

Prüfung SoSe 2024 Stahlbau II - Musterlösung

Prüfungszeit 90 Minuten

Prof. Dr.-Ing. habil. Marcus Rutner

Institut für Metall- und Verbundbau

Hamburg, den 21. August 2024

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Berechnungsnorm: **DIN EN 1993**

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punktzahl
1)	45	45
2)	45	45
Summe	90	90
		Note: -

Bearbeitungshinweise:

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

Aufgabe 1 (45 Punkte)

- a) **Hinweis:** Hierfür können Rahmentabellen genutzt werden, z.B. Schneider Bautabellen.

Lastfall 1: M_{Ed} unter q

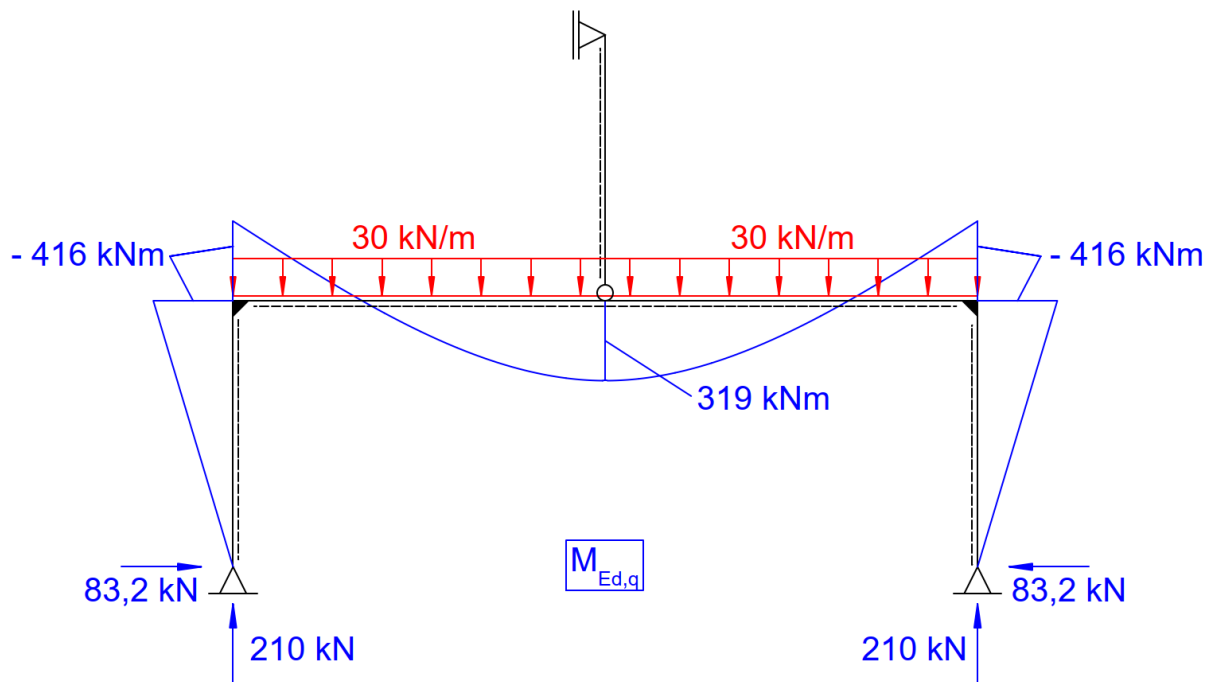
$$A = B = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 14 \text{ m}}{2} = 210 \text{ kN}$$

$$k = \frac{I_R}{I_S} \cdot \frac{h}{l} = \frac{43190 \text{ cm}^4}{57680 \text{ cm}^4} \cdot \frac{5 \text{ m}}{14 \text{ m}} = 0,267$$

$$H_A = -H_B = \frac{ql^2}{4h(2k+3)} = \frac{30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 14^2 \text{ m}}{4 \cdot 5 \text{ m} (2 \cdot 0,267 + 3)} = 83,2 \text{ kN}$$

$$M_{Ed}^I = 5 \text{ m} \cdot 83,2 \text{ kN} = 416 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}^I = \frac{ql^2}{8} = \frac{30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 14^2 \text{ m}}{8} = 735 \text{ kNm} \rightarrow 735 \text{ kNm} - 416 \text{ kNm} = 319 \text{ kNm}$$



Lastfall 2: M_{Ed} unter F

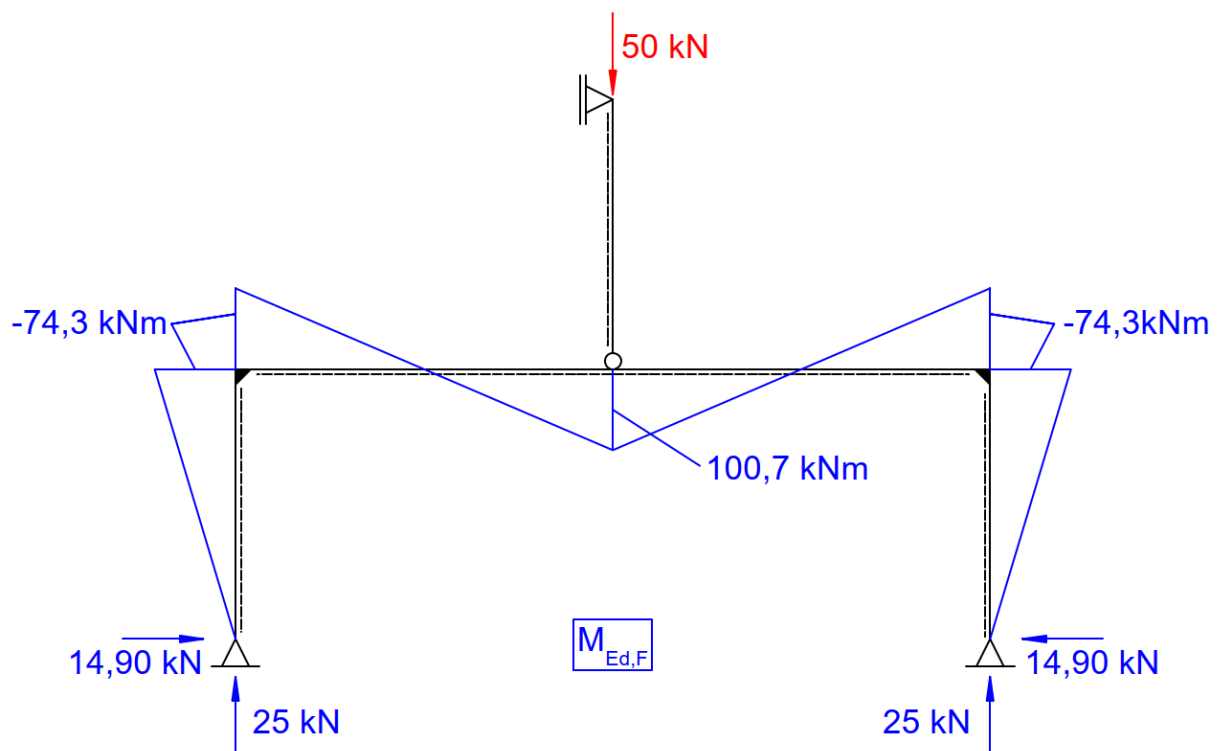
$$A = B = \frac{F}{2} = \frac{50 \text{ kN}}{2} = 25 \text{ kN}$$

$$k = \frac{I_R}{I_S} * \frac{h}{l} = \frac{43190 \text{ cm}^4}{57680 \text{ cm}^4} * \frac{5 \text{ m}}{14 \text{ m}} = 0,267$$

$$H_A = -H_B = \frac{3}{2} * \frac{F_{ab}}{hl(2k+3)} = \frac{3}{2} * \frac{50 \text{ kN} * 7 \text{ m} * 7 \text{ m}}{5 \text{ m} * 14 \text{ m} (2 * 0,267 + 3)} = 14,85 \text{ kN}$$

$$M_{Ed, \text{Eckmoment}}^I = 5 \text{ m} * 14,85 \text{ kN} = 74,3 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed, \text{Feldmitte}}^I = \frac{Fl}{4} = \frac{50 \text{ kN} * 14 \text{ m}}{4} = 175 \text{ kNm}$$



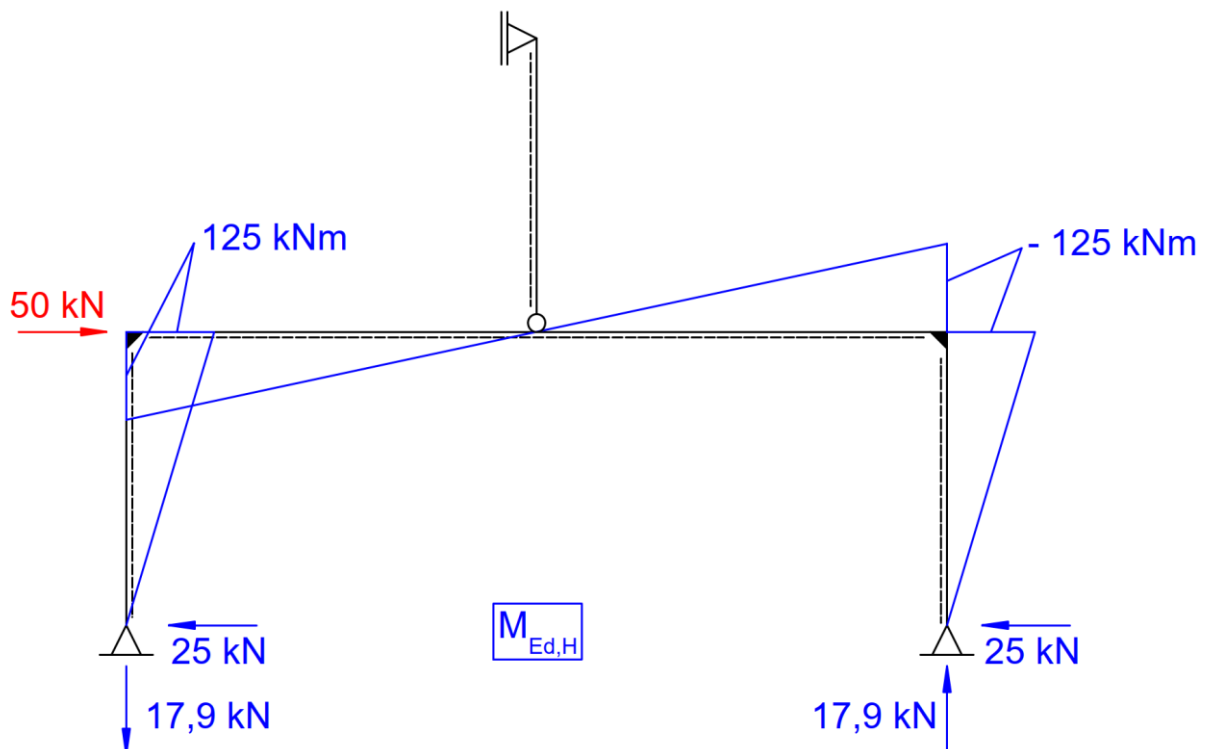
Lastfall 3: M_{Ed} unter H

$$-A = B = \frac{H * 5m}{14 m} = \frac{50 \text{ kN} * 5m}{14 m} = 17,9 \text{ kN}$$

$$H_A = H_B = \frac{F}{2} = \frac{50 \text{ kN}}{2} = 25 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,Eckmoment}^I = 5 m * 25 \text{ kN} = 125 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,Feldmitte}^I = 0 \text{ kNm}$$



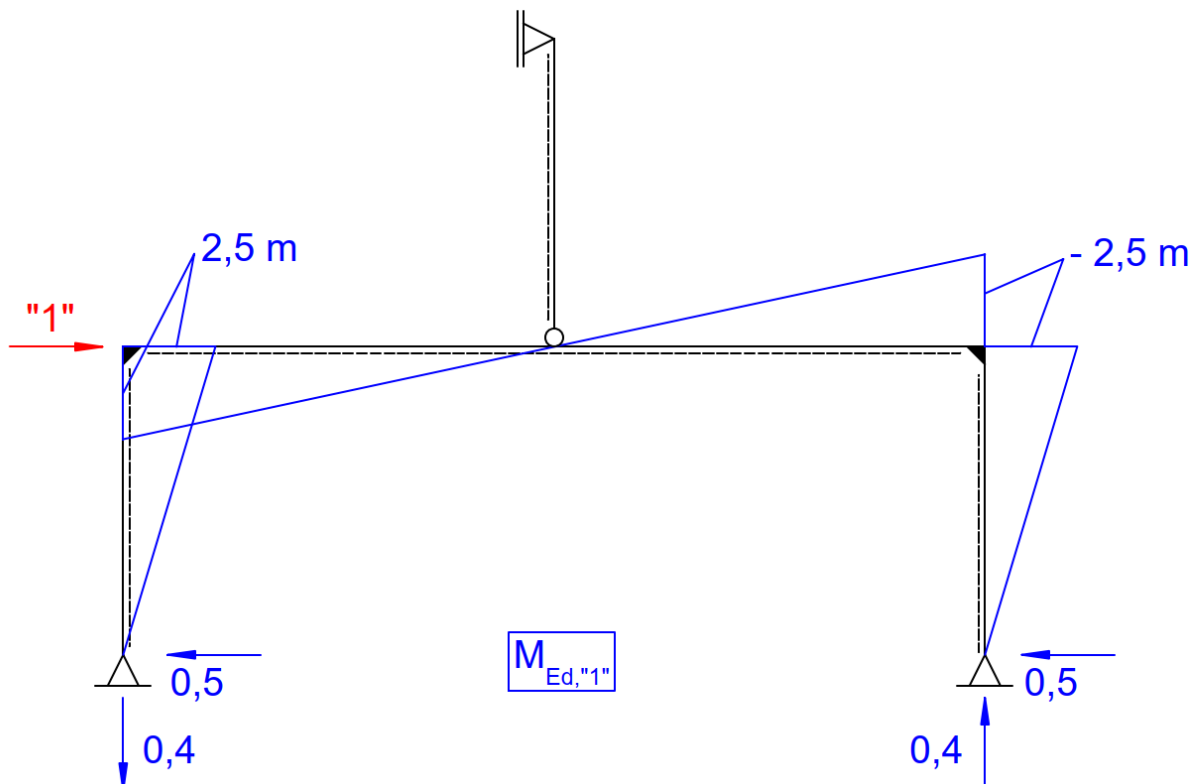
Lastfall 4: M_{Ed} unter „1“

$$-A = B = \frac{1 * 5m}{14 m} = \frac{1 * 5m}{14 m} = 0,4$$

$$H_A = H_B = \frac{F}{2} = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$M_{Ed,Eckmoment}^I = 5 m * 0,5 = 2,5 m$$

$$M_{Ed,Feldmitte}^I = 0 \text{ kNm}$$



Für die Ermittlung der horizontalen Auslenkung wird die Normalkraft in den Stützen benötigt.

$$A = 210 + 25 - 17,9 = 217,1 \text{ kN}$$

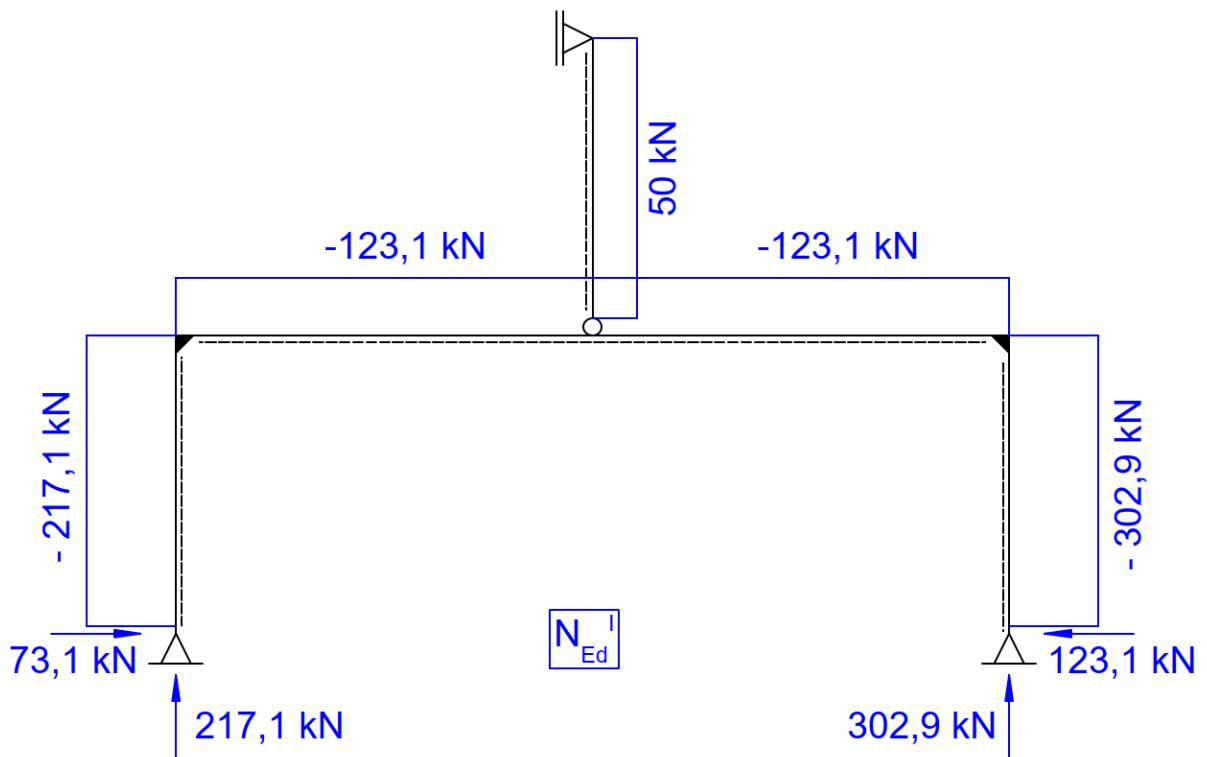
$$B = 210 + 25 + 17,9 + 50 \text{ kN} = 302,9 \text{ kN}$$

$$H_A = 83,2 + 14,9 - 25 = 73,1 \text{ kN}$$

$$H_B = 83,2 + 14,9 + 25 = 123,1 \text{ kN}$$

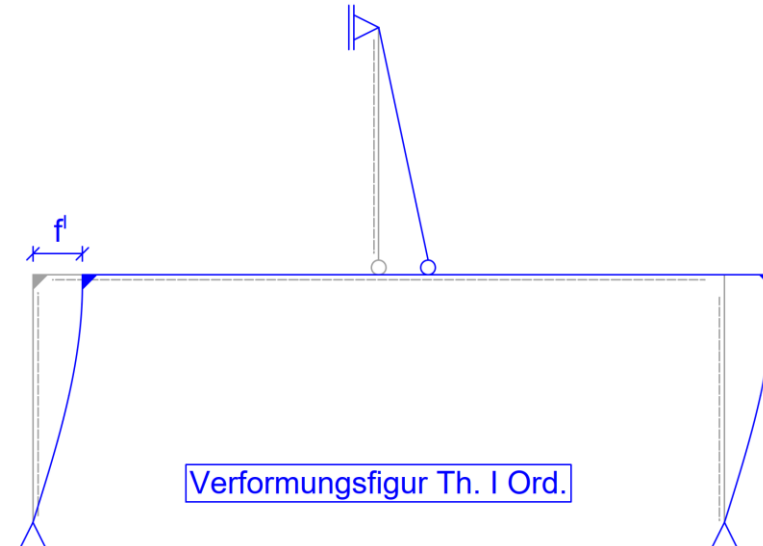
$$N_{\text{Ed,Riegel}} = 73,1 + 50 \text{ kN} = 123,1 \text{ kN}$$

Die Normalkraft in den einzelnen Stützen ist aus den Auflagergrößen ableitbar.



Horizontale Auslenkung Δf nach Theorie I. Ordnung:

$$\Delta H = 217,1 \text{ kN} * \frac{f^I}{5\text{m}} + 302,9 \text{ kN} * \frac{f^I}{5\text{m}} + 50 \text{ kN} * \frac{f^I}{5\text{m}} = 114 * f^I$$



Horizontale Auslenkung Δf wird durch die Überlagerung der Momentverläufe aus der H-Last und der „1“ virtuellen Last ermittelt.

Hinweis: Die Überlagerung eines symmetrischen Verlaufes mit einem antimetrischen Verlaufe ergibt Null!

$$EI_{\text{Riegel,HEB360}} = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 43190 \text{ cm}^4 * 10^{-4} = 90699 \text{ kNm}^2$$

$$EI_{\text{Stütze,HEB400}} = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 57680 \text{ cm}^4 * 10^{-4} = 121128 \text{ kNm}^2$$

$$f^I = \frac{1}{EI_S} * \frac{1}{3} * 125 \text{ kNm} * 2,5 * 5 \text{ m} + \frac{1}{EI_S} * \frac{1}{3} * -125 \text{ kNm} * -2,5 * 5 \text{ m} +$$

$$\frac{1}{EI_R} * \frac{1}{3} * 125 \text{ kNm} * 2,5 * 14 \text{ m} = 0,0247 \text{ m}$$

$$\Delta H = 114 * f^I = 114 * 0,0247 \text{ m} = 2,83 \text{ kN} \approx 3 \text{ kN}$$

Mit dem Verhältnis von ΔH zu H kann der Vergrößerungsfaktor ermittelt werden.

$$\alpha = \frac{1}{1 - q} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta H}{H}} = \frac{1}{1 - \frac{2,83 \text{ kN}}{50 \text{ kN}}} = 1,06 \text{ (ca. +6\%)}$$

Lastfall 5: M_{Ed} unter H (Th. II.Ord)

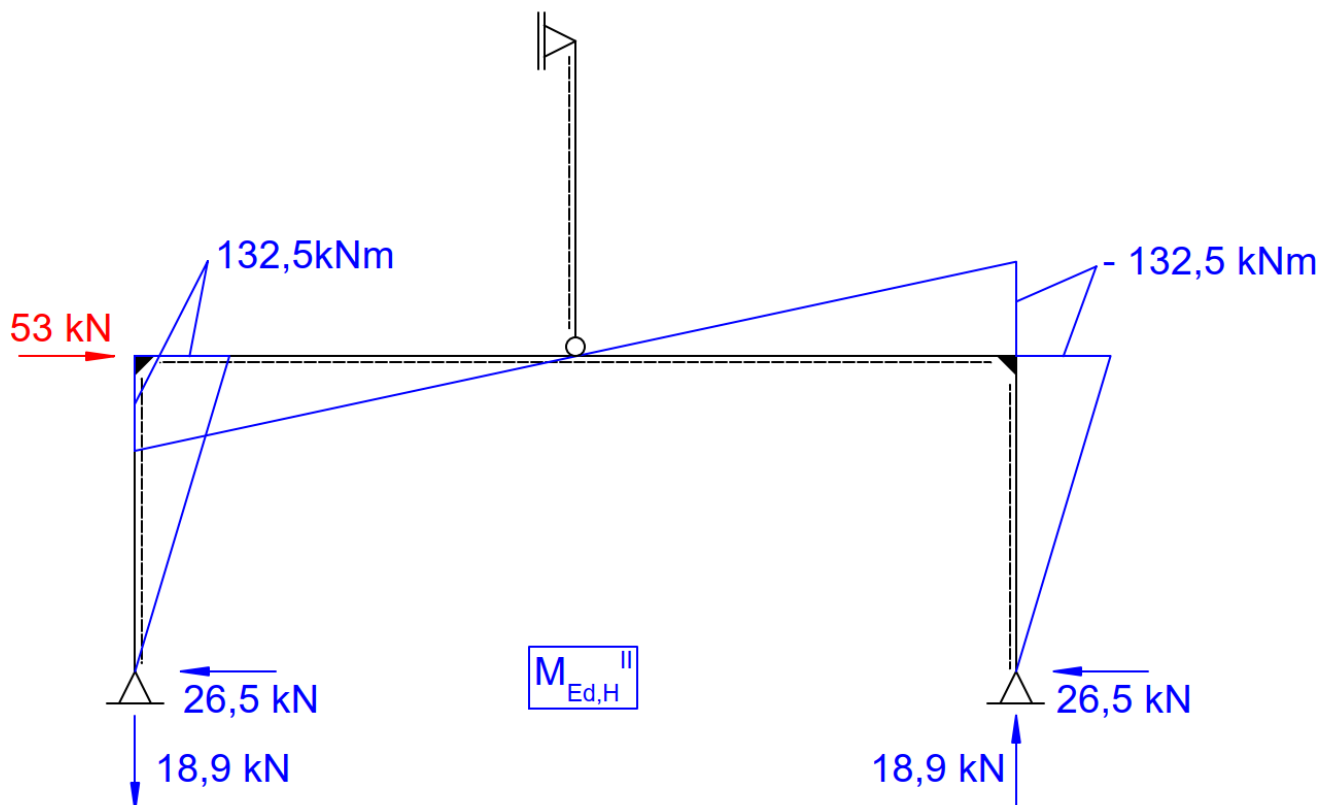
$$-A = B = \frac{H * 5m}{14 m} = \frac{53 \text{ kN} * 5m}{14 m} = 18,9 \text{ kN}$$

$$H_A = H_B = \frac{F}{2} = \frac{53 \text{ kN}}{2} = 26,5 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,Eckmoment}^{\text{II}} = 5 \text{ m} * 26,5 \text{ kN} = 132,5 \text{ kNm}$$

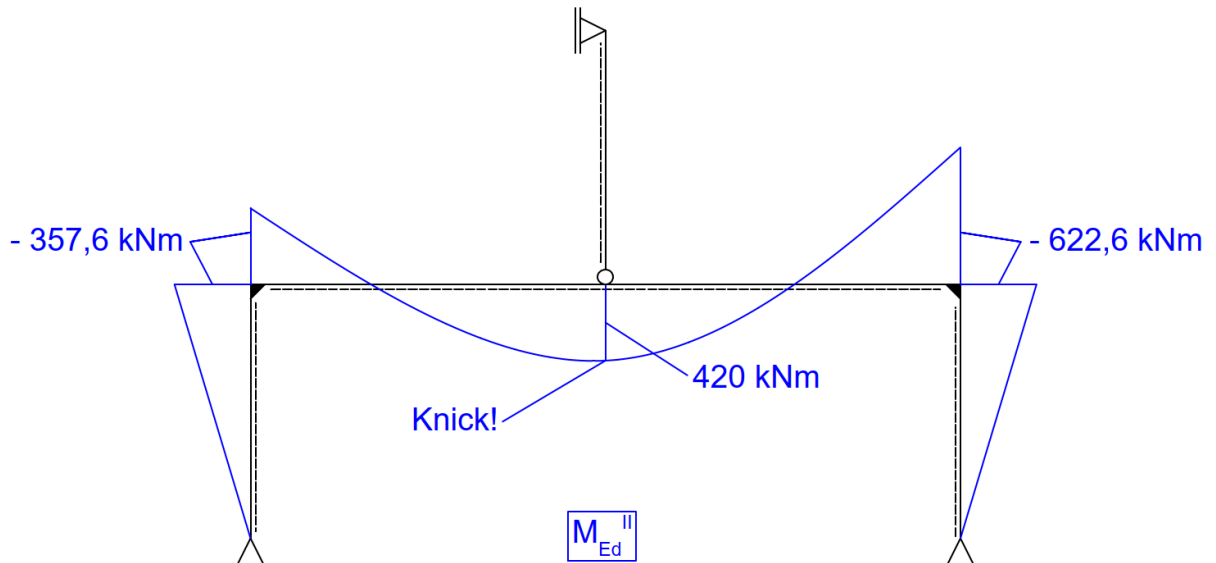
$$M_{Ed,Feldmitte}^{\text{II}} = 0 \text{ kNm}$$

Hinweis: Die Schnittgrößen können auch durch Multiplikation des M-Verlaufs aus der H-Last nach Th. I.Ord. mit dem Vergrößerungsfaktor berechnet werden.



Durch Addition der Momentenverläufe Lastfall 1 + Lastfall 2 + Lastfall 5 ergeben sich die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung.

M_{Ed} unter nach Th. II.Ord



b) Die maßgebende Stelle ist in der rechten Rahmenecke im Anschnitt des Riegels (HEB 360).

$$M_{Ed}^{II} = 622,6 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed}^I = 123,1 \text{ kN}$$

$$Q_{Ed}^I = 302,9 - 50 = 252,9 \text{ kN}$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{N_{Ed}^I}{A} + \frac{M_{Ed}^{II}}{W_{y,el}} = \frac{123,1 \text{ kN}}{181 \text{ cm}^2} + \frac{622,6 \text{ kNm}}{2400 \text{ cm}^3} = 26,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < f_y = 35,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{Ed} = 1,5 * \frac{Q_{Ed}^I}{A_v} = 1,5 * \frac{252,9 \text{ kN}}{60,6 \text{ cm}^2} = 6,3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 20,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Keine Interaktion notwendig!

Aufgabe 2 (45 Punkte)

Für die unten dargestellte Stützen-Riegel-Verbindung sind die nachfolgenden Punkte zu bearbeiten.

- a) Führen Sie alle erforderlichen Nachweise der Schraubenverbindung.

$$z = h - 2 * \frac{1}{2} * t_f = 39 \text{ cm} - 2 * \frac{1}{2} * 1,9 \text{ cm} = \mathbf{37,1 \text{ cm}}$$

$$N_{\text{Flansch,oben}} = \frac{N_{\text{Ed}}}{2} + \frac{M_{\text{Ed}}}{z} = \frac{100 \text{ kN}}{2} + \frac{190 \text{ kNm}}{0,371 \text{ m}} = \mathbf{563 \text{ kN}}$$

Zugbeanspruchung der Schrauben (M24 10.9):

$$F_{\text{t,Ed}} = \frac{563 \text{ kN}}{4 \text{ Schrauben}} = \mathbf{141 \text{ kN je Schraube}} \leq \mathbf{254,2 \text{ kN}} = F_{\text{t,Rd}}$$

Grenzdurchstanzkraft der Platte (t = 15 cm):

$$B_{\text{p,Rd}} = 205,1 \text{ kN} * 1,5 = \mathbf{307 \text{ kN}} \geq \mathbf{141 \text{ kN}} = F_{\text{t,Ed}}$$

- b) Führen Sie alle erforderlichen Nachweise der Schweißverbindung.

Annahme : $l_w = b + b - t_w - 2 * r = 30 + 30 - 1,1 - 2 * 2,7 = \mathbf{53 \text{ cm}}$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{\text{Ed}}}{\sqrt{2} * a_w * l_w} = \frac{563 \text{ kN}}{\sqrt{2} * 0,5 \text{ cm} * 53 \text{ cm}} = \mathbf{15 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

$$\sigma_{\text{w,Ed}} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * \tau_{\perp}^2} = \sqrt{15^2 + 3 * 15^2} = \mathbf{30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

$$\sigma_{\text{w,Rd}} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,8 * 1,25} = \mathbf{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \geq \sigma_{\text{w,Ed}} = \mathbf{30 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

$$\sigma_{\perp} = \mathbf{15 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \leq \frac{0,9 * f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 * 36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} = \mathbf{25,9 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

- c) Bestimmen Sie die erforderlichen Schweißnahtdicken 1 - 3 der Rippe und überprüfen Sie die konstruktiven Bedingungen hinsichtlich Schweißnahtdicke und Schweißnahtlänge.

Nachweise für die Schweißnähte 1 und 3:

Annahme : gew. $l_w = 2 * 10 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$ (Doppelkehlnaht)

$$F_{t,Ed\perp} = \frac{563 \text{ kN}}{2 \text{ Rippen}} = \mathbf{282 \text{ kN je Rippe}}$$

$$\sigma_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{0,8 * 1,25} = \mathbf{36 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed}}{\sqrt{2} * a_w * l_w} = \frac{282 \text{ kN}}{\sqrt{2} * a_w * 20 \text{ cm}} = \frac{\mathbf{10 \text{ kN}}}{a_w \text{ cm}}$$

$$\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * \tau_{\perp}^2} = \sigma_{w,Rd} \rightarrow a_w \geq \mathbf{0,6 \text{ cm}}$$

$$a_{w,min} = \sqrt{t_{max}} - 0,5 = \sqrt{26 \text{ mm}} - 0,5 = \mathbf{4 \text{ mm}} \leq \text{gew. } a_w = \mathbf{6 \text{ mm}}$$

$$\text{gew. } l_w = \mathbf{20 \text{ cm}} \leq l_{w,max} = 150 * a_w = 150 * 0,6 \text{ cm} = \mathbf{90 \text{ cm}}$$

Nachweise für die Schweißnaht 2:

Aufgrund der symmetrischen Belastung ist die Schweißnaht 2 spannungsfrei und wird konstruktiv wie die Schweißnähte 1 und 3 ausgeführt. Lediglich die Schweißnahtlänge wird auf 31 cm angepasst.

- d) Wählen Sie eine Rippendicken, sodass die maximal zulässigen Spannungen eingehalten sind.

$$\sigma_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{A} = \frac{282 \text{ kN}}{10 \text{ cm} * t} = \sigma_{Rd} = f_y = \mathbf{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} \rightarrow t_{min} = \mathbf{1,2 \text{ cm}}$$

$$\text{gew. } t_{Rippe} = \mathbf{2,0 \text{ cm}}$$

e) Führen Sie den Nachweis des T-Stummels und treffen Sie eine Aussage zur lokalen Tragfähigkeit dieser Verbindung. Wählen Sie hier den Ansatz mit Abstützkräfte.

- Modus 1: (vier Fließlinien in der Platte, kein Schraubenfließen)

$$m = h_1 - 0,8 * a_w * \sqrt{2} = 45 - 0,8 * 5 * \sqrt{2} = \mathbf{39 \text{ mm}}$$

$$M_{pl,Rd} = 0,25 * b_p * t_p^2 * f_y = 0,25 * 30 * 1,5^2 * 23,5 = \mathbf{396 \text{ kNcm}}$$

$$F_{T1,Rd} = 4 * \frac{M_{pl,Rd}}{m} = 4 * \frac{396 \text{ kNcm}}{3,9 \text{ cm}} = \mathbf{406 \text{ kN}}$$

- Modus 2: (zwei Fließlinien in der Platte)

$$n = 48 \text{ mm} \leq 1,25 * m = 1,25 * 39 = \mathbf{4,8 \text{ mm}}$$

$$F_{t,Rd} \text{ (M24 10.9)} = 254 \text{ kN}$$

$$F_{T2,Rd} = \frac{4 * F_{t,Rd} * n + 2 * M_{pl,Rd}}{m + n} = \frac{4 * 254 * 4,8 + 2 * 396}{3,9 + 4,8} = \mathbf{651 \text{ kN}}$$

- Modus 3: (reines Schraubenfließen)

$$F_{T3,Rd} = 4 * F_{t,Rd} = 4 * 254 \text{ kN} = \mathbf{1016 \text{ kN}}$$

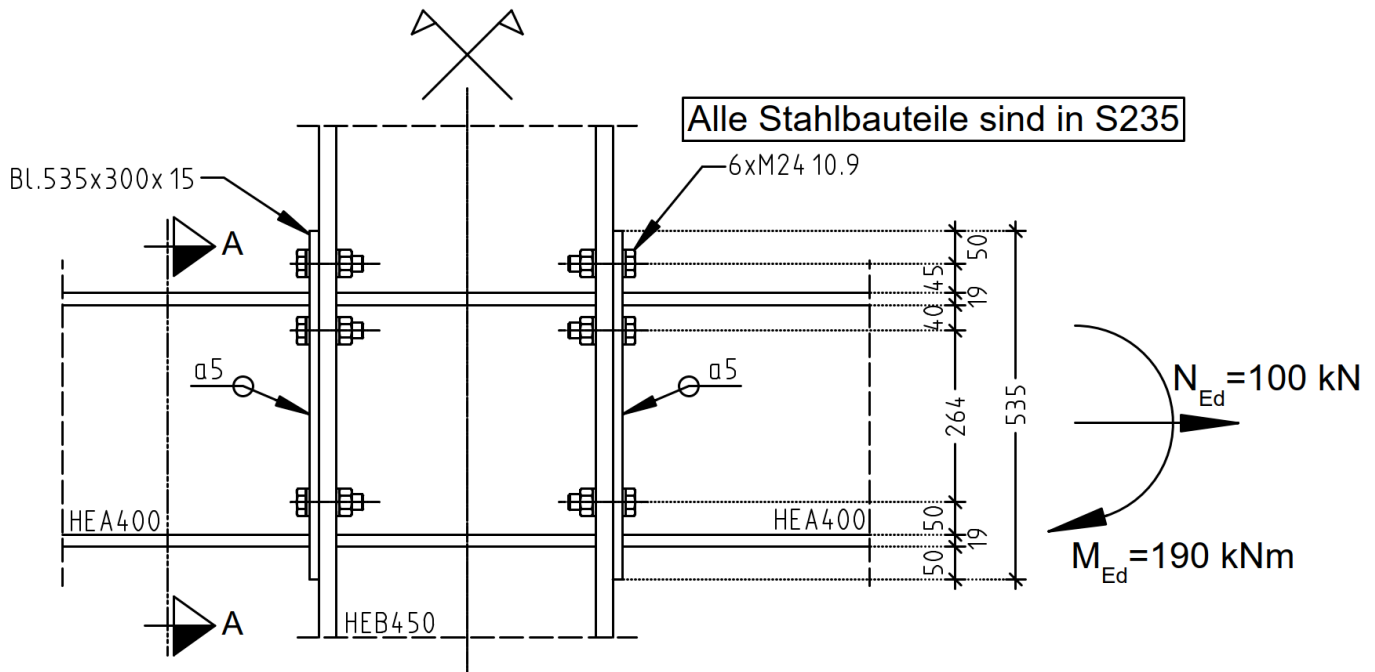
Die Zuglast im Oberflansch des Riegels von 563 kN kann durch den Anschluss nicht übertragen werden. Die Standsicherheit ist nicht gegeben!

f) Die Stahlbaufirma sieht den Anschluss im Bereich des T-Stummels als kritisch und verweigert die Ausführung. Die Firma schlägt eine Verstärkung mit einem Futterblech (siehe Zeichnung) vor. Ist der vorgeschlagene Lösungsansatz zweckführend? Begründen Sie Ihre Beurteilung. Hier ist keine Berechnung notwendig.

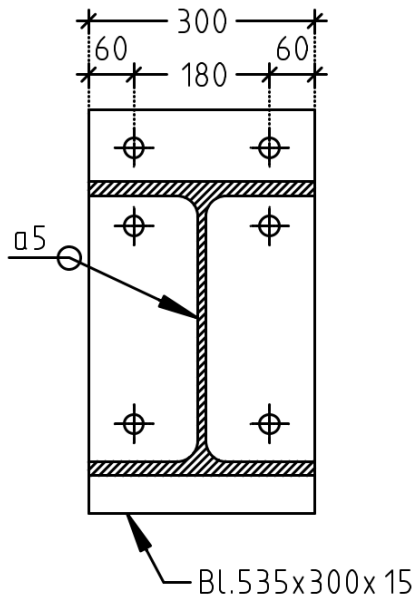
Antwort: Der Lösungsvorschlag ist keineswegs zielführend. Die Anordnung des Futterblechs gemäß Vorschlag des Stahlbauers trägt keinen Beitrag zum Lastabtrag des T-Stummels bei. Die Versagensmodi werden in ihrer Verformung nicht verhindert.

Ein möglicher Ansatz wäre die Verstärkung mittels Futterbleche unmittelbar unter den Schraubenköpfen. Die so entstehende plastische Gelenke können den Widerständen zugerechnet werden.

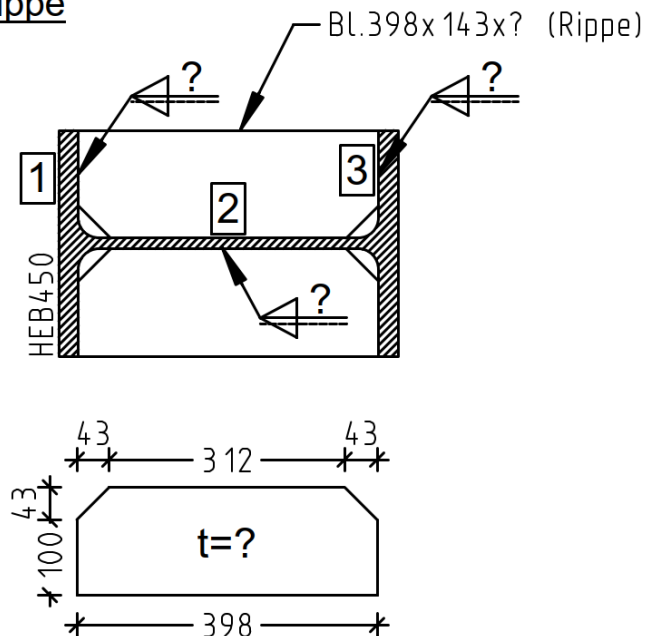
Stützen-Riegel-Verbindung:



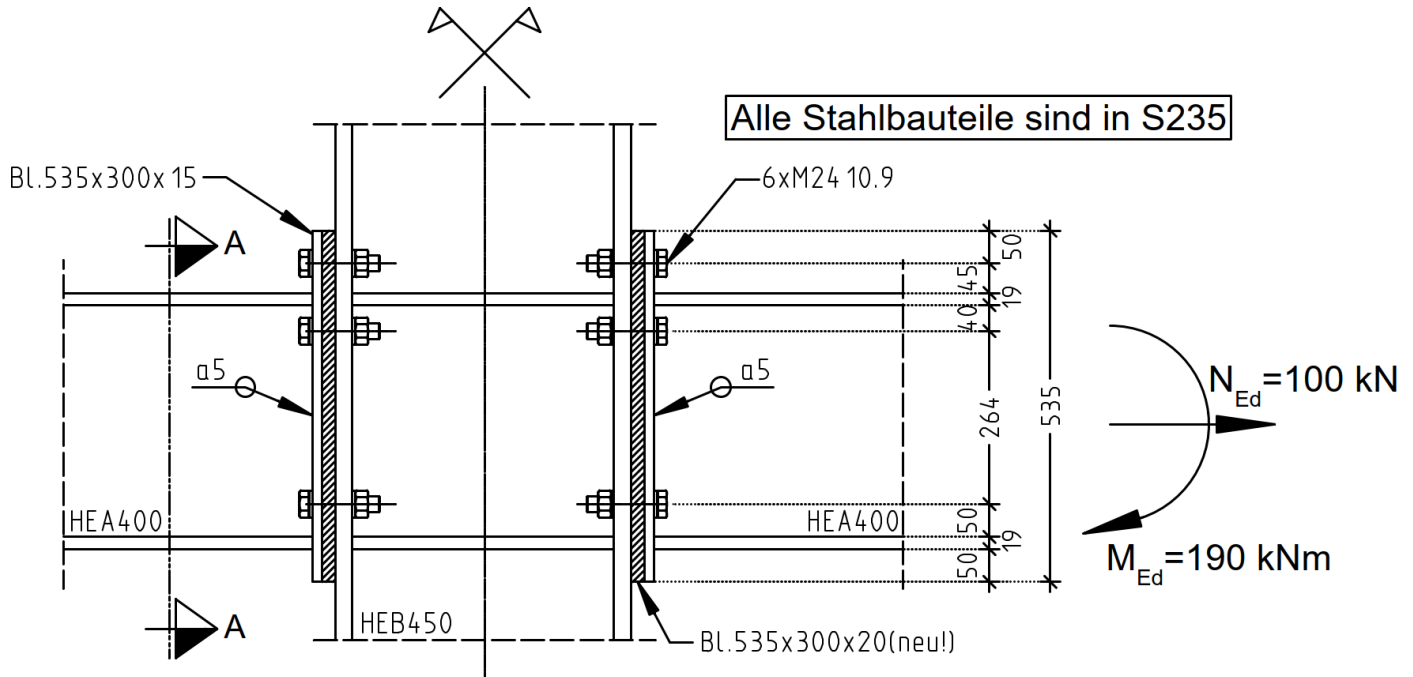
Schnitt A - A



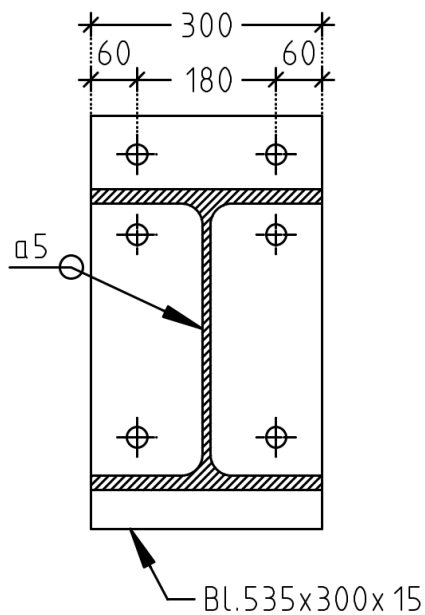
Rippe



Sanierungsvorschlag des Stahlbauers:



Schnitt A - A



Futterblech (neu!)

