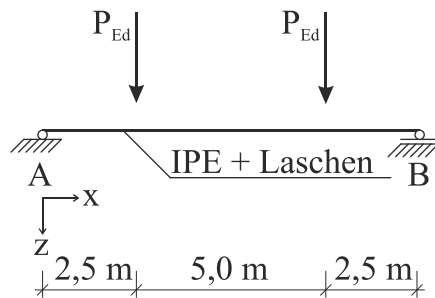


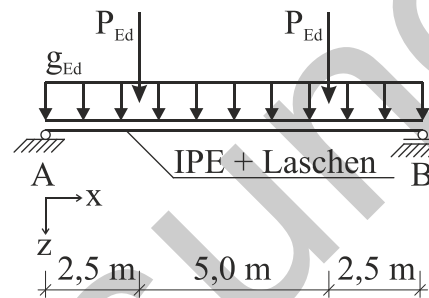
Aufgabe 1
20 Punkte
gegeben:

- Ebenes statisches System unter Last gemäß Skizze:

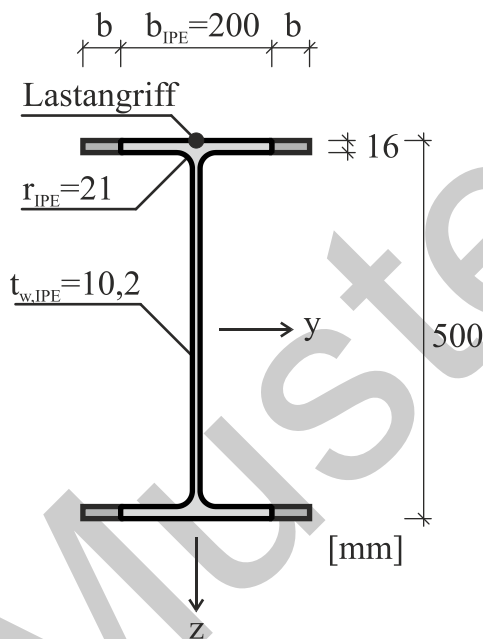
b) ohne Eigengewicht



c) mit Eigengewicht



- Profilkennwerte IPE 500 mit angeschweißten Laschen (b = Laschenbreite):



Variante	I_{zz} [cm ⁴]	I_w [cm ⁶]	I_T [cm ⁴]	$W_{pl,y}$ [cm ³]
b=0mm	2.140	1.234.030	89,3	2.194
b=25mm	4.175	2.414.360	99,7	2.582
b=50mm	7.209	4.180.870	115,3	2.969
b=75mm	11.442	6.646.320	128,9	3.356
b=100mm	17.076	9.929.370	142,2	3.743

- Profil:

IPE 500

 $A = 116 \text{ cm}^2$ (ohne Laschen)

 $\gamma = 73,5 \text{ kN/m}^3$
 $QKL = 1$ (reine Biegung M_y)

- Material:

S 355

gesucht:

- a) Zur Erhöhung des Widerstandes gegen Biegedrillknicken soll das Profil IPE 500 verstärkt werden. Hierzu werden an die Flansche Laschen mit den Abmessungen ($t = 16 \text{ mm}$; $b = x \text{ mm}$) angeschweißt.

Ohne die Laschen lässt sich das Profil für Biegung um die starke Achse in QKL 1 einordnen.

Wählen Sie die maximal mögliche Laschenbreite b so, dass das Profil nach der Verstärkungsmaßnahme noch in QKL 2 eingeordnet werden kann (mögliche Laschenbreiten: $b = 25 \text{ mm} / 50 \text{ mm} / 75 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$).

- b) Ermitteln Sie für das Profil mit der unter a) gewählten Laschenbreite die maximal aufnehmbare Last P_{Ed} . Führen Sie hierzu den Biegedrillknicknachweis unter Zuhilfenahme von **Anlage 1.1.** ohne Berücksichtigung des Eigengewichts.

(Sollten Sie Aufgabenteil a) nicht gelöst haben, gehen Sie von einer Laschenbreite $b = 50 \text{ mm}$ aus.)

- c) Die Ermittlung des bezogenen kritischen Biegedrillknickmomentes unter Zuhilfenahme der angegebenen Tafelwerte liegt auf der sicheren Seite.

Das bezogene kritische Biegedrillknickmoment für die unter b) ermittelte Belastung P_{Ed} sowie das gleichzeitig wirkende Eigengewicht g_{Ed} wurde elektronisch berechnet zu:

$$M_{cr} = 409,42 \text{ kNm}$$

Führen Sie mit diesem M_{cr} den Biegedrillknicknachweis unter Berücksichtigung des Eigengewichts g_{Ed} sowie der in b) berechneten Last P_{Ed} .

(Sollten Sie Aufgabenteil a) nicht gelöst haben, gehen Sie von $b = 50 \text{ mm}$ aus.)

(Sollten Sie Aufgabenteil b) nicht gelöst haben, gehen Sie von $P_{Ed} = 192 \text{ kN}$ aus.)

Hinweise:

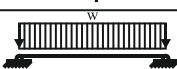
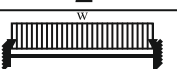
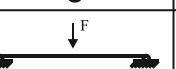
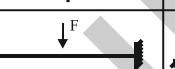
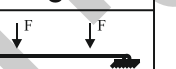





- Ermitteln Sie den Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken X_{LT} nach der Variante für „gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte“.
- Modifizieren Sie den Abminderungsfaktor X_{LT} nicht mit dem Beiwert f .

Anlage 1.1 (für Aufgabenteil b)

Ermittlung des bezogenen kritischen Biegedrillknickmomentes

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{l_{LT}^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_w}{I_z} + 0,039 \cdot \frac{l_{LT}^2 \cdot I_T}{I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

(z_g = Abstand des Lastangriffspunktes zum Schwerpunkt; geht positiv bei Lastangriff am Druckgurt ein)

	1	2	3	4	5
Belastung und Auflagerbed.					
Biegemomentenverlauf					

Fall	Beiwert C_1	Beiwert C_2
1	1,12	0,45
2	2,58	1,57
3	1,35	0,65
4	1,68	1,51
5	1,04	0,47

Musterlösung:

a) Querschnittsklassifizierung

Die Querschnittsklasse des Steges ändert sich durch die Verstärkungsmaßnahme nicht.

Damit die Flansche in QKL 2 eingeordnet werden können, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{c_{max}}{t} \leq 10 \cdot \epsilon \rightarrow \frac{c_{max}}{16} \leq 10 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \rightarrow c_{max} \leq 130mm$$

Die Breite des einseitig gestützten Querschnittsteils des Profils IPE500 beträgt:

$$c_{vorh} = \frac{200mm - 2 \cdot 21mm - 10,2mm}{2} = 73,9mm$$

Die maximal mögliche Laschenbreite ergibt sich somit zu

$$b_{max} = 130mm - 73,9mm = 56,1mm$$

Die Laschenbreite wird somit zu $b = 50mm$ gewählt.

b) Biegedrillknicknachweis unter Last P_{Ed}

Nachweis zu führen nach DIN EN 1993-1-1, Kapitel 6.3.2

Ermittlung des bezogenen kritischen Biegedrillknickmomentes:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{l_{LT}^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_w}{I_z} + 0,039 \cdot \frac{l_{LT}^2 \cdot I_T}{I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \\ &= 1,04 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot 7.209}{1.000^2} \\ &\quad \cdot \left[\sqrt{\frac{4.180.870}{7.209} + 0,039 \cdot \frac{1.000^2 \cdot 115,3}{7.209} + (0,47 \cdot 25)^2} - 0,47 \cdot 25 \right] \\ &= 386,62[kNm] \end{aligned}$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2.969[cm^3] \cdot 35,5[kN/cm^2]}{38.662[kNcm]}} = 1,651[-]$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors für Biegedrillknicken:

Knicklinie: geschweißtes Profil, $h/b = 50/30 = 1,67 \Rightarrow$ Knicklinie c

Imperfektionsbeiwert: $\alpha_{LT} = 0,49[-]$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$= 0,5[1 + 0,49 \cdot (1,651 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,651^2] = 1,829[-]$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,829 + \sqrt{1,829^2 - 0,75 \cdot 1,651^2}} = 0,337[-]$$

Ermittlung des Bemessungswertes der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,337 \cdot 2.969[cm^3] \cdot \frac{35,5[kN/cm^2]}{1,1} = 322,72[kNm]$$

Ermittlung der maßgebenden Schnittgrößen:

Auflagerkraft:

$$A_V = P_{Ed}$$

Biegemoment:

$$M_{Ed} = A_V \cdot 2,5m = P_{Ed} \cdot 2,5m$$

Nachweis:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \Rightarrow \frac{P_{Ed} \cdot 2,5m}{322,72kNm} \leq 1,0 \Rightarrow P_{Ed} \leq 129,1kN$$

Die maximal aufzubringende Bemessungslast beträgt $P_{Ed} = 129,1kN$.

c) Biegedrillknicknachweis unter Last P_{Ed} und Eigengewicht

Ermittlung des bezogenen kritischen Biegedrillknickmomentes (gegeben):

$$M_{cr} = 409,42[kNm]$$

Ermittlung des Schlankheitsgrades:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2.969[cm^3] \cdot 35,5[kN/cm^2]}{40.942[kNcm]}} = 1,604[-]$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors für Biegedrillknicken:

$$\begin{aligned}\Phi_{LT} &= 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2] \\ &= 0,5[1 + 0,49 \cdot (1604 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,604^2] = 1,760[-]\end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,760 + \sqrt{1,760^2 - 0,75 \cdot 1,604^2}} = 0,352[-]$$

Ermittlung des Bemessungswertes der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,352 \cdot 2.969[cm^3] \cdot \frac{35,5[kN/cm^2]}{1,1} = 337,28[kNm]$$

Ermittlung der maßgebenden Schnittgrößen:

Fläche des Profils:

$$A = 116cm^2 + 4 \cdot (5cm \cdot 1,6cm) = 148cm^2$$

Eigengewicht des Profils:

$$q = \frac{148}{100 \cdot 100} m^2 \cdot 78,5 \frac{kN}{m^3} = 1,1618 \frac{kN}{m}$$

Maximales Biegemoment:

$$M_{Ed} = P_{Ed} \cdot 2,5m + \frac{q \cdot L^2}{8} = 192,1 \cdot 2,5 + \frac{1,1618 \cdot 10^2}{8} = 337,27kNm$$

Nachweis:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \Rightarrow \frac{337,27kNm}{337,28kNm} = 1,00 \leq 1,0$$

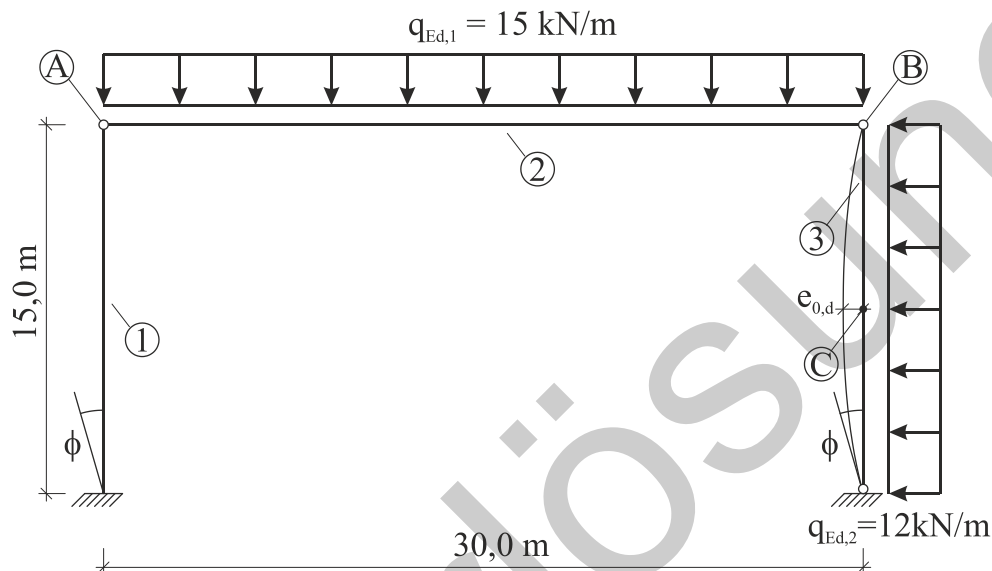
Nachweis erbracht!

Aufgabe 2

45 Punkte

gegeben:

- Ebenes statisches System unter Last gemäß Skizze:



- Pos. ①: Fachwerkstütze
 $EI = 1.195.800 \text{ kNm}^2$
- Pos. ② : Fachwerkbinder
 $EI = 872.420 \text{ kNm}^2$
- Pos. ③: IPEo 400
S 235, KSL a, Biegung um die starke Achse
 $EI = 56.175 \text{ kNm}^2$
 $a = 0,4146$
 $N_{\text{pla,Rd}} = 2.264,9 \text{ kN}$
 $M_{\text{pla,Rd}} = 390,0 \text{ kNm}$

gesucht:

- Ermitteln Sie die äquivalenten Ersatzlasten (Abtriebskräfte), welche sich aus den Imperfektionen Φ und $e_{0,d}$ in den Stützen ergeben. Tragen Sie die ermittelten Ersatzlasten in **Anlage 2.1** ein.

(Anlage 2.5: Imperfektionsansätze Φ und $e_{0,d}$ nach DIN EN 1993-1-1)

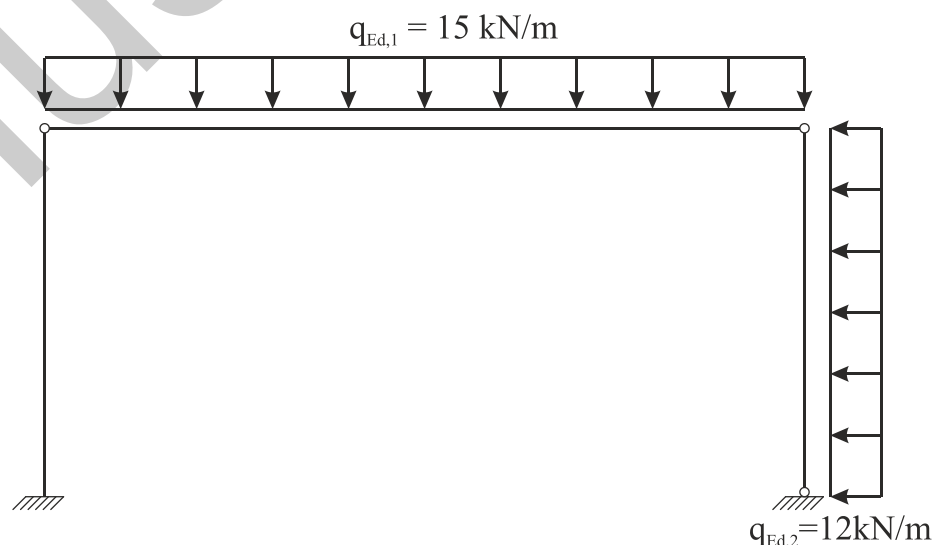
- b) Ermitteln Sie die Schnittgrößenverläufe (M^I , N^I) nach Theorie 1. Ordnung, resultierend aus äußeren Lasten und Imperfektionen (d.h. System aus Anlage 2.1). Tragen Sie die Schnittgrößenverläufe in **Anlage 2.2** ein.
- c) Zeichnen Sie die Verformungsfigur (qualitativ); nutzen Sie hierzu **Anlage 2.3**. Ermitteln Sie weiterhin die horizontale Verformung in den Rahmenecken (Pkt. A und Pkt. B) sowie in Stützenmitte (Stütze rechts, Pkt. C).
- d) Ermitteln Sie die Schnittgrößenverläufe (M^{II} , N^{II}) nach Theorie 2. Ordnung (1 Iterationsschritt). Tragen Sie die Schnittgrößenverläufe in **Anlage 2.4** ein.
- e) Führen Sie den Querschnittsnachweis für Pos. ③ in Feldmitte nach Theorie 2. Ordnung (M-N-Interaktion, V kann vernachlässigt werden).

Hinweise:

- Die Profile werden alle um ihre starke Achse belastet.
- Im Fachwerkbinder (Pos. ②) sind keine Abtriebskräfte anzusetzen.
- Längsdehnung und Eigengewicht aller Stäbe sind zu vernachlässigen.
- Die Berechnung der Schnittgrößen nach Theorie 2. Ordnung ist mit dem ΔM -Verfahren durchzuführen (geometrische Reihe).
- Es sind keine Stabilitätsnachweise zu führen.

Anlage 2.1 (zu Aufgabenteil a):

Antragen der äquivalenten Ersatzlasten (Abtriebskräfte):



Musterlösung

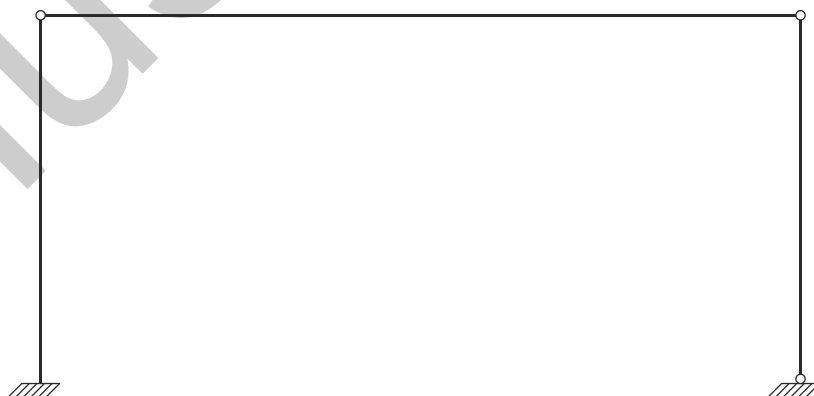
Anlage 2.2 (zu Aufgabenteil b):

Schnittgrößenverläufe nach Theorie 1. Ordnung:

N^I



M^I



Anlage 2.3 (zu Aufgabenteil c):

Verformungsfigur:



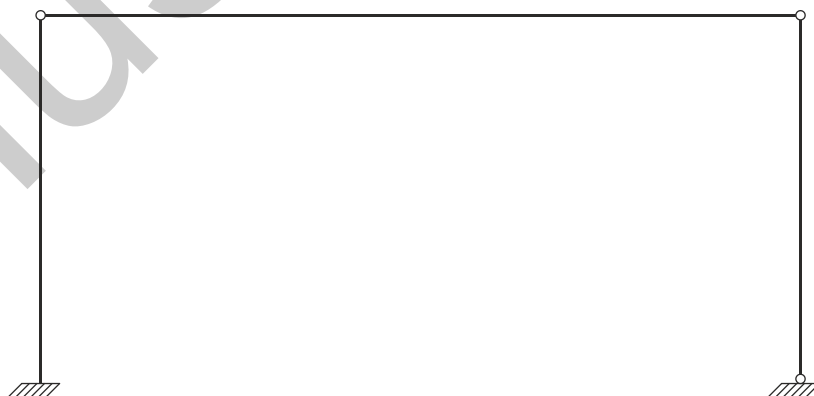
Anlage 2.4 (zu Aufgabenteil d):

Schnittgrößenverläufe nach Theorie 2. Ordnung:

N^{II}



M^{II}



Anlage 2.5 (zu Aufgabenteil a):

Imperfektionsansätze nach DIN EN 1993-1-1

- 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.

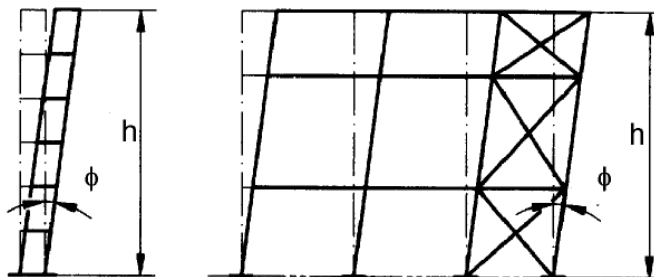


Bild 5.2 — Äquivalente Stützenschiefstellung

- b) eingeprägte Vorkrümmung von Bauteilen

$$e_{0,d}/L \quad (5.6)$$

Dabei ist L die Bauteillänge.

ANMERKUNG Die Werte $e_{0,d}/L$ können dem Nationalen Anhang entnommen werden. Empfohlene Werte sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1 — Bemessungswerte der Vorkrümmung $e_{0,d}/L$ von Bauteilen

Knicklinie nach Tabelle 6.1	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	$e_{0,d}/L$	$e_{0,d}/L$
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

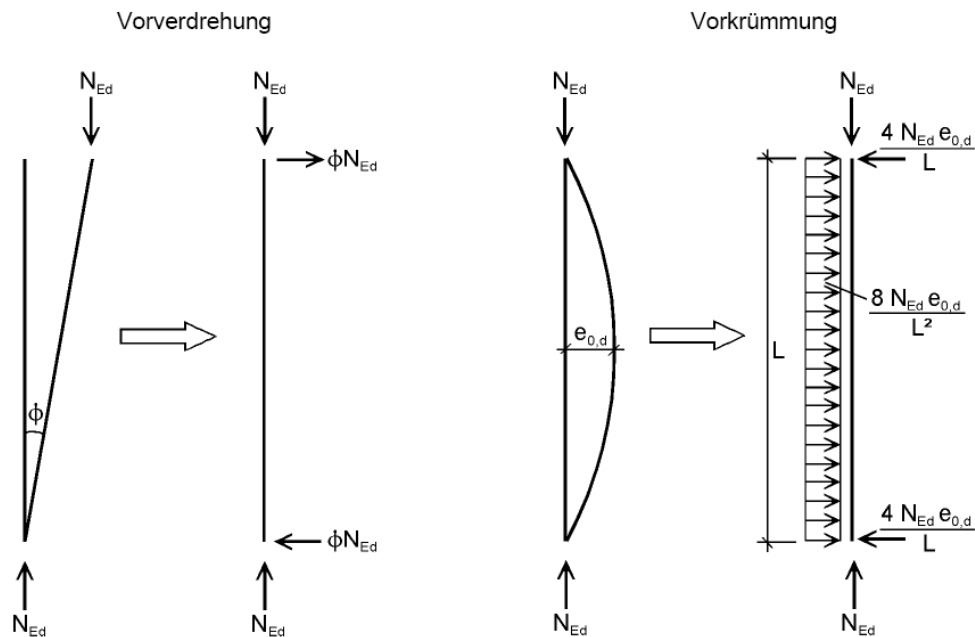
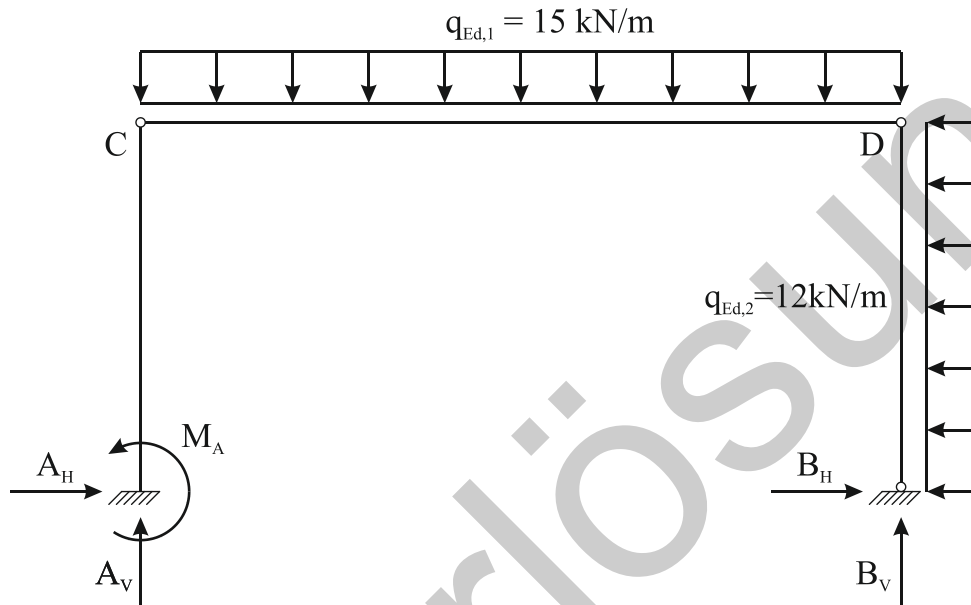


Bild 5.4 — Ersatz der Vorverformungen durch äquivalente horizontale Ersatzlasten

Musterlösung:
a) Abtriebskräfte / Ersatzlasten
Ermittlung der Normalkräfte in den Stützen:


$$\sum M_D = 0 \rightarrow B_H \cdot 15m - 12 \frac{kN}{m} \cdot 15m \cdot 7,5m = 0 \rightarrow B_H = 90kN$$

$$\sum F_H = 0 \rightarrow B_H + A_H - 12 \frac{kN}{m} \cdot 15m = 0 \rightarrow A_H = 90kN$$

$$\sum M_C = 0 \rightarrow B_V \cdot 30m + B_H \cdot 15m - 12 \frac{kN}{m} \cdot 15m \cdot 7,5m - 15 \frac{kN}{m} \cdot 30m \cdot 15m = 0$$

$$\rightarrow B_V = 225kN$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V + B_V - 15 \frac{kN}{m} \cdot 30m = 0 \rightarrow A_V = 225kN$$

$$\sum M_C = 0 \rightarrow A_H \cdot 15m + M_A = 0 \rightarrow M_A = -1.350kNm$$

Ermittlung der Vorimperfektionen in den Stützen:

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

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{15}} = 0,5164$$

$$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0 \rightarrow \alpha_h = \frac{2}{3}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,866$$

$$\phi = \frac{1}{200} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,866 = \frac{1}{346}$$

Ermittlung der Vorkrümmung in rechten Stütze (KSL a, plastische Bemessung):

$$\frac{e_{0,d}}{L} = \frac{e_{0,d}}{15m} = \frac{1}{250} = 0,004m$$

Ermittlung der Abtriebskräfte / äquivalenten Ersatzlasten:

Linke Stütze: $N = A_V = 225 \text{ kN}$

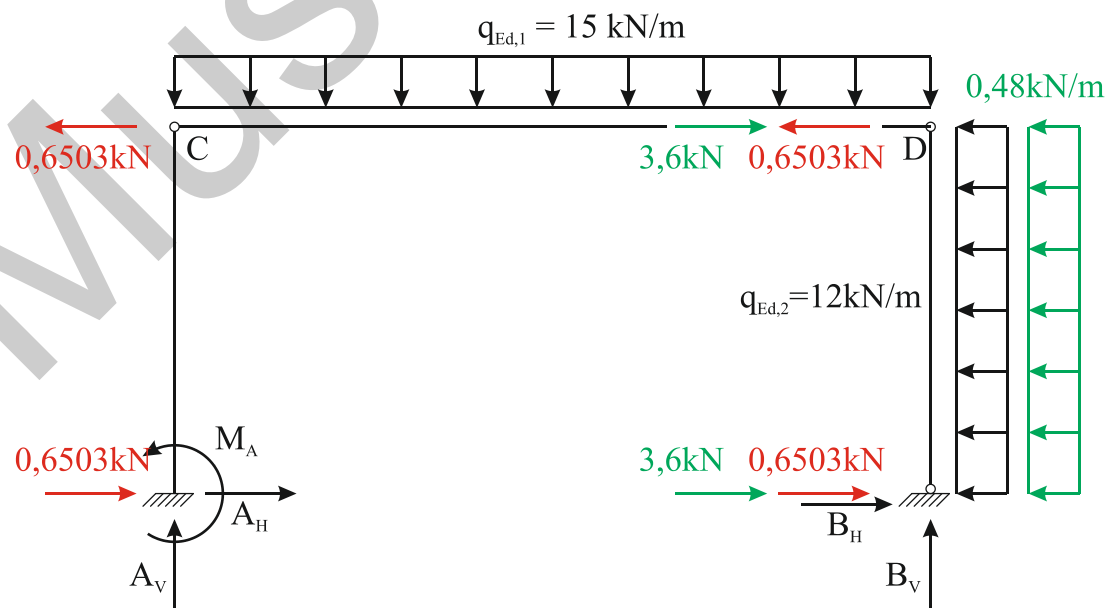
$$\Delta H = N \cdot \left(\frac{\delta}{L} + \phi\right) = 225[kN] \cdot \frac{1}{346} = 0,6503kN$$

Rechte Stütze: $N = B_V = 225 \text{ kN}$

$$\Delta H = N \cdot \left(\frac{\delta}{L} + \phi\right) = 225[kN] \cdot \frac{1}{346} = 0,6503kN$$

$$\Delta w = \frac{8 \cdot N \cdot (\delta + e_{0,d})}{L^2} = \frac{8 \cdot 225 \cdot 0,004}{15^2} = 0,48 \frac{kN}{m}$$

$$\Delta H_w = \frac{4 \cdot N \cdot (\delta + e_{0,d})}{L} = \frac{4 \cdot 225 \cdot 0,004}{15} = 3,6kN$$



b) Schnittgrößenverläufe (M^I , N^I) nach Theorie 1. Ordnung

$$\sum M_D = 0 \rightarrow B_H \cdot 15m + (3,6 + 0,6503)kN \cdot 15m - (12 + 0,48) \frac{kN}{m} \cdot 15m \cdot 7,5m = 0$$

$$\rightarrow B_H = 89,35kN$$

$$\sum F_H = 0 \rightarrow B_H + A_H - 12 \frac{kN}{m} \cdot 15m = 0 \rightarrow A_H = 90,65kN$$

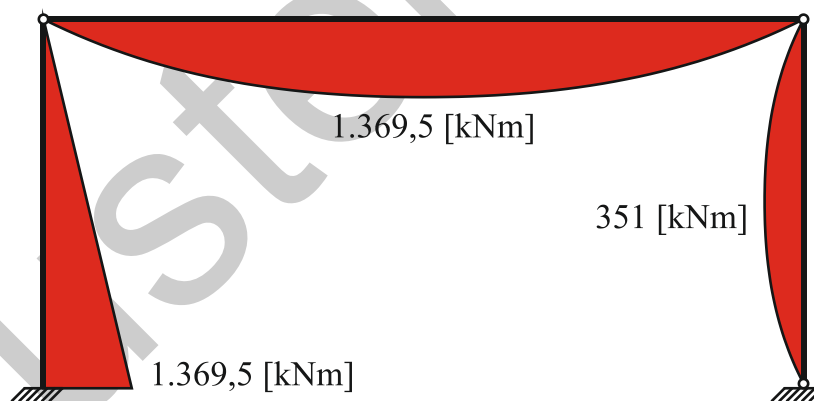
$$\begin{aligned} \sum M_C = 0 \rightarrow B_V \cdot 30m + B_H \cdot 15m - (12 + 0,48) \frac{kN}{m} \cdot 15m \cdot 7,5m - 15 \frac{kN}{m} \cdot 30m \cdot 15m \\ + (3,6 + 0,6503)kN \cdot 15m = 0 \end{aligned}$$

$$\rightarrow B_V = 225kN$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V + B_V - 15 \frac{kN}{m} \cdot 30m = 0 \rightarrow A_V = 225kN$$

$$\sum M_C = 0 \rightarrow A_H \cdot 15m + 0,6503kN \cdot 15m + M_A = 0 \rightarrow M_A = -1.369,5kNm$$

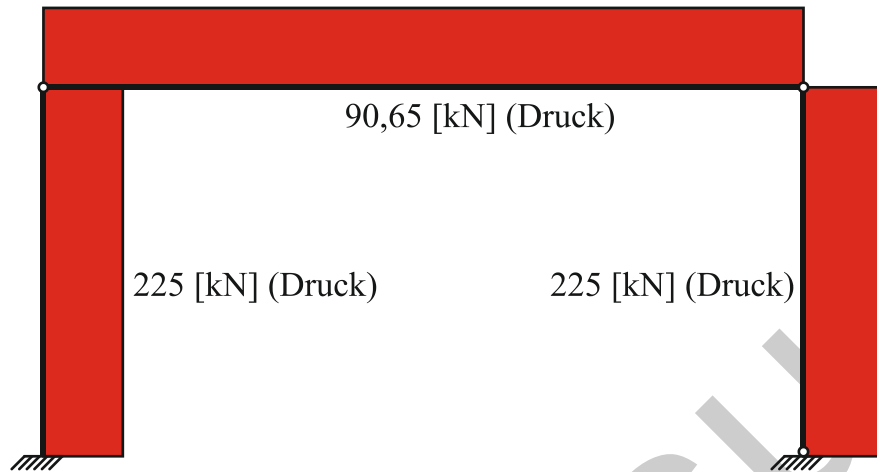
Momentenverlauf nach Theorie 1. Ordnung:



$$M_{Riegel} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{15 \cdot 30^2}{8} = 1.867,5kNm$$

$$M_{Stütze} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(12 + 0,48) \cdot 15^2}{8} = 351kNm$$

Normalkraftverlauf nach Theorie 1. Ordnung:

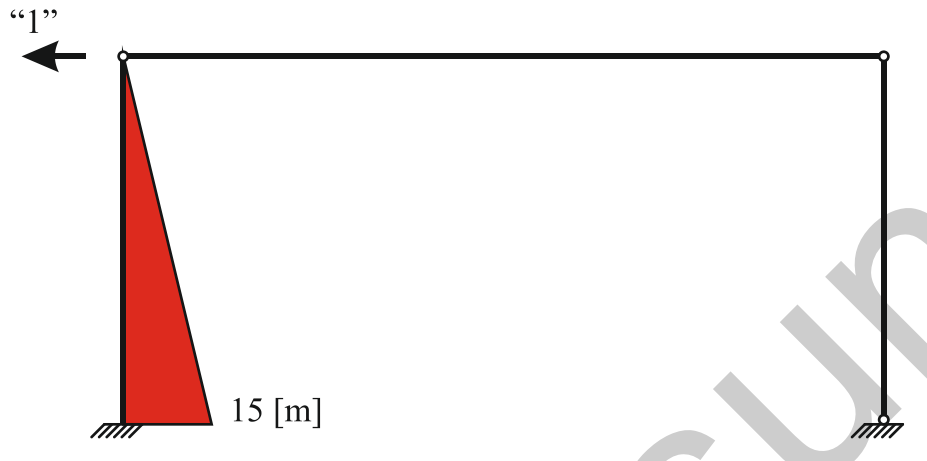


c) Verformungsfigur / Verformungen:

Skizze der Verformungsfigur:

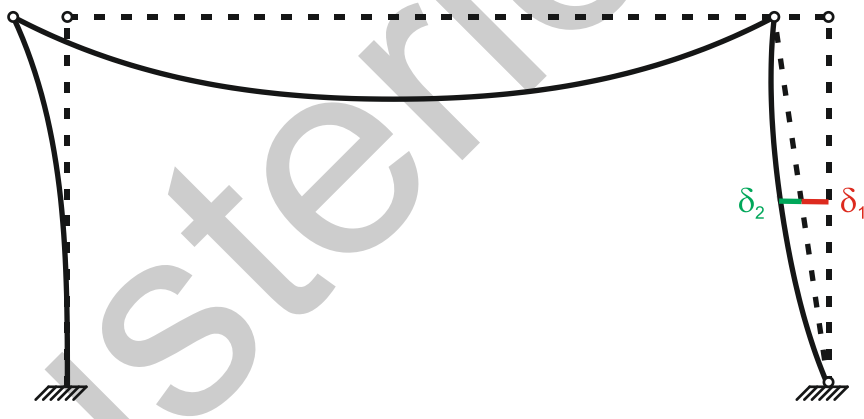


Ermittlung der Verformung in den Rahmenecken:
Schnittgrößenverlauf infolge „1“-Last (Rahmenecke):



$$\delta_{10} = \frac{1}{1.195.800 \text{ kNm}^2} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot 15 \text{ m} \cdot 1.369,5 \text{ kNm} \cdot "15" \text{ m} \right] = 8,59 [\text{cm}]$$

Ermittlung der Verformung in der Mitte der rechten Stütze:
Die Verformung setzt sich aus 2 Komponenten zusammen:



$$\delta_1 = \frac{\delta_{10}}{2} = 4,295 \text{ cm}$$

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot H^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{12,48 \text{ kN/m} \cdot 15^4 \text{ m}^4}{56.175 \text{ kNm}^2} = 14,64 \text{ cm}$$

d) Schnittgrößenverlauf nach Theorie 2. Ordnung
Ermittlung der Abtriebskräfte / äquivalenten Ersatzlasten:

 Linke Stütze: $N = A_V = 225 \text{ kN}$

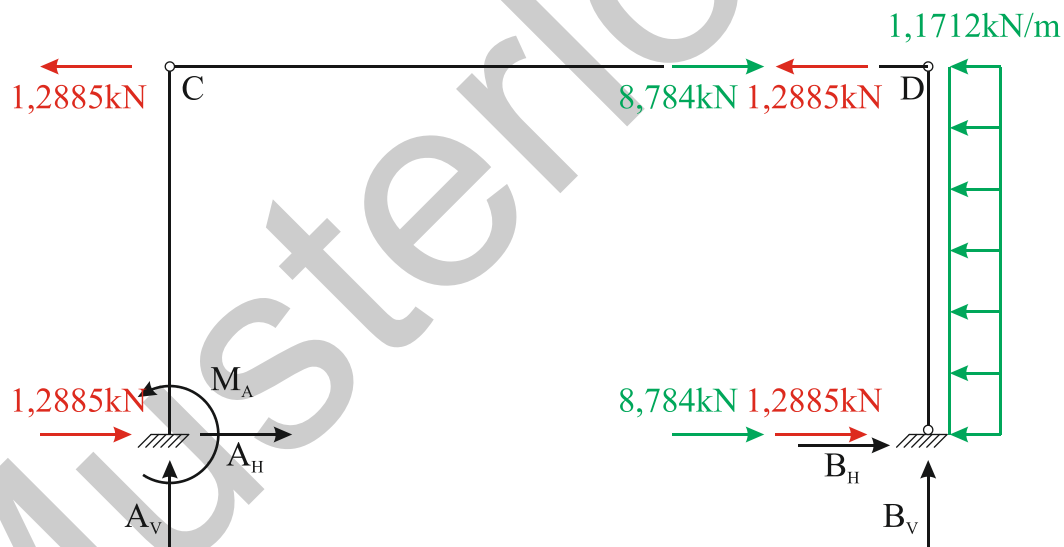
$$\Delta H = N \cdot \left(\frac{\delta}{L} + \phi \right) = 225 \text{ kN} \cdot \frac{8,59 \text{ cm}}{1.500 \text{ cm}} = 1,2885 [\text{kN}]$$

 Rechte Stütze: $N = B_V = 225 \text{ kN}$

$$\Delta H = N \cdot \left(\frac{\delta}{L} + \phi \right) = 225 \text{ kN} \cdot \frac{8,59 \text{ cm}}{1.500 \text{ cm}} = 1,2885 [\text{kN}]$$

$$\Delta w = \frac{8 \cdot N \cdot (\delta + e_{0,d})}{L^2} = \frac{8 \cdot 225 \cdot 14,64/100}{15^2} = 1,1712 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\Delta H_w = \frac{4 \cdot N \cdot (\delta + e_{0,d})}{L} = \frac{4 \cdot 225 \cdot 14,64/100}{15} = 8,784 \text{ kN}$$



$$\sum M_D = 0 \rightarrow B_H \cdot 15 \text{ m} + (8,784 + 1,2885) \text{ kN} \cdot 15 \text{ m} - 1,1712 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 15 \text{ m} \cdot 7,5 \text{ m} = 0$$

$$\rightarrow B_H = -1,2885 \text{ kN}$$

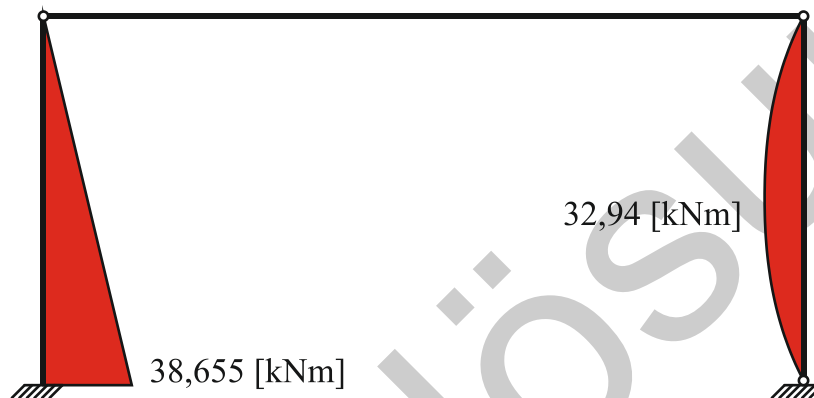
$$\sum F_H = 0 \rightarrow B_H + A_H = 0 \rightarrow A_H = 1,2885 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sum M_C = 0 \rightarrow B_V \cdot 30 \text{ m} + B_H \cdot 15 \text{ m} - 1,1712 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 15 \text{ m} \cdot 7,5 \text{ m} + (8,784 + 1,2885) \text{ kN} \\ \cdot 15 \text{ m} = 0 \rightarrow B_V = 0 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\sum F_V = 0 \rightarrow A_V + B_V = 0 \rightarrow A_V = 0 \text{ kN}$$

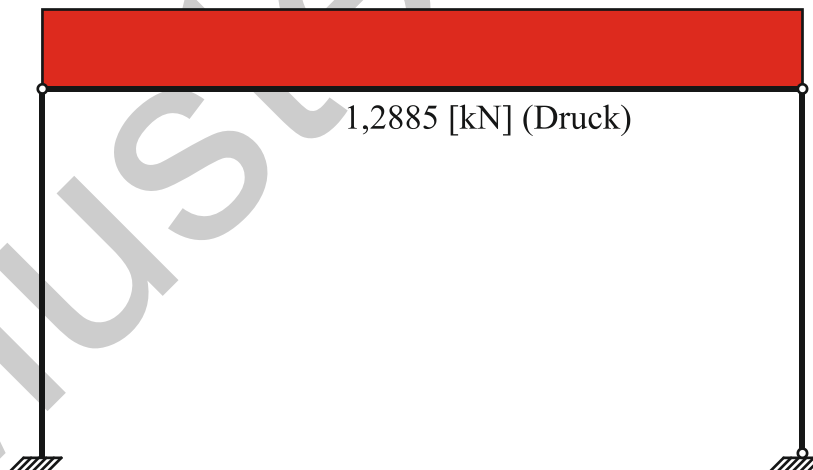
$$\sum M_C = 0 \rightarrow A_H \cdot 15 \text{ m} + 1,2885 \text{ kN} \cdot 15 \text{ m} + M_A = 0 \rightarrow M_A = -38,655 \text{ kNm}$$

Momentenzuwachs ΔM_1 :



$$M_{\text{Stütze}} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{1,1712 \cdot 15^2}{8} = 32,94 \text{ kNm}$$

Normalkraftzuwachs ΔN_1 :



Einspannmoment der linken Stütze nach Theorie 2. Ordnung:

$$M^{II} = \frac{M^I}{1 - \Delta M_1 / M^I} = \frac{1.369,5 \text{ kNm}}{1 - 38,655 \text{ kNm} / 1.369,5 \text{ kNm}} = 1.409,3 \text{ kNm}$$

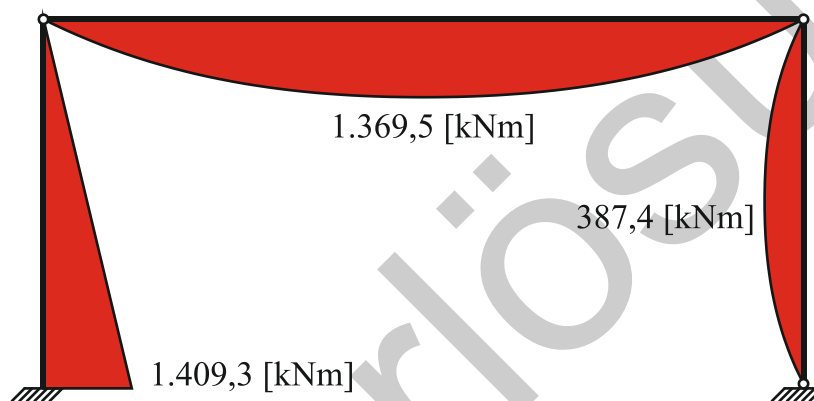
Feldmoment der rechten Stütze nach Theorie 2. Ordnung:

$$M^{II} = \frac{M^I}{1 - \Delta M_1 / M^I} = \frac{351 \text{ kNm}}{1 - 32,94 \text{ kNm} / 351 \text{ kNm}} = 387,4 \text{ kNm}$$

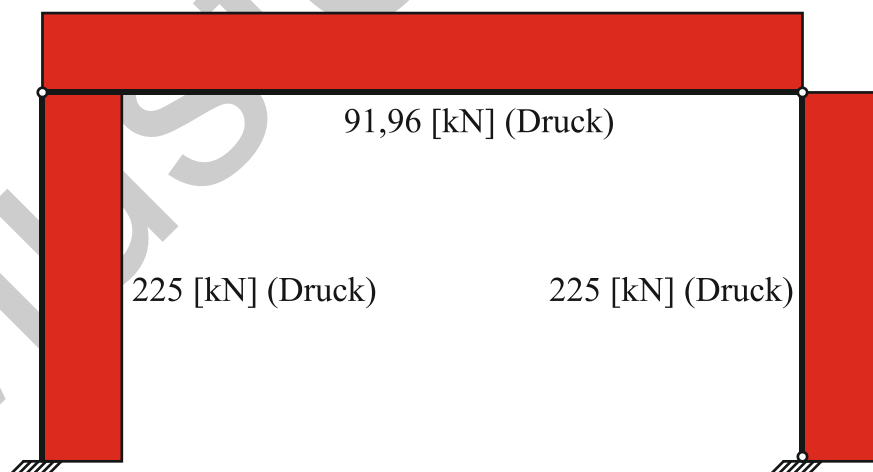
Normalkraft im Riegel nach Theorie 2. Ordnung:

$$N^{II} = \frac{N^I}{1 - \Delta N_1 / N^I} = \frac{90,65 \text{ kN}}{1 - 1,2885 \text{ kN} / 90,65 \text{ kN}} = 91,96 \text{ kN}$$

Momentenverlauf nach Theorie 2. Ordnung:



Normalkraftverlauf nach Theorie 2. Ordnung:



e) Querschnittsnachweis für die rechte Stütze in Feldmitte

Querschnittswerte:

$$\alpha = 0,4146$$

$$N_{pl,Rd} = 2.264,9kN$$

$$M_{pl,Rd} = 390kNm$$

Interaktion erforderlich?

$$N_{Ed} < 0,5 \cdot N_{pl,w,Rd} \rightarrow 225kN < 0,5 \cdot 0,4146 \cdot 2.264,9kN = 469,5kN$$

$$N_{Ed} < 0,25 \cdot N_{pl,Rd} \rightarrow 225kN < 0,5 \cdot 2.264,9kN = 566,2kN$$

Keine Interaktion erforderlich!

Nachweis:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} \rightarrow 225kN \leq 2.264,9kN$$

$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} \rightarrow 387,4kNm \leq 390,0kNm$$

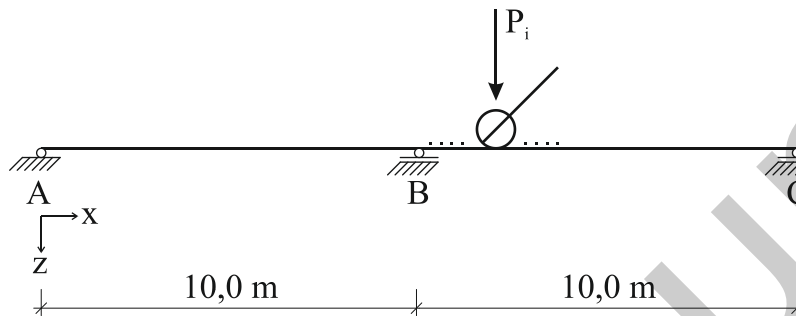
Nachweis erbracht!

Aufgabe 3

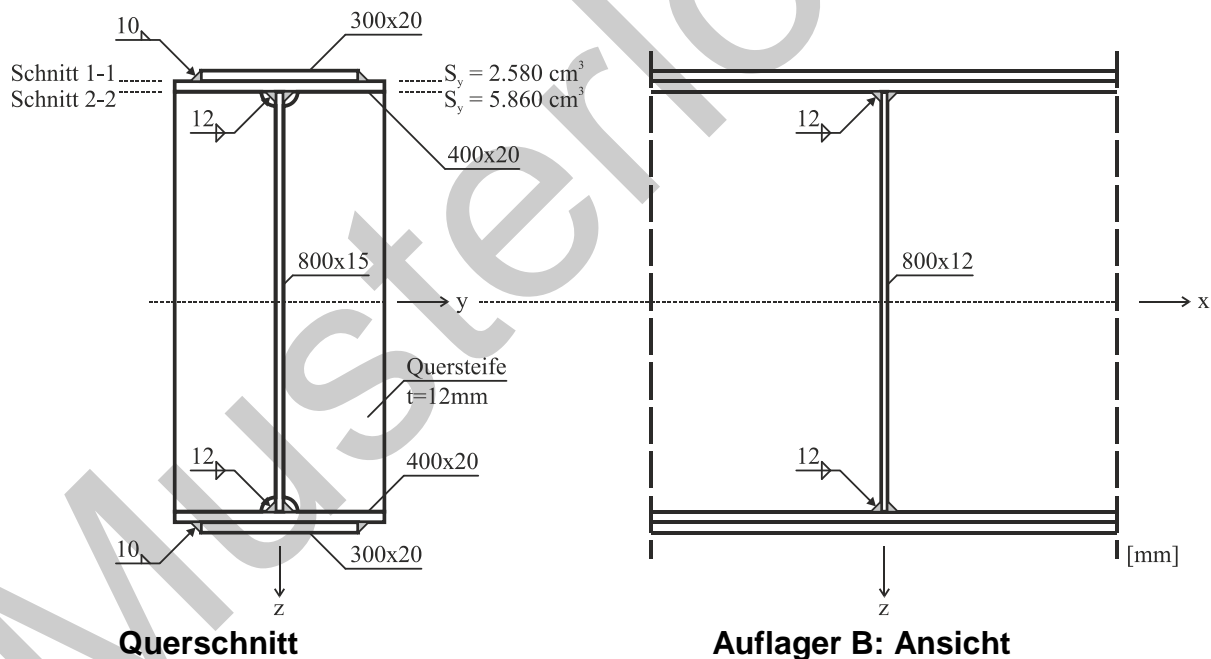
35 Punkte

gegeben:

- Ebenes, ermüdungsbeanspruchtes System eines 2-Feldträgers gemäß Skizze:



- Querschnitt: geschweißter I-Träger mit Verstärkungslamellen und eingeschweißten Lasteinleitungsblechen an den Auflagern gemäß Skizze



- Material: Baustahl S 355
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Mf} = 1,0$ $\gamma_{Ff} = 1,0$
- Schweißungen: alle Schweißungen handgeschweißt

- Belastungsgeschichte: Hinfahrt mit $P_i = 1.000 \text{ kN}$
 Rückfahrt mit $P_i = 250 \text{ kN}$
 100 Überfahrten pro Tag (hin und zurück)
 340 Tage pro Jahr
 15 Jahre

gesucht:

- a) Ermitteln Sie alle relevanten Kerbdetails für die Detailausführung im Punkt B über der Mittelstütze. Benutzen Sie die Anlagen (**Anlage 3.1**, **Anlage 3.2**) als Lösungshilfe.
- b) Führen Sie den Ermüdungsnachweis für die Detailausführung im Punkt B über der Mittelstütze für alle relevanten Kerbdetails. Benutzen Sie die Anlagen (**Anlage 3.1**, **Anlage 3.2**) als Lösungshilfe.
- c) Berechnen Sie die Restnutzungsdauer des Systems unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus a).

Hinweise:

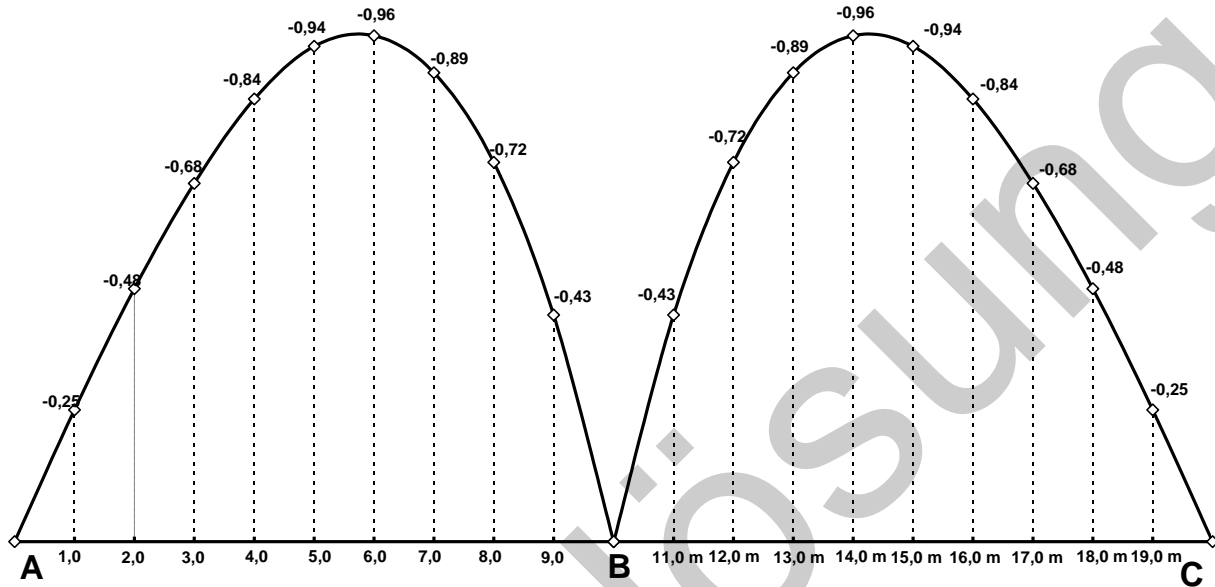
- Die Ermüdungsnachweise sind mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.
- Die Ermittlung der Spannungskollektive soll nach der Reservoir-Methode erfolgen.
- Das Eigengewicht der Konstruktion ist zu vernachlässigen.
- Die statischen Momente sind für 2 Schnitte angegeben (siehe Skizze „Querschnitt“):
 - Schnitt 1-1: der abgesicherte Querschnitt ist die Obergurtlamelle
 $S_y = 2.580 \text{ cm}^3$
 - Schnitt 2-2: der abgesicherte Querschnitt setzt sich aus
 Obergurtlamelle und Obergurt zusammen
 $S_y = 5.860 \text{ cm}^3$
- Rückblick Stahlbau I: Schubspannungen in Längsnähten längsverschweißter Blechträger:

$$\tau(z) = \frac{Q \cdot S_y(z)}{I_y \cdot n} \quad \text{mit } n = \text{Blehdicke}$$

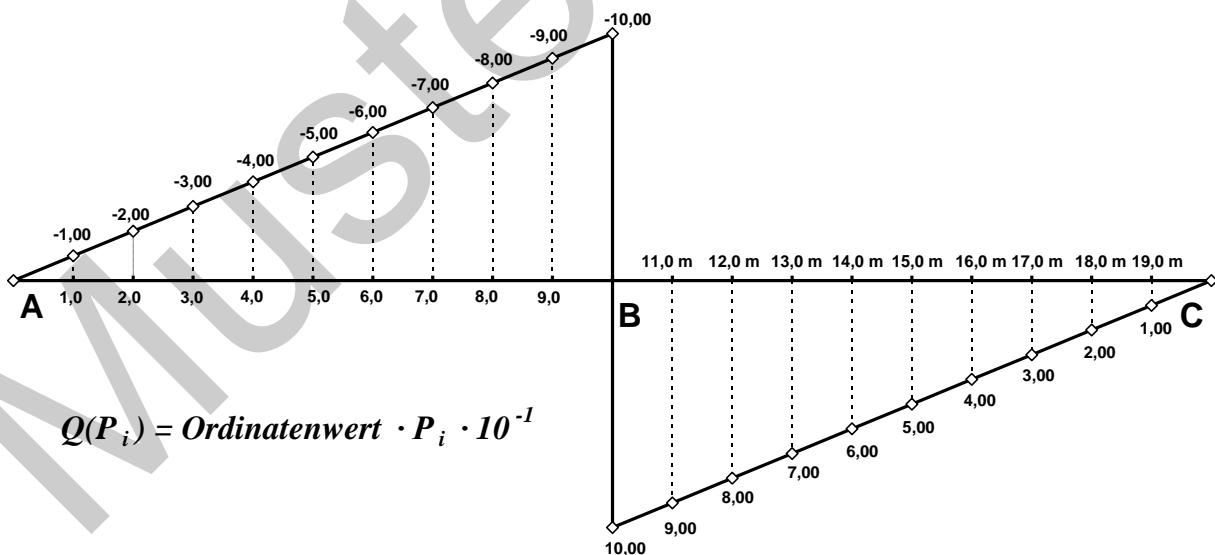
Anlage 3.1: Einflusslinien:

Einflusslinie Stützmoment

$$M(P_i) = \text{Ordinatenwert} \cdot P_i \cdot l \cdot 10^{-1}$$

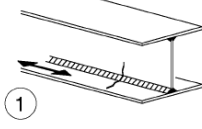
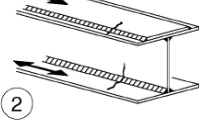
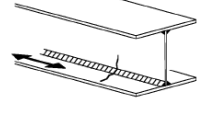
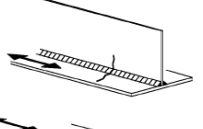
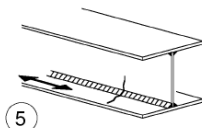
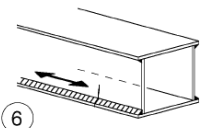
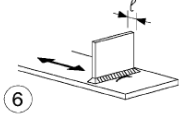
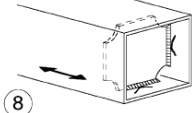
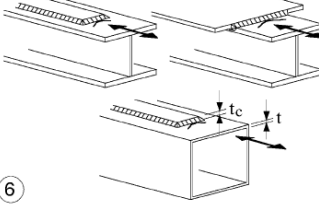
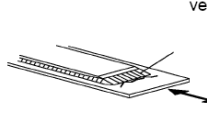
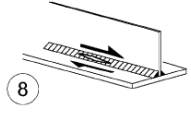


Einflusslinie Auflager Mitte



$$Q(P_i) = \text{Ordinatenwert} \cdot P_i \cdot 10^{-1}$$

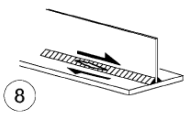
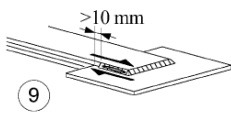
Anlage 3.2: Kerbdetails (Auszug aus DIN EN 1993-1-9):

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
125			<u>Durchgehende Längsnähte:</u> 1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) Automatengeschweißte 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) Automatengeschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) Mit Automaten einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerngruppe 100 zuzuordnen.
100			5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) Von Hand oder mit Automaten 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.
80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$		<u>Querstreifen:</u> 6) Querstreifen auf Blechen 7) Vertikalstreifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.	Kerbfälle 6) und 7): Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.
71	$50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$		8) Am Steg oder Flansch angeschweißte Querschotte in Kasten-trägern. Nicht für Hohlprofile. Die Kerbfälle gelten auch für Ringstreifen.	7) Wenn die Steife, Fall 7) links, im Stegblech abschließt, wird $\Delta\sigma$ mit den Hauptspannungen berechnet.
56*	$t_c < t$		<u>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern:</u> 6) Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirrnaht.	6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirrnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich. Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm. Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.
50	$t \leq 20$			
45	$20 < t \leq 30$			
40	$30 < t \leq 50$			
36	$t > 50$			
56	$t_c \geq t$		7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. $5t_c$ ist die Minillänge der Verstärkungsnaht.	7) Die Stirrnaht ist blecheben zu schleifen. Zusätzlich ist für $t_c > 20 \text{ mm}$ die Lamelle mit einer Neigung $\leq 1/4$ auszubilden.
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 $\geq 10 \text{ mm}$ vom Blechende entfernt sein.

Musterlösung:

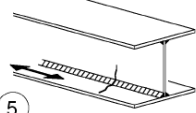
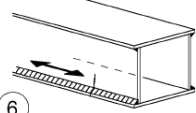
a) Ermittlung der relevanten Kerbdetails über der Mittelstütze

Kerbdetail 1: Schweißnaht Flansch-Lamelle (Schubspannungen)

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) $\Delta \tau$ 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>
-------------	---	--	---

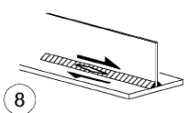
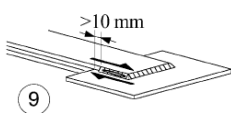
Kerbfall 80

Kerbdetail 2: Schweißnaht Steg-Flansch (Längsspannungen)

100	 	<p>5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte.</p> <p>6) Von Hand oder mit Automaten einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.</p>	<p>5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschärfen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.</p>
-----	---	--	--

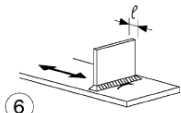
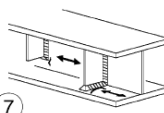
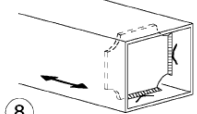
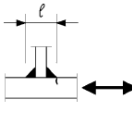
Kerbfall 100

Kerbdetail 3: Schweißnaht Steg-Flansch (Schubspannungen)

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) $\Delta \tau$ 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>
-------------	---	--	---

Kerbfall 80

Kerbdetail 4: Eingeschweißte Bleche / Steife

80	$\ell \leq 50$ mm	 	<p>Querstreifen:</p> <p>6) Querstreifen auf Blechen</p> <p>7) Vertikalstreifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7):</p> <p>Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$ mm	 	<p>8) Am Steg oder Flansch angeschweißte Querschotte in Kastenträgern.</p> <p>Nicht für Hohlprofile.</p> <p>Die Kerbfälle gelten auch für Ringstreifen.</p>	<p>7) Wenn die Steife, Fall 7) links, im Stegblech abschließt, wird $\Delta \sigma$ mit den Hauptspannungen berechnet.</p>

$$l = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a + t_{\text{Steife}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12 + 15 = 49 \text{ mm}$$

Kerbfall 80

b) Ermüdungsnachweis für die Detailausführung über der Mittelstütze

Querschnittswerte:

$$\begin{aligned}
 I_{yy} &= \frac{15 \cdot 800^3}{12} + 2 \cdot \left(\frac{300 \cdot 20^3}{12} + \frac{400 \cdot 20^3}{12} \right) + 2 \cdot (400 \cdot 20 \cdot 410^2 + 300 \cdot 20 \cdot 430^2) \\
 &= 5.549.333.333 \text{ mm}^4 \\
 &= 554.933 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

Statische Momente (gegeben, Berechnung informativ):

Schnitt 1-1: der abgeschnittene Querschnitt ist die Obergurtlamelle

$$S_{y,1-1} = A_L \cdot z = (300 \cdot 20) \cdot 430 = 2.580.000 \text{ mm}^3 = 2.580 \text{ cm}^3$$

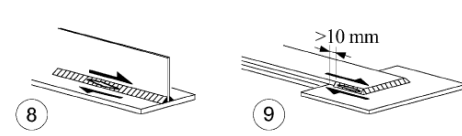
Schnitt 2-2: der abgeschnittene Querschnitt setzt sich aus Obergurtlamelle und Obergurt zusammen

$$S_{y,2-2} = S_{y,1-1} + A_C \cdot z = 2.580.000 + (400 \cdot 20) \cdot 410 = 5.860.000 \text{ mm}^3 = 5.860 \text{ cm}^3$$

Lastspielzahl:

$$n_{vorh} = 100 \cdot 340 \cdot 15 = 510.000$$

**Ermüdungsnachweis Kerbdetail 1: Schweißnaht Flansch-Lamelle
(Schubspannungen)**

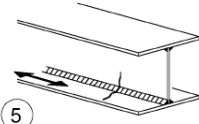
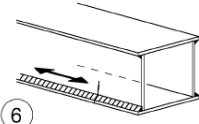
80 m=5		8) Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern. 9) Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.	8) $\Delta \tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen. 9) $\Delta \tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.
-----------	---	---	---

Kerbfall 80

$$\Delta \tau_c = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta \tau_L = \Delta \tau_c \cdot \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_L}} = 80 \cdot \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} = 36,6 \text{ N/mm}^2$$

Ermüdungsnachweis Kerbdetail 2: Schweißnaht Steg-Flansch (Längsspannungen)

100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) Von Hand oder mit Automaten 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 anzuschraffen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
-----	---	---	--

Kerbfall 100

$$\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$$

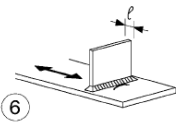
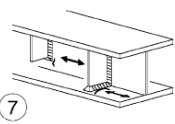
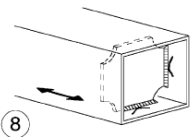
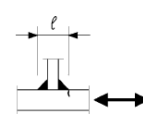
$$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_c \cdot \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} = 100 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} = 73,7 \text{ N/mm}^2$$

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

Ermüdungsnachweis Kerbdetail 3: Schweißnaht Steg-Flansch (Schubspannungen)

Analog zu Kerbdetail 1

Ermüdungsnachweis Kerbdetail 4: Eingeschweißte Bleche

80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$	 	Querstreifen: 6) Querstreifen auf Blechen 7) Vertikalstreifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.	Kerbfälle 6) und 7): Die Schweißnähtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.
71	$50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$	 	8) Am Steg oder Flansch angeschweißte Querschotte in Kastenträgern. Nicht für Hohlprofile. Die Kerbfälle gelten auch für Ringstreifen.	7) Wenn die Steife, Fall 7) links, im Stegblech abschließt, wird $\Delta\sigma$ mit den Hauptspannungen berechnet.

$$l = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a + t_{\text{Steife}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12 + 15 = 49 \text{ mm}$$

Kerbfall 80

$$\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$$

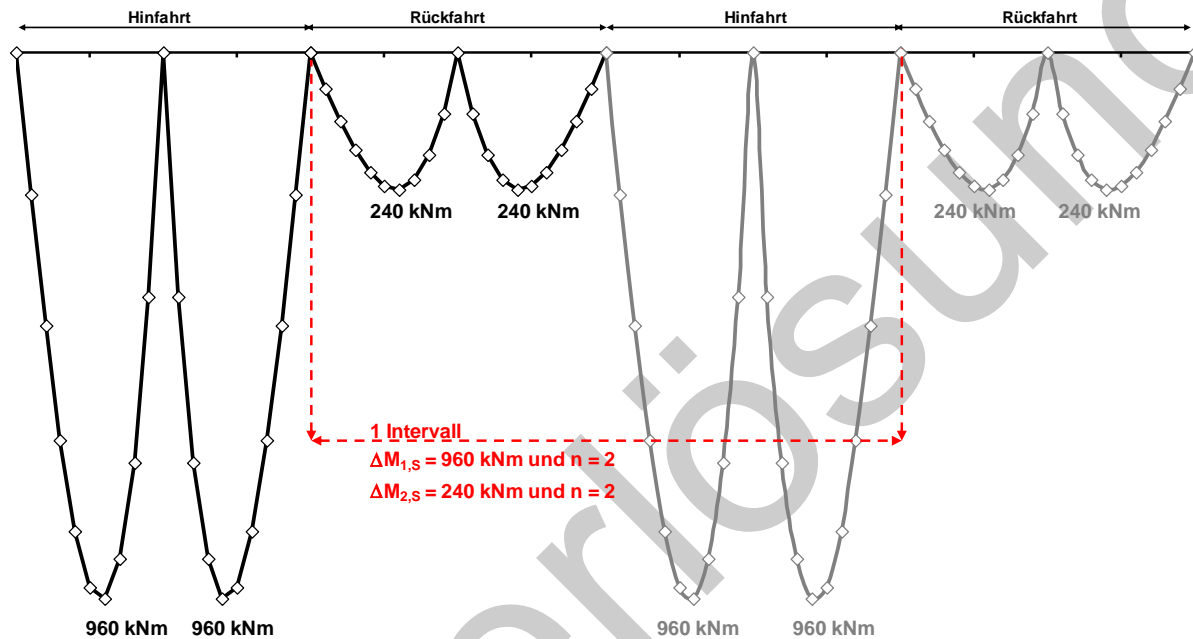
$$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_c \cdot \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} = 80 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} = 58,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_L = \Delta\sigma_D \cdot \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} = 58,9 \cdot \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} = 32,4 \text{ N/mm}^2$$

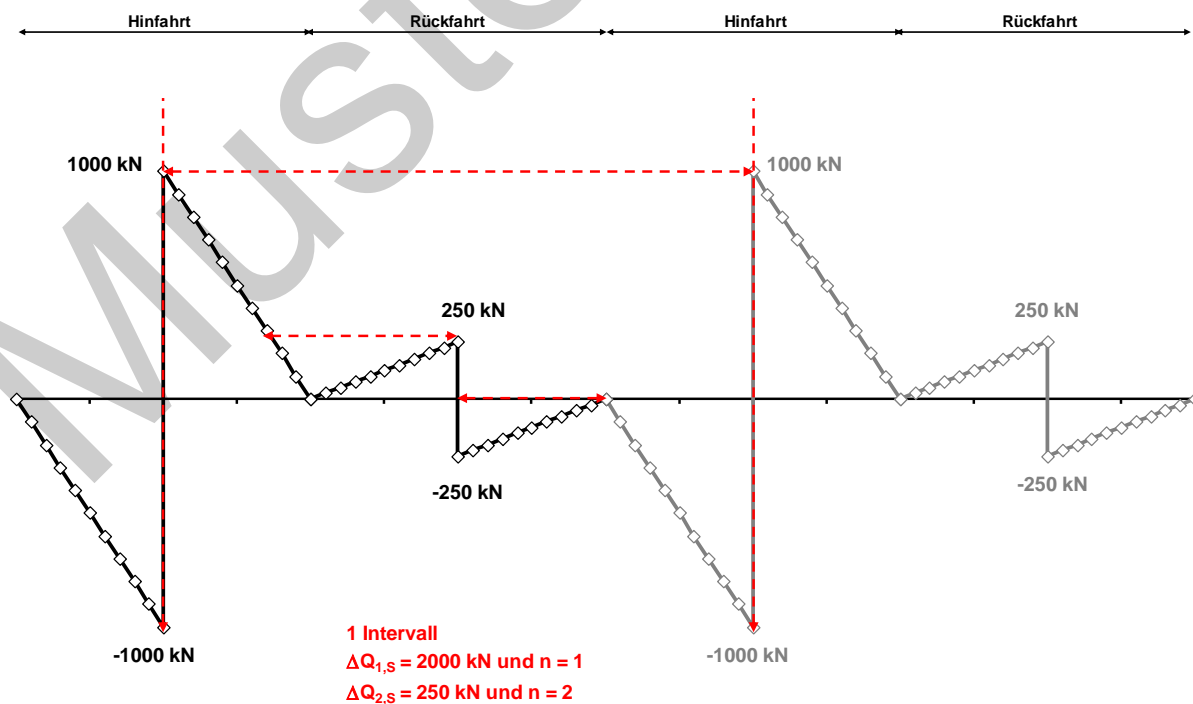
Ermittlung der Spannungsschwingspiele am Punkt B (Mittelstütze)

Die Spannungskollektive (Normalspannungen und Schubspannungen) werden mit Hilfe der Reservoir-Methode ermittelt. Hierzu werden zunächst die Momentenschwingbreiten sowie die Querkraftschwingbreiten bestimmt:

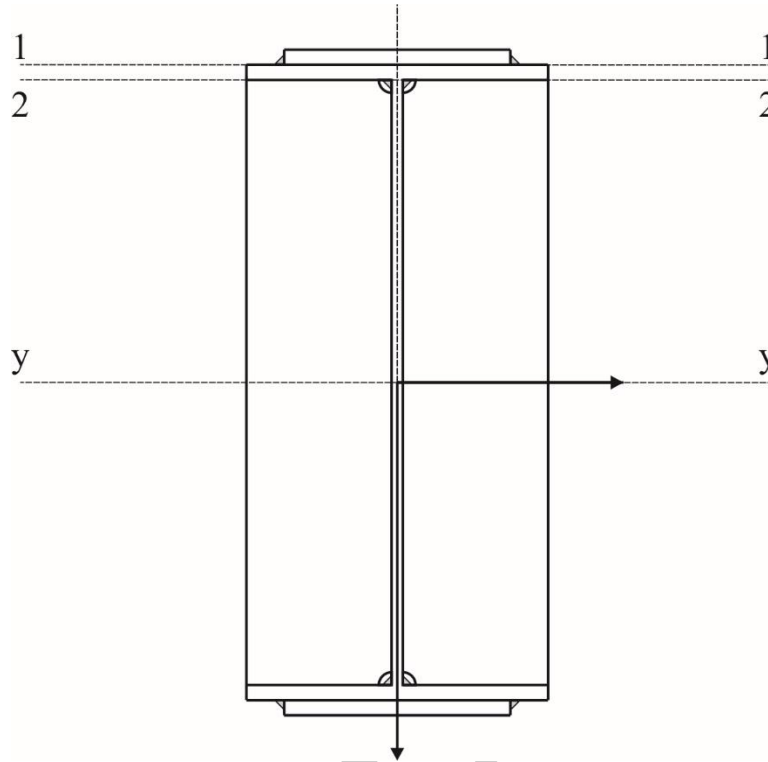
Momentenschwingbreiten:



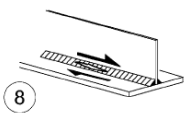
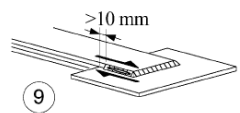
Querkraftschwingbreiten:



Ermittlung der Spannungen:



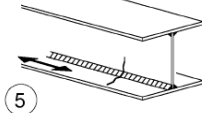
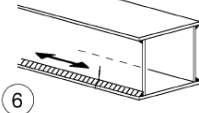
Schnitt 1-1 (Anschluss Flansch-Lamelle, Schubspannungen) (Kerbdetail 1):

80 III=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) $\Delta \tau$ 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>
-------------	---	--	---

$$\Delta \tau_{1-1,1} = \frac{\Delta Q_{1,S} \cdot S_{y,1-1}}{I_y \cdot a} = \frac{2000 \cdot 10^3 \cdot 2.580.000}{5.549.333.333 \cdot (2 \cdot 10)} = 45,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta \tau_{1-1,2} = \frac{\Delta Q_{1,S} \cdot S_{y,1-1}}{I_y \cdot a} = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 2.580.000}{5.549.333.333 \cdot (2 \cdot 10)} = 5,8 \text{ N/mm}^2$$

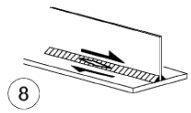
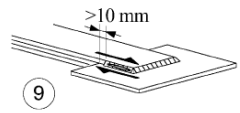
Schnitt 2-2 (Anschluss Steg-Flansch, Normalspannungen) (Kerbdetail 2):

100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) Von Hand oder mit Automaten 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 anzuschärfen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
-----	---	---	---

$$\Delta\sigma_{2-2,1} = \frac{\Delta M_{1,S}}{W_{2-2}} = \frac{\Delta M_{1,S}}{I_y} \cdot z_{2-2} = \frac{960 \cdot 10^6}{5.549.333.333} \cdot 400 = 69,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{2-2,2} = \frac{\Delta M_{2,S}}{W_{2-2}} = \frac{\Delta M_{2,S}}{I_y} \cdot z_{2-2} = \frac{240 \cdot 10^6}{5.549.333.333} \cdot 400 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

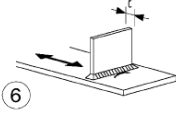
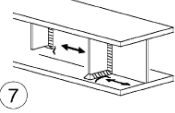
Schnitt 2-2 (Anschluss Steg-Flansch, Schubspannungen) (Kerbdetail 3):

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 $\geq 10 \text{ mm}$ vom Blechende entfernt sein.
-------------	---	---	---

$$\Delta\tau_{1-1,1} = \frac{\Delta Q_{1,S} \cdot S_{y,1-1}}{I_y \cdot a} = \frac{2000 \cdot 10^3 \cdot 5.860.000}{5.549.333.333 \cdot (2 \cdot 10)} = 88,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\tau_{1-1,2} = \frac{\Delta Q_{1,S} \cdot S_{y,1-1}}{I_y \cdot a} = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 5.860.000}{5.549.333.333 \cdot (2 \cdot 10)} = 11,0 \text{ N/mm}^2$$

**Schnitt 2-2 (Anschluss Steife, Normalspannungen) (Kerbdetail 4)
(identisch mit Steg-Flansch):**

80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$	 	Quersteifen: 6) Quersteifen auf Blechen 7) Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.	Kerbfälle 6) und 7): Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.
----	---------------------------	---	--	---

$$\Delta\sigma_{2-2,1} = \frac{\Delta M_{1,S}}{W_{2-2}} = \frac{\Delta M_{1,S}}{I_y} \cdot z_{2-2} = \frac{960 \cdot 10^6}{5.549.333.333} \cdot 400 = 69,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{2-2,2} = \frac{\Delta M_{2,S}}{W_{2-2}} = \frac{\Delta M_{2,S}}{I_y} \cdot z_{2-2} = \frac{240 \cdot 10^6}{5.549.333.333} \cdot 400 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

Zusammenfassung Spannungsschwingbreiten Stütze

Stütze	n_i	$\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$	$\Delta\sigma_i, \Delta\tau_i$ [N/mm ²]	m	
Schnitt 1-1	1	80	$\Delta\tau_{1-1,1} = 45,5 \geq \Delta\tau_L = 36,6$	5	Anschluss Flansdh- Lamelle
	2	80	$\Delta\tau_{1-1,2} = 5,8 \leq \Delta\tau_L = 36,6$	-	
Schnitt 2-2	2	100	$\Delta\sigma_{2-2,1} = 69,2 \leq \Delta\sigma_D = 37,7$	5	Anschluss Steg-Flansch
	2	100	$\Delta\sigma_{2-2,2} = 17,3 \leq \Delta\sigma_L = 40,5$	-	
	1	80	$\Delta\tau_{2-2,1} = 88,0 \geq \Delta\tau_L = 36,6$	5	
	2	80	$\Delta\tau_{2-2,2} = 11,0 \leq \Delta\tau_L = 36,6$	-	
Schnitt 2-2	2	80	$\Delta\sigma_{2-2,1} = 69,2 \geq \Delta\sigma_D = 58,9$	3	Steife
	2	80	$\Delta\sigma_{2-2,2} = 17,3 \leq \Delta\sigma_L = 32,4$	-	

Ermittlung der zulässigen Lastspiele:

Schnitt 1-1, Flansch-Lamelle (Kerbdetail 1):

$$N_{1-1}(\Delta\tau_c = 80) = N_L \cdot \left(\frac{\Delta\tau_L}{\Delta\tau_i}\right)^5 = 1 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{36,6}{45,5}\right)^5 = 33.678.167 \text{ LW}$$

Schnitt 2-2, Steg-Flansch (Kerbdetail 2 + Kerbdetail 3):

$$N_{2-2}(\Delta\sigma_c = 100) = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i}\right)^m = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{73,7}{69,2}\right)^5 = 6.851.363 \text{ LW}$$

$$N_{2-2}(\Delta\tau_c = 80) = N_L \cdot \left(\frac{\Delta\tau_L}{\Delta\tau_i}\right)^5 = 1 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{36,6}{88,0}\right)^5 = 1.244.492 \text{ LW}$$

Schnitt 2-2, Steife (Kerbdetail 4):

$$N_{2-2}(\Delta\sigma_c = 80) = N_D \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_i}\right)^m = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{58,9}{69,2}\right)^3 = 3.083.171 \text{ LW}$$

Ermüdungsnachweise:

Schnitt 1-1, Flansch-Lamelle (Kerbdetail 1):

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{\sigma} + \sum_j \left(\frac{n_j}{N_j} \right)_{\tau} = 0 + \frac{1 \cdot 510.000}{33.678.167} = 0,02 \leq 1,0$$

Schnitt 2-2, Steg-Flansch (Kerbdetail 2+3):

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{\sigma} + \sum_j \left(\frac{n_j}{N_j} \right)_{\tau} = \frac{2 \cdot 510.000}{6.851.363} + \frac{1 \cdot 510.000}{1.244.492} = 0,56 \leq 1,0$$

Schnitt 2-2, Steife (Kerbdetail 4):

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{\sigma} = \frac{2 \cdot 510.000}{3.083.171} = 0,33 \leq 1,0$$

maßgebend ist der Ermüdungsnachweis in Schnitt 2-2: Steg-Flansch (Kerbdetail 2+3)

b) Ermittlung der Restlebensdauer

$$D = \left(\frac{2 \cdot 510.000 + 2 \cdot n_{Rest}}{6.851.363} \right)_{\sigma} + \left(\frac{510.000 + n_{Rest}}{1.244.492} \right)_{\tau} = 1,0$$

$$n_{Rest} = 402.864 LW$$

Restnutzungsdauer:

$$\frac{402.864 LW}{100 \frac{LW}{d} \cdot 340 \frac{d}{a}} = 11,85 \text{ Jahre}$$

alternativ:bisherige Nutzungsdauer: 15 Jahre, Schadenssumme $D = 0,56$

Gesamtnutzungsdauer:

$$\frac{15}{0,56} = 26,85 \text{ Jahre}$$

Restnutzungsdauer:

$$26,85 \text{ Jahre} - 15 \text{ Jahre} = 11,85 \text{ Jahre}$$