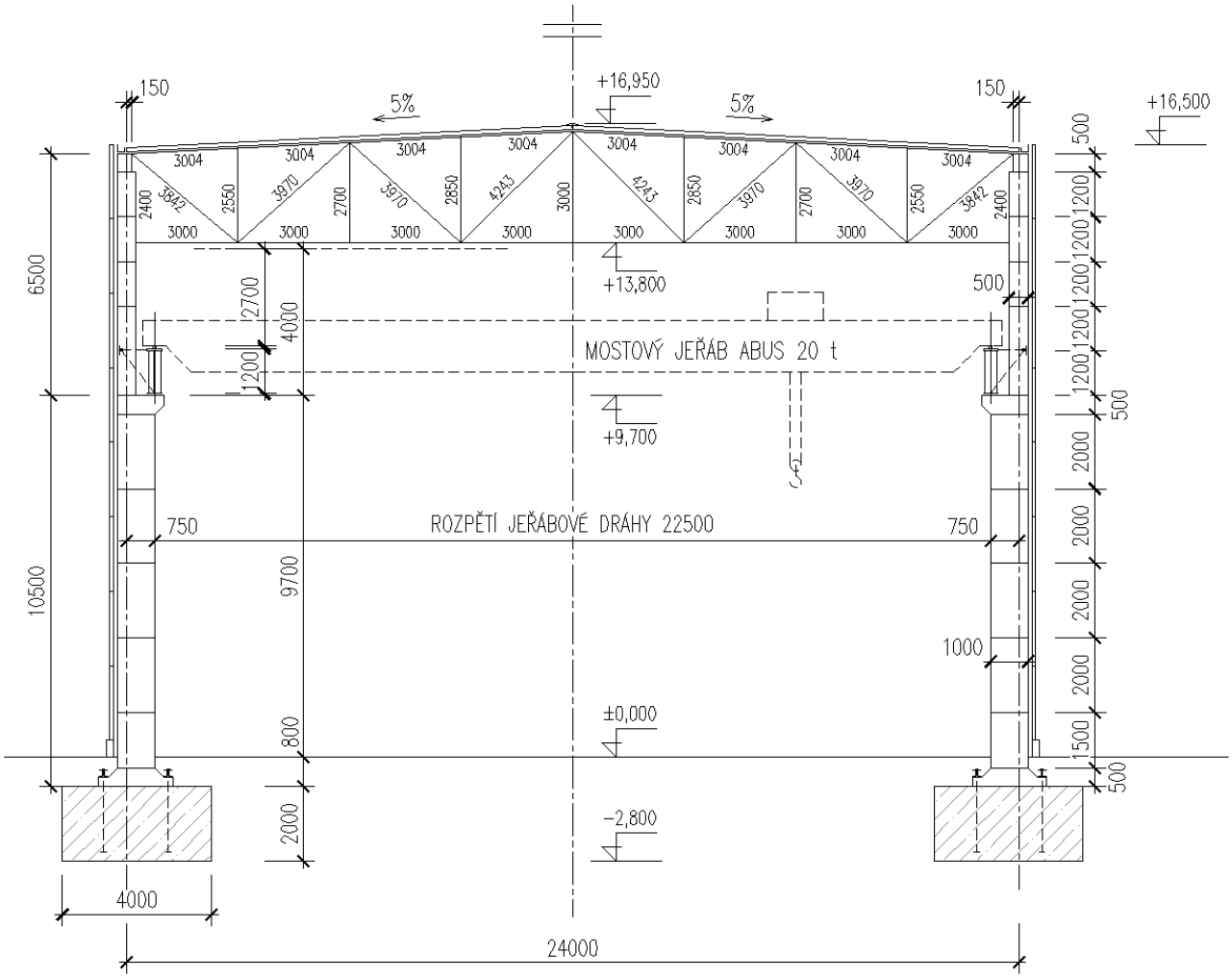
POSOUZENÍ PLNOSTĚNNÉHO SLOUPU

… řešený příklad pro BO004

Proveďte posouzení sloupu příčné vazby jednolodní haly, sloup je navržen jako plnostěnný. Posouzení proveďte na kombinaci namáhání normálovou tlakovou silou a ohybovým momentem na tuhou osu.



Vzpěrné délky dříku sloupu

Vzpěrná délka při vybočení v rovině příčné vazby

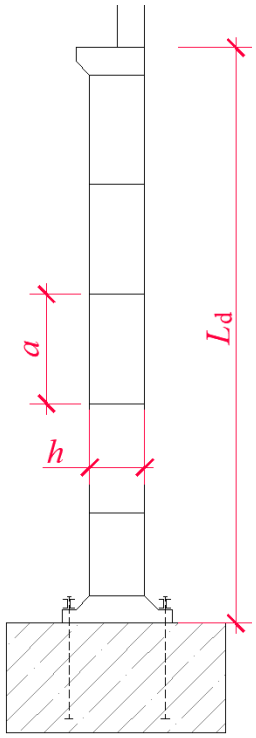
$$L_{cr,y} \approx 2{,}5 \cdot L_D = 2{,}5 \cdot 10500 = 26250 \text{ mm}$$

Vzpěrná délka při vybočení z roviny příčné vazby

$$L_{cr,z} = L_D = 10500 \text{ mm}$$

Poznámka:
Některé postupy použité níže jsou zjednodušené nebo je lze použít pouze ve specifických případech. Tyto podklady lze použít pouze v kombinaci s podrobným výkladem poskytnutým ve cvičení.

Vstupní hodnoty



Návrhová osová tlaková síla v patě sloupu

$N_{Ed} = 800\ \text{kN}$

Návrhový ohybový moment v patě sloupu od vnějšího zatížení

$M_{Ed,y} = 2200\ \text{kNm}$

Návrhová posouvající síla v patě sloupu od vnějšího zatížení

$V_{Ed,z} = 250\ \text{kN}$

Konstrukční ocel S355

$f_y = 355\ \text{MPa}$

Geometrické uspořádání dříku sloupu

Výška průřezu

$h = 1000\ \text{mm}$

Výška stojiny

$h_w = 940\ \text{mm}$

Šířka pásnice

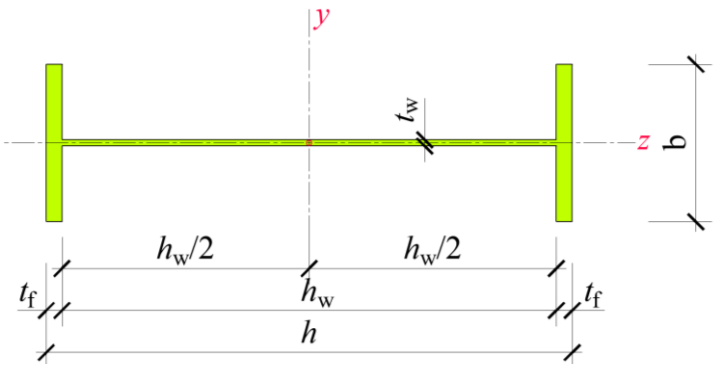
$b = 300\ \text{mm}$

Tloušťka pásnice

$t_f = 30\ \text{mm}$

Tloušťka stojiny

$t_w = 12\ \text{mm}$



Průřezové charakteristiky dříku sloupu

$A = 29280\ \text{mm}^2$	průřezová plocha
$I_y = 5{,}066.10^9\ \text{mm}^4$	moment setrvačnosti k ose *y*
$I_z = 1{,}35.10^8\ \text{mm}^4$	moment setrvačnosti k ose *z*
$W_{el,y} = 10{,}13.10^6\ \text{mm}^3$	pružný průřezový modul k ose *y*
$W_{el,z} = 9{,}00.10^5\ \text{mm}^3$	pružný průřezový modul k ose *z*
$I_t = 5{,}62.10^6\ \text{mm}^4$	moment setrvačnosti v prostém kroucení
$I_\omega = 3{,}13.10^{13}\ \text{mm}^6$	výsečový moment setrvačnosti

ZATŘÍDĚNÍ PRŮŘEZU

Stojina

Stojina je v tlaku a ohybu

Normálová napětí v extrémních vláknech stojiny

$$\sigma_1 = -\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{A} - \frac{M_{\mathrm{Ed,y}}}{I_{\mathrm{y}}} \cdot h_{\mathrm{w}}/2 = -\frac{800.10^3}{29280} - \frac{2200.10^6}{5{,}066.10^9} \cdot 940/2 = -27{,}3 - 204{,}1 = -231\,\mathrm{MPa}$$

$$\sigma_2 = -\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{A} + \frac{M_{\mathrm{Ed,y}}}{I_{\mathrm{y}}} \cdot h_{\mathrm{w}}/2 = -\frac{800.10^3}{29280} + \frac{2200.10^6}{5{,}066.10^9} \cdot 940/2 = -27{,}3 + 204{,}1 = +178\,\mathrm{MPa}$$

Poměr napětí

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{178}{-231} = -0{,}77$$

$$\frac{h_{\mathrm{w}}}{t_{\mathrm{w}}} = \frac{940}{12} = 78{,}3 \quad \leq \quad \frac{42 \cdot \varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33 \cdot \psi} = \frac{42 \cdot 0{,}81}{0{,}67 + 0{,}33 \cdot -0{,}77} = 81{,}8$$ => *třída 3*

Pásnice

Pásnice je v tlaku

$$\frac{c}{t} = \frac{(b - t_{\mathrm{w}})/2}{t_{\mathrm{f}}} = \frac{144}{30} = 4{,}8 \quad \leq \quad 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0{,}81 = 7{,}29$$ => *třída 1*

Celý průřez

=> *třída 3*

POSOUZENÍ NA PROSTOU PEVNOST

(Provádí se pouze za účelem předběžného návrhu)

Podmínka spolehlivosti

$$\boxed{\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{C,Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{Ed,y}}}{M_{\mathrm{C,Rd}}} \leq 1{,}0}$$

Únosnost v prostém tlaku

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{A \cdot f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{29\,280 \cdot 355}{1{,}0} = 10\,394.10^{3}\ \mathrm{N} = 10\,394\ \mathrm{kN}$$

Únosnost v prostém ohybu

$$M_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{W_{\mathrm{el,y}} \cdot f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{10{,}13.10^{6} \cdot 355}{1{,}0} = 3597.10^{6}\ \mathrm{Nmm} = 3597\ \mathrm{kNm}$$

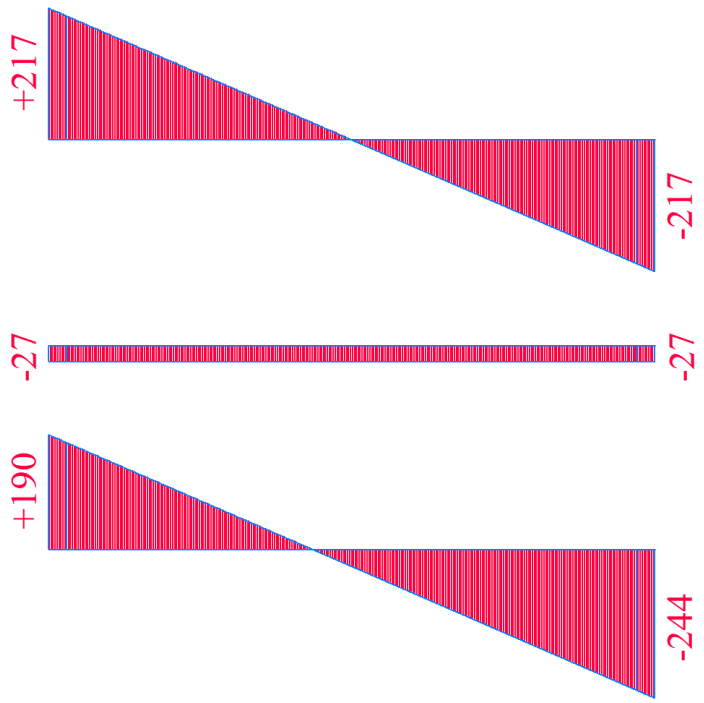
Jednotkový posudek

$$\frac{800}{10394} + \frac{2200}{3597} = 0{,}69 \quad \leq \quad 1{,}0$$

=> vyhovuje

(ale rezerva je příliš malá, uvidíme dále…)

Poznámka:
Jednotkový posudek posouzení na prostou pevnost musí vyjít se stejnou hodnotou jako je podíl normálového napětí v extrémních vláknech průřezu a meze kluzu použité oceli. V našem případě 244 / 355 = 0,69.



POSOUZENÍ NA INTERAKCI VZPĚRU A KLOPENÍ

Podmínky spolehlivosti

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 29\,280 \cdot 355 = 10\,394.10^6 \text{ Nm} = 10\,394 \text{ kNm}$$

$$M_{Rk,y} = W_{el,y} \cdot f_y = 10{,}13.10^6 \cdot 355 = 3596.10^6 \text{ Nm} = 3596 \text{ kNm}$$

$$\Delta M_{Ed} = 0 \text{ kNm}$$

Vybočení v rovině příčné vazby

Kritická síla

$$N_{cr,y} = \pi^2 \cdot \frac{EI_y}{L_{cr,y}^2} = \pi^2 \cdot \frac{210.10^3 \cdot 5{,}066.10^9}{26\,250^2} = 15\,238.10^3 \text{ N} = 15\,238 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{29280 \cdot 355}{15\,238.10^3}} = 0{,}826$$

Bezrozměrný parametr (křivka vzpěrné pevnosti b)

$$\Phi_y = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_y^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}34 \cdot \left(0{,}826 - 0{,}2\right) + 0{,}826^2\right] = 0{,}948$$

Součinitel vzpěrnosti

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0{,}948 + \sqrt{0{,}948^2 - 0{,}826^2}} = 0{,}707$$

Vybočení z roviny příčné vazby

Kritická síla

$$N_{cr,z} = \pi^2 \cdot \frac{EI_z}{L_{cr,z}^2} = \pi^2 \cdot \frac{210.10^3 \cdot 1{,}35.10^8}{10\,500^2} = 2538.10^3 \text{ N} = 2538 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{29280 \cdot 355}{2538.10^3}} = 2{,}02$$

Bezrozměrný parametr (křivka vzpěrné pevnosti c)

$$\Phi_z = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_z - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_z^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot \left(2{,}02 - 0{,}2\right) + 2{,}02^2\right] = 2{,}986$$

Součinitel vzpěrnosti

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{2{,}986 + \sqrt{2{,}986^2 - 2{,}02^2}} = 0{,}193$$

Klopení

Okrajové podmínky

$k_z = 1{,}0$ ($L_{cr,z} = L_D$) odpovídá konstrukčnímu návrhu ztužidel

$k_\omega = 0{,}5$ ($L_{cr,\omega} = 0{,}5 \cdot L_D$) deplanaci je bráněno v patě sloupu a v hlavici sloupu (konzola pro JD)

$C_1 \approx 1{,}5$

$C_2 \approx 0{,}5$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\kappa_{\omega t} = \frac{\pi}{k_\omega \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_\omega}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{0{,}5 \cdot 10500} \cdot \sqrt{\frac{210.10^3 \cdot 3{,}13.10^{13}}{81.10^3 \cdot 5{,}62.10^6}} = 2{,}274$$

Bezrozměrný parametr působiště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 500}{1{,}0 \cdot 10500} \cdot \sqrt{\frac{210.10^3 \cdot 1{,}35.10^8}{81.10^3 \cdot 5{,}62.10^6}} = 1{,}181$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1{,}0 \cdot 10500} \cdot \sqrt{\frac{210.10^3 \cdot 1{,}35.10^8}{81.10^3 \cdot 5{,}62.10^6}} = 0{,}000$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \cdot \sqrt{1 + \kappa_{\omega t}^2 + \left(C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j\right)^2} - \left(C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j\right) =$$

$$= \frac{1{,}5}{1{,}0} \cdot \sqrt{1 + 2{,}274^2 + \left(0{,}5 \cdot 1{,}181 - 0\right)^2} - \left(0{,}5 \cdot 1{,}181 - 0\right) = 3{,}240$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L} = 3{,}240 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{210.10^3 \cdot 1{,}35.10^8 \cdot 81.10^3 \cdot 5{,}62.10^6}}{10500} = 3483.10^6 \text{ Nmm} = 3483 \text{ kNm}$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{10{,}13.10^6 \cdot 355}{3483.10^6}} = 1{,}016$$

Bezrozměrný parametr (křivka vzpěrné pevnosti d)

$$\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}76 \cdot \left(1{,}016 - 0{,}2\right) + 1{,}016^2\right] = 1{,}326$$

Součinitel vzpěrnosti

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1{,}326 + \sqrt{1{,}326^2 - 1{,}016^2}} = 0{,}459$$

Interakční součinitelé

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0{,}05 \cdot \bar{\lambda}_z}{\left(C_{m,LT} - 0{,}25\right)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right] \geq \left[1 - \frac{0{,}05}{\left(C_{m,LT} - 0{,}25\right)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right] =$$

$$= \left[1 - \frac{0{,}05 \cdot 2{,}02}{\left(1{,}0 - 0{,}25\right)} \cdot \frac{800}{0{,}193 \cdot \frac{10394}{1{,}0}}\right] \geq \left[1 - \frac{0{,}05}{\left(1{,}0 - 0{,}25\right)} \cdot \frac{800}{0{,}193 \cdot \frac{10394}{1{,}0}}\right] = 0{,}946 \quad \geq \quad 0{,}973$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) =$$

$$= 1{,}0 \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot 0{,}826 \cdot \frac{800}{0{,}707 \cdot \frac{10394}{1{,}0}}\right) \leq 1{,}0 \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{800}{0{,}707 \cdot \frac{10394}{1{,}0}}\right) = 1{,}054 \quad \leq \quad 1{,}065$$

Jednotkové posudky

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} = \frac{800}{\frac{0{,}707 \cdot 10394}{1{,}0}} + 1{,}054 \cdot \frac{2200 + 0}{\frac{0{,}459 \cdot 3596}{1{,}0}} = 1{,}51 \quad \geq \quad 1{,}0$$

=> nevyhovuje

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} = \frac{800}{\frac{0{,}193 \cdot 10394}{1{,}0}} + 0{,}973 \cdot \frac{2200 + 0}{\frac{0{,}459 \cdot 3596}{1{,}0}} = 1{,}70 \quad \geq \quad 1{,}0$$

=> nevyhovuje