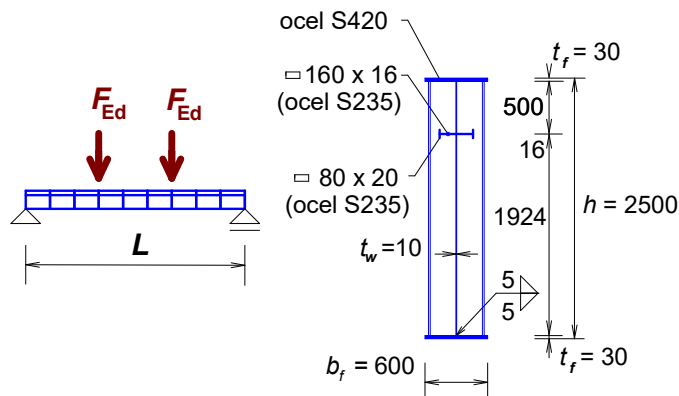


Stojina ohýbaného nosníku vyztužená příčnými výztuhami a jednou podélnou výztuhou (podle ČSN EN 1993-1-5/2008, resp. prEN 1993-1-5/2022)

Příklad

Posuďte MSÚ prostého nosníku se stojinou vyztuženou příčnými i podélnými výztuhami. Rozpětí nosníku $L = 35$ m, zatížení dvěma břemeny ve třetinách rozpětí. Příčné výztuhy jsou po $a = L/9 = 3889$ mm. Posuďte pouze únosnost momentovou, smykovou, jejich interakci a průřez podélné výztuhy.



Ocel S420M ($f_y = 420$ MPa)
(výztuhy stačí z oceli S235J0)
 $L = 35$ m
 $F_{Ed} = 1300$ kN

$\chi_{LT} = 0,75$
(způsob držení ani výpočet klopení
není neuváděn)

Obr. 1 Geometrie a zatížení nosníku.

1. Zatížení

Vlastní tíha a návrhové vnitřní síly:

$$g_d = \gamma_G A \gamma = 1,35 \cdot 0,0719 \cdot 78,5 = 7,62 \text{ kN/m (odhad)}$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} g_d L^2 + \frac{L F_{Ed}}{3} = \frac{1}{8} \cdot 7,62 \cdot 35^2 + \frac{35 \cdot 1300}{3} = 16333,3 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} g_d L + F_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot 7,62 \cdot 35 + 1300 = 1433,4 \text{ kN}$$

2. Klasifikace průřezu

Stranový rozměr svaru: $a\sqrt{2} = 5\sqrt{2} \approx 7$ mm.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{420}} = 0,75$$

Pásnice:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{300 - 5 - 7}{30} = 9,6 < 14\varepsilon = 14 \cdot 0,75 = 10,5 \text{ (třída 3)}$$

Stojina:

$$\frac{c}{t_w} = \frac{2500 - 2 \cdot (30 + 7)}{10} = 242,6 > 124\varepsilon = 124 \cdot 0,75 = 93 \text{ (třída 4)}$$

Podélná výztuha pro namáhání tlakem patří analogicky do třídy 1. Průřez jako celek patří do třídy 4 (patří ale do třídy 4 vždy, jakmile má podélné výztuhy).

Plocha jedné samotné výztuhy T:

$$A_{sl} = 80 \cdot 20 + 160 \cdot 16 = 4160 \text{ mm}^2$$

Moment setrvačnosti samotné výztuhy v prostém kroucení:

$$I_T = \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (160 \cdot 16^3 + 80 \cdot 20^3) = 4,318 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Polární moment setrvačnosti k místu připojení výztuhy na stojinu:

$$I_p = I_{y'} + I_{z'} = \frac{1}{12} (20 \cdot 80^3 + 160 \cdot 16^3) + \left(\frac{1}{12} \cdot 80 \cdot 20^3 + 80 \cdot 20 \cdot 170^2 + \frac{1}{3} \cdot 16 \cdot 160^3 \right) = 6,905 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

K vyloučení ztráty stability podélné výztuhy zkroucením musí být splněna alespoň jedna z následujících podmínek:

- 1) Přibližné posouzení se zanedbáním tuhosti v ohybovém kroucení (ocel výztuhy zřejmě stačí S235):

$$I_T/I_p = 4,318 \cdot 10^5 / 6,905 \cdot 10^7 = 0,00625 \geq 5,3 f_y/E = 5,3 \cdot 235/210000 = 0,00593$$

(splněno).

- 2) Druhou podmínku **tedy není nutné v tomto případě ověřovat**. Pro výztuhy z uhlíků však obvykle první kritérium nevyhoví. Proto je ukázáno i druhé, zpřesněné kritérium, týkající se velikosti kritického napětí výztuhy v kroucení:

$$\sigma_{cr} \geq 6 f_y$$

Pomocné hodnoty:

- výsečová plocha na okraji pásnice průřezu T (bráno po střednici) pro střed smyku v místě připojení ke stojině:

$$w = 170 \cdot 40 = 6800 \text{ mm}^2$$

- výsečový moment setrvačnosti:

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 6800^2\right) \cdot 40 \cdot 20 = 2,47 \cdot 10^{10} \text{ mm}^6$$

Kritické napětí v kroucení:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{a^2} \right) = \frac{1}{6,905 \cdot 10^7} \left(81000 \cdot 4,318 \cdot 10^5 + \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2,47 \cdot 10^{10}}{3889^2} \right)$$

$$= 555,5 \text{ MPa}$$

nevyhovuje, neboť $\sigma_{cr} \geq 6 \cdot 235 = 1410 \text{ MPa}$ (není splněno).

U tohoto výpočtu však není zahrnuta torzní tuhost stojiny nosníku při vybočení výztuhy. Tu je možno uvažovat podle vztahu:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} \left(G I_t + \frac{\pi^2 m^2 E I_w}{a^2} + \frac{c_\theta a^2}{m^2 \pi^2} \right)$$

Pro dlouhé výztuhy, pro něž platí:

$$a \geq \ell_{cr} = \pi \sqrt[4]{\frac{E I_w}{c_\theta}}$$

lze uvažovat počet polovin při vybočení $m = 1$ a vzorec zjednodušit na:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} (G I_t + 2 \sqrt{c_\theta E I_w})$$

kde

$$c_\theta \approx \frac{E t_w^3}{3 b}$$

(vzorec platí pro velký počet výztuh ve vzdálenosti b).

Pro posuzovanou výztuhu přibližně platí:

$$c_\theta \approx \frac{210000 \cdot 10^3}{3 \cdot 500} = 140000 \text{ N}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{6,905 \cdot 10^7} (81000 \cdot 4,318 \cdot 10^5 + 2 \cdot \sqrt{140000 \cdot 210000 \cdot 2,47 \cdot 10^{10}}) = 1287,0 \text{ MPa}$$

opět však není splněna podmínka: $\sigma_{cr} \geq 6 \cdot 235 = 1410 \text{ MPa}$

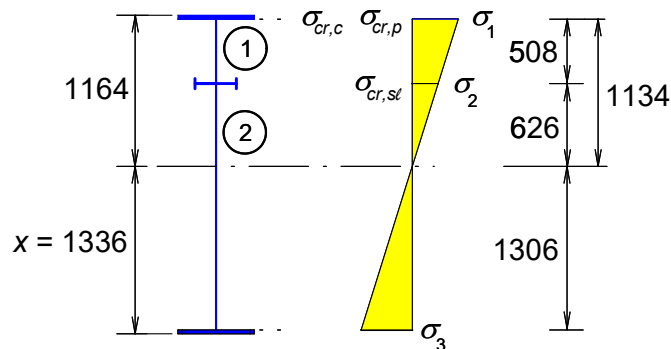
Poznámka:

Rozbor však ukazuje, že aplikace tohoto zpřesněného výpočtu umožní návrh výztuhy z nerovnoramenného úhelníku (např. L 160x100x12), zatímco rovnoramenný úhelník podle žádného z výše uvedených vztahů normy ČSN EN 1993-1-5 nevyhoví.

3. Posouzení na ohybový moment

Podélná výztuha je uvažována do průřezu, neboť se předpokládá její spojitost přes příčné výztuhy. Výztuha je třídy 1 a proto se započítává celá, plnou plochou $A_{st} = 2 \cdot (80 \cdot 20 + 160 \cdot 16) = 8320 \text{ mm}^2$. Pro plný nesymetrický průřez lze potom stanovit běžným způsobem (popř. softwarem) polohu neutrální osy $x = 1336 \text{ mm}$, plochu $A = 68720 \text{ mm}^2$, moment setrvačnosti $I = 7,0725 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$ a průběh napětí podle obrázku.

Pozn.: Při výpočtu s více výztuhami se do parametrů průřezu zahrnou všechny výztuhy. Pro normálové napětí se však tažená zóna s výztuhami samozřejmě neposuzuje na boulení (tato výztuha má význam pro boulení ve smyku). Ve cvičení, kde jsou 2 výztuhy, z nichž dolní je v tažené zóně, je potom posouzení na boulení od normálového napětí totožné s následujícím postupem.



Obr. 2 Napjatost plného průřezu.

a) Boulení panelů

Pozn.: Pro zjednodušení jsou šířky panelů uvažovány od líce pásnic do osy výztuhy (podle ČSN EN 1993-1-5 lze uvažovat panely v čisté šířce, dokonce po odečtení stran svarů):

$$b_1 = 508 \text{ mm},$$

$$b_2 = 626 + 1306 = 1932 \text{ mm}.$$

Horní panel ①:

$$\psi_1 = \sigma_2 / \sigma_1 \approx 626 / 1134 = 0,552$$

Podle ČSN EN 1993-1-5, Tab. 4.1:

$$k_\sigma = \frac{8,2}{1,05 + \psi_1} = \frac{8,2}{1,05 + 0,552} = 5,12$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_1/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{508/10}{28,4 \cdot 0,75 \cdot \sqrt{5,12}} = 1,054 > \bar{\lambda}_{p,min} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,73$$

Pozn.:

Pokud by platilo, že $\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_{p,min}$ potom by byl součinitel boulení $\rho = 1$.

$$\rho_{1,loc} = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi_1)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,054 - 0,055(3 + 0,552)}{1,054^2} = 0,77$$

$$b_{1,eff} = \rho_{1,loc} b_1 = 0,77 \cdot 508 = 391 \text{ mm}$$

$$b_{1,e1} = \frac{2}{5 - \psi_1} b_{1,eff} = \frac{2}{5 - 0,552} \cdot 391 = 176 \text{ mm}$$

$$b_{1,e2} = b_{1,eff} - b_{1,e1} = 391 - 176 = 215 \text{ mm}$$

Dolní panel ②:

$$\psi_2 = \sigma_3 / \sigma_2 \approx -1306 / 626 = -2,086$$

$$k_\sigma = 5,98(1 - \psi_2)^2 = 5,98(1 - (-2,086))^2 = 56,95$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_2/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{(1306 + 626)/10}{28,4 \cdot 0,75 \cdot \sqrt{56,95}} = 1,202$$

$$\rho_{2,loc} = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi_2)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,202 - 0,055(3 - 2,086)}{1,202^2} = 0,80$$

$$b_{2,eff} = \rho_{2,loc} b_c = 0,80 \cdot 626 = 501 \text{ mm}$$

$$b_{2,e1} = 0,4 b_{2,eff} = 0,4 \cdot 501 = 200 \text{ mm}$$

$$b_{2,e2} = b_{2,eff} - b_{2,e1} = 501 - 200 = 301 \text{ mm}$$

b) Celkové boulení vyztužené stojiny

b1) Stěnové chování

Kritické napětí vyztužené stěny s jednou výztuhou, se stanoví přibližně pro fiktivní izolovaný prut uložený na pružném podkladě (viz ČSN 1993-1-5). Pro fiktivní prut s plnou plochou podle obrázku platí:

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1 = \frac{3 - 0,552}{5 - 0,552} \cdot 508 = 280 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = 0,4 b_{2c} = 0,4 \cdot 626 = 250 \text{ mm}$$

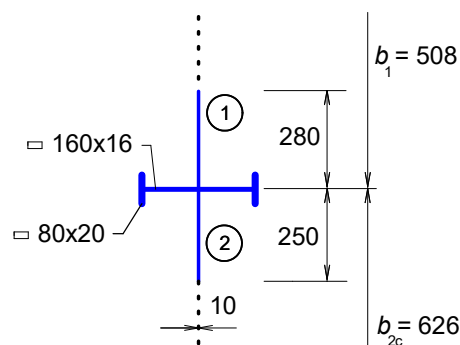
Plocha a moment setrvačnosti fiktivního prutu (sestavajícího se ze dvou průřezů T a spolupůsobící stojiny) k ose stojiny:

$$A_{s\ell,1} = (280 + 250) \cdot 10 + 2 \cdot (160 \cdot 16 + 80 \cdot 20) = 13620 \text{ mm}^2$$

$$I_{s\ell,1} =$$

$$= 2 \cdot (80 \cdot 20 \cdot 175^2 + 160 \cdot 16 \cdot 85^2) + \frac{1}{12} \cdot 80 \cdot 20^3 + \frac{1}{12} \cdot 16 \cdot 160^3 + \frac{1}{12} (280 + 250) \cdot 10^3$$

$$= 1,461 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$



Obr. 3 Fiktivní prut (podélná výztuha a spolupůsobící stojina).

Těžiště jedné výztuhy T k ose stojiny:

$$e = \frac{(80 \cdot 20) \cdot 175 + (160 \cdot 16) \cdot 85}{80 \cdot 20 + 160 \cdot 16} = 119,6 \text{ mm}$$

$$a_c = 4,33 [I_{s\ell,1} b_1^2 b_2^2 / (t^3 b)]^{0,25} = 4,33 \cdot [1,461 \cdot 10^8 \cdot 508^2 \cdot (1306 + 626)^2 / (10^3 \cdot 2440)]^{0,25}$$

$$= 11933 \text{ mm} > a = 3889 \text{ mm}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) A_{s\ell,1} b_1^2 b_2^2}$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1,461 \cdot 10^8}{13620 \cdot 3889^2} + \frac{210000 \cdot 10^3 \cdot 2440 \cdot 3889^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 13620 \cdot 508^2 \cdot 1932^2} = 1486,4 \text{ MPa}$$

Extrapolace do krajních vláken stojiny

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \frac{b_c}{b_{sl,1}} = \sigma_{cr,sl} \frac{b_1 + b_{2c}}{b_{2c}} = 1486,4 \cdot \frac{1134}{626} = 2692,6 \text{ MPa}$$

Pro součinitel $\beta_{A,c}$ se uvažuje tlačenná část stojiny, bez subpanelu přiléhajícího k pásnici:

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{(b_{1,e2} + b_{2,eff}) t_w + 2A_{sl}}{(b_{1,inf} + b_{2,c}) t_w + 2A_{sl}} = \frac{(215 + 501) \cdot 10 + 2 \cdot 4160}{(280 + 626) \cdot 10 + 2 \cdot 4160} = 0,89$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,89 \cdot 420}{2692,6}} = 0,373 < 0,73$$

Odtud součinitel boulení ekvivalentní stěny $\rho = 1,0$.

b2) Prutové chování

Pro fiktivní prut s plochou $A_{s\ell}$ a momentem setrvačnosti $I_{s\ell,1}$ (viz b1) platí pro namáhání ve vzpěru:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1,461 \cdot 10^8}{13620 \cdot 3889^2} = 1470 \text{ MPa}$$

Extrapolace do krajních vláken stojiny:

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \frac{b_c}{b_{sl,1}} = 1470,0 \cdot \frac{1134}{626} = 2662,9 \text{ MPa}$$

Pozn.: vždy musí platit $\sigma_{cr,c} < \sigma_{cr,p}$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} = \frac{(b_{1,e2} + b_{2,e1}) t_w + A_{st}}{A_{sl,1}} = \frac{(215 + 200) \cdot 10 + 8320}{13620} = 0,92$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,92 \cdot 420}{2662,9}} = 0,381$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = \sqrt{\frac{1,461 \cdot 10^8}{13620}} = 103,6 \text{ mm}$$

$$e = \max(e_1; e_2) = \max(119,6; 119,6) = 119,6 \text{ mm}$$

$$\alpha_e = 0,49 + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{103,6/119,6} = 0,59$$

$$\varphi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,5 \cdot [1 + 0,59 \cdot (0,381 - 0,2) + 0,381^2] = 0,626$$

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,626 + \sqrt{0,626^2 - 0,381^2}} = 0,89$$

Součinitel celkového boulení ρ_c :

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{2692,6}{2662,9} - 1 = 0,01 \quad \text{je splněno: } 0 \leq \xi \leq 1$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,89) \cdot 0,01 \cdot (2 - 0,01) + 0,89 = 0,89$$

Účinný průřez nosníku

Podle ČSN EN 1993-1-5 čl. A.2.1 (4) lze stanovit plochu účinného průřezu fiktivního prutu $A_{c,eff,loc}$ pro štíhlosti panelů odpovídající skutečnému napětí $\sigma_{com,Ed}$, určenému pro plný průřez stojiny nosníku. Tato napětí jsou:

V krajních vláknech stojiny:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Sd}}{I} z = \frac{16333,3 \cdot 10^6}{7,0725 \cdot 10^{10}} \cdot 1134 = 262,0 \text{ MPa}$$

V místě výztuhy:

$$\sigma_{com,Ed,st} = \frac{M_{Sd}}{I} z = \frac{16333,3 \cdot 10^6}{7,0725 \cdot 10^{10}} \cdot 626 = 144,6 \text{ MPa}$$

Panely fiktivní podélné výztuhy:

Horní panel ①:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}} = 1,054 \cdot \sqrt{\frac{262,0}{420/1,0}} = 0,832 > 0,73$$

$$\rho_{1,loc,red} = \frac{\bar{\lambda}_{p,red} - 0,055(3 + \psi_1)}{\bar{\lambda}_{p,red}^2} = \frac{0,832 - 0,055(3 + 0,552)}{0,832^2} = 0,92$$

$$b_{1,eff,red} = \rho_{1,loc,red} b_1 = 0,92 \cdot 508 = 467 \text{ mm}$$

$$b_{1,e2,red} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_{1,eff,red} = \frac{3 - 0,552}{5 - 0,552} \cdot 467 = 257 \text{ mm}$$

Dolní panel ②:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,st}}{f_y / \gamma_{M0}}} = 1,202 \cdot \sqrt{\frac{144,6}{420/1,0}} = 0,705$$

Součinitel boulení plyne ze vztahu:

$$\rho_{2,loc,red} = \frac{\bar{\lambda}_{p,red} - 0,055(3 + \psi_2)}{\bar{\lambda}_{p,red}^2} = \frac{0,705 - 0,055 \cdot (3 - 2,086)}{0,705^2} = 1,32 > 1,0$$

(neboulí, tzn. bez redukce).

$$b_{2,e1,red} = b_{2,sup} = 250 \text{ mm}$$

Pozn.: Norma obdobně umožňuje provést přepočet účinných šířek $b_{1,e1}$ a $b_{2,e2}$, avšak pro tento přepočet vyžaduje nový, iterační výpočet.

Celkové boulení fiktivního prutu:

Protože

$$\frac{\rho_c f_y}{\sigma_{com,Ed,st} \gamma_{M1}} = \frac{0,89 \cdot 420}{144,6 \cdot 1,0} = 2,58 > 1$$

další redukce plochy fiktivního prutu součinitelem ρ_c (zeslabení tlouštěk celého účinného průřezu fiktivního prutu) se neprovádí.

Výsledný účinný průřez

Horní panel ① podepřený pásnicí:

$$b_{1,edge,eff} = b_{1,e1} = 176 \text{ mm}$$

Fiktivní prut: výztuhy T a spolupůsobící panely:

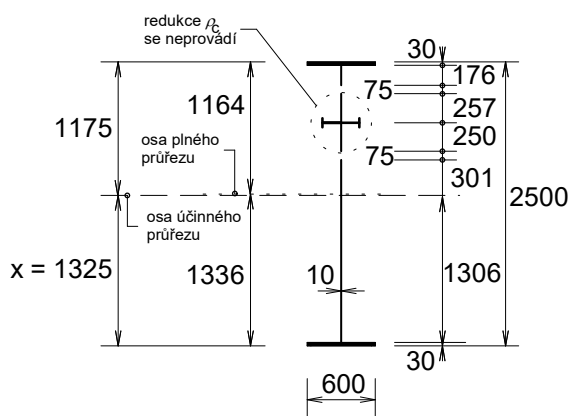
$$b_{1,e2,red} = 257 \text{ mm}$$

$$b_{2,e1,red} = 250 \text{ mm}$$

Tloušťka všech částí fiktivního prutu podle obr. 3 se má redukovat součinitelem ρ_c . V tomto případě (viz předchozí odstavec), se však redukce neprovede.

Dolní panel ②:

$$b_{2,edge,eff} = b_{2,e2} = 301 \text{ mm}$$



Obr. 4 Výsledný účinný průřez.

Pro účinný průřez podle obrázku platí („ruční“ výpočet, nebo s použitím softwaru):

$$x = 1325 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = 67520 \text{ mm}^2$$

$$I_{eff} = 6,6737 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$W_{eff,1} = I_{eff}/e_1 = 6,6737 \cdot 10^{10}/1175 = 5,680 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$W_{eff,2} = I_{eff}/e_2 = 6,6737 \cdot 10^{10}/1325 = 5,037 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Prostá momentová únosnost:

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} W_{eff,2}} = \frac{16333,3 \cdot 10^6}{(420/1,0) \cdot 5,037 \cdot 10^7} = 0,77 \leq 1 \text{ vyhovuje.}$$

Posouzení na příčnou a torzní stabilitu (klopení):

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_{eff,I} f_y}{\gamma_{MI}} = 0,75 \cdot 5,680 \cdot 10^7 \cdot \frac{420}{1,0} = 17892,0 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\eta'_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{16333,3 \cdot 10^6}{17892,0 \cdot 10^6} = 0,91 \leq 1 \text{ vyhovuje.}$$

4. Posouzení ve smyku

Uvažuje se pole mezi tuhými příčnými výztuhami, s jednou podélnou výztuhou.

Pozn.: V případě více podélných výztuh ve stojině, včetně výztuh v tažené oblasti, se za I_{st} v následujícím vzorci bere součet momentů setrvačnosti všech výztuh se spolupůsobícími šířkami $30a$. V příkladu ve cvičení se tedy bere pro stejné výztuhy $\Sigma I_{st} = 2 I_{st}$, přičemž přibližně lze brát I_{st} podle obr. 3.

Účinek této výztuhy na kritické napětí stěny:

$$\alpha = a/h_w = 3889/2440 = 1,59 < 3.$$

Proto pro boulení vyztužené stěny platí:

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{\Sigma I_{st}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{\Sigma I_{st}}{t^3 h_w}} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{1,461 \cdot 10^8}{10^3 \cdot 2440}}{1,59^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,461 \cdot 10^8}{10^3 \cdot 2440}}$$

$$= 19,3$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}} = \frac{2440}{37,4 \cdot 10 \cdot 0,75 \cdot \sqrt{19,3}} = 1,98$$

Pro boulení ve smyku největšího subpanelu s výškou $h_{wi} = 1924 + 8 = 1932 \text{ mm}$ platí:

$$\alpha = a/h_{wi} = 3889/1932 = 2,01 > 1$$

$$k_{\tau i} = 5,34 + 4,00 (h_{wi}/a)^2 = 5,34 + 4,00 \cdot (1932/3889)^2 = 6,3$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_{\tau i}}} = \frac{1932}{37,4 \cdot 10 \cdot 0,75 \cdot \sqrt{6,3}} = 2,74 > 1,98 \dots \text{rozhoduje}$$

Pro $\eta = 1,20$ (ocel S420), $\bar{\lambda}_w > 1,08$ a netuhou koncovou výztuhou platí:

$$\chi_w = 0,83/\bar{\lambda}_w = 0,83/2,74 = 0,30$$

Příspěvek stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{MI}} = \frac{0,30 \cdot 420 \cdot 2440 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1775,0 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Vliv pásnic (obvykle lze zanedbat):

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right) = 3889 \cdot \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot 600 \cdot 30^2 \cdot 420}{10 \cdot 2440^2 \cdot 420} \right) = 1029 \text{ mm}$$

Moment přenášený pouze pásnicemi:

$$M_{f,Rd} = \frac{b_f t_f (h_w + t_f) f_y}{\gamma_{M0}} = 600 \cdot 30 \cdot (2440 + 30) \cdot \frac{420}{1,0} = 18673 \cdot 10^6 \text{ Nmm} > M_{Ed}$$

$$= 16333,3 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Pásnice tedy nejsou plně využity a příspěvek pásnic lze využít:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{MI}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) = \frac{600 \cdot 30^2 \cdot 420}{1029 \cdot 1,0} \left(1 - \left(\frac{16333,3}{18673} \right)^2 \right) = 51,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Celkem únosnost stojiny ve smyku:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 1775,0 + 51,8 = 1826,8 \text{ kN} \quad (\text{příspěvek pásnic činí 2,9 \%})$$

Posouzení:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{1433,4}{1826,8} = 0,78 < 1,0$$

Únosnost ve smyku vyhovuje, avšak jde o velký smyk ($\eta_3 > 0,5$) a proto je nutné posoudit interakci s momentem.

5. Interakce momentu a smyku

Nejprve se stanoví plastické charakteristiky plného průřezu. Plastická neutrální osa dělí plochu na dvě stejné části (dolní a horní):

$$A_d = A_h = \frac{A}{2} = \frac{68720}{2} = 34360 \text{ mm}^2$$

Vzdálenost plastické osy od dolních vláken:

$$x_{pl} = \frac{A_d - A_{pásnice}}{t} + t_f = \frac{34360 - 600 \cdot 30}{10} + 30 = 1666 \text{ mm}$$

Vzdálenosti os pásnic od plastické osy:

$$e_d = x_{pl} - \frac{t_f}{2} = 1666 - \frac{30}{2} = 1651 \text{ mm}$$

$$e_h = h - x_{pl} - \frac{t_f}{2} = 2500 - 1666 - \frac{30}{2} = 819 \text{ mm}$$

Plastický moment průřezu:

$$S_d = A_{pásnice} e_d + \frac{1}{2} (e_d - \frac{t_f}{2})^2 t_w = (600 \cdot 30 \cdot 1651 + \frac{1}{2} \cdot (1651 - 15)^2 \cdot 10) = 43,10 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$S_h = A_{pásnice} e_h + \frac{1}{2} (e_h - \frac{t_f}{2})^2 t_w + A_{st} (e_h - 15 - 500 - 8) = 600 \cdot 30 \cdot 819 + \frac{1}{2} \cdot (819 - 15)^2 \cdot 10 + 8320 \cdot (819 - 523) = 20,44 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} f_{yd} = (S_d + S_h) f_{yd} = (43,10 \cdot 10^6 + 20,44 \cdot 10^6) \cdot 420 / 1,0 = 26687 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{16333,3}{26685} = 0,61 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{18673}{26685} = 0,70$$

Protože únosnost průřezu sestaveného pouze z pásnic je větší než ohybový moment ($M_{f,Rd} > M_{Ed}$), interakce momentu se smykem se neposuzuje.

6. Boulení od ohybu pásnic (oproti ČSN EN 1993-1-5/2008 doplněno součinitelem β podle prEN 1993-1-5/2022)

K zabránění vybočení tlačené pásnice v rovině stojiny má být splněno kritérium:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{\beta f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = k \frac{E}{\beta f_y} \sqrt{\frac{h_w t_w}{b_{cf} t_{cf}}}$$

kde

$$\beta = \left[\frac{\sigma_{Ed}}{2 f_{yf}} (1 - \psi) \right]^{0,5} \geq 0,5 \quad \text{pro} \quad -1 \leq \psi \leq 1$$

Součinitel pro využití pružné momentové únosnosti (pro průřez 4. třídy) je $k = 0,55$. Pozitivní vliv podélných výztuh není v Eurokódu zaveden (lze vyhledat v odborné literatuře). Největší napětí v tlačené pásnici a poměr krajních napětí ve stojině:

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff,2}} = \frac{16333,3 \cdot 10^6}{5,037 \cdot 10^7} = 324,3 \text{ MPa}$$

$$\psi \approx \frac{-W_{eff,2}}{W_{eff,1}} = \frac{-5,037 \cdot 10^7}{5,680 \cdot 10^7} = -0,89$$

Odtud:

$$\beta = \left[\frac{324,3}{2 \cdot 420} (1 + 0,89) \right]^{0,5} = 0,85$$

$$\frac{2440}{10} = 244 \leq 0,55 \cdot \frac{210000}{0,85 \cdot 420} \cdot \sqrt{\frac{2440 \cdot 10}{600 \cdot 30}} = 376,7$$

Je splněno, spojitě podepření pásnice stojinou lze považovat za dostatečně tuhé. Případné mírné překročení lze s ohledem na pozitivní vliv podélné výztuhy (který Eurokód zanedbává) akceptovat.