

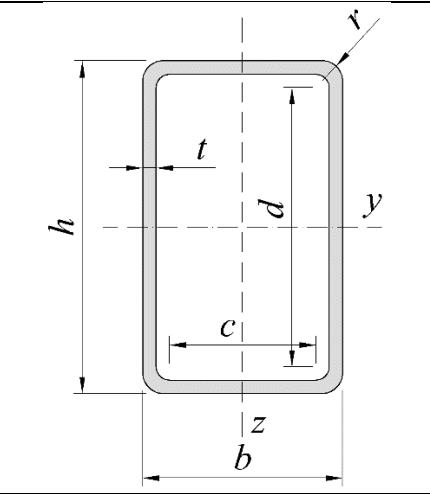
## Posouzení prutu namáhaného kombinací osově tlakové síly a ohybového momentu ve smyslu ČSN EN 1993-1-1 – řešený příklad

Předmětem příkladu je posouzení prutu namáhaného kombinací osového tlaku a ohybového momentu s možnou ztrátou stability při tlaku (vzpěr). Pro posouzení se použijí ustanovení kapitoly 6.3.3 v normě ČSN EN 1993-1-1 [1], na kterou je v pravém sloupci odkazováno.

### Vstupní údaje

V rámci úlohy je řešeno posouzení prostého nosníku průřezu RHS 200×120×10 z oceli pevnostní třídy S235 o rozpětí  $L = 5$  m. Návrhové hodnoty zatížení jsou  $N_{Ed} = -100,00$  kN (návrhová normálová tlaková síla), příčná síla  $F_{z,Ed} = 50$  kN působící 2 m od levé podpory, koncové momenty okolo osy  $y$ :  $M_{y,Ed} = -20$  kNm (vlevo) a  $M_{y,Ed} = 20$  kNm (vpravo) a koncové momenty okolo osy  $z$ :  $M_{z,Ed} = -10$  kNm (vlevo) a  $M_{z,Ed} = 30$  kNm (vpravo). Nosník je použitý v ocelové konstrukci pozemní stavby.

Okrajové podmínky jsou uvažovány jako oboustranné kloubové podepření jak pro ohyb okolo osy  $y$ , tak okolo osy  $z$ . Deplanace průřezu je umožněna v obou podporách.

$A = 5890,00 \text{ mm}^2$	$t_w = 10,00 \text{ mm}$	
$I_y = 30260000,00 \text{ mm}^4$	$r = 15,00 \text{ mm}$	
$I_z = 13370000,00 \text{ mm}^4$	$c = 90,00 \text{ mm}$	
$I_t = 30010000,00 \text{ mm}^4$	$d = 170,00 \text{ mm}$	
$I_w = 3993000000,00 \text{ mm}^6$	$h = 200,00 \text{ mm}$	
$W_{el,y} = 303000,00 \text{ mm}^3$	$b = 120,00 \text{ mm}$	
$W_{el,z} = 223000,00 \text{ mm}^3$	$i_y = 71,70 \text{ mm}$	
$W_{pl,y} = 379000,00 \text{ mm}^3$	$i_z = 47,60 \text{ mm}$	
$W_{pl,z} = 263000,00 \text{ mm}^3$	$y_0 = 0,00 \text{ mm}$	
$t_f = 10,00 \text{ mm}$	$z_0 = 0,00 \text{ mm}$	

### Materiálové charakteristiky

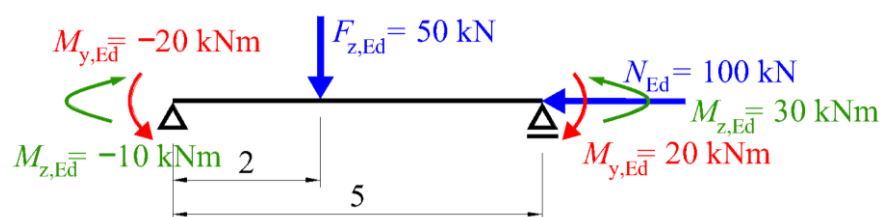
Ocel S235:  $E = 210$  GPa,  $G = 81$  GPa,  $f_y = 235$  MPa

### Součinitele spolehlivosti

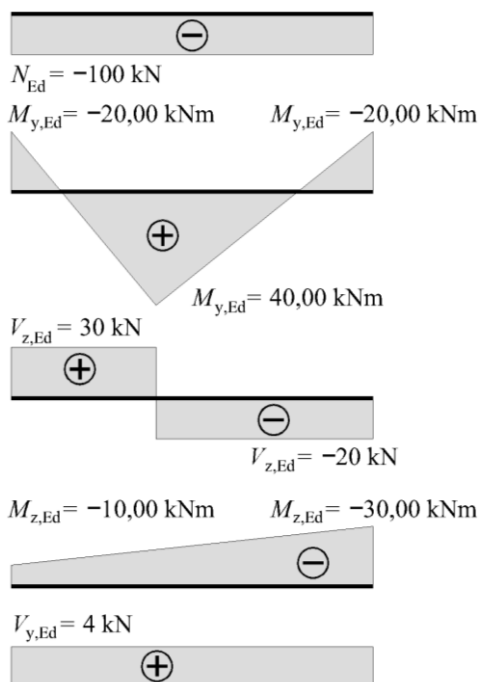
$\gamma_{M0} = 1,00$  (dílní součinitel únosnosti průřezu)

$\gamma_{M1} = 1,00$  (dílní součinitel únosnosti průřezu při posuzování stability prutu)

### Zatížení



## Vnitřní síly



## Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,00$$

Svislá stěna (konzervativně uvažován pouze tlak) [2]

$$\frac{d}{t_w} = \frac{170}{10} = 17 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \rightarrow \text{třída 1}$$

Tab. 5.2

Vodorovná stěna (konzervativně uvažován pouze tlak) [2]

$$\frac{c}{t_f} = \frac{90}{10} = 9 \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \rightarrow \text{třída 1}$$

Tab. 5.2

Průřez je třídy 1.

## Posouzení

Posouzení se provede pomocí podmínek (6.61) a (6.62):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.62)$$

Momenty v důsledku posunu těžišťové osy  $\Delta M_{y,Ed}$  a  $\Delta M_{z,Ed}$  se uplatní pouze u průřezů třídy 4.

Interakční součinitele  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  a  $k_{zz}$  se určí pomocí metody 1 nebo metody 2. Pro použití v ČR je doporučeno použití metody 2.

### Návrhové vnitřní síly

$$N_{Ed} = 100,00 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = 40,00 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 30,00 \text{ kNm}$$

### Charakteristické únosnosti v tlaku a v ohybu

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 5890 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^6 = 1384,15 \text{ kN} \quad \text{Tab. 6.7}$$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 379000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 = 89,07 \text{ kNm} \quad \text{Tab. 6.7}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 263000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6 = 61,85 \text{ kNm} \quad \text{Tab. 6.7}$$

### Návrhové plastické únosnosti v ohybu

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{379000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,00} = 89,07 \text{ kNm} \quad (6.13)$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{263000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,00} = 61,85 \text{ kNm} \quad (6.13)$$

### Vzpěrné délky

$$L_{cr,y} = k_y \cdot L = 1 \cdot 5 = 5 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} = k_z \cdot L = 1 \cdot 5 = 5 \text{ m}$$

$$L_{cr,T} = k_w \cdot L = 1 \cdot 5 = 5 \text{ m}$$

### Výpočet součinitelů vzpěrnosti $\chi_y$ a $\chi_z$

Vzpěr kolmo k ose y

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 30260000 \cdot 10^{-12}}{5^2} = 2508,70 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{5890 \cdot 235}{6927510}} = 0,74$$

6.3.1.2

Křivka vzpěrné pevnosti  $a$  (válcováno za tepla),  $\alpha = 0,21$

Tab. 6.2

$$\Phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,74 - 0,2) + 0,74^2] = 0,83$$

6.3.1.2

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,74^2}} = 0,83$$

6.3.1.2

Vzpěr kolmo k ose z

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 13370000 \cdot 10^{-12}}{5^2} = 1108,44 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{5890 \cdot 235}{1108440}} = 1,12$$

6.3.1.2

Křivka vzpěrné pevnosti  $a$  (válcováno za tepla),  $\alpha = 0,21$

Tab. 6.2

$$\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,12 - 0,2) + 1,12^2] = 1,22$$

6.3.1.2

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,22 + \sqrt{1,22^2 - 1,12^2}} = 0,59$$

6.3.1.2

Uzavřený průřez není náchylný ke klopení,  $\chi_{LT} = 1,00$ .

### Výpočet součinitelů interakce $k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ , $k_{zz}$

Pro určení součinitelů interakce jsou k dispozici dvě metody: metoda 1 a metoda 2. Při výpočtu se rozlišuje, zda je prut náchylný ke zkroucení či nikoli.

#### Metoda 1

[2]

V metodě 1 se prut považuje za náchylný ke zkroucení, pokud platí  $I_t \leq I_y$ . Pokud je náchylný ke zkroucení, uvažuje se v rámci posouzení s vypočítaným součinitelem klopení (viz výše). Pokud prut náchylný ke zkroucení není, lze uvažovat  $\chi_{LT} = 1,00$ .

V případě, že platí  $I_t < I_y$ , avšak prut je podélně průběžně podepřen spojitou příčnou vazbou bránící příčnému vybočení, může být považován za nenáchylný ke zkroucení, pokud je splněna následující podmínka, kde  $C_1$  je součinitel závislý na průběhu

ohybového momentu,  $\bar{\lambda}_0$  je poměrná štíhlost odpovídající konstantnímu průběhu momentu a  $N_{cr,T}$  je kritická síla pro vzpěr zkroucením.

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0,2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} \quad [2]$$

Součinitel  $C_1$  lze spočítat následujícím vztahem, kde  $k_c$  je opravný součinitel:

$$C_1 = \left(\frac{1}{k_c}\right)^2 \quad [2]$$

V řešeném příkladu platí  $I_t < I_y$  a prut není spojitě příčně podepřen. Je tedy považován za náchylný ke zkroucení.

$$I_t = 30010000 \text{ mm}^4 < I_y = 30260000 \text{ mm}^4$$

Interakční součinitele se určí dle Tab. A.1. Pro řešenou úlohu se uplatní hodnoty pro plasticitní návrh (jedná se o průřez třídy 1).

$$k_{yy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}} \quad \text{Tab. A.1}$$

$$k_{yz} = C_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \quad \text{Tab. A.1}$$

$$k_{zy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \quad \text{Tab. A.1}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}} \quad \text{Tab. A.1}$$

Výpočet pomocných součinitelů

Pomocné součinitele ekvivalentního konstantního momentu  $C_{my,0}$  a  $C_{mz,0}$  (s použitím největšího průhybu prutu kolmo na daný směr, tedy  $\delta_z$  a  $\delta_y$ ,  $M_{y,Ed}$  a  $M_{z,Ed}$  jsou příslušné největší momenty).

$$\delta_z = -9,7 \text{ mm}$$

Moment  $M_{y,Ed}$  má po částech lineární průběh, moment  $M_{z,Ed}$  má lineární průběh.

$$C_{m,y,0} = 1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y \cdot |\delta_z|}{L^2 \cdot |M_{y,Ed}(x)|} - 1 \right) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} =$$

$$= 1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 30260000 \cdot 10^{-12} \cdot |-0,0097|}{5^2 \cdot |40000|} - 1 \right) \cdot \frac{100000,00}{2508700,00} = 0,98$$

Tab. A.2

$$\psi_z = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} = \frac{-10000}{-30000} = 0,33$$

Tab. A.2

$$C_{mz,0} = 0,79 + 0,21 \cdot \psi_z + 0,36 \cdot (\psi_z - 0,33) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} =$$

$$= 0,79 + 0,21 \cdot 0,33 + 0,36 \cdot (0,33 - 0,33) \cdot \frac{100000}{1108440} = 0,86$$

Tab. A.2

Výpočet poměrné štíhlosti odpovídající konstantnímu průběhu momentu

$$k_z = k_w = 1,0$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_\omega}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,5} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 3993000000 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 30010000 \cdot 10^{-12}}} = 0,01$$

NB.3.2

$$z_a = 0,00 \text{ m}$$

NB.3.2

$$z_s = 0,00 \text{ m}$$

NB.3.2

$$z_g = z_a - z_s = 0,00 - 0,00 = 0,00 \text{ m}$$

NB.3.2

$$z_j = 0 \text{ m}$$

NB.3.3

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0,00}{1,5} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 13370000 \cdot 10^{-12}}{81 \cdot 10^9 \cdot 30010000 \cdot 10^{-12}}} = 0,00$$

NB.3.2

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0,00}{1,5} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 13370000 \cdot 10^{-12}}{81 \cdot 10^9 \cdot 30010000 \cdot 10^{-12}}} = 0,00$$

NB.3.2

$$C_1 = 1,00$$

NB.3.2

$$C_2 = 1,00$$

NB.3.2

$$C_3 = 1,00$$

NB.3.2

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

$$= \frac{1,00}{1} \cdot \left[ \sqrt{1 + 0,01^2 + [1,00 \cdot 0,00 - 1,00 \cdot 0]^2} - [0,00 \cdot 0,00 - 1,00 \cdot 0] \right] = 1,00$$

NB.3.2

$$M_{cr} = \mu_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L} =$$

$$= 1,00 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 13370000 \cdot 10^{-12} \cdot 81 \cdot 10^9 \cdot 30010000 \cdot 10^{-12}}}{5} =$$

$$= 519,08 \text{ kNm}$$

NB.3.2

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{379000 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^6}{519800}} = 0,41$$

6.3.2.2

Součinitele ekvivalentního konstantního momentu  $C_{my}$  a  $C_{mz}$

Pro  $\bar{\lambda}_0 \leq 0,2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$  platí:

Tab. A.1

$$C_{my} = C_{my,0}, C_{mz} = C_{mz,0}, C_{mLT} = 1,00$$

Tab. A.1

Vyčíslení:

$$C_1 = \left(\frac{1}{k_c}\right)^2 = \left(\frac{1}{0,82}\right)^2 = 1,49$$

Tab. 6.6

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 = 0,072^2 + 0,048^2 = 0,007488 \text{ m}^2$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left( G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_\omega}{L_{cr,T}^2} \right) =$$

$$= \frac{1}{0,007488} \cdot \left( 81 \cdot 10^9 \cdot 30010000 \cdot 10^{-12} + \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 3993000000 \cdot 10^{-18}}{5^2} \right) =$$

$$= 324671,61 \text{ kN}$$

[3]

$$\bar{\lambda}_0 \geq 0,2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}$$

$$0,41 \geq 0,2 \cdot \sqrt{1,49} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{100,00}{1108,44}\right) \cdot \left(1 - \frac{100,00}{324671,61}\right)} = 0,24$$

V řešeném příkladu je poměrná štíhlost odpovídající konstantnímu průběhu momentu větší než uvedený výraz. Součinitele ekvivalentního konstantního momentu se určí pomocí následujících vztahů:

$$0,41 \geq 0,24 \rightarrow C_{m_y} = C_{m_{y,0}} + (1 - C_{m_{y,0}}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} \quad \text{Tab. A.1}$$

$$C_{m_z} = C_{m_{z,0}} \quad \text{Tab. A.1}$$

$$C_{m_{LT}} = C_{m_y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1,00 \quad \text{Tab. A.1}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed} \cdot A}{N_{Ed} \cdot W_{el,y}} = \frac{40000 \cdot 5890 \cdot 10^{-6}}{100000 \cdot 303000 \cdot 10^{-9}} = 7,78 \quad \text{Tab. A.1}$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{30010000}{30260000} = 0,01 \geq 0,00 \quad \text{Tab. A.1}$$

$$C_{m_y} = C_{m_{y,0}} + (1 - C_{m_{y,0}}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} = 1,00 + (1 - 0,98) \cdot \frac{\sqrt{7,78} \cdot 0,01}{1 + \sqrt{7,78} \cdot 0,01} = 1,00 \quad \text{Tab. A.1}$$

$$C_{m_z} = C_{m_{z,0}} = 0,86 \quad \text{Tab. A.1}$$

$$C_{m_{LT}} = C_{m_y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} =$$

$$= 1,00^2 \cdot \frac{0,01}{\sqrt{\left(1 - \frac{100}{1108,44}\right) \cdot \left(1 - \frac{100}{324671,61}\right)}} = 0,01 \leq 1,00 \rightarrow C_{m_{LT}} = 1,00 \quad \text{Tab. A.1}$$

Pomocné hodnoty:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{100}{2508,70}}{1 - 0,83 \cdot \frac{100}{2508,70}} = 0,93 \quad \text{Tab. A.1}$$



$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{100}{1108,44}}{1 - 0,59 \cdot \frac{100}{1108,44}} = 0,96$$

Tab. A.1

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{379000}{5303000} = 1,25 \leq 1,5$$

Tab. A.1

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{263000}{223000} = 1,18 \leq 1,5$$

Tab. A.1

$$n_{pl} = \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{100,00}{1384,15} = 0,07$$

Tab. A.1

$$\bar{\lambda}_{\max} = \max\{\bar{\lambda}_y; \bar{\lambda}_z\} = \max\{0,74; 1,12\} = 1,12$$

Tab. A.1

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed} \cdot M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd} \cdot M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 0,5 \cdot 0,01 \cdot 0,41^2 \cdot \frac{40000 \cdot 0,00}{1,00 \cdot 89070 \cdot 61850} = 0,00$$

Tab. A.1

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] =$$

$$= 1 + (1,25 - 1) \cdot \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{1,25} \cdot 1,00^2 \cdot 1,12 - \frac{1,6}{1,25} \cdot 1,00^2 \cdot 1,12^2 \right) \cdot 0,07 - 0,00 \right] =$$

$$= 0,98 \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{303000}{379000} = 0,80$$

Tab. A.1

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} =$$

$$= 10 \cdot 0,01 \cdot \frac{0,41^2}{5 + 1,12^4} \cdot \frac{40000}{1,00 \cdot 1,00 \cdot 89070} = 0,00$$

Tab. A.1

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[ \left( 2 - 14 \cdot \frac{C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] =$$

$$= 1 + (1,18 - 1) \cdot \left[ \left( 2 - 14 \cdot \frac{0,86^2 \cdot 1,12^2}{1,18^5} \right) \cdot 0,07 - 0,00 \right] =$$

$$= 0,95 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,18}{1,25}} \cdot \frac{223000}{263000} = 0,49$$

Tab. A.1

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \cdot 0,01 \cdot \frac{0,41}{0,1 + 1,12^4} \cdot \frac{40000}{1,00 \cdot 1,00 \cdot 89070} \cdot \frac{30000}{0,90 \cdot 61850} = 0,00$$

Tab. A.1

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[ \left( 2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] =$$

$$= 1 + (1,25 - 1) \cdot \left[ \left( 2 - 14 \cdot \frac{1,00^2 \cdot 1,12^2}{1,25^5} \right) \cdot 0,07 - 0,00 \right] =$$

$$= 0,93 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,25}{1,18}} \cdot \frac{303000}{379000} = 0,49$$

Tab. A.1

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} =$$

$$= 1,7 \cdot 0,01 \cdot \frac{0,41}{0,1 + 1,12^4} \cdot \frac{40000}{1,00 \cdot 1,00 \cdot 89070} = 0,00$$

Tab. A.1

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - e_{LT} \right] =$$

$$= 1 + (1,18 - 1) \cdot \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{1,18} \cdot 0,86^2 \cdot 1,12 - \frac{1,6}{1,18} \cdot 0,86^2 \cdot 1,12^2 \right) \cdot 0,07 - 0,00 \right] =$$

$$= 1,00 \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = \frac{223000}{263000} = 0,85$$

Tab. A.1

Interakční součinitele pro plasticitní návrh

$$k_{yy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}} = 1,00 \cdot 1,00 \cdot \frac{0,93}{1 - \frac{100,00}{2508,70}} \cdot \frac{1}{0,98} = 0,99$$

Tab. A.1

$$k_{yz} = C_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 0,90 \cdot \frac{0,93}{1 - \frac{100,00}{1108,44}} \cdot \frac{1}{0,95} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,18}{1,25}} = 0,56$$

Tab. A.1

$$k_{zy} = C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} =$$

$$= 1,00 \cdot 1,00 \cdot \frac{0,96}{1 - \frac{100,00}{2508,70}} \cdot \frac{1}{0,93} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,25}{1,18}} = 0,66$$

Tab. A.1

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}} = 0,86 \cdot \frac{0,96}{1 - \frac{100,00}{1108,44}} \cdot \frac{1}{1,00} = 0,91$$

Tab. A.1

### Posouzení dle metody 1

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{100,00}{0,83 \cdot 1384,15} + 0,99 \cdot \frac{40,00 + 0,00}{1,00 \cdot 89,07} + 0,56 \cdot \frac{30,00 + 0,00}{61,85} = 0,80 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.62)$$

$$\frac{100,00}{0,31 \cdot 1384,15} + 0,66 \cdot \frac{40,00 + 0,00}{1,00 \cdot 89,07} + 0,91 \cdot \frac{30,00 + 0,00}{61,85} = 0,97 \leq 1$$

Obě podmínky jsou splněny. Při použití metody 1 průřez vyhovuje, maximální využití je 97 %.

### Metoda 2

[2]

Podle metody 2 mohou být jako nenáchylné ke zkroucení považovány tyto prvky:

- prvky s průřezem kruhové trubky
- prvky s průřezem obdélníkové trubky za předpokladu, že  $h / b \leq 10 / \bar{\lambda}_z$
- prvky otevřeného průřezu za předpokladu, že jsou příčně průběžně (spojitě) podepřeny proti příčnému posunu a natočení, tedy pokud jsou splněny podmínky (BB.2) a (BB.4) v ČSN EN 1993-1-1, příl. BB.

V řešeném příkladu je prut považován za nenáchylný ke zkroucení ( $h / b = 200 / 120 = 1,67 < 10 / 1,12 = 8,93$ ).

Interakční součinitele pro prvky, které nejsou náchylné ke zkroucení (pravoúhlé duté průřezy), se určí dle Tab. B.2. Pro řešenou úlohu se uplatní hodnoty pro plasticitní návrh (jedná se o průřez třídy 1).

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left[ \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) \right] \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right)$$

Tab. B.2

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz}$$

Tab. B.2

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy}$$

Tab. B.2

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left[ \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) \right] \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right)$$

Tab. B.2

Vyčíslení součinitelů ekvivalentního konstantního momentu

Součinitel  $C_{my}$

Vzdálenost bodů podepřených ve směru  $z$  je shodná s rozpětím. Moment mezi těmito body má po částech lineární průběh.

$$\psi_y = 1,00$$

Tab. B.3

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{-20,00}{40,00} = -0,50$$

Tab. B.3

$$C_{my} = 0,90 + 0,10 \cdot \alpha_h = 0,90 + 0,10 \cdot (-0,50) = 0,85$$

Tab. B.3

Součinitel  $C_{mz}$

Vzdálenost bodů podepřených ve směru  $y$  je shodná s rozpětím. Moment mezi těmito body má lineární průběh.

$$\psi_z = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} = \frac{-10000}{-30000} = 0,33$$

Tab. B.3

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi = 0,6 + 0,4 \cdot 0,33 = 0,73$$

Tab. B.3

Součinitel  $C_{mLT}$

Vzdálenost bodů podepřených ve směru  $y$  je shodná s rozpětím. Moment mezi těmito body má po částech lineární průběh.

$$\psi_{LT} = 1,00$$

Tab. B.3

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{-20,00}{40,00} = -0,50$$

Tab. B.3

$$C_{mLT} = 0,90 + 0,10 \cdot \alpha_h = 0,90 + 0,10 \cdot (-0,50) = 0,85$$

Tab. B.3

Interakční součinitele

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left[ \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) \right] = 0,85 \cdot \left[ \left( 1 + (0,74 - 0,2) \cdot \frac{100,00}{0,83 \cdot 1384,15} \right) \right] =$$

Tab. B.1

$$= 0,89 \leq C_{my} \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) = 0,85 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{100,00}{0,83 \cdot 1384,15} \right) = 0,91$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 0,81 = 0,49$$

Tab. B.1

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,89 = 0,53$$

Tab. B.1

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left[ \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) \right] =$$

$$= 0,73 \cdot \left[ \left( 1 + (1,12 - 0,2) \cdot \frac{100,00}{0,59 \cdot 1384,15} \right) \right] =$$

$$0,81 \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) =$$

$$= 0,73 \cdot \left( 1 + 0,8 \cdot \frac{100,00}{0,59 \cdot 1384,15} \right) = 0,80 \rightarrow k_{zz} = 0,80$$

Tab. B.1

## Posouzení dle metody 2

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{100,00}{0,83 \cdot 1384,15} + 0,89 \cdot \frac{40,00 + 0,00}{1,00 \cdot 89,07} + 0,49 \cdot \frac{30,00 + 0,00}{61,85} = 0,72 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (6.62)$$

$$\frac{100,00}{0,59 \cdot 1384,15} + 0,53 \cdot \frac{40,00 + 0,00}{1,00 \cdot 89,07} + 0,80 \cdot \frac{30,00 + 0,00}{61,85} = 0,75 \leq 1$$

Obě podmínky jsou splněny. Při použití metody 2 průřez vyhovuje, maximální využití je 75 %.

## Použité zdroje

- [1] ČSN EN 1993-1-1 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] DA SILVA, L. S., SIMÕES, R., GERVÁSIO, H. *Design of Steel Structures*. Berlin: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2016. ISBN 978-92-9147-134-8.
- [3] ČSN EN 1993-1-3 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily*. Praha: Český normalizační institut, 2008.