

Sonderprobleme nach Eurocode 3

EC 3-1-5 (12.10), NA: Deutschland

Stahlsorte

Stahlgüte S 355

Querschnitt

Träger: Profilparameter (I-Profil):

$h = 3080.0 \text{ mm}$, $t_w = 15.0 \text{ mm}$, $b_f = 800.0 \text{ mm}$, $t_f = 40.0 \text{ mm}$

Längssteifen: Anzahl $n_{st} = 1$

Profilparameter (Flachstahl):

$h = 250.0 \text{ mm}$, $t = 25.0 \text{ mm}$

Abstand der Steife von Oberkante Träger $d_{st,0} = 2540.0 \text{ mm}$

Parameter

Länge des Beulfelds $a = 300.0 \text{ cm}$

Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

Anordnung einer starren Auflagersteife

Nachweis am Zwischenaufleger

Beulwerte nach EC 3-1-5 berechnen

effektive Querschnittswerte: A_{eff} allein aus Druck-, W_{eff} allein aus Biegebeanspruchung

Stabilitätsnachweis nach EC 3-1-1, 6.3

Belastung

Schnittgrößen bezogen auf den versteiften Querschnitt:

Lk 1: Platten- + Schubbeulen (Kap. 5.1.1-4)

$N_{Ed} = -4000.0 \text{ kN}$ $M_{Ed} = -33760.0 \text{ kNm}$ $V_{Ed} = 3437.5 \text{ kN}$

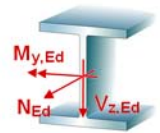
Lk 2: M-N-V-Interaktion (Kap. 5.1.5)

$N_{Ed} = -4000.0 \text{ kN}$ $M_{Ed} = -32150.0 \text{ kNm}$ $V_{Ed} = 3288.0 \text{ kN}$

Materialsicherheitsbeiwerte

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

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



Beulnachweise

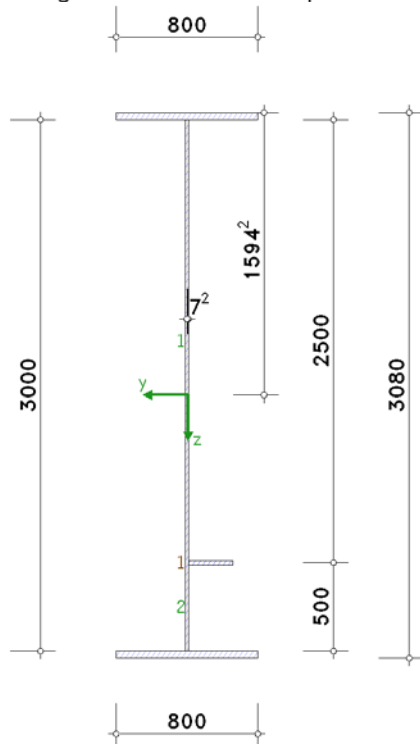
Voraussetzung: Flanschinduziertes Stegbeulen ist ausgeschlossen.

Voraussetzung: Lokales Beulen der Steifen ist ausgeschlossen.

Voraussetzung: Rotationsfähigkeit der Steifen zur Spannungsumlagerung ist ausreichend.

Voraussetzung: Das Blechfeld ist starr gelagert.

Die Voraussetzungen werden nicht überprüft !!



Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

EC 3-Konvention, Druckspannungen positiv

Schubverzerrungen werden vernachlässigt.

Querschnittswerte: $A = 1152.50 \text{ cm}^2$, $z_s = 1594.2 \text{ mm}$, $I_y = 18753552.18 \text{ cm}^4$, $y_s = 7.2 \text{ mm}$, $I_z = 355050.53 \text{ cm}^4$ Extremale Querschnittsspannungen: $\sigma_o = -252.3 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_u = 302.2 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 76.4 \text{ N/mm}^2$ Querschnittsklasse: 4 $\Rightarrow$ Nachweis für Plattenbeulen erforderlich !!**Plattenbeulen**Effektive Querschnittsfläche für $N_{Ed} = 4000.0 \text{ kN}$, $M_{Ed} = 0$

Flansch oben:

Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$ wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Flansch unten:

Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$ wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Steg:

Einzelfeld 1:

Querschnittsklasse 4 für $34.17 < c/t = 165.83$ kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 27.6 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_E = 6.9 \text{ N/mm}^2$, $k_\sigma = 4.00$ Beulslankheitsgrad $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 3.586$ Abminderungsfaktor $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_p^2 = 0.262 \leq 1$ für $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$, $\psi = 1.000$ wirksame Breite $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 651.1 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 325.6 \text{ mm}$, $b_{e2} = 325.6 \text{ mm}$)

Einzelfeld 2:

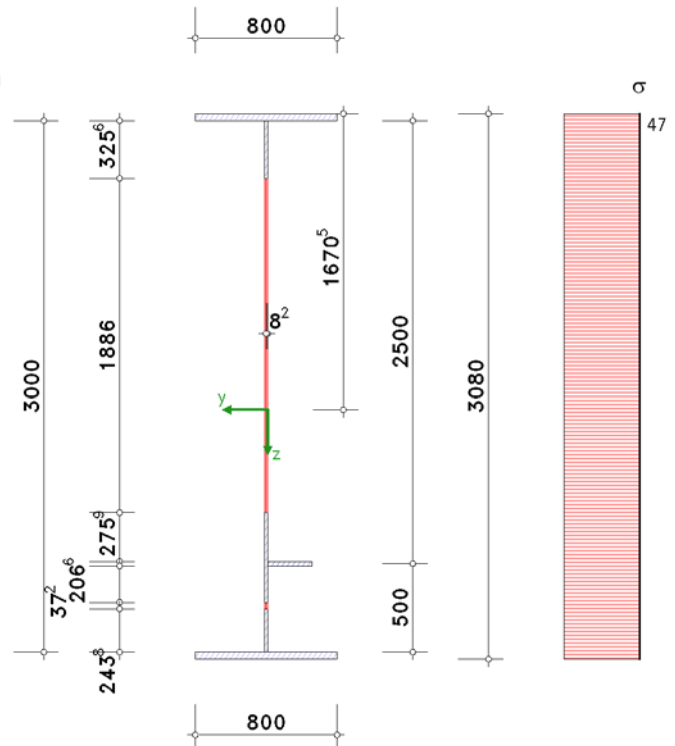
Querschnittsklasse 3 für $30.92 < c/t = 32.50 < 34.17$ wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 487.5 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 243.8 \text{ mm}$, $b_{e2} = 243.8 \text{ mm}$)

Gesamtfeld, Steife 1:

EC 3-1-5, Anhang A.2.2 (Ersatzstab mit elastischer Bettung):

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,p,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 958.8 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.000$, $\sigma_{cr,p,sl} = 958.8 \text{ N/mm}^2$ Beulslankheitsgrad $\lambda_p = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.440$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$ Abminderungsfaktor $\rho = 1$ für $\lambda_p < 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$, $\psi = 1.000$ kritische Beulspannung $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 947.1 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.000$, $\sigma_{cr,c,sl} = 947.1 \text{ N/mm}^2$ Beulslankheitsgrad $\lambda_c = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,c})^{1/2} = 0.443$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$ Abminderungsfaktor $\chi_c = 0.844 \leq 1$ für $\lambda_c > 0.2$ endgültiger Abminderungsfaktor $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.848$ mit $\xi = 0.012$ wirksame Breiten der angrenzenden Beulfelder $b_{1,e2,eff} = \rho \cdot b_{1,c,eff} = 275.9 \text{ mm}$, $b_{2,e1,eff} = \rho \cdot b_{2,c,eff} = 206.6 \text{ mm}$ wirksame Fläche der Steife $A_{sl,eff} = \rho \cdot A_{sl} = 52.97 \text{ cm}^2$

Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:

Abstand des Schwerpunkts von oben $z_{s,eff} = 1670.5 \text{ mm}$ Differenzmoment aus $\Delta z_s = 76.3 \text{ mm}$: $\Delta M_{Ed} = 305.22 \text{ kNm}$ Querschnittsfläche $A_{eff} = 854.49 \text{ cm}^2$ Traglasten $N_{Rd} = (f_y \cdot A_{eff}) / \gamma_{M1} = 27576.68 \text{ kN}$ Effektives Widerstandsmoment für $M_{Ed} = 33760.0 \text{ kNm}$, $N_{Ed} = 0$

Flansch oben:

wirksame Breite $b_{t,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Flansch unten:

Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$ wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Steg:

Einzelfeld 1:

Querschnittsklasse 3 für $\alpha = 0.375$ und $90.00 < c/t = 165.83 < 173.51$

wirksame Breite $b_{c,eff} = (\rho \cdot b) / (1 - \psi) = 933.3 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 373.3 \text{ mm}$, $b_{e2} = 560.0 \text{ mm}$), $b_{t,eff} = 1554.2 \text{ mm}$, $\psi = -1.665$

Einzelfeld 2:

Querschnittsklasse 3 für $30.92 < c/t = 32.50 < 38.50$

wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 487.5 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 224.8 \text{ mm}$, $b_{e2} = 262.7 \text{ mm}$)

Gesamtfeld, Steife 1:

EC 3-1-5, Anhang A.2.2 (Ersatzstab mit elastischer Bettung):

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,p,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 2210.9 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.529$, $\sigma_{cr,p,sl} = 1446.3 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.401$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 1.000$

Abminderungsfaktor $\rho = 1$ für $\lambda_p < 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.880$, $\psi = -1.075$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 2178.6 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.529$, $\sigma_{cr,c,sl} = 1425.2 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_c = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,c})^{1/2} = 0.404$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 1.000$

Abminderungsfaktor $\chi_c = 0.878 \leq 1$ für $\lambda_c > 0.2$

endgültiger Abminderungsfaktor $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.882$ mit $\xi = 0.015$

wirksame Breiten der angrenzenden Beulfelder $b_{1,e2,eff} = \rho \cdot b_{1,c,eff} = 329.2 \text{ mm}$, $b_{2,e1,eff} = \rho \cdot b_{2,c,eff} = 231.7 \text{ mm}$

wirksame Fläche der Steife $A_{sl,eff} = \rho \cdot A_{st} = 55.12 \text{ cm}^2$

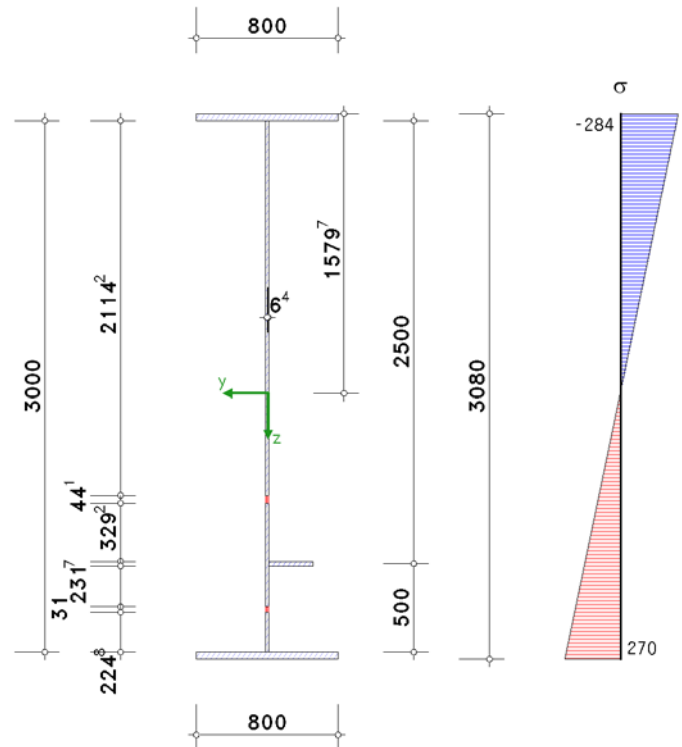
Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:

Abstand des Schwerpunkts von oben $z_{s,eff} = 1579.7 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmoment $I_{y,eff} = 18595061.34 \text{ cm}^4$

Widerstandsmoment $W_{y,eff} = 125619.21 \text{ cm}^3$

Traglasten $M_{Rd} = (f_y \cdot W_{eff}) / \gamma_{M1} = 40540.74 \text{ kNm}$



Nachweis (M-N-Interaktion)

Einwirkendes Moment $M_{Ed}' = M_{Ed} - \Delta M_{Ed} = 33454.78 \text{ kNm}$

$I_{Ed} / N_{Rd} + I_{MEd}' / M_{Rd,u} = 0.145 + 0.825 = 0.970 < 1$ **ok.**

Schubbeulen

Einzelfeld 1:

Schubbeulen: $h_w / t_w = 166.67 > 72 \cdot \epsilon / \eta = 48.82 \Rightarrow$ genauer Nachweis erforderlich !!

Schubbeulwert für $a/h_w = 1.20 > 1$: $k_\tau = 5.34 + 4 / (a/h_w)^2 = 8.12$

kritische Schubbeulspannung $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 55.5 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_E = 6.8 \text{ N/mm}^2$

modifizierte Schlankheit $\lambda_w = 0.76 \cdot (f_y / \tau_{cr,p}) = 1.923$

Abminderungsfaktor $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.522$ für $\lambda_w \geq 1.08$

Beanspruchbarkeit $V_{bw,Rd} = (\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 4379.87 \text{ kN}$

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = 4379.9 \text{ kN}$

Einzelfeld 2:

Schubbeulen: $h_w / t_w = 33.33 \leq 72 \cdot \epsilon / \eta = 48.82$ **ok.**

Gesamtfeld:

Schubbeulen: $h_w / t_w = 200.00 > 31 \cdot \epsilon \cdot k_\tau^{1/2} / \eta = 85.14$, $k_\tau = 16.41 \Rightarrow$ genauer Nachweis erforderlich !!

Beitrag der Flansche:

aufnehmbares Moment $M_{f,Rd} = f_{N,f} \cdot M_{f,k} / \gamma_{M0} = 28454.4 \text{ kNm}$, $M_{f,k} = 34534.4 \text{ kNm}$, $f_{N,f} = 0.82$

$M_{Ed} \geq M_{f,Rd}$: Flansche voll ausgenutzt, Beanspruchbarkeit $V_{bf,Rd} = 0$

Beitrag des Stegs:

Schubbeulwert für $a/h_w = 1.00 < 3$: $k_\tau = 4.1 + (6.3 + 0.18 \cdot |s| / (h_w \cdot t_w^3)) / (a/h_w)^2 + 2.2 \cdot (|s| / (h_w \cdot t_w^3))^{1/3} = 16.41$

kritische Schubbeulspannung $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 77.9 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_E = 4.7 \text{ N/mm}^2$

modifizierte Schlankheit $\lambda_w = 0.76 \cdot (f_y / \tau_{cr,p}) = 1.623$

Abminderungsfaktor $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.590$ für $\lambda_w \geq 1.08$

Beanspruchbarkeit $V_{bw,Rd} = (\gamma_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 4945.45 \text{ kN}$
 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = 4945.4 \text{ kN}$
 Traglasten $V_{b,Rd,min} = 4379.9 \text{ kN}$, $V_{bw,Rd,min} = 4379.9 \text{ kN}$
 Nachweis: $V_{Ed}/V_{b,Rd,min} = 0.785 < 1$ **ok.**

Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

Ausnutzung aus Schubbeulen des Stegs $\eta_3 = V_{Ed}/V_{bw,Rd,min} = 0.785 > 0.5$
 Ausnutzung aus Plattenbeulen $\eta_1 = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 0.696 > \eta_{1,lim} = M_{f,Rd}/M_{pl,Rd} = 0.587$
 mit $M_{pl,Rd} = 48493.1 \text{ kNm}$, $M_{f,Rd} = 28454.4 \text{ kNm}$
 Nachweis: $\eta_1 + (1 - \eta_{1,lim}) \cdot (2 \cdot \eta_3 - 1)^2 = 0.830 < 1$ **ok.**

Gesamtausnutzung: $U = 0.970 < 1$ **ok.**

Lk 2: M-N-V-Interaktion (Kap. 5.1.5)

Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

EC 3-Konvention, Druckspannungen positiv

Schubverzerrungen werden vernachlässigt.

Querschnittswerte: $A = 1152.50 \text{ cm}^2$, $z_s = 1594.2 \text{ mm}$, $I_y = 18753552.18 \text{ cm}^4$, $y_s = 7.2 \text{ mm}$, $I_z = 355050.53 \text{ cm}^4$

Extremale Querschnittsspannungen: $\sigma_o = -238.6 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_u = 289.4 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 73.1 \text{ N/mm}^2$

Querschnittsklasse: 4 $\Rightarrow$ Nachweis für Plattenbeulen erforderlich !!

Plattenbeulen

Effektive Querschnittsfläche für $N_{Ed} = 4000.0 \text{ kN}$, $M_{Ed} = 0$

Flansch oben:

Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$

wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Flansch unten:

Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$

wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$

Steg:

Einzelfeld 1:

Querschnittsklasse 4 für $34.17 < c/t = 165.83$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 27.6 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_E = 6.9 \text{ N/mm}^2$, $k_\sigma = 4.00$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 3.586$

Abminderungsfaktor $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_p^2 = 0.262 \leq 1$ für $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$, $\psi = 1.000$

wirksame Breite $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 651.1 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 325.6 \text{ mm}$, $b_{e2} = 325.6 \text{ mm}$)

Einzelfeld 2:

Querschnittsklasse 3 für $30.92 < c/t = 32.50 < 34.17$

wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 487.5 \text{ mm}$ ($b_{e1} = 243.8 \text{ mm}$, $b_{e2} = 243.8 \text{ mm}$)

Gesamtfeld, Steife 1:

EC 3-1-5, Anhang A.2.2 (Ersatzstab mit elastischer Bettung):

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,p,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 958.8 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.000$, $\sigma_{cr,p,sl} = 958.8 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_p = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.440$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$

Abminderungsfaktor $\rho = 1$ für $\lambda_p < 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$, $\psi = 1.000$

kritische Beulspannung $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 947.1 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_1 / \sigma_{sl} = 1.000$, $\sigma_{cr,c,sl} = 947.1 \text{ N/mm}^2$

Beulschlankheitsgrad $\lambda_c = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,c})^{1/2} = 0.443$, $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$

Abminderungsfaktor $\chi_c = 0.844 \leq 1$ für $\lambda_c > 0.2$

endgültiger Abminderungsfaktor $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.848$ mit $\xi = 0.012$

wirksame Breiten der angrenzenden Beulfelder $b_{1,e2,eff} = \rho \cdot b_{1,c,eff} = 275.9 \text{ mm}$, $b_{2,e1,eff} = \rho \cdot b_{2,c,eff} = 206.6 \text{ mm}$

wirksame Fläche der Steife $A_{sl,eff} = \rho \cdot A_{sl} = 52.97 \text{ cm}^2$

Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:

Abstand des Schwerpunkts von oben $z_{s,eff} = 1670.5 \text{ mm}$

Differenzmoment aus $\Delta z_s = 76.3 \text{ mm}$: $\Delta M_{Ed} = 305.22 \text{ kNm}$

Querschnittsfläche $A_{eff} = 854.49 \text{ cm}^2$

Traglasten $N_{Rd} = (f_y \cdot A_{eff}) / \gamma_{M1} = 27576.68 \text{ kN}$

Endergebnis

Maximale Ausnutzung [Lk 1]: $\max U = 0.970 < 1$ **ok.**

Nachweise erbracht

Vorschriften

DIN EN 1990, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung;
Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Ausgabe Dezember 2010
DIN EN 1990/NA, Nationaler Anhang zur DIN EN 1990, Ausgabe Dezember 2010

DIN EN 1993-1-1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten -
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau;
Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, Ausgabe Dezember 2010
DIN EN 1993-1-1/NA, Nationaler Anhang zur DIN EN 1993-1-1, Ausgabe Dezember 2010

DIN EN 1993-1-5, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten -
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile;
Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009, Ausgabe Dezember 2010
DIN EN 1993-1-5/NA, Nationaler Anhang zur DIN EN 1993-1-5, Ausgabe Dezember 2010