

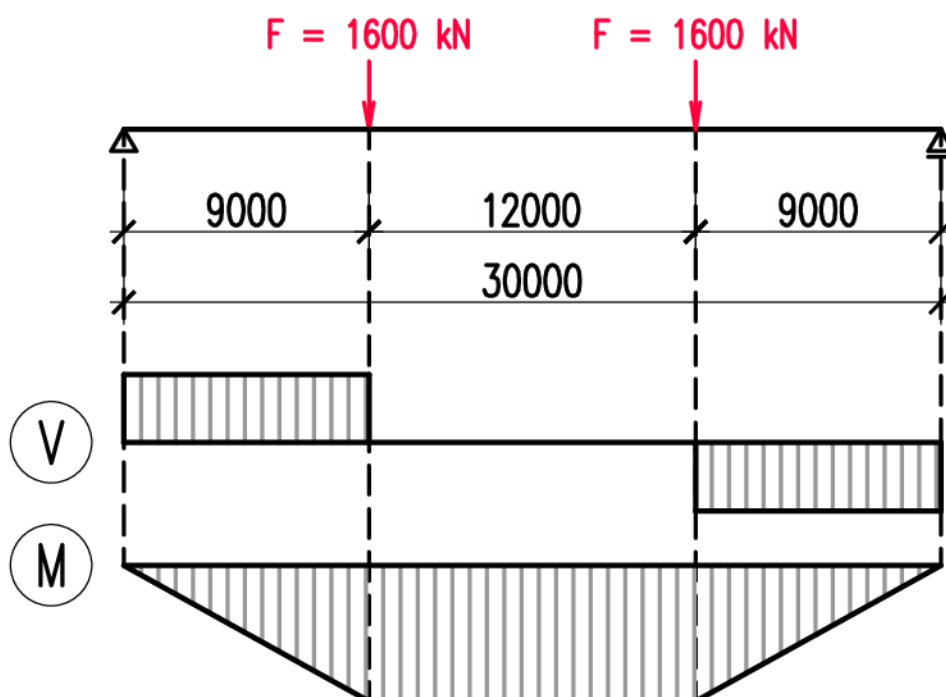
POSOUZENÍ PŘÍČNÝCH VÝZTUH STOJINY

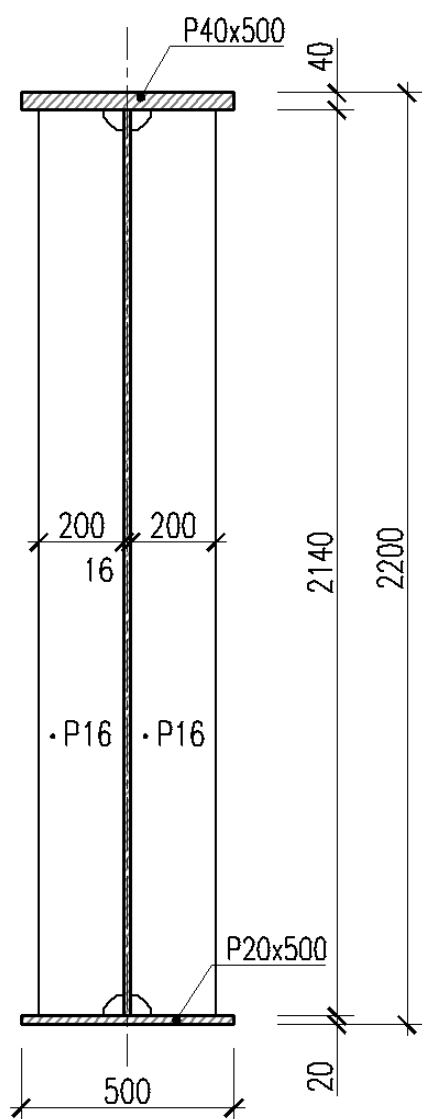
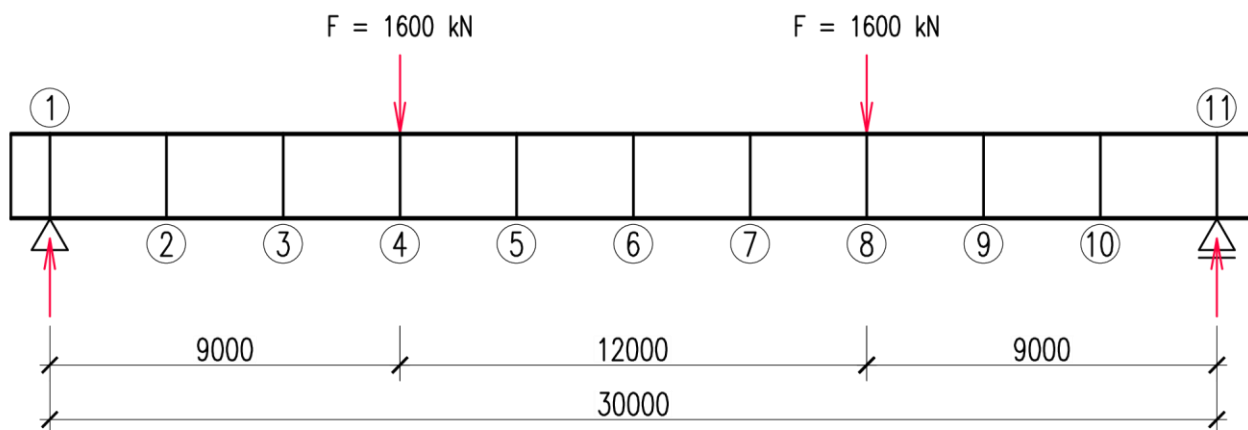
... řešený příklad pro B0009

Posouzení průřezu prostého nosníku na posouvající síly. Průřez nosníku je jednoose symetrický, konstantní po celé délce. Pásnice a stojina jsou z konstrukční oceli S355, příčné výztuhy jsou z oceli S235. Provede se posouzení krajní (podporové) výztuhy, první vnitřní výztuhy a výztuhy pod břemenem. Součinitel spolehlivosti $\gamma_{M0} = 1,0$ a $\gamma_{M1} = 1,0$ (ale pro mosty $\gamma_{M1} = 1,1$).

GEOMETRIE NOSNÍKU

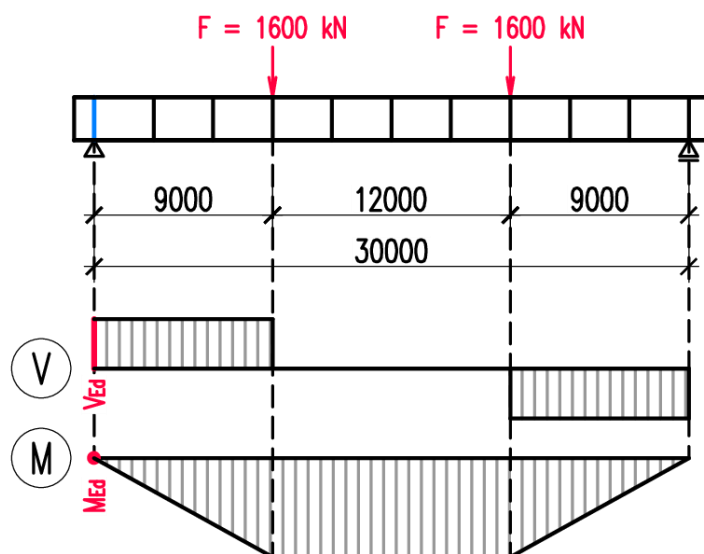
$L = 30 \text{ m}$	rozpětí nosníku
$h = 2200 \text{ mm}$	výška nosníku
$b_f = 500 \text{ mm}$	šířka pásnic
$t_{f,h} = 40 \text{ mm}$	tloušťka horní pásnice
$t_{f,d} = 20 \text{ mm}$	tloušťka dolní pásnice
$h_w = 2140 \text{ mm}$	výška stojiny
$t = 16 \text{ mm}$	tloušťka stojiny
$a = 3000 \text{ mm}$	vzdálenost příčných výztuh
$b_{st} = 200 \text{ mm}$	šířka příčných výztuh
$t_{st} = 16 \text{ mm}$	tloušťka příčných výztuh



Příčný řez**Pohled**

A) VÝZTUHA Č. 1 - KONCOVÁ (PODPOROVÁ) PŘÍČNÁ VÝZTUHA

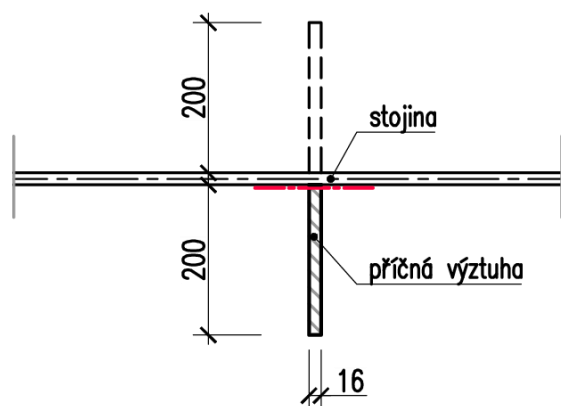
Z hlediska čl. 9.3.2 normy ČSN EN 1993-1-5 je navržena jako netuhá.



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

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN}$$

Podmínka torzní tuhosti



St. Venantův moment v prostém kroucení samotné výztuhy

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \sum b_i \cdot t_i^3 = \frac{1}{3} \cdot 200 \cdot 16^3 = 273 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

Polární moment setrvačnosti samotné výztuhy k okraji připojenému ke stěně (červená čerchovaná čára)

$$I_p = I_y + I_z = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 16^3 + \frac{1}{12} \cdot 16 \cdot 200^3 + 200 \cdot 16 \cdot \left(\frac{200}{2} \right)^2 = 42,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Není-li provedena náročnější analýza, má být splněno kritérium

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{273 \cdot 10^3}{42,7 \cdot 10^6} = 0,0064 \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} = 5,3 \cdot \frac{235}{210 \cdot 10^3} = 0,0059$$

=> **vyhovuje**

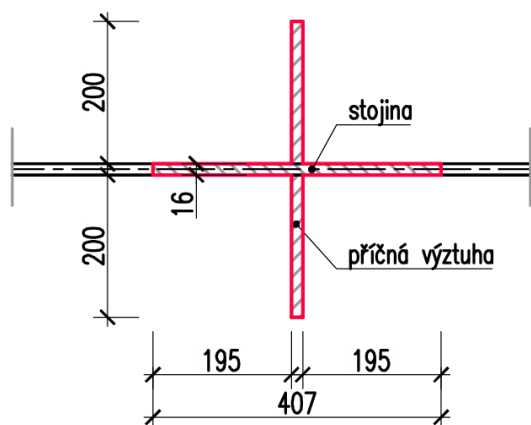
Posouzení z hlediska pevnosti

S využitím pružné analýzy podle teorie II. řádu se mají v mezním stavu únosnosti ověřit následující kritéria:

- Maximální napětí ve výztuze nepřesahuje f_y/γ_{M1}
- Dodatečný průhyb nepřesáhne $b/300$

Stanovení přiléhající části stojiny započitatelné do momentu setrvačnosti příčné výztuhy

$$15 \cdot \varepsilon \cdot t = 15 \cdot 0,81 \cdot 16 = 195 \text{ mm} \Rightarrow b_w = 2 \cdot (15 \cdot \varepsilon \cdot t) + t_{st} = 2 \cdot 195 + 16 = 407 \text{ mm}$$



Moment setrvačnosti příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny

$$I_{st} = \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot t^3 + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot t_{st} \cdot b_{st}^3 + t_{st} \cdot b_{st} \cdot \left(\frac{b_{st} + t}{2} \right)^2 \right] =$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 407 \cdot 16^3 + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot 16 \cdot 200^3 + 16 \cdot 200 \cdot \left(\frac{200 + 16}{2} \right)^2 \right] = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Průřezová plocha příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny

$$A_{st} = b_w \cdot t + 2 \cdot t_{st} \cdot b_{st} = 407 \cdot 16 + 2 \cdot 16 \cdot 200 = 12912 \text{ mm}^2$$

Kritická síla příčné výztuhy

$$N_{cr,st} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_{st}}{h_w^2} = \pi^2 \cdot \frac{210 \cdot 10^3 \cdot 71 \cdot 10^6}{2140^2} = 32133 \text{ kN}$$

Vnější osová síla

$$N_{st,ex} = 1600 \text{ kN} \quad \text{podporová reakce nosníku}$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z tahových polí

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN} \quad \text{návrhová posouvající síla ve vzdálenosti } h_w/2 \text{ od výztuhy}$$

Poměrná štíhlost stojiny ([viz příklad posouzení na smyk](#))

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{2140}{37,4 \cdot 16 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{7,38}} = 1,625$$

Tlaková síla plynoucí z tahových polí

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \cdot \frac{f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 1600 \cdot 10^3 - \frac{1}{1,625^2} \cdot \frac{355 \cdot 2140 \cdot 16}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = -1058 \text{ kN} \Rightarrow N_{st,ten} = 0 \text{ kN}$$

Tlaková síla plynoucí z odchýlených sil

$$M_{Ed} = 0 \text{ kNm} \Rightarrow \sigma = 0 \text{ MPa} \Rightarrow \Delta N_{st,Ed} = 0 \text{ kN}$$

Součet vnější osově síly a osově síly z tahových polí

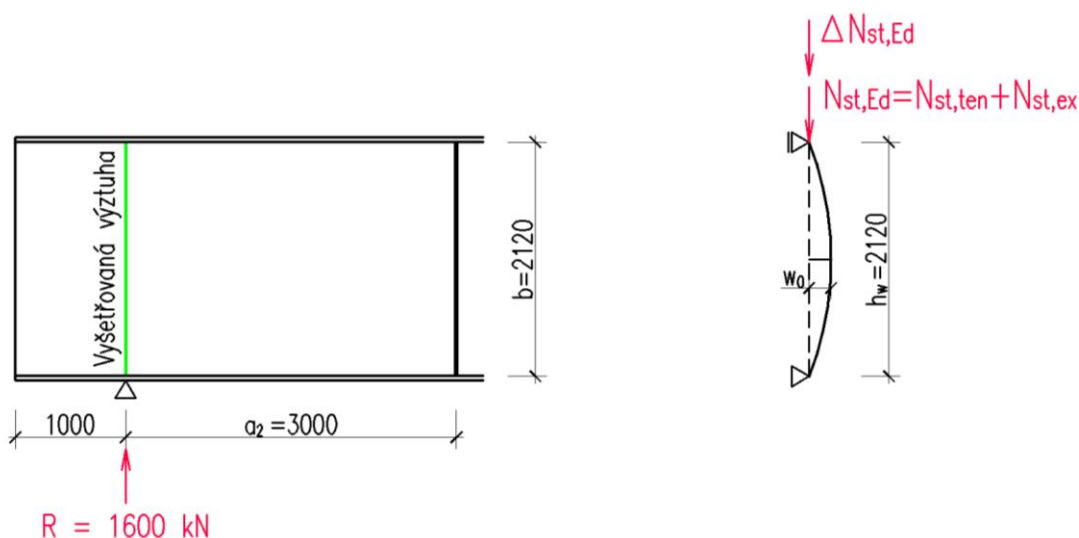
$$N_{st,Ed} = N_{st,ten} + N_{st,ex} = 0 + 1600 = 1600 \text{ kN}$$

Celková osová síla

$$\Sigma N_{st,Ed} = N_{st,Ed} + \Delta N_{st,Ed} = 1600 + 0 = 1600 \text{ kN}$$

Amplituda počáteční imperfekce výztuhy

$$w_0 = \frac{s}{300} = \frac{\min \{a_2; b\}}{300} = \frac{\min \{3000; 2140\}}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$



Dodatečný průhyb výztuhy

$$w = w_0 \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} = 7,13 \cdot \frac{1}{\frac{32133}{1600} - 1} = 0,37 \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální napětí ve výztuze

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\Sigma N_{st,Ed} \cdot e_{\max}}{I_{st}} \cdot w_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{st,Ed}}{N_{cr,st}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{12912} + \frac{1600 \cdot 10^3 \cdot 208}{71 \cdot 10^6} \cdot 7,13 \cdot \frac{1}{1 - \frac{1600}{32133}} = \\ &= 124 + 33 \cdot \frac{1}{0,950} = 124 + 35 = 159 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned}$$

Alternativní posouzení na rovinný vzpěr podle čl. 9.4 (2) ČSN EN 1993-1-5

Kritická síla příčné výztuhy pro vzpěrnou délku rovnou $0,75 \times h_w$

$$N_{cr,st} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_{st}}{(0,75 \cdot h_w)^2} = \pi^2 \cdot \frac{210 \cdot 10^3 \cdot 71 \cdot 10^6}{(0,75 \cdot 2140)^2} = 57125 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{st} \cdot f_y}{N_{cr,st}}} = \sqrt{\frac{12912 \cdot 235}{57125 \cdot 10^3}} = 0,23$$

Součinitel pro výpočet součinitele vzpěrnosti (pro otevřený průřez výztuhy se použije křivka c)

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,23 - 0,2) + 0,23^2 \right] = 0,534$$

Součinitel vzpěrnosti

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,534 + \sqrt{0,534^2 - 0,23^2}} = 0,984$$

Návrhová vzpěrná únosnost

$$N_{st,b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{st} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,984 \cdot 12912 \cdot 235}{1,0} = 2986 \text{ kN}$$

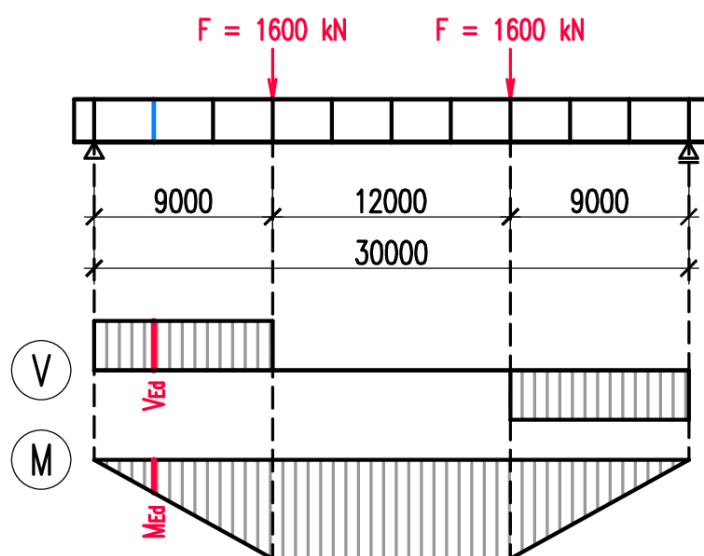
Jednotkový posudek

$$\frac{\Sigma N_{st,Ed}}{N_{st,b,Rd}} = \frac{1600}{2986} = 0,54 \leq 1,0$$

=> **vyhovuje**

Poznámka:

Jednotkový posudek pro napětí s účinky II. řádu je $159/235 = 0,68$. Výsledek alternativního posouzení je příznivější v důsledku zmenšení vzpěrné délky prutu.

B) VÝZTUHA Č. 2 - PRVNÍ VNITŘNÍ PŘÍČNÁ VÝZTUHA

$$M_{Ed} = 4800 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN}$$

Podmínka torzní tuhosti

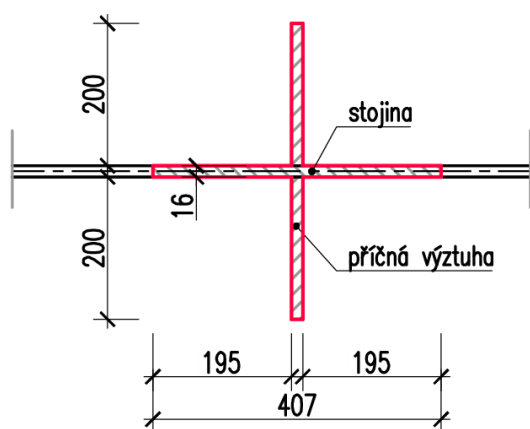
Stejně jako pro výztuhu č. 1

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{273 \cdot 10^3}{42,7 \cdot 10^6} = 0,0064 \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} = 5,3 \cdot \frac{235}{210 \cdot 10^3} = 0,0059 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Podmínka ohybové tuhosti

Stanovení přiléhající části stojiny započitatelné do momentu setrvačnosti příčné výztuhy

$$15 \cdot \varepsilon \cdot t = 15 \cdot 0,81 \cdot 16 = 195 \text{ mm} \Rightarrow b_w = 2 \cdot (15 \cdot \varepsilon \cdot t) + t_{st} = 2 \cdot 195 + 16 = 407 \text{ mm}$$



Moment setrvačnosti příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny

$$I_{st} = \frac{1}{12} \cdot b_w \cdot t^3 + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot t_{st} \cdot b_{st}^3 + t_{st} \cdot b_{st} \cdot \left(\frac{b_{st} + t}{2} \right)^2 \right] =$$

$$I_{st} = \frac{1}{12} \cdot 407 \cdot 16^3 + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot 16 \cdot 200^3 + 16 \cdot 200 \cdot \left(\frac{200+16}{2} \right)^2 \right] = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Minimální moment setrvačnosti

$$I_{st,min} = 0,75 \cdot h_w \cdot t^3 = 0,75 \cdot 2120 \cdot 16^3 = 6,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \geq I_{st,min} = 6,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

=> dle č. 9.3.3 lze výztuhu považovat za tuhou pro posouzení smykové únosnosti

Posouzení z hlediska pevnosti

S využitím pružné analýzy podle teorie II. řádu se mají v mezním stavu únosnosti ověřit následující kritéria:

- Maximální napětí ve výztuze nepřesahuje f_y/γ_{M1}
- Dodatečný průhyb nepřesáhne $b/300$

Moment setrvačnosti příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Průřezová plocha příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$A_{st} = 12912 \text{ mm}^2$$

Kritická síla příčné výztuhy (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$N_{cr,st} = 32133 \text{ kN}$$

Vnější osová síla

$$N_{st,ex} = 0 \text{ kN}$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z tahových polí

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN} \quad \text{návrhová posouvající síla ve vzdálenosti } h_w/2 \text{ od výztuhy}$$

Poměrná štíhlost stojiny ([viz příklad posouzení na smyk](#))

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{2140}{37,4 \cdot 16 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{7,38}} = 1,625$$

Tlaková síla plynoucí z tahových polí

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \cdot \frac{f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 1600 \cdot 10^3 - \frac{1}{1,625^2} \cdot \frac{355 \cdot 2140 \cdot 16}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = -1058 \text{ kN} \Rightarrow N_{st,ten} = 0 \text{ kN}$$

Ohybový moment na nosníku v místě posuzované výztuhy

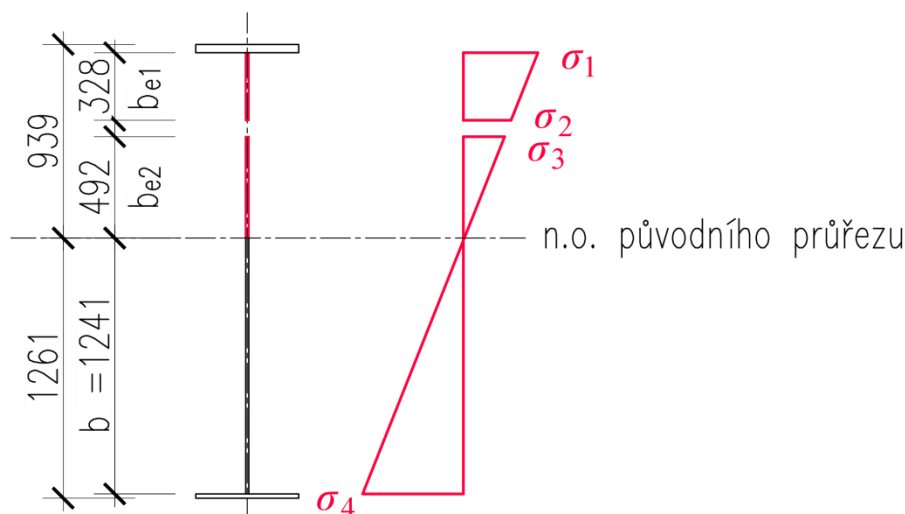
$$M_{Ed} = 4800 \text{ kNm}$$

Normálové napětí od ohybu

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 92,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 58,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 50,7 \text{ MPa}$$



Tlaková síla z přilehlých panelů

$$N_{Ed} = \left(b_{e,1} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + b_{e,2} \cdot \frac{\sigma_3}{2} \right) \cdot t = \left(328 \cdot \frac{92,6 + 58,8}{2} + 492 \cdot \frac{50,7}{2} \right) \cdot 16 = 597 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \geq \frac{A_{c,eff}}{2} \cdot \sigma_{max} = \frac{13120}{2} \cdot 92,6 = 607 \text{ kN}$$

$$A_{c,eff} = b_{eff} \cdot t = 820 \cdot 16 = 13120 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \cdot \frac{N_{Ed}}{b} \cdot \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) = 0,5 \cdot \frac{607 \cdot 10^3}{2140} \cdot \left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \right) = 0,095 \text{ MPa}$$

Omezení poměru kritických napětí

$$\frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = \frac{5,40}{359} = 0,015 \quad \text{ale} \quad 0,5 \leq \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \leq 1,0 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = 0,5$$

Kritické napětí stěnového chování pro stojinu bez podélné výztuhy

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 33,87 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{16}{2140} \right)^2 = 359 \text{ MPa}$$

Poměr normálových napětí v posuzovaném panelu stojiny (pozor: zde jiné σ_1 a σ_2 než v obr. výše)

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1241}{-899} = -1,38$$

Součinitel kritického napětí

$$k_\sigma = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 5,98 \cdot (1 - (-1,38))^2 = 33,87$$

Kritické napětí prutového chování pro stojinu bez podélné výztuhy

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{16}{3000}\right)^2 = 5,40 \text{ MPa}$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z odchýlených sil

$$\Delta N_{st,Ed} = \frac{\sigma_m \cdot h_w^2}{\pi^2} = \frac{0,095 \cdot 2140^2}{\pi^2} = 44 \text{ kN}$$

Součet vnější osově síly a osově síly z tahových polí

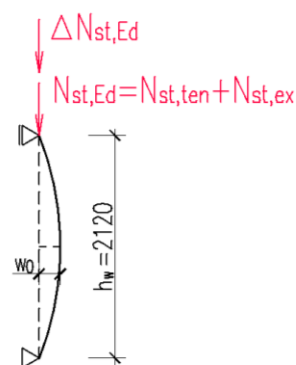
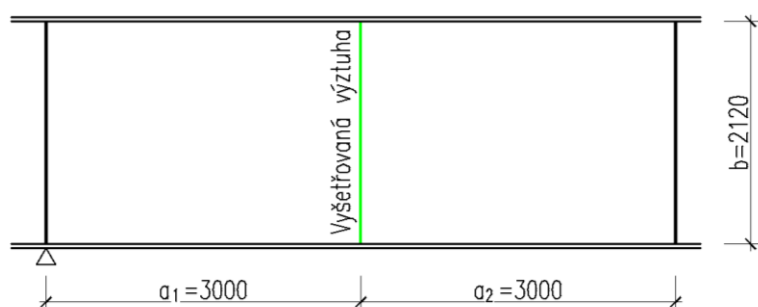
$$N_{st,Ed} = N_{st,ten} + N_{st,ex} = 0 + 0 = 0 \text{ kN}$$

Celková osová síla

$$\Sigma N_{st,Ed} = N_{st,Ed} + \Delta N_{st,Ed} = 0 + 44 = 44 \text{ kN}$$

Amplituda počáteční imperfekce výztuhy

$$w_0 = \frac{s}{300} = \frac{\min\{a_1; a_2; b\}}{300} = \frac{\min\{3000; 3000; 2140\}}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$



Dodatečný průhyb výztuhy

$$w = w_0 \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} = 7,13 \cdot \frac{1}{\frac{32133}{44} - 1} = 0,01 \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální napětí ve výztuze

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\Sigma N_{st,Ed} \cdot e_{\max}}{I_{st}} \cdot w_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{st,Ed}}{N_{cr,st}}} = \frac{0}{12912} + \frac{44 \cdot 10^3 \cdot 208}{71 \cdot 10^6} \cdot 7,13 \cdot \frac{1}{1 - \frac{44}{32133}} = \\ &= 0 + 0,9 \cdot \frac{1}{0,998} = 0 + 0,9 = 0,9 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje} \end{aligned}$$

Alternativní posouzení podle čl. 9.2.1 (5) ČSN EN 1993-1-5

Při absenci osově síly v příčné výztuze lze předpokládat, že obě kritéria jsou splněna, pokud

$$I_{st} \geq I_{st,min} = \frac{\sigma_m}{E} \cdot \left(\frac{b}{4}\right)^4 \cdot \left(1 + w_0 \cdot \frac{300}{b} \cdot u\right)$$

kde

$$u = \frac{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot e_{max}}{f_y \cdot 300 \cdot b}}{\gamma_{M1}} = \frac{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 208}{235 \cdot 300 \cdot 2140}}{1,0} = 2,86 \geq 1$$

Minimální moment setrvačnosti

$$I_{st,min} = \frac{0,095}{210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{2140}{4}\right)^4 \cdot \left(1 + 7,13 \cdot \frac{300}{2140} \cdot 2,86\right) = 143 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Posouzení

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \geq I_{st,min} = 143 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Alternativní posouzení podle čl. 9.2.1 (7) ČSN EN 1993-1-5

Při absenci osově síly v příčné výztuze lze obě kritéria zjednodušeně ověřit pružnou analýzou prvního řádu s dodatečným ekvivalentním rovnoměrným příčným zatížením

Dodatečné ekvivalentní rovnoměrné příčné zatížení

$$q_{dev} = \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_m \cdot (w_0 + w_{el}) = \frac{\pi}{4} \cdot 0,095 \cdot (7,13 + 7,13) = 1,06 \text{ kN/m}$$

kde w_{el} je pružný průhyb, který lze určit iteračně nebo uvažovat jako maximální dodatečný průhyb $b/300$

$$w_{el} = \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$

Průhyb výztuhy od dodatečného ekvivalentního příčného zatížení

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{dev} \cdot h_w^2}{E \cdot I_{st}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,06 \cdot 2140^2}{210 \cdot 10^3 \cdot 71,0 \cdot 10^6} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$

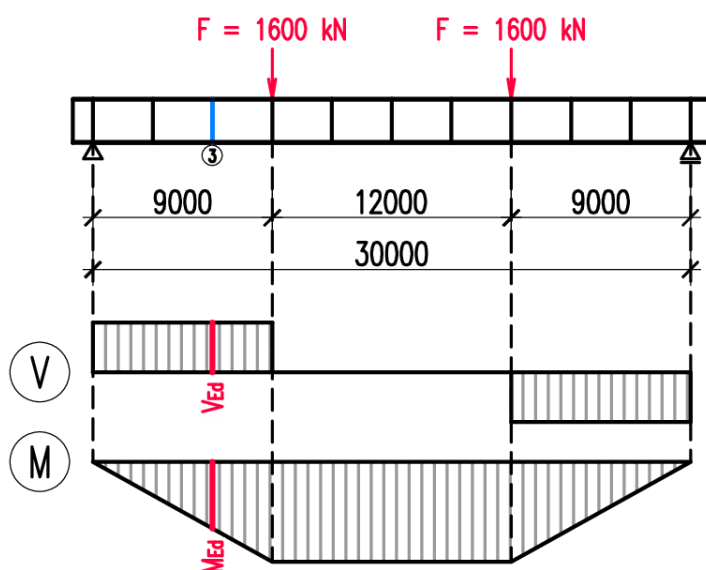
$\Rightarrow$ vyhovuje

Ohybový moment na výztuze od dodatečného ekvivalentního příčného zatížení

$$M_{st,dev} = \frac{1}{8} \cdot q_{dev} \cdot h_w^2 = \frac{1}{8} \cdot 1,06 \cdot 2,14^2 = 0,61 \text{ kNm}$$

Normálové napětí ve výztuze

$$\sigma_{max} = \frac{M_{st,dev}}{I_{st}} \cdot e_{max} = \frac{0,61 \cdot 10^6}{71,0 \cdot 10^6} \cdot 208 = 1,8 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

C) VÝZTUHA Č. 3 - DRUHÁ VNITŘNÍ PŘÍČNÁ VÝZTUHA

$$M_{Ed} = 9600 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN}$$

Podmínka torzní tuhosti

Stejně jako pro výztuhu č. 1

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{273 \cdot 10^3}{42,7 \cdot 10^6} = 0,0064 \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} = 5,3 \cdot \frac{235}{210 \cdot 10^3} = 0,0059 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Podmínka ohybové tuhosti

Stejně jako pro výztuhu č. 2

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \geq I_{st,min} = 6,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

=> dle č. 9.3.3 lze výztuhu považovat za tuhou pro posouzení smykové únosnosti

Posouzení z hlediska pevnosti

S využitím pružné analýzy podle teorie II. řádu se mají v mezním stavu únosnosti ověřit následující kritéria:

- Maximální napětí ve výztuze nepřesahuje f_y/γ_{M1}
- Dodatečný průhyb nepřesáhne $b/300$

Moment setrvačnosti příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Průřezová plocha příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$A_{st} = 12912 \text{ mm}^2$$

Kritická síla příčné výztuhy (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$N_{cr,st} = 32133 \text{ kN}$$

Vnější osová síla

$$N_{st,ex} = 0 \text{ kN}$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z tahových polí

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN} \quad \text{návrhová posouvající síla ve vzdálenosti } h_w/2 \text{ od výztuhy}$$

Poměrná štíhlost stojiny ([viz příklad posouzení na smyk](#))

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{2140}{37,4 \cdot 16 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{7,38}} = 1,625$$

Tlaková síla plynoucí z tahových polí

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \cdot \frac{f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 1600 \cdot 10^3 - \frac{1}{1,625^2} \cdot \frac{355 \cdot 2140 \cdot 16}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = -1058 \text{ kN} \Rightarrow N_{st,ten} = 0 \text{ kN}$$

Ohybový moment na nosníku v místě posuzované výztuhy

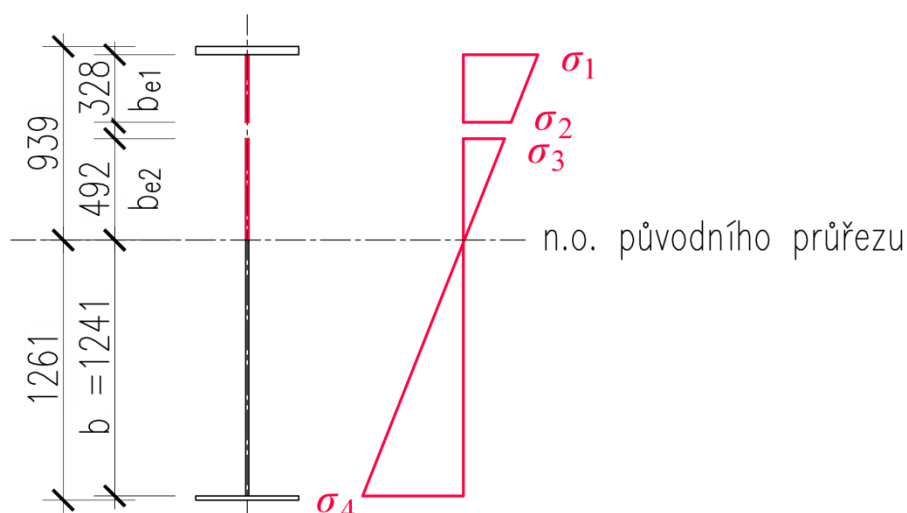
$$M_{Ed} = 9600 \text{ kNm}$$

Normálové napětí od ohybu

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = 185 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 118 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 101 \text{ MPa}$$



Tlaková síla z přilehlých panelů

$$N_{Ed} = \left(b_{e,1} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + b_{e,2} \cdot \frac{\sigma_3}{2} \right) \cdot t = \left(328 \cdot \frac{185 + 118}{2} + 492 \cdot \frac{101}{2} \right) \cdot 16 = 1194 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \geq \frac{A_{c,eff}}{2} \cdot \sigma_{max} = \frac{13120}{2} \cdot 92,6 = 1214 \text{ kN}$$

$$A_{c,eff} = b_{eff} \cdot t = 820 \cdot 16 = 13120 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \cdot \frac{N_{Ed}}{b} \cdot \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) = 0,5 \cdot \frac{1214 \cdot 10^3}{2140} \cdot \left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \right) = 0,19 \text{ MPa}$$

Omezení poměru kritických napětí (stejně jako pro výztuhu č. 2)

$$\frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = \frac{5,40}{359} = 0,015 \quad \text{ale} \quad 0,5 \leq \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \leq 1,0 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = 0,5$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z odchýlených sil

$$\Delta N_{st,Ed} = \frac{\sigma_m \cdot h_w^2}{\pi^2} = \frac{0,19 \cdot 2140^2}{\pi^2} = 88 \text{ kN}$$

Součet vnější osově síly a osově síly z tahových polí

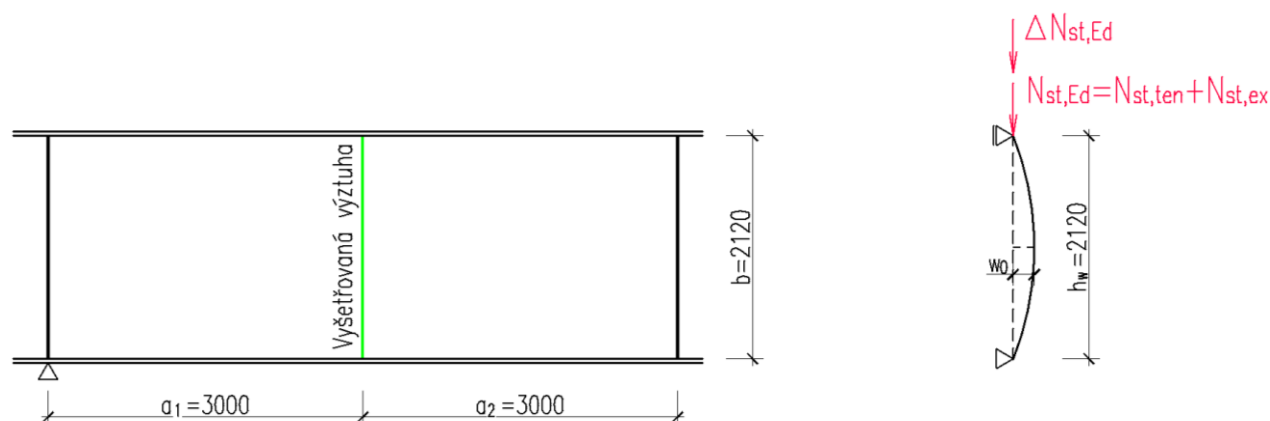
$$N_{st,Ed} = N_{st,ten} + N_{st,ex} = 0 + 0 = 0 \text{ kN}$$

Celková osová síla

$$\Sigma N_{st,Ed} = N_{st,Ed} + \Delta N_{st,Ed} = 0 + 88 = 88 \text{ kN}$$

Amplituda počáteční imperfekce výztuhy

$$w_0 = \frac{s}{300} = \frac{\min \{a_1; a_2; b\}}{300} = \frac{\min \{3000; 3000; 2140\}}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$



Dodatečný průhyb výztuhy

$$w = w_0 \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} = 7,13 \cdot \frac{1}{\frac{32133}{88} - 1} = 0,02 \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální napětí ve výztuze

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\text{st,Ed}}}{A_{\text{st}}} + \frac{\Sigma N_{\text{st,Ed}} \cdot e_{\max}}{I_{\text{st}}} \cdot w_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{\text{st,Ed}}}{N_{\text{cr,st}}}} = \frac{0}{12912} + \frac{88 \cdot 10^3 \cdot 208}{71 \cdot 10^6} \cdot 7,13 \cdot \frac{1}{1 - \frac{88}{32133}} =$$

$$= 0 + 1,8 \cdot \frac{1}{0,997} = 0 + 1,8 = 1,8 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Alternativní posouzení podle čl. 9.2.1 (5) ČSN EN 1993-1-5

Při absenci osově síly v příčné výztuze lze předpokládat, že obě kritéria jsou splněna, pokud

$$I_{\text{st}} \geq I_{\text{st,min}} = \frac{\sigma_m}{E} \cdot \left(\frac{b}{4}\right)^4 \cdot \left(1 + w_0 \cdot \frac{300}{b} \cdot u\right)$$

kde

$$u = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot e_{\max}}{f_y \cdot 300 \cdot b} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 208}{235 \cdot 300 \cdot 2140} = 2,86 \geq 1$$

Minimální moment setrvačnosti

$$I_{\text{st,min}} = \frac{0,19}{210 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{2140}{4}\right)^4 \cdot \left(1 + 7,13 \cdot \frac{300}{2140} \cdot 2,86\right) = 286 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Posouzení

$$I_{\text{st}} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \geq I_{\text{st,min}} = 286 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Alternativní posouzení podle čl. 9.2.1 (7) ČSN EN 1993-1-5

Při absenci osově síly v příčné výztuze lze obě kritéria zjednodušeně ověřit pružnou analýzou prvního řádu s dodatečným ekvivalentním rovnoměrným příčným zatížením

Dodatečné ekvivalentní rovnoměrné příčné zatížení

$$q_{\text{dev}} = \frac{\pi}{4} \cdot \sigma_m \cdot (w_0 + w_{\text{el}}) = \frac{\pi}{4} \cdot 0,19 \cdot (7,13 + 7,13) = 2,12 \text{ kN/m}$$

kde w_{el} je pružný průhyb, který lze určit iteračně nebo uvažovat jako maximální dodatečný průhyb $b/300$

$$w_{\text{el}} = \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$

Průhyb výztuhy od dodatečného ekvivalentního příčného zatížení

$$w = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{\text{dev}} \cdot h_w^2}{E \cdot I_{\text{st}}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,12 \cdot 2140^2}{210 \cdot 10^3 \cdot 71,0 \cdot 10^6} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$

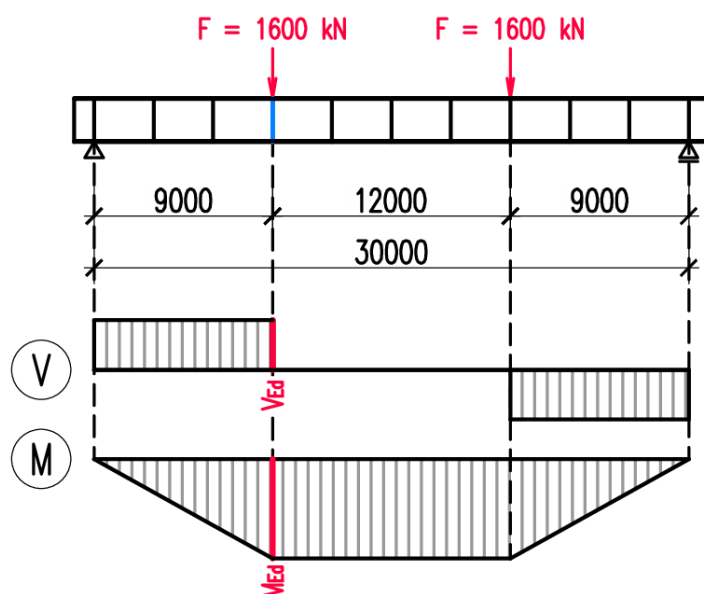
$\Rightarrow$ vyhovuje

Ohybový moment na výztuze od dodatečného ekvivalentního příčného zatížení

$$M_{\text{st.dev}} = \frac{1}{8} \cdot q_{\text{dev}} \cdot h_w^2 = \frac{1}{8} \cdot 2,12 \cdot 2,14^2 = 1,22 \text{ kNm}$$

Normálové napětí ve výztuze

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{st.dev}}}{I_{\text{st}}} \cdot e_{\text{max}} = \frac{1,22 \cdot 10^6}{71,0 \cdot 10^6} \cdot 208 = 3,6 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

D) VÝZTUHA Č. 4 - PŘÍČNÁ VÝZTUHA POD BŘEMENEM

$$M_{Ed} = 14400 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN}$$

Podmínka torzní tuhosti

Stejně jako pro výztuhu č. 1

$$\frac{I_t}{I_p} = \frac{273 \cdot 10^3}{42,7 \cdot 10^6} = 0,0064 \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} = 5,3 \cdot \frac{235}{210 \cdot 10^3} = 0,0059 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Podmínka ohybové tuhosti

Stejně jako pro výztuhu č. 2

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \geq I_{st,min} = 6,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

=> dle č. 9.3.3 lze výztuhu považovat za tuhou pro posouzení smykové únosnosti

Posouzení z hlediska pevnosti

S využitím pružné analýzy podle teorie II. řádu se mají v mezním stavu únosnosti ověřit následující kritéria:

- Maximální napětí ve výztuze nepřesahuje f_y/γ_{M1}
- Dodatečný průhyb nepřesáhne $b/300$

Moment setrvačnosti příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$I_{st} = 71,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Průřezová plocha příčné výztuhy s přilehlými částmi stojiny (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$A_{st} = 12912 \text{ mm}^2$$

Kritická síla příčné výztuhy (stejně jako pro výztuhu č. 1)

$$N_{cr,st} = 32133 \text{ kN}$$

Vnější osová síla

$$N_{st,ex} = 1600 \text{ kN} \quad \text{břemeno nad výztuhou}$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z tahových polí

$$V_{Ed} = 1600 \text{ kN} \quad \text{návrhová posouvající síla ve vzdálenosti } h_w/2 \text{ od výztuhy}$$

Poměrná štíhlost stojiny ([viz příklad posouzení na smyk](#))

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{2140}{37,4 \cdot 16 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{7,38}} = 1,625$$

Tlaková síla plynoucí z tahových polí

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \cdot \frac{f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 1600 \cdot 10^3 - \frac{1}{1,625^2} \cdot \frac{355 \cdot 2140 \cdot 16}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = -1058 \text{ kN} \Rightarrow N_{st,ten} = 0 \text{ kN}$$

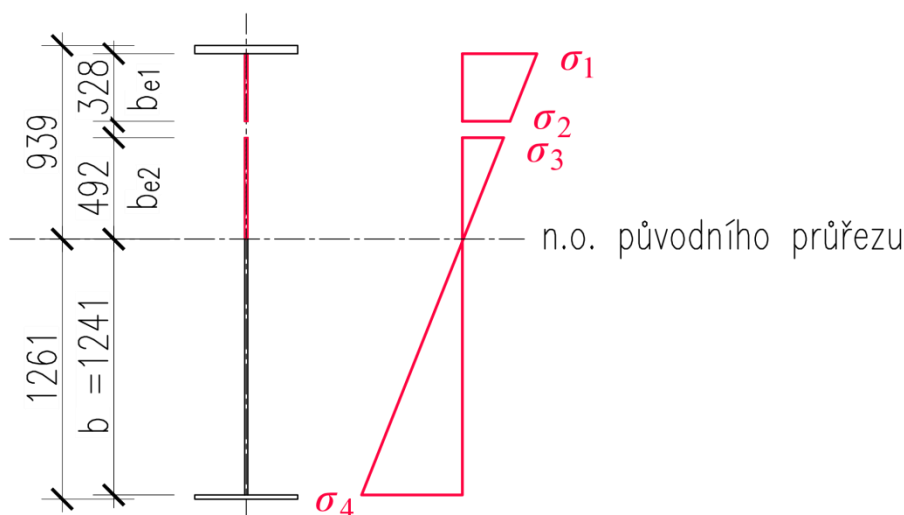
Normálové napětí od ohybu

$$M_{Ed} = 14400 \text{ kNm}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = 278 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 176 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 152 \text{ MPa}$$



Tlaková síla z přilehlých panelů

$$N_{Ed} = \left(b_{e,1} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + b_{e,2} \cdot \frac{\sigma_3}{2} \right) \cdot t = \left(328 \cdot \frac{278 + 176}{2} + 492 \cdot \frac{152}{2} \right) \cdot 16 = 1791 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \geq \frac{A_{c,eff}}{2} \cdot \sigma_{max} = \frac{13120}{2} \cdot 278 = 1821 \text{ kN}$$

$$A_{c,eff} = b_{eff} \cdot t = 820 \cdot 16 = 13120 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \cdot \frac{N_{Ed}}{b} \cdot \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) = 0,5 \cdot \frac{1821 \cdot 10^3}{2140} \cdot \left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \right) = 0,285 \text{ MPa}$$

Omezení poměru kritických napětí (stejně jako pro výztuhu č. 2)

$$\frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = \frac{5,40}{359} = 0,015 \quad \text{ale} \quad 0,5 \leq \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \leq 1,0 \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = 0,5$$

Stanovení tlakové síly plynoucí z odchýlených sil

$$\Delta N_{st,Ed} = \frac{\sigma_m \cdot h_w^2}{\pi^2} = \frac{0,285 \cdot 2140^2}{\pi^2} = 132 \text{ kN}$$

Součet vnější osově síly a osově síly z tahových polí

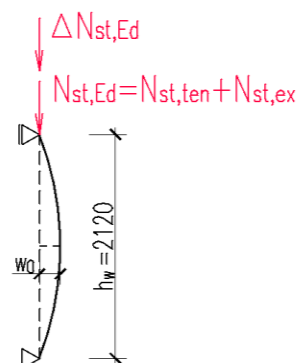
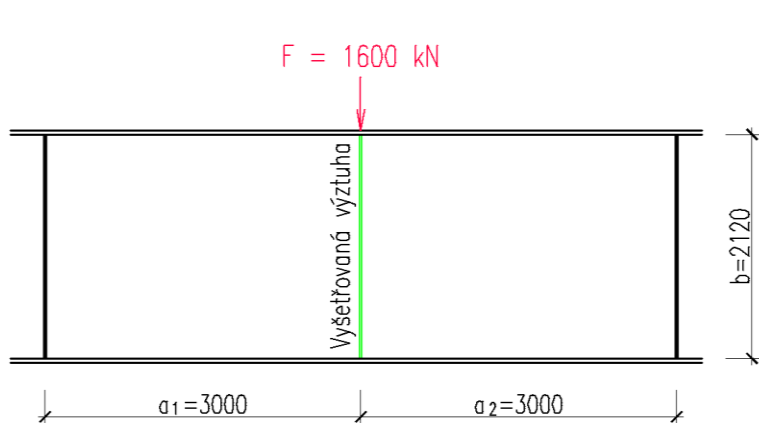
$$N_{st,Ed} = N_{st,ten} + N_{st,ex} = 0 + 1600 = 1600 \text{ kN}$$

Celková osová síla

$$\Sigma N_{st,Ed} = N_{st,Ed} + \Delta N_{st,Ed} = 1600 + 132 = 1732 \text{ kN}$$

Amplituda počáteční imperfekce výztuhy

$$w_0 = \frac{s}{300} = \frac{\min \{a_1; a_2; b\}}{300} = \frac{\min \{3000; 3000; 2140\}}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm}$$



Dodatečný průhyb výztuhy

$$w = w_0 \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} = 7,13 \cdot \frac{1}{\frac{32133}{1732} - 1} = 0,41 \text{ mm} \leq \frac{b}{300} = \frac{2140}{300} = 7,13 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Maximální napětí ve výztuze

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\text{st,Ed}}}{A_{\text{st}}} + \frac{\Sigma N_{\text{st,Ed}} \cdot e_{\max}}{I_{\text{st}}} \cdot w_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{\text{st,Ed}}}{N_{\text{cr,st}}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{12912} + \frac{1732 \cdot 10^3 \cdot 208}{71 \cdot 10^6} \cdot 7,13 \cdot \frac{1}{1 - \frac{1732}{32133}} =$$

$$= 124 + 36 \cdot \frac{1}{0,946} = 124 + 38 = 162 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \text{vyhovuje}$$