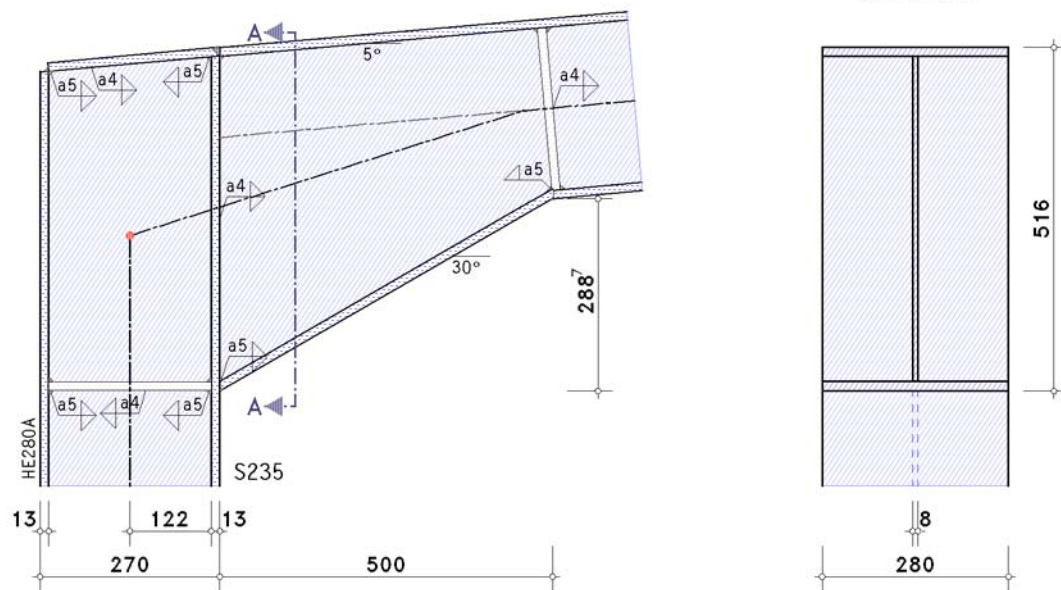


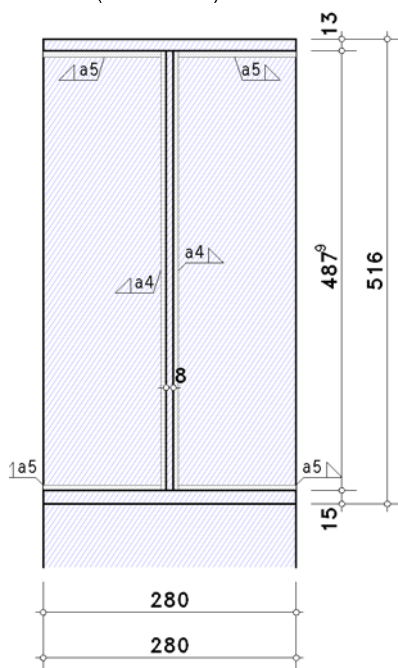
POS. 9: BEISPIEL BEULEN/SCHUBFELD

Rahmenecke EC 3-1-8 (12.10), NA: Deutschland

1. Eingabeprotokoll



Details (Schnitt A - A)



Stahlsorte

Stahlgüte S235

Parameter der Stütze

Profil HE280A

Verstärkung des Profils durch Quersteifen (Stegsteifen in Höhe von Trägerzug- und -druckflansch, $d_{st} = 500.8$ mm):

Dicke $t_{st} = 13.0$ mm, Breite $b_{st} = 136.0$ mm, Länge $l_{st} = 244.0$ mm

Aussparung an den Steifen $c_{st} = 36.0$ mm

Schweißnähte $a_{st,f} = 5.0$ mm, $a_{st,w} = 4.0$ mm

Parameter des Trägers

Profilparameter (I-Profil):

Gesamthöhe $h = 270.0$ mm, Stegdicke $t_w = 8.0$ mm

Flanschbreite $b_f = 280.0$ mm, Flanschdicke $t_f = 13.0$ mm

Neigungswinkel des Profils gegen die Horizontale $\alpha_b = 5.00^\circ \Rightarrow$ Profilhöhe im Anschluss $h_b = h / \cos(\alpha_b) = 271.0$ mm

Neigungswinkel der Voute gegen die Horizontale $\alpha_v = 30.00^\circ \Rightarrow$ Voutenwinkel gegen den Träger $\Delta\alpha_v = 25.00^\circ$

Länge der Voute $L_v = 500.0$ mm, Voutenhöhe im Anschluss $h_v = L_v \cdot (\tan(\alpha_v) - \tan(\alpha_b)) = 244.9$ mm

Gesamte Trägerhöhe im Anschluss $h_{ges} = h_b + h_v = 516.0$ mm

Verstärkung des Profils durch Quersteifen:

Dicke $t_{st} = 13.0$ mm, Breite $b_{st} = 136.0$ mm, Länge $l_{st} = 244.0$ mm

Schweißnähte $a_{st,f} = 5.0$ mm, $a_{st,w} = 4.0$ mm

Nachweisparameter

geschweißter Anschluss:

Zugblech: Dicke $t_z = 13.0$ mm, Breite $b_z = 280.0$ mm

Schweißnähte $a_{z,f} = 5.0$ mm, $a_{z,w} = 4.0$ mm

Schweißnähte im Anschluss:

Trägerflansch oben: Kehlnaht, Nahtdicke $a = 5.0$ mm, Öffnungswinkel $\varphi = 85^\circ$

Trägersteg: Kehlnaht, Nahtdicke $a = 4.0$ mm

Trägerflansch unten: Kehlnaht, Nahtdicke $a = 5.0$ mm, Öffnungswinkel $\varphi = 120^\circ$

Schnittgrößen im Schnittpunkt der Systemachsen

Lk 1: $N_{j,b,Ed} = -800.00$ kN $M_{j,b,Ed} = -100.00$ kNm

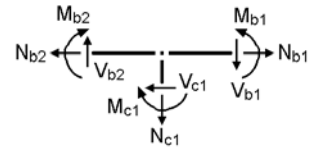
$N_{j,c1,Ed} = -240.56$ kN $M_{j,c1,Ed} = -100.00$ kNm $V_{j,c1,Ed} = -762.97$ kN (berechnet)

Materialsicherheitsbeiwerte

Beanspruchbarkeit von Querschnitten $\gamma_{M0} = 1.00$

Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen $\gamma_{M1} = 1.10$

Beanspruchbarkeit von Schrauben, Schweißnähten, Blechen auf Lochleibung $\gamma_{M2} = 1.25$



Datencheck

ok

Hinweise

Die Querschnittsprofile werden nicht nachgewiesen.

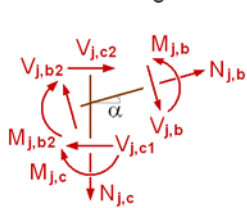
2. Lk 1

Hinweise

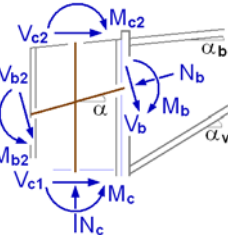
Die Schweißnähte des geschweißten Profils werden nicht nachgewiesen.

2.1. Bemessungsgrößen

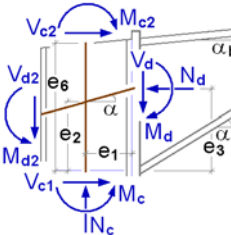
Knotenschnittgrößen



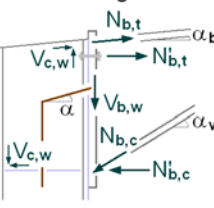
Anschnitt Anschluss



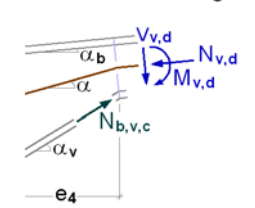
⊥ zur Anschlussebene



Teilschnittgrößen



Anschnitt Voute-Träger



Vorzeichendefinition der Statik: eine positive Normalkraft bedeutet Zug, ein positives Moment erzeugt unten Zug
⇒ Transformation nach EC3: eine positive Normalkraft bedeutet Druck, ein positives Moment erzeugt oben Zug

Neigungswinkel: $\alpha_b = 5.00^\circ$, $\alpha_v = 30.00^\circ \Rightarrow \alpha = (\alpha_b + \alpha_v)/2 = 17.50^\circ$, $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_b = 12.50^\circ$

Abstände: $e_1 = 135.0$ mm, $e_3 = 268.5$ mm, $e_2 = 225.9$ mm, $e_6 = 500.8$ mm, $e_4 = 496.1$ mm

Transformation Statik-KoS -> EC3-KoS

$N_{j,b,Ed} = 800.00$ kN, $M_{j,b,Ed} = 100.00$ kNm

Transformation Knotengrößen -> Anschlussgrößen

$N_{b,Ed} = 800.00$ kN, $M_{b,Ed} = 100.00$ kNm

Transformation Anschlussgrößen -> Bemessungsgrößen

$N_d = 762.97$ kN, $M_d = 100.00$ kNm, $V_d = 240.56$ kN

Schnittgrößen am Ansnitt Voute-Träger

$N_{v,d} = 781.04$ kN, $M_{v,d} = 100.00$ kNm, $V_{v,d} = 173.15$ kN

Schnittgrößen senkrecht zu den Anschlussebenen

Anschnitt Träger

$N_d = 762.97$ kN, $M_d = 100.00$ kNm, $V_d = 240.56$ kN

Anschnitt Voute-Träger

$N_{v,d} = 781.04$ kN, $M_{v,d} = 100.00$ kNm, $V_{v,d} = 173.15$ kN

Anschnitt Stütze (unten, berechnet)

$N_c = 240.56$ kN, $M_c = -72.39$ kNm, $V_c = 762.97$ kN

$IN_{b,Ed} = 800.00$ kN $> 5\% \cdot N_{pl,Rd} = 138.18$ kN ⇒ Nachweis mit Teilschnittgrößen

mit $N_{pl,Rd} = A_b \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} = 2763.65$ kN

Teilschnittgrößen

$N_{b,t} = (-N_d \cdot z_{bu}/z_b + M_d/z_b) / \cos(\alpha_b) = -165.32$ kN, $z_b = 501.9$ mm, $z_{bu} = 239.4$ mm < 0 (Druckanschluss)

$N_{b,c} = (N_d \cdot z_{bo}/z_b + M_d/z_b) / \cos(\alpha_v) = 690.84$ kN, $z_b = 501.9$ mm, $z_{bo} = 262.5$ mm

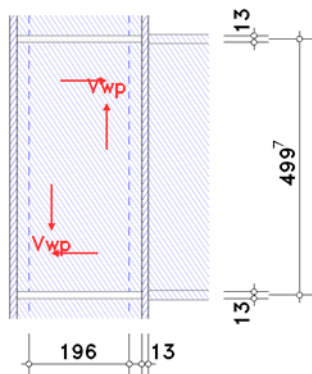
$V_{b,w} = V_d + N_{b,c} \cdot \sin(\alpha_v) - N_{b,t} \cdot \sin(\alpha_b) = 600.39$ kN

2.2. Grundkomponenten

Geschweißter Trägeranschluss: Grundkomponenten: 1, 2, 3, 20

2.2.1. Gk 1: Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung

Übertragungsparameter (EC 3-1-8, 5.3(9)) $\beta_j = 1.000$ für $M_{j1} = 100.00$ kNm ($M_{j2} = 0$)



In der Skizze sind nur die wesentlichen Abmessungen maßstäblich angegeben. Die Geometrie des Anschlusses ist nur angedeutet.

Voraussetzung

Schlankheit des Stützenstegs $d_c/t_{wc} = 24.50 < 69 \cdot \epsilon = 69.00$, $\epsilon = 1.00 \Rightarrow$ Verfahren anwendbar

Schubfläche

Schubfläche $A_v = 31.74$ cm²

plastische Schubtragfähigkeit

plastische Schubtragfähigkeit ohne Steifen $V_{wp,Rd} = (0.9 \cdot f_{y,w} \cdot A_v) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M0}) = 387.6$ kN

Anordnung von zwischenliegenden Stegsteifen:

plastisches Widerstandsmoment eines Stützenflanschs $W_{pl,fc} = b_{fc} \cdot t_{fc}^2 / 4 = 11.83$ cm³

plastisches Widerstandsmoment einer Stegsteife $W_{pl,st} = 2 \cdot b_{st} \cdot t_{st}^2 / 4 = 11.49$ cm³

plastische Biegetragfähigkeit des Stützenflanschs $M_{pl,fc,Rd} = (W_{pl,fc} \cdot f_{y,c}) / \gamma_{M0} = 2.78$ kNm

plastische Biegetragfähigkeit der Stegsteife $M_{pl,st,Rd} = (W_{pl,st} \cdot f_{y,st}) / \gamma_{M0} = 2.70$ kNm

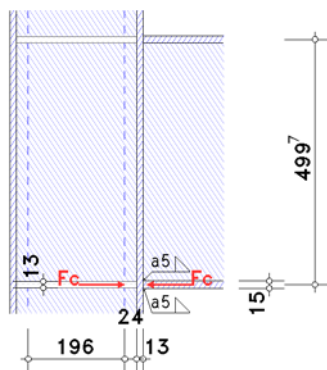
zusätzliche Tragfähigkeit $V_{wp,add,Rd} = 4 \cdot M_{pl,fc,Rd} / d_{st} = 22.3$ kN

$V_{wp,add,Rd} > 2 \cdot (M_{pl,fc,Rd} + M_{pl,st,Rd}) / d_{st} = 21.9$ kN $\Rightarrow V_{wp,add,Rd} = 21.9$ kN, $d_{st} = 499.7$ mm

plastische Schubtragfähigkeit mit Quersteifen $V_{wp,Rd} = 409.6$ kN

2.2.2. Gk 2: Stützensteg mit Querdrukbeanspruchung

Übertragungsparameter (EC 3-1-8, 5.3(9)) $\beta_j = 1.000$ für $M_{j1} = 100.00$ kNm ($M_{j2} = 0$)



In der Skizze sind nur die wesentlichen Abmessungen maßstäblich angegeben. Die Geometrie des Anschlusses ist nur angedeutet.

Verstärkung des Stegs durch Quersteifen:

Voraussetzung: Steifen nicht beulgefährdet (Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ max. Q-Klasse 3)

c/t-Verhältnis $c/t = 10.46 \leq 33.00 = 33 \cdot \epsilon$, $\epsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow$ Q-Klasse 1 $\leq 3 \Rightarrow$ Voraussetzung erfüllt !!

Mindestanforderung an das Trägheitsmoment der Steifen

Länge des Beulfelds (Abstand der Steifen) $a = 499.7$ mm

Steghöhe zwischen den Flanschen $h_{wc} = d_c + 2 \cdot s_c = 244.0$ mm

Trägheitsmoment der Steifen $I_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc})^3 \cdot t_{st} / 12 = 2378.13$ cm⁴

Mindestträgheitsmoment für $a/h_{wc} = 2.05 \geq 2^{1/2}$: $I_{st,min} = 0.75 \cdot h_{wc} \cdot t_{wc}^3 = 9.37$ cm⁴ $< I_{st}$ ok

Anforderung an die Steifen zur Vermeidung von Drillknicken

Torsionsträgheitsmoment der Steifen $I_T \approx b_{st} \cdot t_{st}^3 / 3 = 9.96$ cm⁴

polares Trägheitsmoment der Steifen $I_p = b_{st} \cdot t_{st}^3 / 12 + t_{st} \cdot b_{st}^3 / 12 = 275.00$ cm⁴

$I_T / I_p \approx 0.036 > 0.006 = 5.3 \cdot f_{y,st} / E_{st}$ ok

Tragfähigkeit des ausgesteiften Stegs mit Querdrukbeanspruchung

Fläche der Steifen einschl. Steg $A_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc}) \cdot t_{st} = 36.40$ cm²

Trägheitsradius der Steifen $i = (I_{st} / A_{st})^{1/2} = 80.8$ mm

Knicklänge der Steifen $L_{cr} = h_{wc} = 244.0$ mm

Schlankheitsgrad $\lambda = L_{cr} / (i \cdot \lambda_1) = 0.032$ mit $\lambda_1 = \pi \cdot (E_{st} / f_{y,st})^{1/2} = 93.9$

$\lambda \leq 0.2 \Rightarrow$ keine Abminderung ($\chi = 1.0$)

Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit auf Biegeknicken $F_{c,w,Rd} = \chi \cdot A_{st} \cdot f_{y,st} / \gamma_{M1} = 777.6$ kN

Tragfähigkeit des oberen Trägerflanschs:

Verstärkung des Stegs durch Quersteifen:

Voraussetzung: Steifen nicht beulgefährdet (Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ max. Q-Klasse 3)
 c/t -Verhältnis $c/t = 10.46 \leq 33.00 = 33 \cdot \varepsilon$, $\varepsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow$ Q-Klasse $1 \leq 3 \Rightarrow$ Voraussetzung erfüllt !!

Mindestanforderung an das Trägheitsmoment der Steifen

Länge des Beulfelds (Abstand der Steifen) $a = 499.7$ mm

Steghöhe zwischen den Flanschen $h_{wc} = d_c + 2 \cdot s_c = 244.0$ mm

Trägheitsmoment der Steifen $I_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc})^3 \cdot t_{st} / 12 = 2378.13$ cm⁴

Mindestträgheitsmoment für $a/h_{wc} = 2.05 \geq 2^{1/2}$: $I_{st,min} = 0.75 \cdot h_{wc} \cdot t_{wc}^3 = 9.37$ cm⁴ $< I_{st}$ ok

Anforderung an die Steifen zur Vermeidung von Drillknicken

Torsionsträgheitsmoment der Steifen $I_T \approx b_{st} \cdot t_{st}^3 / 3 = 9.96$ cm⁴

polares Trägheitsmoment der Steifen $I_p = b_{st} \cdot t_{st}^3 / 12 + t_{st} \cdot b_{st}^3 / 12 = 275.00$ cm⁴

$I_T / I_p \approx 0.036 > 0.006 = 5.3 \cdot f_{y,st} / E_{st}$ ok

Tragfähigkeit des ausgesteiften Stegs mit Querdrukbeanspruchung

Fläche der Steifen einschl. Steg $A_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc}) \cdot t_{st} = 36.40$ cm²

Trägheitsradius der Steifen $i = (I_{st} / A_{st})^{1/2} = 80.8$ mm

Knicklänge der Steifen $L_{cr} = h_{wc} = 244.0$ mm

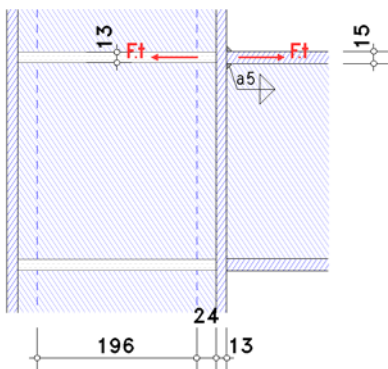
Schlankheitsgrad $\lambda = L_{cr} / (i \cdot \lambda_1) = 0.032$ mit $\lambda_1 = \pi \cdot (E_{st} / f_{y,st})^{1/2} = 93.9$

$\lambda \leq 0.2 \Rightarrow$ keine Abminderung ($\chi = 1.0$)

Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit auf Biegeknicken $F_{c,w,Rd} = \chi \cdot A_{st} \cdot f_{y,st} / \gamma_{M1} = 777.6$ kN

2.2.3. Gk 3: Stützensteg mit Querzugbeanspruchung

Übertragungsparameter (EC 3-1-8, 5.3(9)) $\beta_j = 1.000$ für $M_{j1} = 100.00$ kNm ($M_{j2} = 0$)



In der Skizze sind nur die wesentlichen Abmessungen maßstäblich angegeben. Die Geometrie des Anschlusses ist nur angedeutet.

Verstärkung des Stegs durch Quersteifen:

Fläche der Steifen einschl. Steg $A_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc}) \cdot t_{st} = 36.40$ cm²

Tragfähigkeit eines Stützenstegs mit Querzug $F_{t,wc,Rd} = A_{st} \cdot f_{y,st} / \gamma_{M0} = 855.4$ kN, $f_{y,st} = 235.0$ N/mm²

2.2.4. Gk 20: Gevouteter Träger mit Druckbeanspruchung

Längsdruckspannung im Trägersteg $\sigma_{com,Ed} = N_{v,d} / A_b + M_{v,d} / W_{w,b} = 178.45$ N/mm²

$N_{v,d} = 781.0$ kN, $A_b = 92.3$ cm², $M_{v,d} = 100.0$ kNm, $W_{w,b} = I_{y,b} / z_{w,b} = 1065.5$ cm³, $z_{w,b} = 122.0$ mm

Querschnittsklasse des Trägers in der Anschlussebene ($\varepsilon = 1.00$):

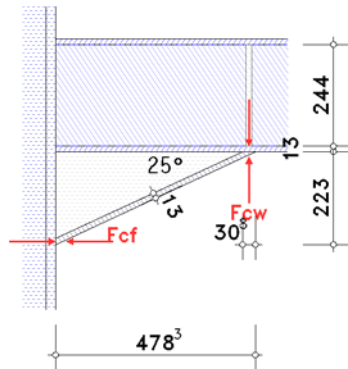
Flansch oben: Querschnittsklasse für $c/(\varepsilon \cdot t) = 10.42$ (einseitig gestützt): 3

Flansch unten: Querschnittsklasse für $c/(\varepsilon \cdot t) = 9.06$ (einseitig gestützt): 2

Steg: Querschnittsklasse für $c/(\varepsilon \cdot t) = 60.99$ (beidseitig gestützt): 4

Gesamt: Querschnittsklasse des Profils: 4

Transformation in die Betrachtungsebene (wg. Trägerneigung): $L_{v,Gk20} = L_v \cdot \cos \alpha_b = 478.3$ mm, $\alpha_{v,Gk20} = 25.00^\circ$



In der Skizze sind nur die wesentlichen Abmessungen maßstäblich angegeben. Die Geometrie des Anschlusses ist nur angedeutet.

Voraussetzung: Voutenflansch nicht beulgefährdet

c/t -Verhältnis $10 \cdot \varepsilon = 10.00 < c/t = 10.46 \leq 14.00 = 14 \cdot \varepsilon$, $\varepsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow$ Q-Klasse $3 \leq 3$ ok

Anschluss Voute-Stütze: (Grundkomponente 7: Trägerflansch und -steg mit Druck)

Tragfähigkeit nur des Druckflanschs (ohne Steganteil, elastisch $\Rightarrow$ Q-Klasse 3)

Flanschbreite der Voute $b_{f,v} = 280.0$ mm $< \max b_{f,v} = 42 \cdot t_{f,v} \cdot \varepsilon = 546.0$ mm ($\varepsilon = 1.00$) ok

Höhe des Trägers einschließlich Voute $h = h_b + h_v = 493.0$ mm, Flanschdicken $t_{fo} = 13.0$ mm, $t_{f,v} = 13.0$ mm

Widerstandsmoment $W_{el,v} = 1747.307$ cm³

Beanspruchung für Querschnittsklasse 3

Tragfähigkeit $M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = (W_{el,min} \cdot f_y) / \gamma_{M0} = 410.62 \text{ kNm}$, $W_{el,min} = 1747.31 \text{ cm}^3$

Tragfähigkeit eines Flanschs (und Stegs) mit Druck

$F_{c,f,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_f) = 855.40 \text{ kN}$, $(h - t_f) = 480.0 \text{ mm}$

bezogen auf die Betrachtungsebene $F_{c,f,Rd} \cdot \cos \alpha_v = 775.26 \text{ kN}$

Anschluss Voute-Träger: (Grundkomponente 2: Stützensteg mit Querdruk)

Verstärkung des Stegs durch Quersteifen:

Voraussetzung: Steifen nicht beulgefährdet (Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ max. Q-Klasse 3)

c/t-Verhältnis $c/t = 10.46 \leq 33.00 = 33 \cdot \varepsilon$, $\varepsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow$ Q-Klasse $1 \leq 3 \Rightarrow$ Voraussetzung erfüllt !!

Mindestanforderung an das Trägheitsmoment der Steifen

Länge des Beulfelds (Abstand der Steifen) $a = 478.3 \text{ mm}$

Steghöhe zwischen den Flanschen $h_{wc} = d_c + 2 \cdot s_c = 244.0 \text{ mm}$

Trägheitsmoment der Steifen $I_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc})^3 \cdot t_{st} / 12 = 2378.13 \text{ cm}^4$

Mindestträgheitsmoment für $a/h_{wc} = 1.96 \geq 2^{1/2}$: $I_{st,min} = 0.75 \cdot h_{wc} \cdot t_{wc}^3 = 9.37 \text{ cm}^4 < I_{st}$ **ok**

Anforderung an die Steifen zur Vermeidung von Drillknicken

Torsionsträgheitsmoment der Steifen $I_T \approx b_{st} \cdot t_{st}^3 / 3 = 9.96 \text{ cm}^4$

polarer Trägheitsmoment der Steifen $I_p = b_{st} \cdot t_{st}^3 / 12 + t_{st} \cdot b_{st}^3 / 12 = 275.00 \text{ cm}^4$

$I_T / I_p \approx 0.036 > 0.006 = 5.3 \cdot f_{y,st} / E_{st}$ **ok**

Tragfähigkeit des ausgesteiften Stegs mit Querdrukbeanspruchung

Fläche der Steifen einschl. Steg $A_{st} = (2 \cdot b_{st} + t_{wc}) \cdot t_{st} = 36.40 \text{ cm}^2$

Trägheitsradius der Steifen $i = (I_{st} / A_{st})^{1/2} = 80.8 \text{ mm}$

Knicklänge der Steifen $L_{cr} = h_{wc} = 244.0 \text{ mm}$

Schlankheitsgrad $\lambda = L_{cr} / (i \cdot \lambda_1) = 0.032$ mit $\lambda_1 = \pi \cdot (E_{st} / f_{y,st})^{1/2} = 93.9$

$\lambda \leq 0.2 \Rightarrow$ keine Abminderung ($\chi = 1.0$)

Bemessungswert für die Beanspruchbarkeit auf Biegeknicken $F_{c,w,Rd} = \chi \cdot A_{st} \cdot f_{y,st} / \gamma_{M1} = 777.6 \text{ kN}$

bezogen auf die Betrachtungsebene $F_{c,w,Rd} \cdot \cot \alpha_v = 1667.65 \text{ kN}$

Gesamttragfähigkeit eines gevouteten Trägers mit Druckbeanspruchung

$F_{c,v,Rd} = \min(F_{c,f,Rd} \cdot \cos \alpha_v, F_{c,w,Rd} \cdot \cot \alpha_v) = 775.26 \text{ kN}$

Rücktransformation (wg. Trägerneigung) $F_{c,v,Rd} \cdot \cos \alpha_v / \cos \alpha_{v,Gk20} = 740.80 \text{ kN}$

Tragfähigkeit des oberen Trägerflanschs (Gk 7):

Beanspruchung für Querschnittsklasse 4

Tragfähigkeit $M_{c,Rd} = (W_{eff,min} \cdot f_y) / \gamma_{M0} = 498.61 \text{ kNm}$, $W_{eff,min} = 2121.76 \text{ cm}^3$

Tragfähigkeit eines Flanschs (und Stegs) mit Druck

$F_{c,f,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_f) = 993.39 \text{ kN}$, $(h - t_f) = 501.9 \text{ mm}$

2.3. Schubtragfähigkeit

Schubtragfähigkeit des Stützenstegs

maßgebende Grundkomponente: 1

$V_{wp,Rd} / \beta_j = 409.6 \text{ kN}$

2.4. Nachweise

2.4.1. Nachweis der Anschlusstragfähigkeit mit Teilschnittgrößen

Schubkraft im Stützensteg:

$V_{c,w,Ed} = (M_{d1,w} - M_{d2,w}) / z - V_c / 2 = -182.26 \text{ kN}$, $M_{d1,w} = 100.0 \text{ kNm}$, $M_{d2,w} = 0.0 \text{ kNm}$

$z = 501.9 \text{ mm}$

Gk 1: $F_{Rd} = V_{wp,Rd} / \beta_j = 409.6 \text{ kN}$, $F_{Ed} = |V_{c,w,Ed}| = 182.26 \text{ kN}$

$F_{Ed} = 182.3 \text{ kN} < F_{Rd} = 409.6 \text{ kN} \Rightarrow U = 0.445 < 1$ **ok**

Gk 2: $F_{Rd} = F_{c,w,Rd} = 777.6 \text{ kN}$, $F_{Ed} = N_{b,c} = 690.84 \text{ kN}$

$F_{Ed} = 690.8 \text{ kN} < F_{Rd} = 777.6 \text{ kN} \Rightarrow U = 0.888 < 1$ **ok**

Gk 3: $F_{Rd} = F_{t,w,c,Rd} = 855.4 \text{ kN}$, $F_{Ed} = N_{b,t} = -165.32 \text{ kN} \leq 0$ **kein Nachweis**

Gk 20: $F_{Rd} = F_{c,v,Rd} = 740.8 \text{ kN}$, $F_{Ed} = N_{b,c} \cdot \cos(\alpha_v) = 598.29 \text{ kN}$

$F_{Ed} = 598.3 \text{ kN} < F_{Rd} = 740.8 \text{ kN} \Rightarrow U = 0.808 < 1$ **ok**

Ausnutzung Teilschnittgrößen $U_{Gk} = 0.888 < 1$ **ok**

2.4.2. Nachweis der Schweißnähte am Trägerprofil

Naht 1: Trägerflansch mit Zug außen

Nähte 2,3: Trägerflansch mit Zug innen

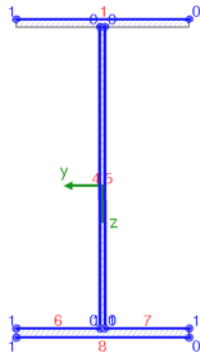
Nähte 4,5: Trägersteg beidseitig

Naht 8: Trägerflansch mit Druck außen

Nähte 6,7: Trägerflansch mit Druck innen

Naht 1: Nahtdicke $a = 13.0 \text{ mm} > a_{max} = 0.7 \cdot t_{min} = 9.1 \text{ mm}$!!

Berechnungsquerschnitt:



Naht 1:	$a_w = 13.0 \text{ mm}$	$l_w = 280.0 \text{ mm}$
Naht 4:	$a_w = 4.0 \text{ mm}$	$l_w = 487.9 \text{ mm}$
Naht 5:	siehe Naht 4	
Naht 6:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 136.0 \text{ mm}$
Naht 7:	siehe Naht 6	
Naht 8:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 280.0 \text{ mm}$

Bemessungsgrößen bezogen auf den Schwerpunkt des Profils:

$N_{Ed} = -762.97 \text{ kN}$, $M_{y,Ed} = -100.00 \text{ kNm}$, $V_{z,Ed} = 240.56 \text{ kN}$

Querschnittswerte bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts:

$\Sigma A_w = 103.17 \text{ cm}^2$, $A_{w,z} = 39.03 \text{ cm}^2$, $\Sigma l_w = 180.8 \text{ cm}$
 $I_{w,y} = 48778.31 \text{ cm}^4$, $I_{w,z} = 4222.77 \text{ cm}^4$, $\Delta z_w = -35.8 \text{ mm}$

Schnittgrößenverteilung:

Naht 1: $N_w = -95.47 \text{ kN}$
Naht 4: $N_w = -153.82 \text{ kN}$ $M_{y,w} = -7.94 \text{ kNm}$
Naht 5: siehe Naht 4
Naht 6: $N_w = -87.60 \text{ kN}$
Naht 7: siehe Naht 6
Naht 8: $N_w = -184.67 \text{ kN}$

aus konventioneller Querkraftaufteilung: $V_{z,w} = 240.56 \text{ kN}$

Spannungen in den Endpunkten der Nähte:

Naht 1, Pkt. 0: $\sigma_{w,x} = -26.13 \text{ N/mm}^2$
Naht 4, Pkt. 0: $\sigma_{w,x} = -28.80 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{w,z} = 61.63 \text{ N/mm}^2$
Pkt. 1: $\sigma_{w,x} = -128.83 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{w,z} = 61.63 \text{ N/mm}^2$
Naht 5, Pkt. 0: siehe Naht 4
Pkt. 1: siehe Naht 4
Naht 6, Pkt. 0: $\sigma_{w,x} = -128.83 \text{ N/mm}^2$
Naht 7, Pkt. 0: siehe Naht 6
Pkt. 1: siehe Naht 6
Naht 8, Pkt. 0: $\sigma_{w,x} = -131.90 \text{ N/mm}^2$

Nachweise in den Endpunkten der Nähte:

Nachweis für Naht 1, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) = -18.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) = -18.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 3.70 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): $f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 3.70 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.103 < 1 \quad \text{ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 1.85 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): $f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 1.85 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.071 < 1 \quad \text{ok}$$

Nachweis für Naht 4, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) = -20.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) = -20.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_p = \tau_{w,z} = 61.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 11.43 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): $f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 11.43 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.317 < 1 \quad \text{ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 2.04 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): $f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 2.04 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.079 < 1 \quad \text{ok}$$

Nachweis für Naht 4, Pkt. 1:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) = -91.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) = -91.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_p = \tau_{w,z} = 61.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 21.12 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): $f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 21.12 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.587 < 1 \quad \text{ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 9.11 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): $f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 9.11 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.351 < 1 \text{ ok}$$

Nachweis für Naht 6, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) = -91.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) = -91.1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 18.22 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): } f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 18.22 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.506 < 1 \text{ ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 9.11 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): } f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 9.11 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.351 < 1 \text{ ok}$$

Nachweis für Naht 8, Pkt. 0:

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) = -93.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) = -93.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 18.65 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): } f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 18.65 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.518 < 1 \text{ ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 9.33 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): } f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 9.33 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.360 < 1 \text{ ok}$$

Ergebnis:

$$\text{Naht 4, Pkt. 1: } \sigma_{w,x} = -128.83 \text{ N/mm}^2 \quad \tau_{w,z} = 61.63 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Max: } \sigma_{1,w,Ed} = 21.12 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 9.11 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U_w = 0.587 < 1 \text{ ok}$$

2.4.3. Nachweis der Stegsteifen / Zugblech

Bemessungsgrößen

$$N_{R,t} = (-N_d \cdot z_{bu} + M_d + V_d \cdot \Delta s) / (z \cdot \cos(\alpha_b)) = -162.37 \text{ kN}, \quad z = z_b \cdot \Delta s \cdot \tan(\alpha_b) = 501.4 \text{ mm}, \quad z_{bu} = 239.4 \text{ mm}, \quad \Delta s = t_{fc}/2 = 6.5 \text{ mm} < 0$$

$$N_{R,c} = (N_d \cdot z_{bo} + M_d + V_d \cdot \Delta s) / z = 601.40 \text{ kN}, \quad z = z_b = 501.9 \text{ mm}, \quad z_{bo} = 262.5 \text{ mm}, \quad \Delta s = t_{fc}/2 = 6.5 \text{ mm}$$

$$N_{R,b} = N'_{b,c} \cdot \sin(\Delta \alpha_v) / \cos(\alpha_v) = 291.96 \text{ kN}$$

Stütze

Drucksteife

$$F_{c,Ed} = N_{R,c} = 601.40 \text{ kN}$$

Die Schweißnähte werden mit dem richtungsbezogenen Verfahren nachgewiesen.

Abmessungen, Hebelarme, Kräfte je Rippe

$$b_R = b_{st} = 136.0 \text{ mm}, \quad b_1 = b_R - r_R = 100.0 \text{ mm}, \quad e_F = b_R - 0.5 \cdot b_1 = 86.0 \text{ mm} \text{ mit } r_R = 36.0 \text{ mm}$$

$$l_R = l_{st} = 244.0 \text{ mm}, \quad l_1 = l_R - 2 \cdot r_R = 172.0 \text{ mm}, \quad e_H = l_R = 244.0 \text{ mm}, \quad t_R = 13.0 \text{ mm}$$

$$F = 0.5 \cdot F_{c,Ed} \cdot (b_R - 2 \cdot r_R) / b_F = 240.6 \text{ kN}, \quad H = F \cdot e_F / e_H = 84.8 \text{ kN}$$

Voraussetzung: Steifen nicht beulgefährdet (Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ max. Q-Klasse 3)

$$c/t\text{-Verhältnis } c/t = 10.46 \leq 33.00 = 33 \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow \text{Q-Klasse } 1 \leq 3 \Rightarrow \text{Voraussetzung erfüllt !!}$$

Querschnitt am Flansch

$$\text{Drucktragfähigkeit } N_{c,Rd} = (A \cdot f_y) / \gamma_{M0} = 305.50 \text{ kN}$$

$$\text{Bemessungsgröße: } F_{Ed} = (F^2 + 3 \cdot H^2)^{1/2} = 281.8 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = 281.8 \text{ kN} < F_{Rd} = 305.5 \text{ kN} \Rightarrow U = 0.923 < 1 \text{ ok}$$

Querschnitt am Steg

$$\text{Schubtragfähigkeit } V_{Rd} = 430.37 \text{ kN}$$

$$\text{Bemessungsgröße: } F_{Ed} = F = 240.6 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = 240.6 \text{ kN} < F_{Rd} = 430.4 \text{ kN} \Rightarrow U = 0.559 < 1 \text{ ok}$$

Schweißnähte am Flansch

Kehlnaht mit $a = 5.0 \text{ mm}$

$$\text{Bemessungsgrößen: } F_{Ed}(\sigma_s) = F / (2 \cdot b_1) = 12.03 \text{ kN/cm}, \quad F_{Ed}(\tau_p) = H / (2 \cdot b_1) = 4.24 \text{ kN/cm}$$

0% Spannungsabtrag über Druckkontakt

$$\text{Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche: } \sigma_s = 24.06 \text{ kN/cm}^2 \quad \tau_p = 8.48 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 28.18 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): } f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 28.18 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.783 < 1 \text{ ok}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 24.06 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): } f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 24.06 \text{ kN/cm}^2 < f_{2w,d} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.928 < 1 \text{ ok}$$

Schweißnähte am Steg

Kehlnaht mit $a = 4.0 \text{ mm}$

$$\text{Bemessungsgröße: } F_{Ed}(\tau_p) = F / (2 \cdot l_1) = 6.99 \text{ kN/cm}$$

0% Spannungsabtrag über Druckkontakt

$$\text{Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche: } \tau_p = 17.48 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 30.28 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): } f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 30.28 \text{ kN/cm}^2 < f_{1w,d} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow U = 0.841 < 1 \text{ ok}$$

Träger

$$F_{c,Ed} = N_{R,b} = 291.96 \text{ kN}$$

Die Schweißnähte werden mit dem richtungsbezogenen Verfahren nachgewiesen.

Abmessungen, Hebelarme, Kräfte je Rippe

$b_R = 136.0$ mm (maximale Breite), $b_1 = b_R - r_R = 136.0$ mm, $e_F = b_R - 0.5 \cdot b_1 = 68.0$ mm mit $r_R = 0.0$ mm

$l_R = h - 2 \cdot t_f = 244.0$ mm, $l_1 = l_R - 2 \cdot r_R = 244.0$ mm, $e_H = l_R = 244.0$ mm, $t_R = 13.0$ mm

$F = 0.5 \cdot F_{c,Ed} = 146.0$ kN, $H = F \cdot e_F / e_H = 40.7$ kN

Voraussetzung: Steifen nicht beulgefährdet (Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ max. Q-Klasse 3)

c/t-Verhältnis $c/t = 10.46 \leq 33.00 = 33 \cdot \varepsilon$, $\varepsilon = (235/f_y)^{1/2} = 1.00 \Rightarrow$ Q-Klasse $1 \leq 3 \Rightarrow$ Voraussetzung erfüllt !!

Querschnitt am Flansch

Drucktragfähigkeit $N_{c,Rd} = (A \cdot f_y) / \gamma_{M0} = 415.48$ kN

Bemessungsgröße: $F_{Ed} = (F^2 + 3 \cdot H^2)^{1/2} = 162.1$ kN

$F_{Ed} = 162.1$ kN < $F_{Rd} = 415.5$ kN $\Rightarrow U = 0.390 < 1$ ok

Querschnitt am Steg

Schubtragfähigkeit $V_{Rd} = 430.37$ kN

Bemessungsgröße: $F_{Ed} = F = 146.0$ kN

$F_{Ed} = 146.0$ kN < $F_{Rd} = 430.4$ kN $\Rightarrow U = 0.339 < 1$ ok

Schweißnähte am Flansch

Kehlnaht mit $a = 5.0$ mm

Bemessungsgrößen: $F_{Ed}(\sigma_s) = F / (2 \cdot b_1) = 5.37$ kN/cm, $F_{Ed}(\tau_p) = H / (2 \cdot b_1) = 1.50$ kN/cm

0% Spannungsabtrag über Druckkontakt

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche: $\sigma_s = 10.73$ kN/cm², $\tau_p = 2.99$ kN/cm²

$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_p^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 11.92$ kN/cm²

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): $f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00$ kN/cm²

$\sigma_{1,w,Ed} = 11.92$ kN/cm² < $f_{1w,d} = 36.00$ kN/cm² $\Rightarrow U = 0.331 < 1$ ok

$\sigma_{2,w,Ed} = |\sigma_s| = 10.73$ kN/cm²

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.2): $f_{2w,d} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92$ kN/cm²

$\sigma_{2,w,Ed} = 10.73$ kN/cm² < $f_{2w,d} = 25.92$ kN/cm² $\Rightarrow U = 0.414 < 1$ ok

Schweißnähte am Steg

Kehlnaht mit $a = 4.0$ mm

Bemessungsgröße: $F_{Ed}(\tau_p) = F / (2 \cdot l_1) = 2.99$ kN/cm

0% Spannungsabtrag über Druckkontakt

Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche: $\tau_p = 7.48$ kN/cm²

$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_p^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 12.95$ kN/cm²

Tragfähigkeit einer Schweißnaht (Bed.1): $f_{1w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00$ kN/cm²

$\sigma_{1,w,Ed} = 12.95$ kN/cm² < $f_{1w,d} = 36.00$ kN/cm² $\Rightarrow U = 0.360 < 1$ ok

2.4.4. Elastischer Schubfeldnachweis

Stützensteg als ideales Schubfeld

Anforderungen an die Steifen: s. Nachweis der Stegsteifen

Anforderungen an das Schubfeld: s. Beulnachweis

Schnittgrößen am Stegfeld (Statik-Vorzeichen):

$N_3 = -N_c = -240.56$ kN, $M_3 = -M_c = 72.39$ kNm, $V_3 = -V_c = -762.97$ kN

$N_4 = -N_d = -762.97$ kN, $M_4 = -(M_d + (V_d - N_d \cdot \tan(\alpha)) \cdot t_{fc}/2) = -100.00$ kNm, $V_4 = V_d = 240.56$ kN

Abmessungen des Knotenfelds: $l_b = 257.0$ mm, $l_t = 258.0$ mm, $l_l = 478.9$ mm, $l_r = 501.4$ mm

Knotenkräfte am Schubfeld:

$F_{b4} = -580.94$ kN, $F_{t4} = -182.03$ kN, $V_4 = 240.56$ kN

$F_{r3} = 161.39$ kN, $F_{l3} = -401.95$ kN, $V_{b3} = -762.97$ kN

Schnittgrößen der Randsteifen:

$N_b = -580.94$ kN, $N_t = -182.73$ kN, $N_l = -401.95$ kN, $N_r = 177.31$ kN

Schubfeldkräfte:

$T_b = 182.03$ kN, $T_t = 182.73$ kN, $T_l = 401.95$ kN, $T_r = 417.88$ kN

Abmessungen des Schubfelds (am Anschnitt der Steifen):

$h_b = 244.0$ mm, $h_t = 244.9$ mm, $h_l = 465.9$ mm, $h_r = 488.3$ mm

Spannungen im Schubfeld:

$\tau_b = 93.3$ N/mm², $\tau_t = 93.3$ N/mm², $\tau_l = 107.9$ N/mm², $\tau_r = 107.0$ N/mm²

Nachweis des Schubfelds:

$\max \tau_{Ed} = 107.9$ N/mm² < $\tau_{Rd} = 135.7$ N/mm² $\Rightarrow U = 0.795 < 1$ ok

Trägersteg als ideales Schubfeld

Schnittgrößen am Schubfeld (Statik-Vorzeichen):

$N_4 = -N_d = -762.97$ kN, $M_4 = -(M_d + V_d \cdot t_{fc}/2) = -100.00$ kNm, $V_4 = V_d = 240.56$ kN

$N_5 = -N_{v,d} = -781.04$ kN, $M_5 = -M_{v,d} = -100.00$ kNm, $V_5 = V_{v,d} = 173.15$ kN

Abmessungen des Knotenfelds: $l_b = 584.9$ mm, $l_t = 486.0$ mm, $l_l = 512.6$ mm, $l_r = 257.0$ mm

Knotenkräfte am Schubfeld:

$F_{b4} = -576.56$ kN, $F_{t4} = -186.41$ kN, $F_{b5} = -779.62$ kN, $F_{t5} = -1.41$ kN

Schnittgrößen der Randsteifen:

$N_b = 194.46$ kN, $N_t = -185.71$ kN, $N_l = 349.19$ kN, $N_r = -363.54$ kN

Schubfeldkräfte:

$T_b = -194.46$ kN, $T_t = -185.71$ kN, $T_l = -108.62$ kN, $T_r = -190.39$ kN

Abmessungen des Schubfelds (am Anschnitt der Steifen):

$h_b = 577.4$ mm, $h_t = 479.4$ mm, $h_l = 487.9$ mm, $h_r = 244.0$ mm

Spannungen im Schubfeld:

$\tau_b = 42.1$ N/mm², $\tau_t = 48.4$ N/mm², $\tau_l = 27.8$ N/mm², $\tau_r = 97.5$ N/mm²

Nachweis des Schubfelds:

$$\max \tau_{Ed} = 97.5 \text{ N/mm}^2 < \tau_{Rd} = 135.7 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U = 0.719 < 1 \text{ ok}$$

2.4.5. Beulnachweis

Stütze

Anforderungen an die Steifen: s. Nachweis der Stegsteifen

Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ zul. Q-Klasse 3

Plattenbeulen: Q-Klasse des Profils $1 \leq 3$ ok

Schubbeulen: $h_p/t_p = 30.50 \leq 72/(\eta \cdot \epsilon) = 60.00$, $h_p = 244.0 \text{ mm}$, $t_p = 8.0 \text{ mm}$ ok

Träger

Anforderungen an die Steifen: s. Nachweis der Stegsteifen

Nachweisverfahren 'Elastisch-Elastisch' $\Rightarrow$ zul. Q-Klasse 3

Plattenbeulen: Q-Klasse des Profils $4 > 3 \Rightarrow$ genauer Nachweis erforderlich !!

Schubbeulen: $h_p/t_p = 60.99 > 72/(\eta \cdot \epsilon) = 60.00$, $h_p = 487.9 \text{ mm}$, $t_p = 8.0 \text{ mm} \Rightarrow$ genauer Nachweis erforderlich !!

Verfahren der wirksamen Querschnittsflächen

Annahme: Schubverzerrungen können vernachlässigt werden.

Plattenbeulen

Flansch unten:

Druckblech: $a = 576.0 \text{ mm}$, $b = 136.0 \text{ mm}$, $t = 15.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 106.8 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 106.8 \text{ N/mm}^2$

einseitig gestütztes Blechfeld: Spannungsverhältnis $\Psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1.000 \Rightarrow$ Beulwert $k_\sigma = 0.43$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 997.4 \text{ N/mm}^2$ mit $\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1-\mu) \cdot b^2) = 2312.3 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.485$

Abminderungsfaktor für $\lambda_p < 0.748$: $\rho = 1$

wirksame Breite $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 136.0 \text{ mm}$

Flansch oben:

Druckblech: $a = 576.0 \text{ mm}$, $b = 136.0 \text{ mm}$, $t = 13.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 18.9 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 18.9 \text{ N/mm}^2$

einseitig gestütztes Blechfeld: Spannungsverhältnis $\Psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1.000 \Rightarrow$ Beulwert $k_\sigma = 0.43$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 753.8 \text{ N/mm}^2$ mit $\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1-\mu) \cdot b^2) = 1747.5 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.558$

Abminderungsfaktor für $\lambda_p < 0.748$: $\rho = 1$

wirksame Breite $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 136.0 \text{ mm}$

Steg:

Druckblech: $a = 576.0 \text{ mm}$, $b = 487.9 \text{ mm}$, $t = 8.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 107.8 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 20.2 \text{ N/mm}^2$

zweiseitig gestütztes Blechfeld: Spannungsverhältnis $\Psi = \sigma_2/\sigma_1 = 0.188 \Rightarrow$ Beulwert $k_\sigma = 6.63$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 338.1 \text{ N/mm}^2$ mit $\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1-\mu) \cdot b^2) = 51.0 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.834$

Abminderungsfaktor für $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \Psi)^{1/2} = 0.773$: $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \Psi)) / \lambda_p^2 = 0.947 \leq 1$

wirksame Breite $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 462.2 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 192.1 \text{ mm}$, $b_{e2} = 270.1 \text{ mm}$)

flanschinduziertes Stegbeulen:

$h_w/t_w = 60.99 < (k \cdot E) / (f_y \cdot (A_w/A_{fc})^{1/2}) = 262.12$ ok mit $k = 0.30$ für Q-Klasse 4,

$h_w = 487.9 \text{ mm}$, $A_w = 39.03 \text{ cm}^2$, $A_{fc} = 40.83 \text{ cm}^2$

Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:

Schwerpunkt Abstand von oben $z_{s,eff} = 268.4 \text{ mm}$

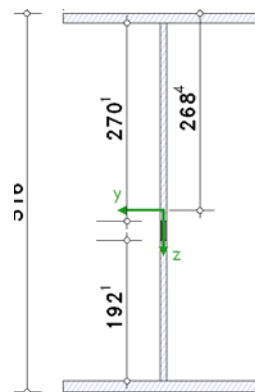
Querschnittsfläche $A_{eff} = 113.30 \text{ cm}^2$

Flächenträgheitsmoment $I_{y,eff} = 55661.10 \text{ cm}^4$

elastisches Widerstandsmoment $W_{y,eff} = 2248.73 \text{ cm}^3$

Traglasten $N_{Rd} = (f_y \cdot A_{eff}) / \gamma_{M0} = 2662.49 \text{ kN}$

$M_{Rd} = (f_y \cdot W_{y,eff}) / \gamma_{M0} = 528.45 \text{ kNm}$



Nachweis: $N_{Ed}/N_{Rd} + M_{Ed}/M_{Rd} = 0.287 + 0.189 = 0.476 < 1$ ok

Schubbeulen

Beitrag des Stags:

Schubbeulwert für $a/h_w = 1.18 > 1$: $k_\tau = 5.34 + 4/(a/h_w)^2 = 8.21$, $a = 576.0 \text{ mm}$, $h_w = 487.9 \text{ mm}$

kritische Schubbeulspannung $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 418.9 \text{ N/mm}^2$ mit $\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1-\mu) \cdot b^2) = 51.0 \text{ N/mm}^2$

modifizierte Schlankheit $\lambda_w = 0.76 \cdot (f_{yw}/\tau_{cr,p}) = 0.569$, $f_{yw} = 235.0 \text{ N/mm}^2$

Abminderungsfaktor für $\lambda_w < 0.83/\eta = 0.692$: $\chi_w = 1.200 = \eta$

Beanspruchbarkeit $V_{bw,Rd} = (\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 577.72 \text{ kN}$

Beitrag der Flansche:

aufnehmbares Moment alleine der eff. Flächen der Flansche $M_{f,Rd} = M_{f,k}/\gamma_{M0} = 430.99 \text{ kNm}$

mit $M_{f,k} = \min(A_{f1}, A_{f2}) \cdot (h_w + (t_{f1} + t_{f2})/2) \cdot f_y = 430.99 \text{ kNm}$, $A_{f1} = b_{f1} \cdot t_{f1} = 36.54 \text{ cm}^2$, $A_{f2} = b_{f2} \cdot t_{f2} = 42.03 \text{ cm}^2$

$N_{Ed} > 0$: $f_{N,f} = 1 - N_{Ed}/((A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_y/\gamma_{M0}) = 0.587 < 1 \Rightarrow M_{f,Rd} = M_{f,Rd} \cdot f_{N,f} = 252.90 \text{ kNm}$

$M_{Ed} = 100.00 \text{ kNm} < M_{f,Rd} = 252.90 \text{ kNm}$:

Flansch 1: $t_f = 13.0 \text{ mm}$, $b_f = 280.0 \text{ mm} \leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \epsilon = 399.5 \text{ mm}$, $a = 576.0 \text{ mm}$

$c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_{yw})) = 167.1 \text{ mm}$

Flansch 2: $t_f = 15.0 \text{ mm}$, $b_f = 280.0 \text{ mm} \leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \epsilon = 458.3 \text{ mm}$, $a = 576.0 \text{ mm}$

$c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_{yw})) = 174.5 \text{ mm}$

Beanspruchbarkeit $V_{bf,Rd} = (b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}) / (c \cdot \gamma_{M1}) \cdot (1 - (M_{Ed}/M_{f,Rd})^2) = 51.43 \text{ kN}$ (Flansch 1 maßgeb.)
Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 629.2 \text{ kN} > \lim V_{b,Rd} \Rightarrow V_{b,Rd} = 577.7 \text{ kN}$
mit $\lim V_{b,Rd} = (\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 577.72 \text{ kN}$
Nachweis: $V_{Ed}/V_{b,Rd} = 0.416 < 1$ **ok**
Interaktion nicht erforderlich, da Ausnutzung aus Schubbeulen des Stegs $\eta_3 = V_{Ed}/V_{bw,Rd} = 0.416 \leq 0.5$

2.4.6. Nachweisergebnis

Maximale Ausnutzung: $\max U = 0.928 < 1$ **ok**

3. Endergebnis

Maximale Ausnutzung: $\max U = 0.928 < 1$ **ok**

Nachweis erbracht