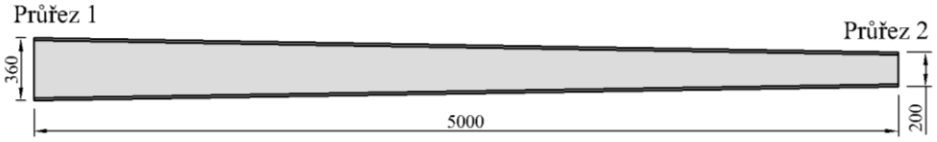
Posouzení prutu proměnného průřezu namáhaného kombinací osové tlakové síly a ohybového momentu ve smyslu ČSN EN 1993-1-1 (obecná metoda) – řešený příklad

Předmětem příkladu je posouzení prutu proměnného průřezu namáhaného kombinací osového tlaku a ohybového momentu s možnou ztrátou stability jak při tlaku, tak při ohybu. Pro posouzení prutů proměnného průřezu lze použít ustanovení článku 6.3.4 normy ČSN EN 1993-1-1 (obecná metoda pro vzpěr z roviny a klopení aplikovatelná na pruty namáhané tlakem a/nebo ohybem v rovině) [1]. Na vztahy obsažené v této normě je v pravém sloupci odkazováno.

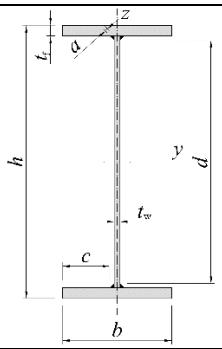
Vstupní údaje

V rámci úlohy je řešeno posouzení prostého nosníku svařovaného proměnného průřezu z oceli pevnostní třídy S235 o rozpětí L = 5 m. Průřez prutu se po délce lineárně mění z průřezu 1 do průřezu 2. Návrhové hodnoty zatížení jsou N_{Ed} = –100,00 kN (návrhová normálová tlaková síla) a $f_{z,Ed}$ = 16,00 kN/m (návrhové rovnoměrné spojité zatížení). Nosník je použitý v konstrukci pozemní stavby.

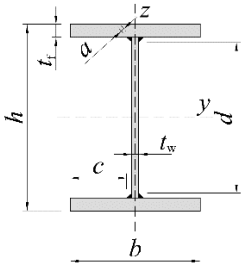
Okrajové podmínky jsou uvažovány jako oboustranné kloubové podepření jak pro ohyb okolo osy *y*, tak okolo osy z. Deplanace průřezu je umožněna v obou podporách. Zatížení působí v úrovni horní pásnice směrem do středu smyku.



Koncový průřez 1:

A =	7140,00 mm^2	t_f =	15,00 mm	
I_y =	157945500,00 mm^4	t_w =	8,00 mm	
I_z =	8451580,00 mm^4	a =	4,00 mm	
I_t =	396380,00 mm^4	c =	65,30 mm	
I_w =	251487000000,00 mm^6	d =	318,70 mm	
$W_{el,y}$ =	877475,00 mm^3	h =	360,00 mm	
$W_{el,z}$ =	112688,00 mm^3	b =	150,00 mm	

Koncový průřez 2:

A =	5860,00 mm^2	t_f =	15,00 mm	
I_y =	41862833,00 mm^4	t_w =	8,00 mm	
I_z =	8444753,00 mm^4	a =	4,00 mm	
I_t =	369073,00 mm^4	c =	65,30 mm	
I_w =	72255420708,00 mm^6	d =	158,70 mm	
$W_{el,y}$ =	418628,00 mm^3	h =	200,00 mm	
$W_{el,z}$ =	112597,00 mm^3	b =	150,00 mm	

Materiálové charakteristiky

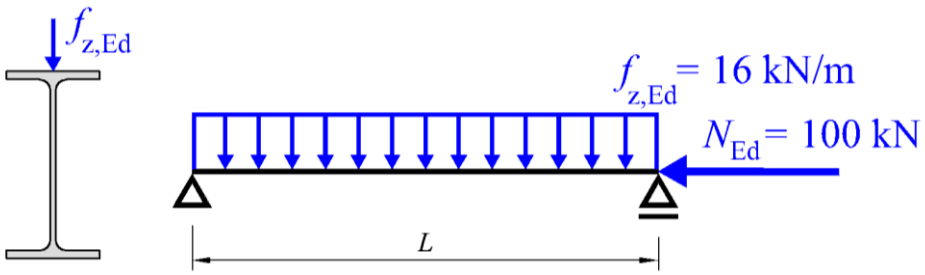
Ocel S235: E = 210 GPa, G = 81 GPa, f_y = 235 MPa

Součinitele spolehlivosti

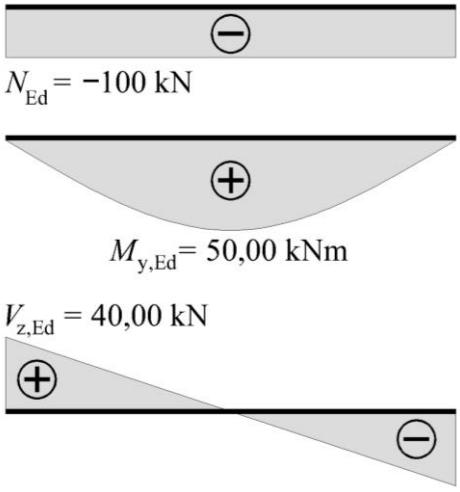
$\gamma_{M0} = 1{,}00$ (dílčí součinitel únosnosti průřezu)

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

Zatížení



Vnitřní síly



Zatřídění průřezu

Průřez se po délce mění a může se měnit i jeho zatřídění v jednotlivých řezech. Konzervativně je zatříděn pouze průřez s nejvyšší štíhlostí stojiny a pouze na tlak (koncový průřez).

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

Stojina (konzervativně pouze tlak)

$$\frac{d}{t_w} = \frac{318{,}7}{8} = 39{,}84 \le 42 \cdot \varepsilon = 42{,}00 \rightarrow \text{třída 3}$$ Tab. 5.2

Pásnice (tlak)

$$\frac{c}{t_f} = \frac{65{,}3}{15} = 4{,}35 \le 9 \cdot \varepsilon = 9 \rightarrow \text{třída 1} \qquad \text{Tab. 5.2}$$

Průřez je třídy 3.

Obecná metoda pro vzpěr z roviny a klopení

Posouzení prostřednictvím obecné metody se provede pomocí vztahu (6.63):

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \ge 1 \qquad (6.63)$$

Součinitel $\alpha_{ult,k}$ je nejmenším násobkem návrhového zatížení prutu, při kterém se právě dosáhne hodnota charakteristické únosnosti v rozhodujícím průřezu **při namáhání v rovině** a **bez uvažování vzpěru z roviny nebo klopení**. Pro jeho stanovení mají být uvažovány účinky imperfekcí prutu v rovině.

Součinitel vzpěrnosti χ_{op} se stanoví pro globální poměrnou štíhlost $\bar{\lambda}_{op}$ pro vzpěr z roviny (out-of-plane) a klopení.

Globální poměrná štíhlost pro vzpěr z roviny a klopení se určí výrazem (6.64), kde $\alpha_{cr,op}$ je nejmenší násobek návrhových zatížení působících v rovině, při kterém se právě dosáhne pružná kritická únosnost prutu stanovená **s ohledem na vzpěr z roviny a klopení**, ale **bez uvažování ztráty stability v rovině**.

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \qquad (6.64)$$

Hodnoty $\alpha_{cr,op}$ a $\alpha_{ult,k}$ lze určit numerickou analýzou. Jednotlivé kroky analýzy jsou shrnuty v následujících odstavcích.

Jsou představeny dvě možnosti přístupu k řešení úlohy:

1) Určení součinitele $\alpha_{ult,k}$ pomocí interakčního vztahu pro posouzení osového tlaku a ohybu a součinitele $\alpha_{cr,op}$ metodou konečných prvků pomocí stabilitní analýzy (LBA analýza);
2) Určení součinitele $\alpha_{ult,k}$ pomocí geometricky a materiálově nelineární analýzy prutu s imperfekcemi (GMNIA analýza) metodou konečných prvků a součinitele $\alpha_{cr,op}$ metodou konečných prvků pomocí stabilitní analýzy (LBA analýza).

Obecná metoda – přístup 1

V rámci přístupu 1 se součinitel $\alpha_{ult,k}$ pro namáhání v rovině určí pomocí interakčního vztahu (6.61) zahrnujícího vzpěr v rovině (prostřednictvím součinitele klopení χ_y). Tento výraz však zahrnuje i účinky klopení (prostřednictvím součinitele klopení χ_{LT}) – proto je nutno (v souladu s definicí součinitele $\alpha_{ult,k}$) uvažovat součinitel $\chi_{LT} = 1{,}00$. Ostatní hodnoty vyskytující se ve výrazu (6.61) jsou určeny standardními postupy, a sice pro rozhodující průřez prutu.

Pouze pro studijní účely

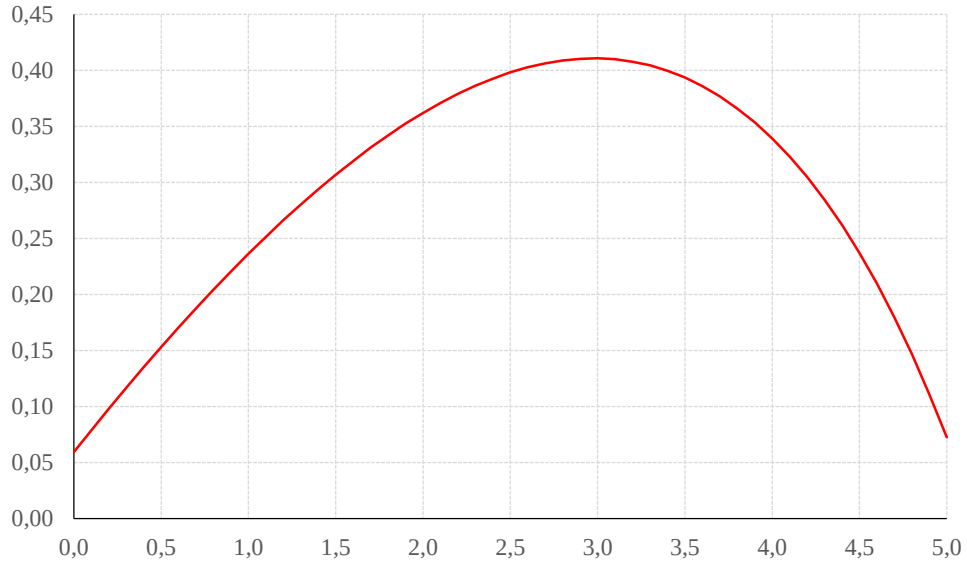
$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \qquad (6.61)$$

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}}$$

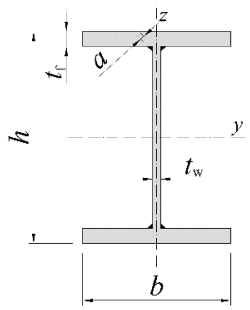
Stanovení rozhodujícího průřezu prutu pro prosté způsoby namáhání

Využití průřezu *u* pro prostý tlak s prostým ohybem se pro třídu průřezu 3 stanoví následujícím výrazem, který je nutno vyčíslit pro všechny řezy *x* řešeného prutu (s ohledem na měnící se průřezové charakteristiky a vnitřní síly v jednotlivých řezech). Z grafu zobrazujícího průběh funkce využití průřezu $u(x)$ lze odečíst polohu rozhodujícího průřezu v místě x = 3,10 m.

$$u(x) = \frac{N_{Ed}(x)}{A(x) \cdot f_y} + \frac{M_{y,Ed}(x)}{W_{el,y}(x) \cdot f_y}$$



Příslušné průřezové charakteristiky v rozhodujícím průřezu:

A =	6346,00 mm^2	t_f =	15,00 mm	
I_y =	76250488,00 mm^4	t_w =	8,00 mm	
I_z =	8447347,00 mm^4	a =	4,00 mm	
I_t =	379450,00 mm^4	c =	56,50 mm	
I_w =	127592000000,00 mm^6	d =	219,70 mm	
$W_{el,y}$ =	584743,00 mm^3	h =	261,00 mm	
$W_{el,z}$ =	112631,00 mm^3	b =	150,00 mm	

Návrhové vnitřní síly

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

$M_{y,Ed} = 50{,}00\ kNm$

$M_{z,Ed} = 0{,}00\ kNm$

Charakteristické únosnosti v tlaku a v ohybu

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 6346 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^{6} = 1491{,}31\ kN$$ Tab. 6.7

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 584743 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^{6} = 137{,}41\ kNm$$ Tab. 6.7

Návrhové elastické únosnosti v ohybu

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{584743 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^{6}}{1{,}00} = 137{,}41\ kNm$$ (6.14)

$$M_{el,z,Rd} = \frac{W_{el,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{112631 \cdot 10^{-9} \cdot 235 \cdot 10^{6}}{1{,}00} = 26{,}47\ kNm$$ (6.14)

Vzpěrné délky

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

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

Výpočet součinitele vzpěrnosti χ_y (vzpěr v rovině)

Vzpěr kolmo k ose y

Pro výpočet kritické síly se v případě proměnného průřezu uvažuje s ekvivalentním momentem setrvačnosti $I_{y,eq}$:

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,\min}}{I_{y,\max}}} = \sqrt{\frac{41862833}{157945500}} = 0{,}51$$ [2]

$$C = 0{,}08 + 0{,}92 \cdot r = 0{,}08 + 0{,}92 \cdot 0{,}51 = 0{,}55$$ [2]

$$I_{y,eq} = C \cdot I_{y,\max} = 0{,}55 \cdot 157945500 = 86870025\ mm^4$$ [2]

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y,eq}}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^{9} \cdot 86870025 \cdot 10^{-12}}{5^2} = 7201{,}93\ kN$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{6346 \cdot 235}{7201930}} = 0{,}46$$ 6.3.1.2

Pouze pro studijní účely

Křivka vzpěrné pevnosti *b* (svařovaný průřez; $t_f < 40$ mm), $\alpha = 0{,}34$ — Tab. 6.2

$$\Phi_y = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_y^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}34 \cdot \left(0{,}46 - 0{,}2\right) + 0{,}46^2\right] = 0{,}65$$ — 6.3.1.2

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0{,}65 + \sqrt{0{,}65^2 - 0{,}46^2}} = 0{,}90$$ — 6.3.1.2

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. Pro použití v ČR je doporučena metoda 2. Při výpočtu se rozlišuje, zda je prut náchylný ke zkroucení či nikoli.

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 náchylný ke zkroucení, jelikož žádná z výše uvedených podmínek není splněna.

Interakční součinitele pro pruty náchylné ke zkroucení se určí dle Tab. B.2. Pro řešenou úlohu se uplatní hodnoty pro pružnostní návrh (jedná se o průřez třídy 3).

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left[\left(1 + 0{,}6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right] \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$ — Tab. B.2

$$k_{yz} = k_{zz}$$ — Tab. B.2

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0{,}05 \cdot \bar{\lambda}_z}{\left(C_{mLT} - 0{,}25\right)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right] \geq \left[1 - \frac{0{,}05}{\left(C_{mLT} - 0{,}25\right)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right]$$ — Tab. B.2

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left[\left(1 + 0{,}6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right] \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$ — Tab. B.2

V rámci řešeného příkladu se uplatňuje pouze součinitel k_{yy} (moment $M_{z,Ed} = 0$ kNm).

Vyčíslení součinitelů ekvivalentního konstantního momentu

Součinitel C_{my}

Vzdálenost bodů podepřených ve směru z je shodná s rozpětím. Moment mezi těmito body má parabolický průběh.

$$\psi = 0$$ Tab. B.3

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = \frac{0{,}00}{50{,}00} = 0{,}00$$ Tab. B.3

$$C_{my} = 0{,}95 + 0{,}05 \cdot \alpha_h = 0{,}95 + 0{,}05 \cdot 0{,}00 = 0{,}95$$ Tab. B.3

Interakční součinitel k_{yy}

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left[\left(1 + 0{,}6 \cdot \overline{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 0{,}95 \cdot \left[\left(1 + 0{,}6 \cdot 0{,}46 \cdot \frac{100{,}00}{\frac{0{,}90 \cdot 1491{,}31}{1{,}00}} \right) \right] =$$

$$= 0{,}97 \le C_{my} \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0{,}95 \cdot \left(1 + 0{,}6 \cdot \frac{100{,}00}{\frac{0{,}90 \cdot 1491{,}31}{1{,}00}} \right) = 0{,}99$$ Tab. B.1

Určení součinitele $\alpha_{ult,k}$

$$\alpha_{ult,k} = \frac{1}{\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{100}{\frac{0{,}90 \cdot 1491{,}31}{1{,}00}} + 0{,}97 \cdot \frac{50{,}00 + 0{,}00}{\frac{1{,}00 \cdot 137{,}41}{1{,}00}}} = 2{,}339$$

Pro určení součinitele $\alpha_{ult,k}$ byl použitý interakční vztah platný pouze pro pruty stálého průřezu. Výslednou hodnotu součinitele $\alpha_{ult,k}$ je nutno chápat jako přibližnou. Příslušný konstrukční návrh je v takovém případě nutno posoudit také kvalifikovaným inženýrským úsudkem.

„Přesnému“ řešení se lze přiblížit např. použitím přístupu 2 (viz dále).

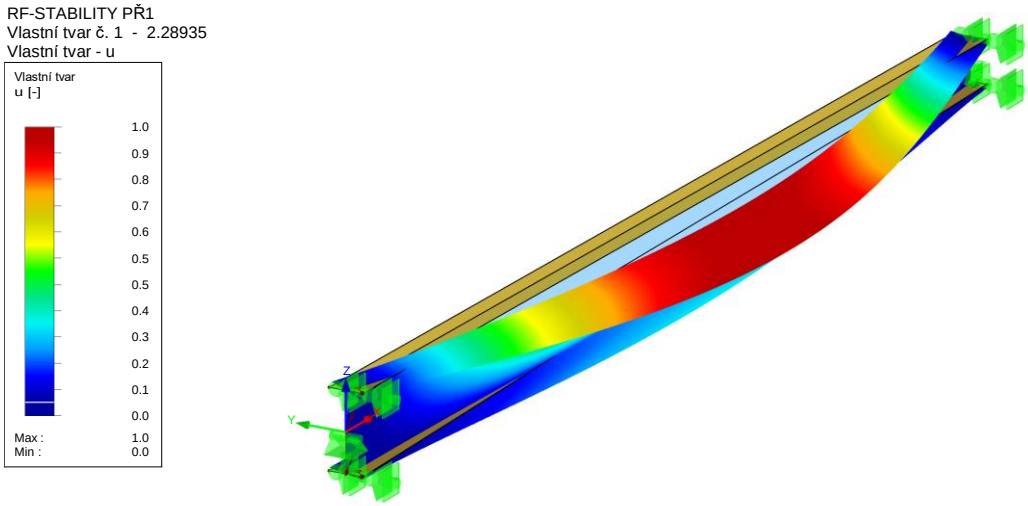
Určení součinitele $\alpha_{cr,op}$

Součinitel $\alpha_{cr,op}$ je součinitel kritického zatížení pro ztráty stability prutu z roviny namáhání. K jeho určení je použita numerická stabilitní analýza (LBA analýza, analýza

vlastních tvarů) aplikovaná na deskostěnový model prutu. Okrajové podmínky modelu odpovídají prostému podepření nosníku s vidlicovým uložením v podporách (je zabráněno posunu ve směru osy *y* průřezu; deplanace je volná).

Pro výpočet byl použit software založený na metodě konečných prvků [3].

Výsledkem stabilitní analýzy je nejnižší tvar vybočení odpovídající ztrátě stability z roviny ohybu – v řešeném případě se jedná o první vlastní tvar s příslušným součinitelem kritického zatížení $\alpha_{cr,op} = 2{,}289$.



Výpočet globální poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti pro ztráty stability z roviny

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} = \sqrt{\frac{2{,}339}{2{,}289}} = 1{,}01 \qquad (6.64)$$

Vzpěr kolmo k ose *z*

Křivka vzpěrné pevnosti *c* (svařovaný průřez; $t_f < 40$ mm), $\alpha = 0{,}49$ Tab. 6.2

$$\Phi_z = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_{op} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{op}^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot \left(1{,}01 - 0{,}2\right) + 1{,}01^2\right] = 1{,}21 \qquad 6.3.1.2$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1{,}21 + \sqrt{1{,}21^2 - 1{,}01^2}} = 0{,}53 \qquad 6.3.1.2$$

Klopení

Křivka vzpěrné pevnosti *c* (svařovaný průřez; $h / b = 261 / 150 = 1{,}74 < 2$), $\alpha = 0{,}49$ Tab. 6.4

$$\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\bar{\lambda}_{op} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_{op}^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot \left(1{,}01 - 0{,}2\right) + 1{,}01^2\right] = 1{,}21 \qquad 6.3.2.2$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1{,}21 + \sqrt{1{,}21^2 - 1{,}01^2}} = 0{,}53 \qquad 6.3.2.2$$

Pouze pro studijní účely

Výsledný součinitel vzpěrnosti

$$\chi_{op} = \min\{\chi_z ; \chi_{LT}\} = \min\{0{,}53; 0{,}53\} = 0{,}53 \qquad 6.3.4$$

Posouzení obecnou metodou

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}53 \cdot 2{,}339}{1{,}00} = 1{,}24 \geq 1 \qquad (6.63)$$

Prut vyhovuje.

Obecná metoda – přístup 2

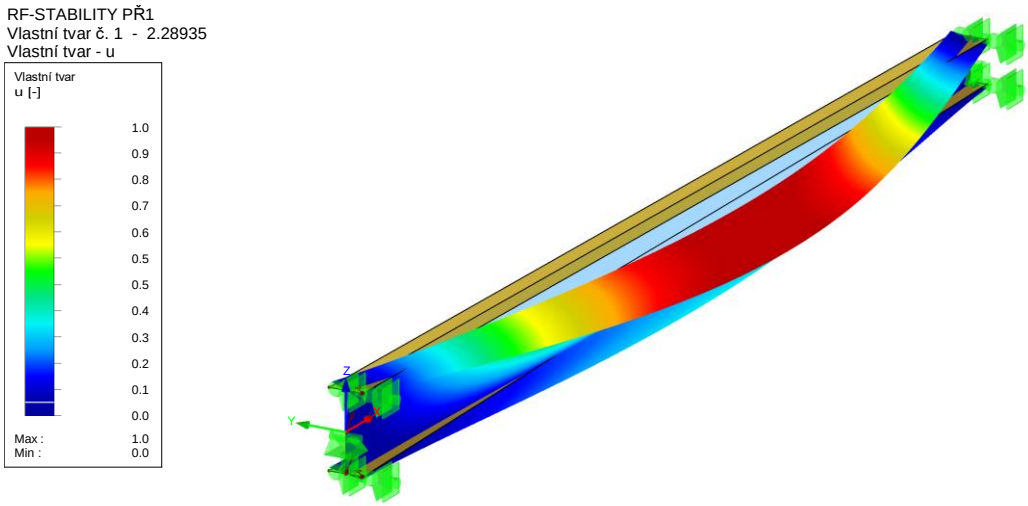
Jak hodnota součinitele $\alpha_{ult,k}$, tak hodnota součinitele $\alpha_{cr,op}$ je určena metodou konečných prvků.

Určení součinitele $\alpha_{cr,op}$

Součinitel $\alpha_{cr,op}$ je součinitel kritického zatížení pro ztráty stability prutu z roviny namáhání. K jeho určení je použita numerická stabilitní analýza (LBA analýza, analýza vlastních tvarů) aplikovaná na deskostěnový model prutu. Okrajové podmínky modelu odpovídají prostému podepření nosníku s vidlicovým uložením v podporách (je zabráněno posunu ve směru osy *y* průřezu; deplanace je volná).

Pro výpočet byl použit software založený na metodě konečných prvků [3].

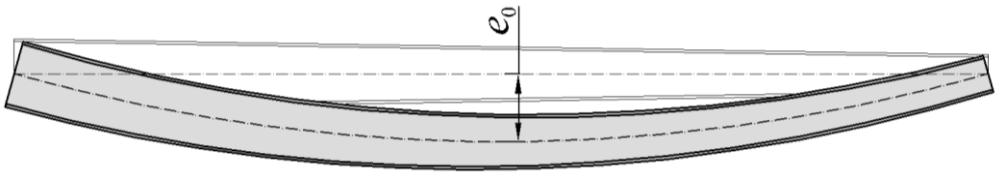
Výsledkem stabilitní analýzy je nejnižší tvar vybočení odpovídající ztrátě stability z roviny ohybu – v řešeném případě se jedná o první vlastní tvar s příslušným součinitelem kritického zatížení $\alpha_{cr,op}$ = 2,289 (stejný postup jako ve výše uvedeném přístupu 1).



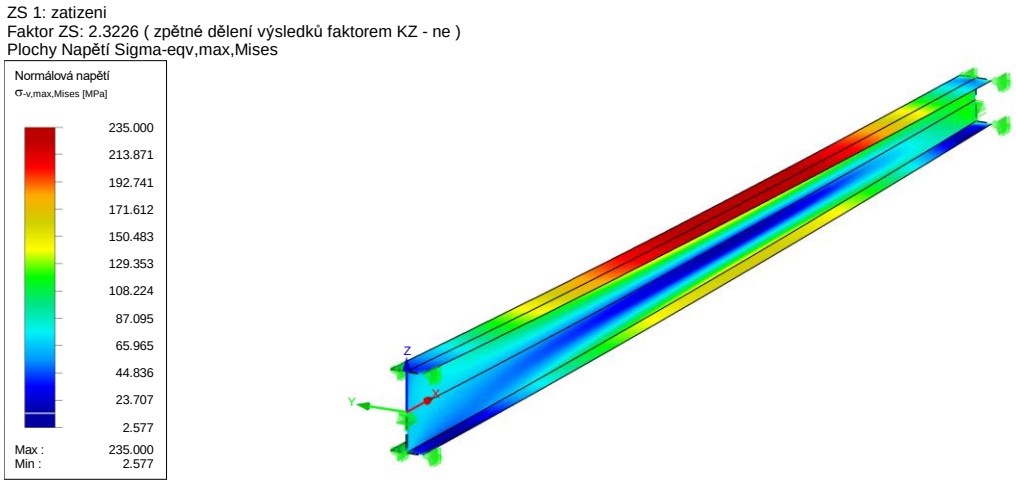
Určení součinitele $\alpha_{ult,k}$

Součinitel $\alpha_{ult,k}$ je určen pomocí geometricky a materiálově nelineární analýzy prutu s imperfekcemi pro ztráty stability v roviny (kolmo k ose y). Pro daný průřez se pro vybočení v rovině uvažuje křivka vzpěrné pevnosti b (svařovaný průřez, $t_f \leq 40$ mm), čemuž odpovídá počáteční imperfekce ve tvaru počátečního prohnutí prutu o amplitudě $e_0 = L / 250$ (pružnostní analýza).

$$e_0 = \frac{L}{250} = \frac{5000}{250} = 20\ mm$$ Tab. 5.1



Pro určení součinitele $\alpha_{ult,k}$ byl v programu [3] vytvořen deskostěnový prostorový model řešeného prutu se zakřivením o amplitudě 20 mm v rovině zatížení. Okrajové podmínky odpovídaly modelu použitému pro LBA analýzu. Materiál byl zadán jako plastický (nelineární) s mezí kluzu 235 MPa. Byla provedena GMNIA analýza, tedy geometricky (výpočet dle teorie II. řádu) i materiálově nelineární analýza prutu s imperfekcí. Zatížení bylo zvyšováno až do okamžiku, kdy bylo v nejvíce namáhaných vláknech prutu dosaženo meze kluzu 235 MPa. Hledaný násobek zatížení, při kterém dosažení meze kluzu nastalo, byl roven 2,323, což je hodnota hledaného součinitele $\alpha_{ult,k}$. Výsledek lze interpetovat tak, že meze kluzu je dosaženo při zatížení N_{Ed} = 2,323 · 100,00 = 232,30 kN a $q_{z,Ed}$ = 2,323 · 16 = 37,17 kN/m.



Výpočet globální poměrné štíhlosti a součinitele vzpěrnosti pro ztráty stability z roviny

$$\overline{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} = \sqrt{\frac{2{,}323}{2{,}289}} = 1{,}01$$ (6.64)

Vzpěr kolmo k ose *z*

Křivka vzpěrné pevnosti *c* (svařovaný průřez; $t_f < 40$ mm), $\alpha = 0{,}49$

$$\Phi_z = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\overline{\lambda}_{op} - 0{,}2\right) + \overline{\lambda}_{op}^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot \left(1{,}01 - 0{,}2\right) + 1{,}01^2\right] = 1{,}21 \qquad 6.3.1.2$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \overline{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1{,}21 + \sqrt{1{,}21^2 - 1{,}01^2}} = 0{,}53 \qquad 6.3.1.2$$

Klopení

Křivka vzpěrné pevnosti *c* (svařovaný průřez; $h / b = 261 / 150 = 1{,}74 < 2$), $\alpha = 0{,}49$

$$\Phi_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\overline{\lambda}_{op} - 0{,}2\right) + \overline{\lambda}_{op}^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot \left(1{,}01 - 0{,}2\right) + 1{,}01^2\right] = 1{,}21 \qquad 6.3.2.2$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \overline{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{1{,}21 + \sqrt{1{,}21^2 - 1{,}01^2}} = 0{,}53 \qquad 6.3.2.2$$

Výsledný součinitel vzpěrnosti

$$\chi_{op} = \min\left\{\chi_z ; \chi_{LT}\right\} = \min\left\{0{,}53; 0{,}53\right\} = 0{,}53 \qquad 6.3.4$$

Posouzení obecnou metodou

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}53 \cdot 2{,}323}{1{,}00} = 1{,}23 \geq 1 \qquad (6.63)$$

Prut vyhovuje.

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] DLUBAL RFEM 5.16. Dlubal Software GmbH.