu erwarten?
- c) Wie viel Gewicht könnte man sparen, wenn man den Obergurt der Träger seitlich hält?

Anlage 3.1: Berechnung von $M_{cr,y}$

Baustatisches System	Momentenverlauf	$\frac{C_1}{C_2}$	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77
		1,04 0,47	0,98 ¹⁾	—
		2,58 1,57	0,90	—
		1,68 1,51	0,77	—
		2,22 0,89	0,91	—
		1,79 1,08	0,82	—

Mit der folgenden Formel kann $M_{cr,y}$ für alle Systeme berechnet werden:

$$M_{cr,y} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 \cdot GI_T}{\pi^2 \cdot EI_z} + (C_2 \cdot z_p)^2} + C_2 \cdot z_p \right]$$

mit z_p Lastangriffspunkt (sofern die Lasten nach unten wirken und am Obergurt der Träger angreifen, ist z_p negativ)

Anlage 3.2: Abminderungsfaktoren χ_{LT} , in Abhängigkeit von λ_{LT} und k_c

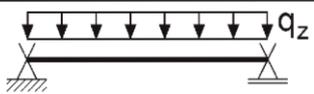
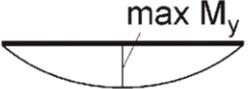
$\bar{\lambda}_{LT}$	$h/b \leq 2: k_c =$			
	1,00	0,94	0,86	0,77
0,40	1,000	1,000	1,000	1,000
0,45	0,980	1,000	1,000	1,000
0,50	0,960	0,984	1,000	1,000
0,55	0,939	0,964	1,000	1,000
0,60	0,917	0,943	0,980	1,000
0,65	0,894	0,920	0,958	1,000
0,70	0,870	0,896	0,934	0,980
0,75	0,844	0,870	0,907	0,953
0,80	0,817	0,842	0,879	0,923
0,85	0,789	0,813	0,848	0,891
0,90	0,760	0,783	0,816	0,857
0,95	0,730	0,752	0,782	0,820
1,00	0,700	0,720	0,748	0,782
1,05	0,669	0,687	0,713	0,744
1,10	0,639	0,655	0,677	0,705
1,15	0,609	0,623	0,642	0,666
1,20	0,579	0,591	0,608	0,628
1,25	0,551	0,561	0,575	0,591
1,30	0,524	0,532	0,543	0,556
1,35	0,498	0,504	0,512	0,521
1,40	0,473	0,477	0,482	0,489
1,45	0,449	0,451	0,454	0,458
1,50	0,427	0,428	0,428	0,428
1,55	0,406	0,406	0,406	0,406
1,60	0,387	0,387	0,387	0,387
1,65	0,367	0,367	0,367	0,367
1,70	0,346	0,346	0,346	0,346
1,75	0,327	0,327	0,327	0,327
1,80	0,309	0,309	0,309	0,309
1,85	0,292	0,292	0,292	0,292
1,90	0,277	0,277	0,277	0,277
1,95	0,263	0,263	0,263	0,263
2,00	0,250	0,250	0,250	0,250

Musterlösung Aufgabe 3

- a) Optimieren Sie die Pfetten und Träger im Hinblick auf das Gewicht. Sie dürfen nur die angegebenen Profile der IPE Reihe verwenden. Ein Versagen auf Biegedrillknicken ist für diese Konstruktion maßgebend. Verwenden Sie für die Ermittlung von M_{cr} die Anlage 3.1.

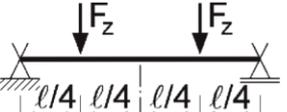
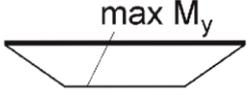
1. Ermittlung der kritischen Biegedrillknickmomenten:

Für die Pfetten:

Baustatisches System	Momentenverlauf	C_1 C_2	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12

	h	b	I_y	I_z	I_t	I_w	C_1	C_2	k_c	M_{cr}
200IPE	200	100	1940	142	6,98	12990	1,12	0,45	0,94	2183,1064
240IPE	240	120	3890	284	12,9	37390	1,12	0,45	0,94	4190,3196
270IPE	270	135	5790	420	15,9	70580	1,12	0,45	0,94	5709,8132
300IPE	300	150	8360	604	20,1	125900	1,12	0,45	0,94	7837,5781
Einheit	mm	mm	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁶				kNcm

Für die Träger

Baustatisches System	Momentenverlauf	C_1 C_2	k_c	ζ
		1,04 0,47	0,98 ¹⁾	—

	H	b	I_y	I_z	I_t	I_w	C_1	C_2	k_c	M_{cr}
270IPE	270	135	5790	420	15,9	70580	1,04	0,47	0,98	3910,2711
300IPE	300	150	8360	604	20,1	125900	1,04	0,47	0,98	5283,5445
Einheit	mm	mm	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁶				kNcm

2. Ermittlung der Einwirkung:

Für die Pfetten:

$$M_{y,Ed} = q \cdot L_p^2 / 8 = 6 \cdot 6^2 / 8 = 27,0 \text{ kNm} = 2700 \text{ kNcm}$$

Für die Träger:

$$M_{y,Ed} = q \cdot L_p / 2 \cdot L_T / 4 = 6 \cdot 6 / 2 \cdot 8 / 4 = 36,0 \text{ kNm} = 3600 \text{ kNcm}$$

3. Ermittlung des Widerstandes gegen BDK:

Für die Pfetten:

	$M_{pl,Rd}$	$\lambda = \sqrt{\frac{M_{pl,Rd} \cdot \gamma_M}{M_{cr}}}$	χ (aus Anlage 3.2)	$M_{b,Rd}$
200IPE	51,85	1,54118112	0,428	22,193512
240IPE	86,16	1,43395933	0,477	41,099751
270IPE	113,74	1,41138554	0,477	54,25398
300IPE	147,62	1,372403	0,504	74,40048
Einheit	kNm	-	-	kNm

Für die Träger:

	$M_{pl,Rd}$	$\lambda = \sqrt{\frac{M_{pl,Rd} \cdot \gamma_M}{M_{cr}}}$	χ (aus Anlage 3.2)	$M_{b,Rd}$
270IPE	113,74	1,70550572	0,346	39,35404
300IPE	147,62	1,67151361	0,367	54,17654
Einheit	kNm	-	-	kNm

Die Optimale Auslegung ist mit Pfetten IPE-240 und Trägern IPE-270

4. Gewicht:

$$\text{Gewicht}_{\text{Pfetten}} = 2 \cdot 6[\text{m}] \cdot A_{\text{IPE-240}}[\text{m}^2] \cdot 7850[\text{kg/m}^3] = 368,32 \text{ kg}$$

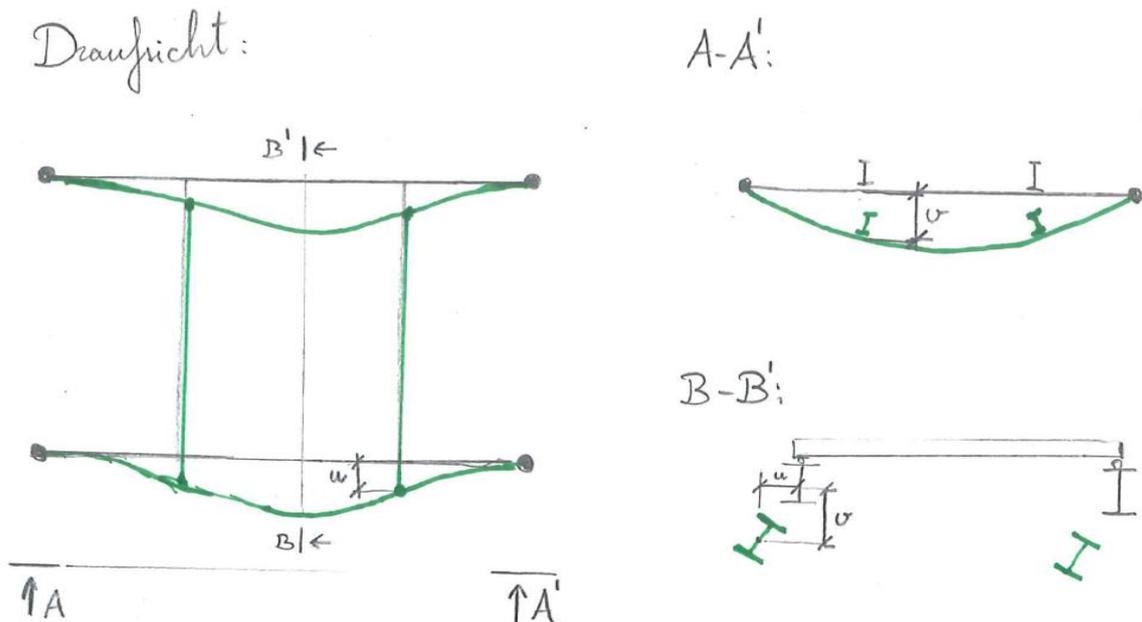
$$\text{Gewicht}_{\text{Träger}} = 2 \cdot 8[\text{m}] \cdot A_{\text{IPE-270}}[\text{m}^2] \cdot 7850[\text{kg/m}^3] = 576,50 \text{ kg}$$

$$\text{Gewicht}_{\text{Insgesamt}} = 944,82 \text{ kg}$$

- b) Zeichnen Sie die Knickfigur des in Aufgabenteil a) gewählten Systems. Ab welcher Linienlast q_d ist dieses Versagen zu erwarten?

Mit der gewählten Auslegung werden die Träger früher als die Pfetten auf BDK versagen.

Die resultierende Knickfigur ist:



Dies geschieht ab einer Last von $q_d = 6,56 \text{ kN/m}$

- c) Wie viel Gewicht könnte man sparen, wenn man den Obergurt der Träger seitlich hält?

Wenn eine seitliche Halterung der Träger vorliegt, dann sind diese nicht mehr BDK gefährdet, somit muss man nur den Querschnittsnachweis erfüllen:

$$M_{Ed} / M_{Rd,pl} < 1$$

$$M_{pl,Rd,IPE-200} = 51,85 > 36,0 \text{ kNm}$$

Es reicht mit einem IPE-200 als Träger. Dies spart:

$$\Delta \text{ Gewicht}_{\text{Träger}} = 2 \cdot 8[\text{m}] \cdot (A_{IPE-270}[\text{m}^2] - A_{IPE-200}[\text{m}^2]) \cdot 7850[\text{kg/m}^3] = \underline{\underline{217,54 \text{ kg}}}$$

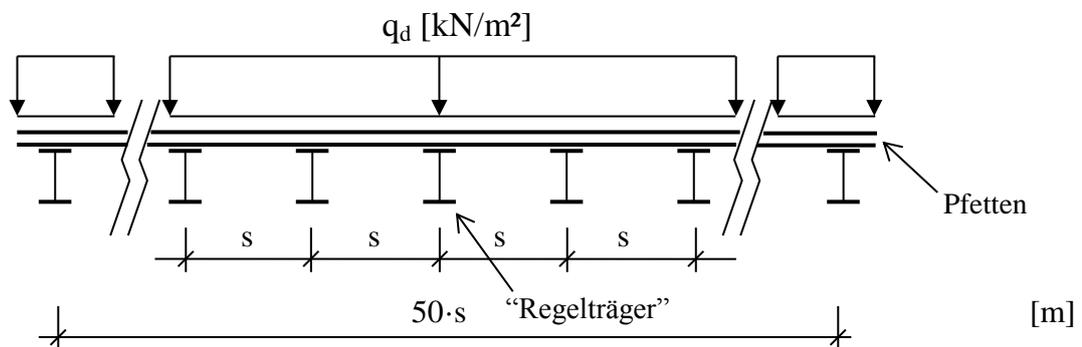
Aufgabe 3

20 Punkte

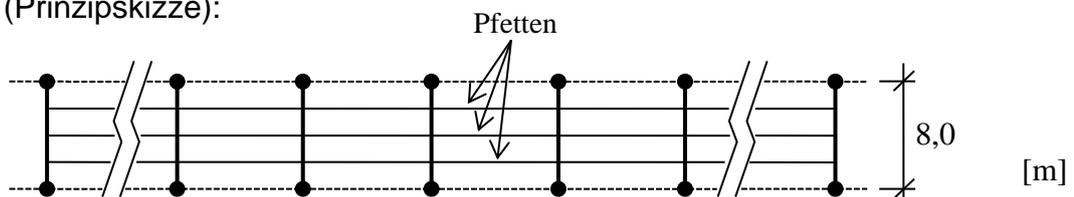
Eine gleichmäßige Flächenlast q_d soll über Pfetten auf Stahlträgern mit jeweils 8 m Spannweite aufgebracht werden, welche an ihren Enden durch Gabellager gestützt werden.

gegeben:

Statisches System unter Last gemäß Skizze:

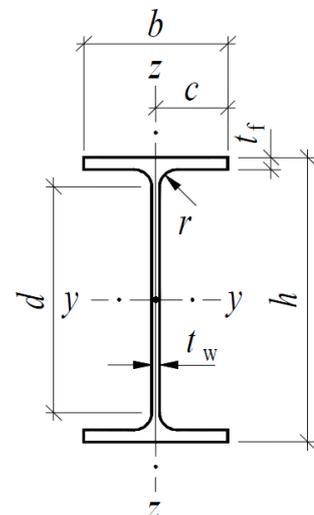


Grundriss (Prinzipskizze):



Träger: IPE 240

Profilm Maße			Statische Werte					
h	240	mm	I_y	3890	cm ⁴	A	39,1	cm ²
b	120	mm	$W_{el,y}$	324	cm ³	I_t	12,9	cm ⁴
t_w	6,2	mm	$W_{pl,y}$	366,6	cm ³	I_w	37390	cm ⁶
t_f	9,8	mm	I_z	284	cm ⁴			
d/t_w	30,71	QKL 1	$W_{el,z}$	47,3	cm ³			
c/t_f	4,28	QKL 1	$W_{pl,z}$	73,9	cm ³			



Pfetten: Durchgehend ausgeführt als Durchlaufträger

Material: S 235

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2; G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$$

Hinweise:

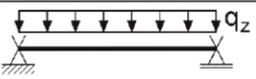
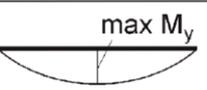
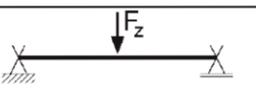
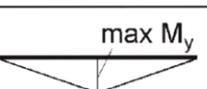
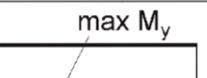
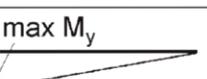
- Gelenkige Gabelagerung an allen Auflagern ohne Wölbbehinderung.
- Die Pfetten sind nicht nachzuweisen.
- Anschlüsse zwischen Pfetten und Träger können als starr angenommen werden.
- Die Profilverformungen der Stahlträger sind vernachlässigbar klein.
- Steifigkeit der Pfetten $I_y = 106,6 \text{ cm}^4$
- Keine seitliche Stabilisierung der Träger durch die Pfetten.

Gesucht für den Regelträger:

- a) Ermitteln Sie die maximal zulässige Belastung q_d in Abhängigkeit vom Trägerabstand s unter der Annahme, dass ein Versagen auf Biegedrillknicken maßgebend wird. Vernachlässigen Sie hierbei die Wirkung der Pfetten. Verwenden Sie für die Ermittlung von M_{cr} die Anlage 3.1.
- b) Berücksichtigen Sie nun die stabilisierende Wirkung der Pfetten. Ab welchem Trägerabstand s_{min} kann man auf den Nachweis gegen Biegedrillknicken verzichten (sowohl für elastische Bemessung als auch für plastische Bemessung). Schraffieren Sie im Diagramm auf Anlage 3.2 den zulässigen Bereich des Wertepaars (q_d, s) im Hinblick auf die Stabilität gegen Biegedrillknicken.
- c) Schraffieren Sie im Diagramm auf Anlage 3.2 den zulässigen Bereich des Wertepaars (q_d, s) auch unter Berücksichtigung des Querschnittsnachweises.

Wurde in Stahlbau II nicht
behandelt!

Anlage 3.1: Berechnung von $M_{cr,y}$

Baustatisches System	Momentenverlauf	$\frac{C_1}{C_2}$	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77

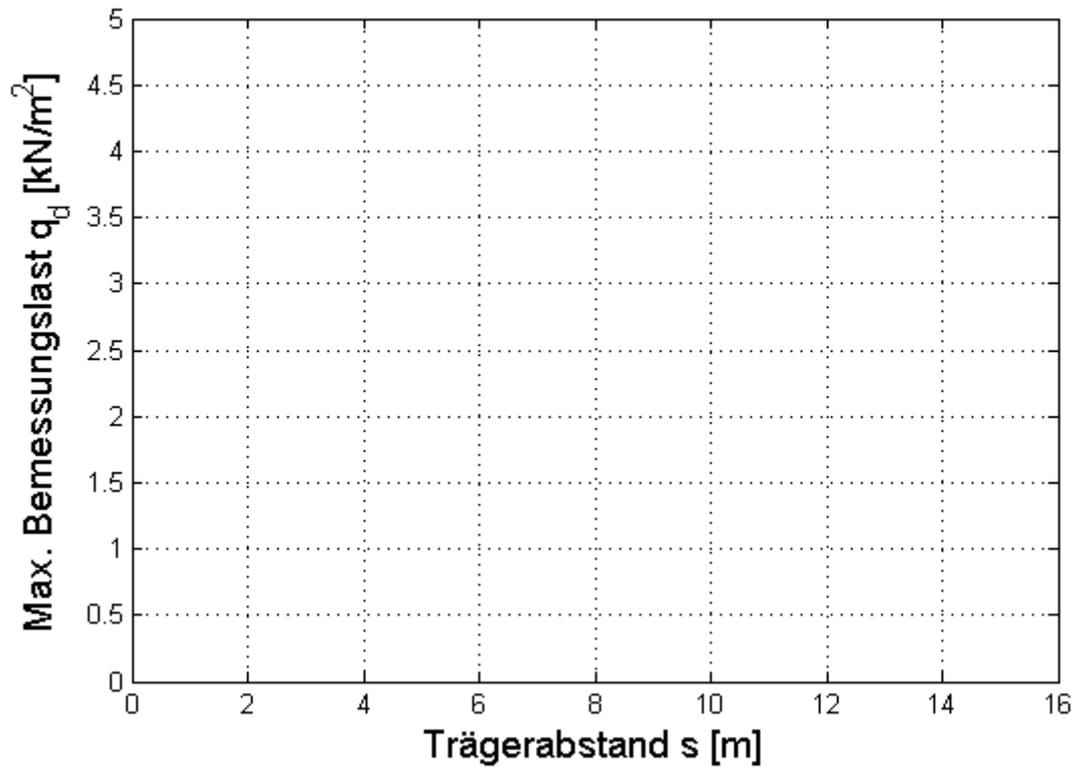
Mit der folgenden Formel kann $M_{cr,y}$ für alle Systeme berechnet werden:

$$M_{cr,y} = M_{ki,y} = \zeta \cdot N_{ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 z_p \right)$$

mit $N_{ki,z} = \pi^2 \cdot EI_z / L^2$

$$c^2 = (I_w + 0,039 \cdot L^2 \cdot I_T) / I_z$$

z_p Lastangriffspunkt (sofern die Lasten nach unten wirken und am Obergurt der Träger angreifen, ist z_p negativ)

Anlage 3.2: s- q_d Diagramm

Musterlösung Aufgabe 3

a)

Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes nach Anlage 3.1:

Baustatisches System	Momentenverlauf	$\frac{C_1}{C_2}$	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77

$$\zeta = 1,12$$

Lastenleitung am Obergurt: $z_g = -12,0 \text{ cm}$ (negativ!!)

$$M_{cr,y} = 3098 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad λ_{LT}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot \frac{f_y}{M_{cr}}} \quad \text{Mit } W_y = W_{pl} = 366,6 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_{LT} = 1,668$$

Knicklinie für IPE 240

Tabelle 6.4 — Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken nach Gleichung (6.56)

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	ⓐ b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	c d
andere Querschnitte	—	d

Imperfektionsbeiwert α_{LT}

Tabelle 6.3 — Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 2,045$$

$$\chi_{LT} = 0,31$$

Beanspruchbarkeit

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{M1} = 2426,67 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Beanspruchung

$$M_{Ed} = q_d [\text{kN/m}]^2 \cdot s [\text{m}] \cdot 8 [\text{m}]^2 / 8 = 8 \cdot s \cdot q_d [\text{kNm}]$$

Lösung

$$q_{d,max} = 24,27 / (8 \cdot s) \text{ kN/m}^2$$

b)

Erforderliche Drehsteifigkeit

(1)B Ein Träger darf als ausreichend gegen Verdrehung gestützt angesehen werden, wenn das folgende Kriterium erfüllt wird:

$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_{\vartheta} K_{\vartheta} \quad (\text{BB.3})$$

Dabei ist

$C_{\vartheta,k}$ die Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit Trägerlänge), die durch das stabilisierende Bauteil (z. B. die Dachkonstruktion) und die Verbindung mit dem Träger wirksam ist;

K_{ϑ} = 0,35 für die elastische Berechnung;

K_{ϑ} = 1,00 für die plastische Berechnung;

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y = 8615 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$K_v = 0,35 \quad \text{wenn elastische Berechnung}$$

$$K_v = 1,0 \quad \text{wenn plastische Berechnung}$$

$$K_\theta = 6,8 \quad \text{aus Tabelle BB.1 im NA, KL b nach Tabelle 6.5}$$

$$C_{\theta, \text{erf}, \text{el}} > 29,62 \text{ kNm/m}$$

$$C_{\theta, \text{erf}, \text{pl}} > 84,62 \text{ kNm/m}$$

Die vorhandene Steifigkeit kommt nur aus der Biegesteifigkeit des abstützenden Bauteils: Pfetten mit Biegesteifigkeit I_y

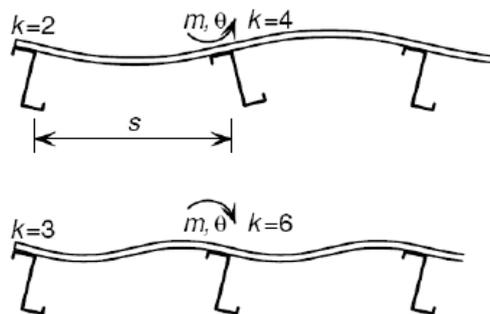


Bild 10.7 — Berechnungsmodelle für $C_{D,C}$

(4) Alternativ darf (auf der sicheren Seite liegend) der $C_{D,C}$ -Wert wie folgt ermittelt werden:

$$C_{D,C} = \frac{k E I_{\text{eff}}}{s}$$

wobei k ein Koeffizient ist, der die folgenden Werte annimmt:

- Endfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 oben $k = 2$;
- Endfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 unten $k = 3$;
- Innenfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 oben $k = 4$;
- Innenfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 unten $k = 6$.

$$I_{\text{eff}} = 106,6 \text{ [cm}^4\text{]} \cdot 3 / 8 \text{ [m]} = 40 \text{ cm}^4/\text{m}$$

$$\begin{aligned} C_{D,C} &= 4 \cdot 21000 \cdot I_{\text{eff}} / s = 84000 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \cdot 40 \text{ [cm}^4/\text{m]} / s \text{ [m]} = \\ &= 3360000/s \text{ [kNcm}^2/\text{m}^2\text{]} = 336/s \text{ [kNm/m]} \end{aligned}$$

Lösung

$$C_{\theta, \text{erf}} < C_{\theta, \text{vorhanden}} \rightarrow (C_{\theta, \text{erf}})^{-1} > (C_{\theta, \text{vorhanden}})^{-1}$$

$$(C_{\theta, \text{erf}})^{-1} > (C_{D, C})^{-1}$$

→ Ausreichende Drehbehinderung bei elastischer Bemessung wenn

$$(1/29,62) > 1/(336/s)$$

$$s \leq 11,34 \text{ m}$$

→ Ausreichende Drehbehinderung bei plastischer Bemessung wenn

$$(1/84,62 - 1/100) > 1/(336/s)$$

$$s \leq 3,97 \text{ m}$$

Berücksichtigung des elastischen bzw. plastischen Widerstands

Beanspruchbarkeit elastisch

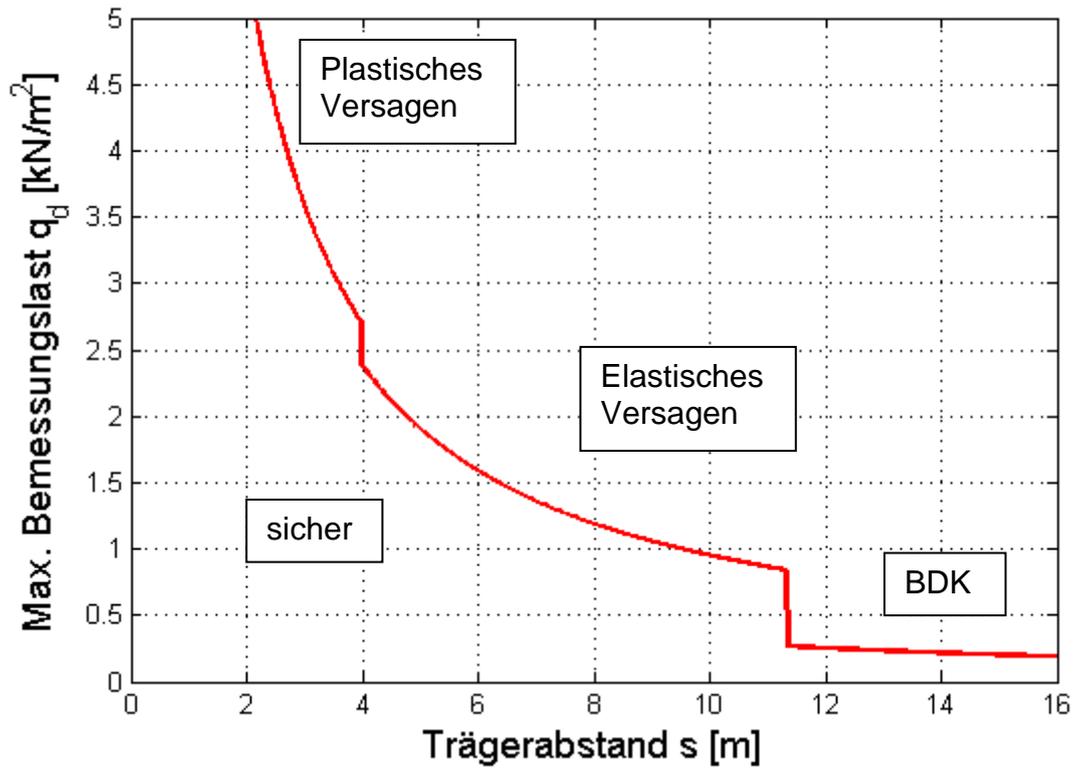
$$M_{b, Rd} = W_{y, el} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 7614 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$q_{d, \text{max}} = 76,14 / (8 \cdot s) \text{ kN/m}^2$$

Beanspruchbarkeit plastisch

$$M_{b, Rd} = W_{y, pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 8615 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$q_{d, \text{max}} = 86,15 / (8 \cdot s) \text{ kN/m}^2$$



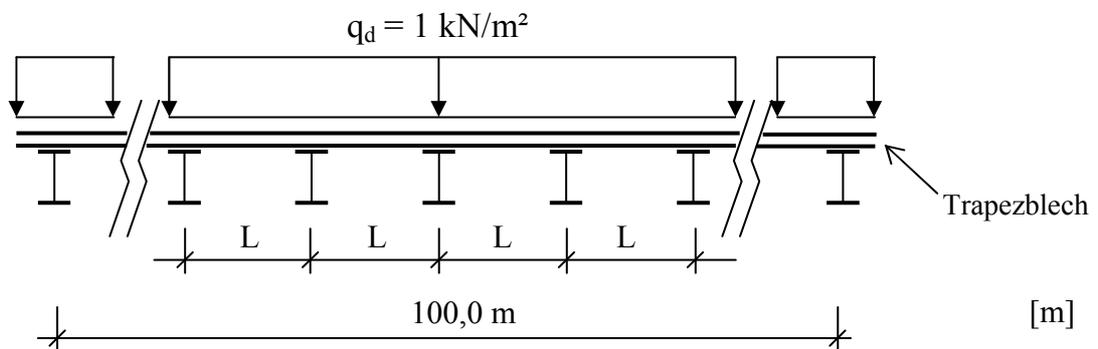
Aufgabe 3

20 Punkte

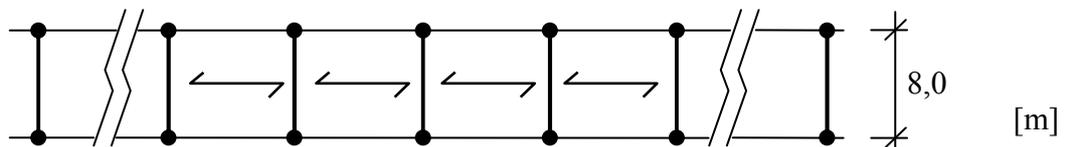
Ein Trapezblech soll über eine Länge von 100 m auf Stahlträgern mit 8 m Spannweite angebracht werden, welche an ihren Enden durch Gabellager gestützt werden.

gegeben:

Statisches System unter Last gemäß Skizze:

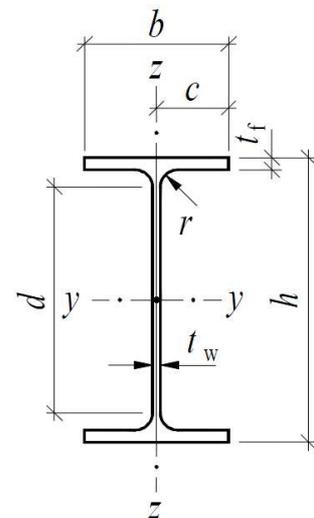


Grundriss (Prinzipskizze):



Träger: IPE 200

Profilmaße			Statische Werte					
h	200	mm	I_y	1940	cm ⁴	A	28,6	cm ²
b	100	mm	$W_{el,y}$	194	cm ³	I_t	6,98	cm ⁴
t_w	5,6	mm	$W_{pl,y}$	220,6	cm ³	I_w	12990	cm ⁶
t_f	8,5	mm	I_z	142	cm ⁴			
d/t_w	28,39	QKL 1	$W_{el,z}$	28,5	cm ³			
c/t_f	4,14	QKL 1	$W_{pl,z}$	44,61	cm ³			



Trapezblech: Durchgehend ausgeführt mit Überlappungsstöße,

Material: S 235

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2; G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$$

Hinweise:

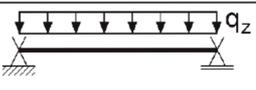
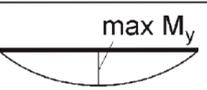
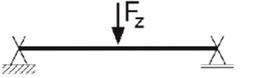
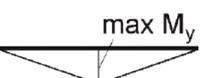
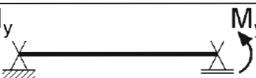
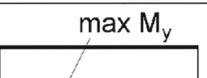
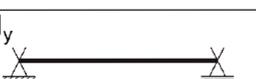
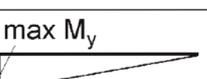
- Gelenkige Gabelagerung an allen Auflagern und keine Wölbbehinderung.
- Es ist keine seitliche Halterung des oberen Trapezbleches vorhanden.
- Steifigkeit des Anschlusses zwischen Trapezblech und Träger: $C_{\theta,k} = 100 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$
- Die Biegeverformungen des Steges sind vernachlässigbar klein.
- Beide Randträger sind kontinuierlich drehbehindert.
- Im Aufgabenteil b) ist der Nachweis elastisch zu führen.

gesucht:

- a) Ermitteln Sie den maximal zulässigen Trägerabstand L unter der Annahme, dass ein Versagen auf Biegedrillknicken maßgebend wird. Vernachlässigen Sie hierbei die Wirkung des Trapezbleches. Verwenden Sie für die Ermittlung von M_{cr} die Anlage 3.1.
- b) Ermitteln Sie die Mindeststeifigkeit I_{eff} des Trapezbleches in Abhängigkeit des Trägerabstands L , um ein Versagen auf Biegedrillknicken zu verhindern. Berücksichtigen Sie nun die stabilisierende Wirkung des Trapezbleches. Definieren Sie im Diagramm auf Anlage 3.2 den zulässigen Bereich des Wertepaars (I_{eff}, L) im Hinblick auf die Stabilität gegen Biegedrillknicken.

Wurde in Stahlbau 2 nicht
behandelt!

Anlage 3.1: Berechnung von $M_{cr,y}$

Baustatisches System	Momentenverlauf	$\frac{C_1}{C_2}$	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77

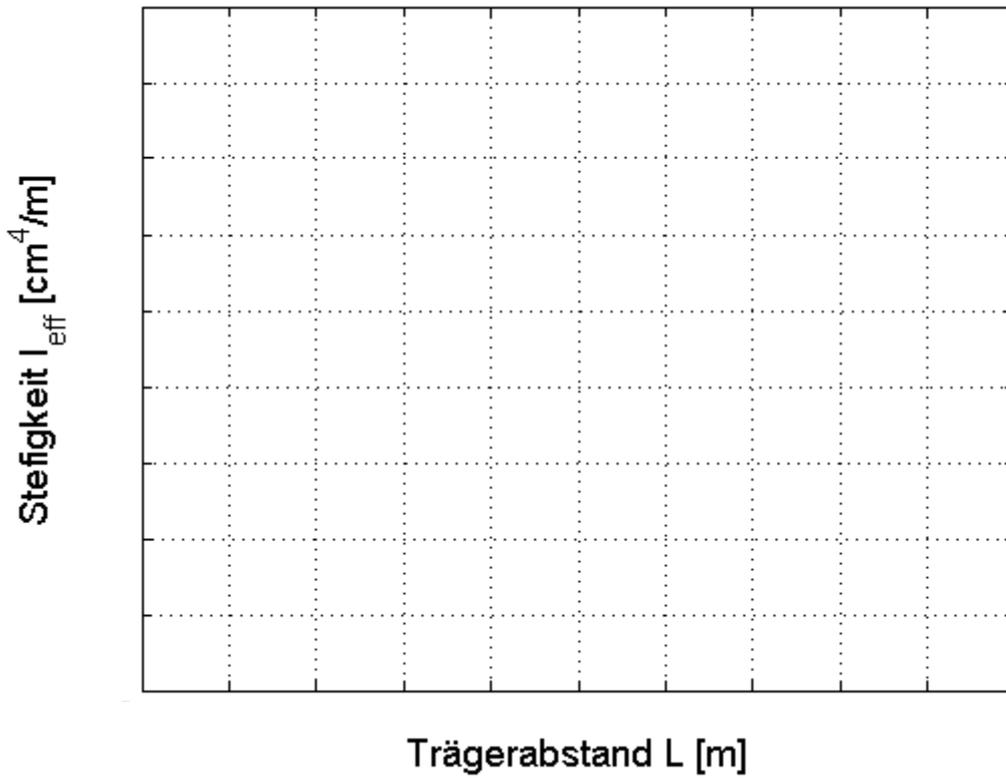
Mit der folgenden Formel kann $M_{cr,y}$ für alle Systeme berechnet werden, die in Bild 1 dargestellt sind:

$$M_{cr,y} = M_{ki,y} = \zeta \cdot N_{ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 z_p \right)$$

mit $N_{ki,z} = \pi^2 \cdot EI_z / L^2$

$$c^2 = (I_w + 0,039 \cdot L^2 \cdot I_T) / I_z$$

z_p Lastangriffspunkt (sofern die Lasten nach unten wirken und am Obergurt der Träger angreifen, ist z_p negativ)

Anlage 3.2: L - I_{eff} Diagramm

Musterlösung Aufgabe 3

a)

Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes nach Anlage 3.1:

Baustatisches System	Momentenverlauf	C_1 C_2	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77

$$\zeta = 1,12$$

Lasteinleitung am Obergurt: $z_g = -10,0 \text{ cm}$ (negativ!!)

$$M_{cr,y} = 1630,23 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad λ_{LT}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot \frac{f_y}{M_{cr}}} \quad \text{Mit } W_y = W_{pl} = 220,6 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_{LT} = 1,783$$

Knicklinie für IPE 200

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	ⓐ
	$h/b > 2$	b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
andere Querschnitte	—	d

Imperfektionsbeiwert α_{LT}

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 2,256$$

$$\chi_{LT} = 0,275$$

Beanspruchbarkeit

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{M1} = 1295,27 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Beanspruchung

$$M_{Ed} = 1 [\text{kN/m}]^2 \cdot L [\text{m}] \cdot 8 [\text{m}]^2 / 8 = 8 \cdot L [\text{kNm}]$$

Lösung

$$L_{\max} = 12,9527 / 8 = 1,62 \text{ m}$$

b)

Erforderliche Drehsteifigkeit

(1)B Ein Träger darf als ausreichend gegen Verdrehung gestützt angesehen werden, wenn das folgende Kriterium erfüllt wird:

$$C_{\theta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_{\theta} K_{\psi} \quad (\text{BB.3})$$

Dabei ist

$C_{\theta,k}$ die Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit Trägerlänge), die durch das stabilisierende Bauteil (z. B. die Dachkonstruktion) und die Verbindung mit dem Träger wirksam ist;

K_{ψ} = 0,35 für die elastische Berechnung;

K_{θ} = 1,00 für die plastische Berechnung;

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y = 5184 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$K_v = 0,35 \quad \text{weil elastische Berechnung}$$

$$K_\theta = 6,8 \quad \text{aus Tabelle BB.1 im NA, KL b nach Tabelle 6.5}$$

$$C_{\theta, \text{erf}} > 21,45 \text{ kNm/m}$$

Die vorhandene Steifigkeit kommt aus der Biegesteifigkeit des abstützenden Bauteils: Trapezblech mit Biegesteifigkeit I_{eff}

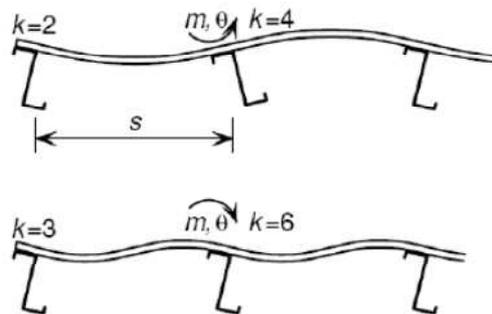


Bild 10.7 — Berechnungsmodelle für $C_{D,C}$

(4) Alternativ darf (auf der sicheren Seite liegend) der $C_{D,C}$ -Wert wie folgt ermittelt werden:

$$C_{D,C} = \frac{k E I_{\text{eff}}}{s}$$

wobei k ein Koeffizient ist, der die folgenden Werte annimmt:

- Endfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 oben $k = 2;$
- Endfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 unten $k = 3;$
- Innenfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 oben $k = 4;$
- Innenfeld und Verdrehung nach Bild 10.7 unten $k = 6.$

$$C_{D,C} = 4 \cdot 21000 \cdot I_{\text{eff}} / L = 84000 \cdot I_{\text{eff}} / L$$

Und aus dem Anschluss Trapezblech zum Träger:

$$C_{\theta,k} = 100 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$$

Lösung

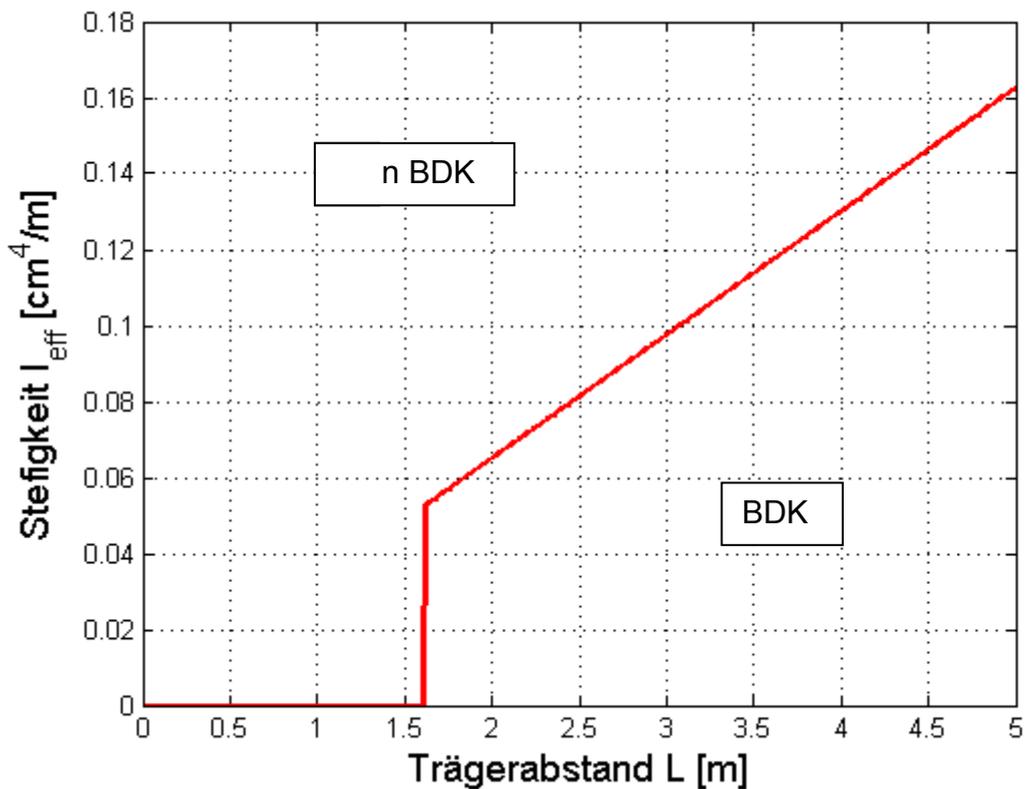
$$(C_{\theta, \text{erf}})^{-1} = (C_{D,C})^{-1} + (C_{\theta,k})^{-1}$$

→ Ausreichende Drehbehinderung wenn

$$(1/21,45 - 1/100) \cdot 84000 \cdot I_{\text{eff}} [\text{cm}^3] = L [\text{cm}]$$

$$I_{\text{eff}} [\text{cm}^3] = 3,25 \cdot 10^{-4} \cdot L [\text{cm}];$$

$$I_{\text{eff}} [\text{cm}^4/\text{m}] = 0,0325 \cdot L [\text{cm}];$$



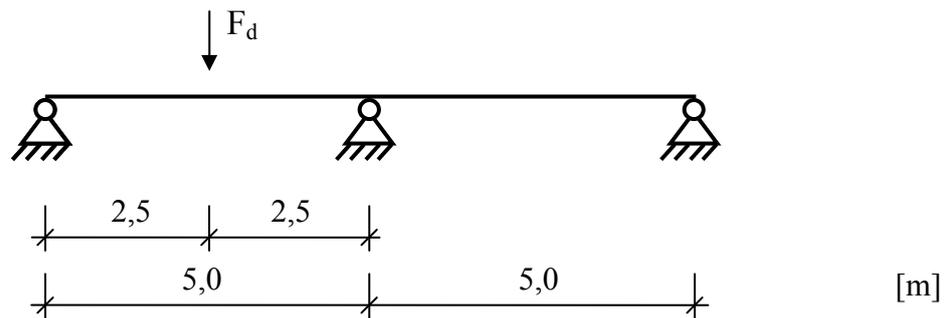
Aufgabe 3

20 Punkte

Die Trägerkonstruktion einer Produktionsanlage soll untersucht werden.

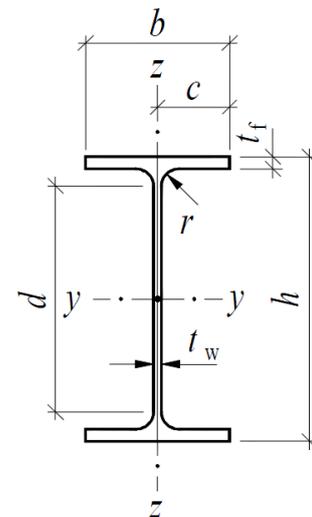
gegeben:

Statisches System unter Last gemäß Skizze:



Träger: IPE 160

Profilmaße			Statische Werte					
h	160	mm	I_y	869	cm ⁴	A	20,1	cm ²
b	82	mm	$W_{el,y}$	109	cm ³	I_t	3,6	cm ⁴
t_w	5	mm	$W_{pl,y}$	123,9	cm ³	I_w	3959	cm ⁶
t_f	7,4	mm	I_z	68,3	cm ⁴			
d/t_w	25,4	QKL 1	$W_{el,z}$	16,7	cm ³			
c/t_f	4,0	QKL 1	$W_{pl,z}$	26,1	cm ³			



Material: S 235

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2; G = 81.000 \text{ N/mm}^2$$

Hinweise:

- Gabellagerung an allen Auflagern und keine Wölbbehinderung.
- Die Einleitung der Einzellast F_d erfolgt mittig auf den Oberflansch.
- Es sind keine Trapezbleche oder seitliche Halterung vorhanden.

gesucht:

- a) Ermitteln Sie die maximal zulässige Belastung F_d unter der Annahme, dass ein Versagen infolge Biegedrillknicken maßgebend wird. Verwenden Sie für die Ermittlung von M_{cr} die Anlage 3.1.
- b) Die Tragfähigkeit der Trägerkonstruktion soll konstruktiv erhöht werden, so dass eine Belastung von $1,35 \cdot F_d$ ertragen werden kann. Ist eine derartige Laststeigerung durch eine Modifikation der Auflagerkonstruktion möglich, wenn hierdurch eine geänderte Lasteinleitung (zu 70% in den Untergurt und zu 30% in den Obergurt) erreicht wird?

Bewerten Sie die beschriebene konstruktive Änderung im Hinblick auf die Standsicherheit (Stabilität auf Biegedrillknicken) der Trägerkonstruktion.

Anlage 3.1: Berechnung von $M_{cr,y}$

Baustatisches System	Momentenverlauf	C_1 C_2	k_c	ζ
		1,12 0,45	0,94	1,12
		1,35 0,65	0,86	1,35
		1,00 —	1,00	1,00
		1,77 —	0,75	1,77
		1,04 0,47	0,98 ¹⁾	—
		2,58 1,57	0,90	—
		1,68 1,51	0,77	—
		2,22 0,89	0,91	—
		1,79 1,08	0,82	—

Bild 1. Baustatische Systeme und Beiwerte C_1 , C_2 , k_c und ζ

Mit der folgenden Formel kann $M_{cr,y}$ für alle Systeme berechnet werden, die in Bild 1 dargestellt sind:

$$M_{cr,y} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 \cdot GI_T}{\pi^2 \cdot EI_z} + (C_2 \cdot z_p)^2} + C_2 \cdot z_p \right]$$

mit L Feldlänge

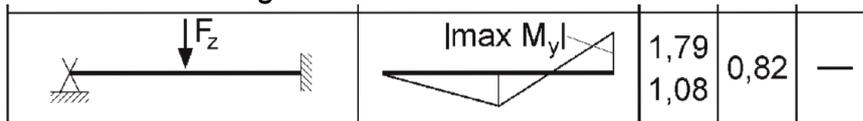
z_p Lastangriffspunkt (sofern die Lasten nach unten wirken und am Obergurt der Träger angreifen, ist z_p negativ)

Musterlösung Aufgabe 3

a)

Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes nach Anlage 3.1:

Für den linken Träger:

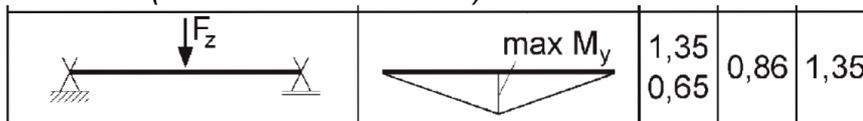


$$C_1 = 1,79 \quad C_2 = 1,08$$

Lasteinleitung am Obergurt: $z_g = -8,0$ (negativ!!)

$$M_{cr,y} = 1703,6 \text{ kNcm}$$

Alternativ: (auf der sicheren Seite)

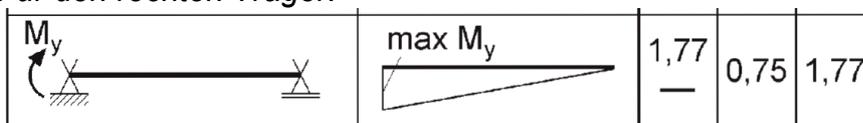


$$C_1 = 1,35 \quad C_2 = 0,65$$

Lasteinleitung am Obergurt: $z_g = -8,0$ (negativ!!)

$$M_{cr,y} = 1474,9 \text{ kNcm}$$

Für den rechten Träger:



$$C_1 = 1,77 \quad C_2 = 0$$

Keine Lasteinleitung im Träger

$$M_{cr,y} = 2399,0 \text{ kNcm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad λ_{LT}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot \frac{f_y}{M_{cr}}} \quad \text{Mit } W_y = W_{pl} = 123,9 \text{ cm}^3$$

Für den linken Träger:

$$\lambda_{LT} = 1,3073$$

Für den rechten Träger:

$$\lambda_{LT} = 1,1017$$

Maßgebend ist der linke Träger! (Höhere Belastung, kleinere Schlankheit)

Knicklinie für IPE 160

Tabelle 6.4 — Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken nach Gleichung (6.56)

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	ⓐ
	$h/b > 2$	b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
andere Querschnitte	—	d

Imperfektionsbeiwert α_{LT}

Tabelle 6.3 — Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 1,471$$

$$\chi_{LT} = 0,466$$

Beanspruchbarkeit

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{M1} = 1234,13 \text{ kNcm}$$

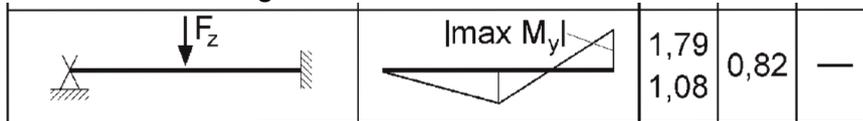
Maximal Last F_d

$$F_d = M_{b,Rd} / (L \cdot 0,203) = 12,2 \text{ kN}$$

b)

Vorgeschlagene Änderung:

Für den linken Träger:



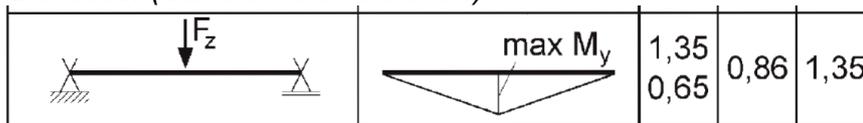
$$C_1 = 1,79 \quad C_2 = 1,08$$

$$\text{Neuer Lasteinleitungspunkt } z_g = 30\% \cdot -8,0 \text{ cm} + 70\% \cdot (8,0 - 0,74) \text{ cm} = 2,68 \text{ cm}$$

(auch 3,2cm)

$$M_{cr,y} = 2737,4 \text{ kNcm}$$

Alternativ: (auf der sicheren Seite)



$$C_1 = 1,35 \quad C_2 = 0,65$$

$$\text{Lasteinleitung am Obergurt: } z_g = 2,68 \text{ cm}$$

$$M_{cr,y} = 1967,8 \text{ kNcm}$$

Für den rechten Träger:

Keine Lasteinleitung im Träger → keine Änderung

$$M_{cr,y} = 2399,0 \text{ kNcm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad λ_{LT}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot \frac{f_y}{M_{cr}}} \quad \text{Mit } W_y = W_{pl} = 123,9 \text{ cm}^3$$

Für den linken Träger:

$$\lambda_{LT} = 1,0313$$

Für den rechten Träger:

$$\lambda_{LT} = 1,1017$$

Maßgebend bleibt der linke Träger. (höhere Belastung, kleinere Schlankheit)

Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2) = 1,202$$

$$\chi_{LT} = 0,595$$

Beanspruchbarkeit

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{M1} = 1574,56 \text{ kNcm}$$

Neue Maximal Last F_d

$$F_{d,neu} = M_{b,Rd} / (L \cdot 0,203) = 16,8 \text{ kN}$$

$$F_{d,neu} / F_d = 16,8 / 12,2 = 1,38$$

Die vorgeschlagene Änderung erlaubt eine Steigerung der Last auf $1,35 \cdot F_d$.
Wenn man mit der Annahme auf der sicheren Seite arbeitet, dann ist die Steigerung nur auf $1,25 \cdot F_d$ zulässig.