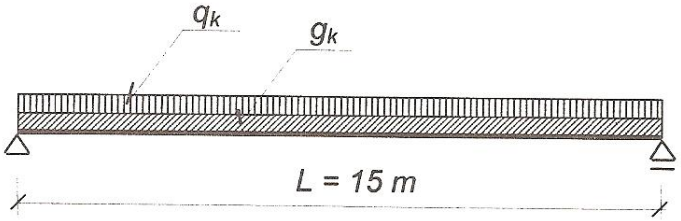
3. Svařovaný nosník průřezu I a jeho montážní styk

Navrhněte prostě uložený svařovaný nosník průřezu I a jeho šroubovaný montážní styk ve vzdálenosti *4,0 m* od krajní podpory.

3.1 Svařovaný nosník průřezu I

Navrhněte prostě uložený svařovaný nosník průřezu I na rozpětí *15,0 m* z oceli S 235 zatížený podle obrázku. Charakteristická hodnota stálého a dlouhodobého zatížení je $g_k = 20\,kN/m'$, charakteristická hodnota krátkodobého nahodilého zatížení je $q_k = 18{,}5\,kN/m'$. Zatížení vlastní tíhou zanedbejte. Nosník je zajištěn proti ztrátě příčné a torzní stability po celé délce. Posuďte boulení stěny, krční svary a průhyb, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1{,}15$, $\gamma_{Mw} = 1{,}50$ a $\gamma_G = 1{,}2$, $\gamma_Q = 1{,}4$.

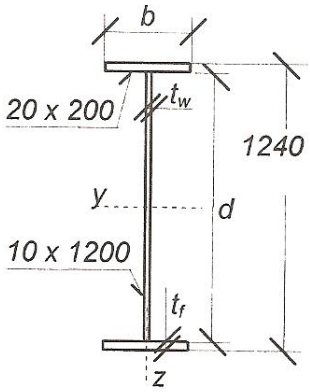


Návrh na základě mezního stavu únosnosti
Moment od vnějšího zatížení je

$$M_{Sd} = \frac{1}{8}(\gamma_Q q_k + \gamma_G g_k)L^2 = \frac{1}{8}(1{,}4 \cdot 18{,}5 + 1{,}2 \cdot 20{,}0) \cdot 15^2 = 1403{,}4\,kNm.$$

Při návrhu průřezu nosníku lze, kromě odhadu nutného průřezového modulu, využít i dalších doporučení a zásad:

- $W_{y,el,min} = \dfrac{M_{Sd}\,\gamma_{M0}}{f_y} = \dfrac{1403{,}4 \cdot 10^3 \cdot 1{,}15}{235} = 6{,}868 \cdot 10^6\ mm^3$,
- výšku nosníku lze pro toto rozpětí a zatížení odhadnout na *1/10 až 1/12* rozpětí,
- plocha stěny by měla přibližně odpovídat ploše pásnic ($A_w \cong 0{,}45\,A$),
- šířka pásnice se obvykle volí přibližně jako desetinásobek její tloušťky ($b / t_f = 10$),
- tloušťka stojiny se obvykle volí větší než setina výšky stojiny ($t_w > d / 100$).



Návrh průřezu

Průřezové hodnoty:

$$A = 2 \cdot 200 \cdot 20 + 1200 \cdot 10 = 20 \cdot 10^3\ mm^2,$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 1200^3 + 2 \cdot 200 \cdot 20 \cdot 610^2 =$$

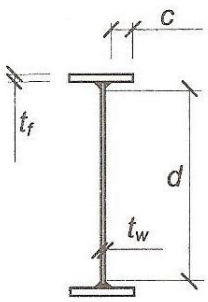
$$= 4{,}417 \cdot 10^9\,mm^4,$$

$$W_{el,y} = \frac{4{,}417 \cdot 10^9}{620} = 7{,}124 \cdot 10^6 \ mm^3 .$$

Posouzení mezního stavu únosnosti

Klasifikace průřezu

Průřez se zatřídí pro ocel S 235, viz [6]. Koutový svar se pro zatřídění průřezu odhadne 4 mm.



Stojina:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{1200 - 2 \cdot 4\sqrt{2}}{10} = 118{,}9 > 83\,\varepsilon \qquad \text{(třída 2)},$$

$$\frac{d}{t_w} = 118{,}9 < 124\,\varepsilon \qquad \text{(třída 3)},$$

kde d je část stojiny bez krčních svarů a $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1.$

Pásnice:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{100 - 5 - 4\sqrt{2}}{20} = 4{,}5 < 9\,\varepsilon \ .$$

Celý průřez lze klasifikovat jako průřez třídy 3.

Posouzení stěny na smykovou únosnost při boulení

Posouvající síla se vypočítá ze vztahu

$$V_{Sd} = \frac{1}{2}(\gamma_Q q_k + \gamma_G g_k)L = \frac{1}{2}(1{,}4 \cdot 18{,}5 + 1{,}2 \cdot 20{,}0) \cdot 15 = 374{,}3 \ kN .$$

Protože štíhlostní poměr stěny $d / t_W = 118{,}9$ je větší než $69\,\varepsilon = 69$, je nutné posoudit stěnu na smykovou únosnost při boulení. Příčné výztuhy jsou umístěny v podporách. K řešení se použije jednoduchá pokritická metoda. Součinitel kritického napětí ve smyku pro stojiny s výztuhami pouze v podporách je $k_\tau = 5{,}34$.

Štíhlost stěny se určí podle vztahu

$$\overline{\lambda_w} = \frac{d/t_w}{37{,}4\,\varepsilon\sqrt{k_\tau}} = \frac{1189/10}{37{,}4 \cdot 1{,}0 \cdot \sqrt{5{,}34}} = 1{,}375 .$$

Protože $\overline{\lambda_w} > 1{,}2$, stanoví se pokritická smyková pevnost podle vztahu

$$\tau_{ba} = \frac{0{,}9}{\overline{\lambda_w}}\left(\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}}\right) = \frac{0{,}9}{1{,}375}\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right) = 88{,}8 \ MPa .$$

Návrhová únosnost ve smyku při uvažování vlivu boulení stojiny je

$$V_{ba,Rd} = \frac{d t_w \tau_{ba}}{\gamma_{M1}} = \frac{1189 \cdot 10 \cdot 88{,}8}{1{,}15} = 918{,}2 \cdot 10^3 N \ ,$$

$V_{Sd} \leq V_{ba,Rd}$,

$374,3\ kN < 918,2\ kN$,

Nosník ve smyku vyhoví.

$374,3\ kN < V_{ba,Rd} / 2 = 918,2 / 2 = 459,1\ kN.$

Protože smyková síla v oblasti největších momentů nepřesáhne 50% smykové únosnosti, není nutné redukovat momentovou únosnost.

Posouzení únosnosti v ohybu

Pružný moment únosnosti (nosník třídy 3) se stanoví ze vztahu

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7,124 \cdot 10^6 \cdot 235}{1,15} = 1455,8 \cdot 10^6\ Nmm .$$

Průřez se posoudí podle

$M_{Sd} \leq M_{el,Rd}$,

$1403,4\ kNm < 1455,8\ kNm.$

Nosník na ohyb vyhoví.

Posouzení krčních svarů

Konstrukčně jsou, pro tloušťku pásnice *20 mm*, navrženy krční svary *4 mm*. Smykové napětí ve svarech (na jednotku délky) musí splňovat podmínku

$$f_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} < \tau_{Sd} = \frac{V_{Sd}\ S_y}{I_y\ 2\ a_{we}},$$

kde statický moment připojované části se vyjádří jako

$$S_y = 200 \cdot 20 \cdot 610 = 2440,0 \cdot 10^3\ mm^3 ,$$

$$\tau_{II,Sd} = \frac{374,3 \cdot 10^3 \cdot 2440 \cdot 10^3}{4417 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 4} < f_{w,Rd} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{3}},$$

$$\tau_{II,Sd} = 25,85\ MPa < f_{w,Rd} = 173,2\ MPa .$$

Navržený svar vyhoví.

Posouzení mezního stavu použitelnosti

Největší průhyb od charakteristických hodnot vnějšího zatížení se vypočítá ze vztahu

$$\delta = \delta_G + \delta_Q = \frac{5\ g_k\ L^4}{384\ E\ I_y} + \frac{5\ q_k\ L^4}{384\ E\ I_y} =$$

$$= \frac{5 \cdot 20{,}0 \cdot 15000^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 4417 \cdot 10^6} + \frac{5 \cdot 18{,}5 \cdot 15000^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 4417 \cdot 10^6} =$$

$$= 14{,}2 + 13{,}1 = 27{,}3 \text{ mm}.$$

Průhyby střešních nosníků mají podle [1] splňovat:

- průhyb od nahodilého zatížení $\delta_2 = L / 300 = 15000 / 300 = 50{,}0 \text{ mm}$,
- celkový průhyb $\delta_{max} = L / 250 = 15000 / 250 = 60{,}0 \text{ mm}$.

27,3 mm < 60,0 mm a 13,1 mm < 50,0 mm.

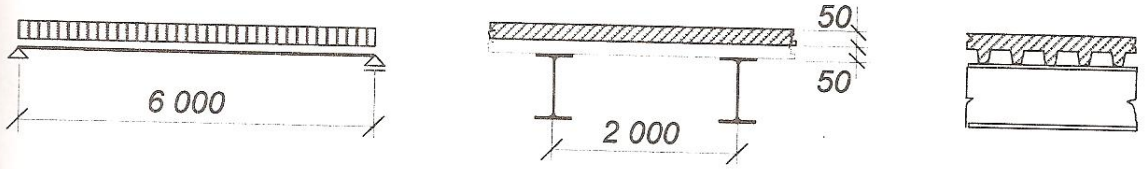
Nosník na průhyb vyhoví.

4. Ocelobetonová stropnice a její přípoj na sloup

Navrhněte ocelobetonovou stropnici jako prostý nosník a její kloubový přípoj na sloup profilu HEB 300.

4.1 Spřažená ocelobetonová stropnice

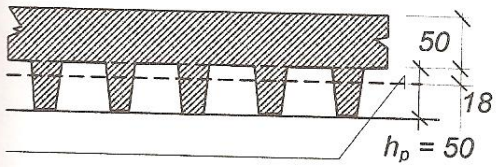
Navrhněte prostě uloženou ocelobetonovou stropnici na rozpětí *6 m* včetně trapézového plechu, který je použit jako ztracené bednění. Rozteč stropnic *2 m*, tloušťka betonové desky je včetně žeber *100 mm*, ocel S 235, beton C 20 / 25, užitné zatížení stropu *3 kN/m²*, stropnice není během montáže podpírána, $\gamma_a = 1{,}15$, $\gamma_v = 1{,}30$ a $\gamma_c = 1{,}50$, $\gamma_G = 1{,}2$ a $\gamma_Q = 1{,}4$.



4.1.1 Trapézový plech VSŽ 11 002 (betonem jsou vyplněna úzká žebra).

Při uvažované poloze plechu je efektivní průřezový modul v ohybu pro tažená vlákna, viz [6]

$W_{a,eff} = 17{,}155 \cdot 10^3\ mm^3$, $I_a = 440{,}1 \cdot 10^3\ mm^4$.



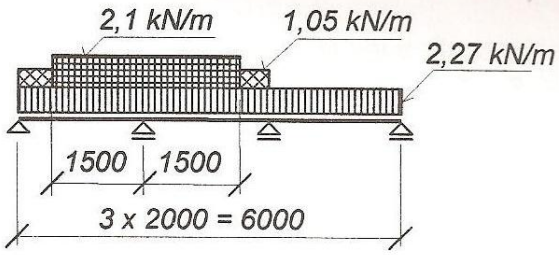
Srovnaná tloušťka betonu představuje beton v žebrech, který je rovnoměrně rozprostřený do jedné souvislé vrtsvy. V případě vyplnění užších žeber se srovnaná tloušťka betonu uvažuje hodnotou *0,35 h_p*.

Zatížení (zatěžovací šířka 1 m):

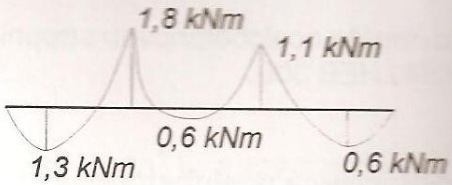
	charakteristické	souč. zatížení	návrhové
stálé - VSŽ 11 002	*0,12 kN/m*	*1,2*	*0,15 kN/m,*
tíha bet. směsi (srovnaná tloušťka žeber = *18 mm*, tloušťka betonu nad žebry = *50 mm*)			
26 · (0,018 + 0,050)	*1,77 kN/m*	*1,2*	*2,12 kN/m,*
stálé celkem	*1,89 kNm*		*2,27 kN/m,*
nahodilé při betonáži („montážní zatížení" podle [3])			
na délce *3 m*	*1,50 kN/m*	*1,4*	*2,10 kN/m,*
jinde	*0,75 kN/m*	*1,4*	*1,05 kN/m.*

Plech je spojitě uložen přes několik stropnic. Dále je uvažován s délkou 6 m jako spojitý nosník o 3 polích. Pro určení extrémních momentů je zatížení umístěno podle obrázku.

Zatížení



Průběh momentů



max M_{Sd} = 1,8 kNm

Posouzení mezního stavu únosnosti

$$M_{a,el} = \frac{W_{a,eff}\, f_{yp}}{\gamma_a} = \frac{17{,}155 \cdot 10^3 \cdot 235}{1{,}15} = 3{,}5 \cdot 10^6 \ Nmm .$$

$$M_{a,el} = 3{,}5\,kNm > M_{Sd} = 1{,}8\,kNm .$$

Navržený profil **VSŽ 11 002** vyhovuje.

Posouzení mezního stavu použitelnosti (průhyb jen od stálého zatížení)
Moment od stálého zatížení nad první podporou:

$$M_k = \frac{1}{10} \cdot 1{,}89 \cdot 2000^2 = 0{,}76 \cdot 10^6 \ Nmm .$$

Max. průhyb v prvním poli:

$$\delta = \frac{1}{E_a\, I_a}\left(\frac{5}{384}\, g_k\, L^4 - \frac{1}{16}\, M_k\, L^2\right) =$$

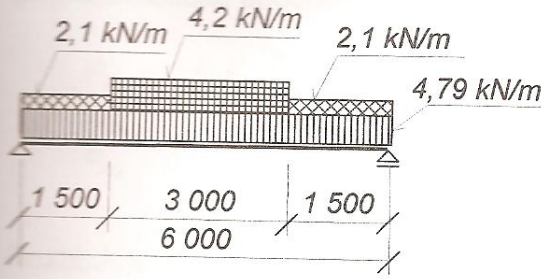
$$= \frac{1}{210 \cdot 10^3 \cdot 440{,}1 \cdot 10^3}\left(\frac{5}{384} \cdot 1{,}89 \cdot 2\,000^4 - \frac{1}{16} \cdot 0{,}76 \cdot 10^6 \cdot 2\,000^2\right) = 2\ mm$$

Největší přípustný průhyb činí $L / 200 = 2\,000 / 200 = 10\ mm > 2\ mm$, průhyb vyhovuje.

4.1.2 Spřažená ocelobetonová stropnice

A) Montážní stav - působí ocelový nosník

Zatížení (zatěžovací šířka 2,0 m)	charakteristické	souč. zatížení	návrhové
stálé - vl.tíha (odhad IPE 200)	0,22 kN/m	1,2	0,26 kN/m
VSŽ 11 002 $0{,}121 \cdot 2$	0,24 kN/m	1,2	0,29 kN/m
tíha bet. směsi $26 \cdot (0{,}018 + 0{,}050) \cdot 2$	3,54 kN/m	1,2	4,24 kN/m
stálé celkem	4,00 kNm		4,79 kN/m
nahodilé při betonáži			
na délce 3 m $1{,}5 \cdot 2$	3,00 kN/m	1,4	4,20 kN/m
jinde $0{,}75 \cdot 2$	1,50 kN/m	1,4	2,10 kN/m



Největší ohybový moment:

$$M_{Sd} = \frac{1}{8}(4{,}79+2{,}1)\cdot 6^2 + 3{,}15\cdot(3-0{,}75) =$$

$$= 38{,}12\ kNm\,.$$

Potřebný průřezový modul:

$$W_{min} = \frac{38{,}12\cdot 10^6\cdot 1{,}15}{235} = 186{,}56\cdot 10^3\ mm^3\,.$$

Navrhne se **IPE 200**:

$$W_{pl,y} = 220{,}6\cdot 10^3\ mm^3,\ W_{el,y} = 194{,}3\cdot 10^3\ mm^3,\ I_y = 19{,}4\cdot 10^6\ mm^4,$$

$$A = 2850\,mm^2,\ A_{vz} = 1{,}4\cdot 10^3\ mm^2\,.$$

Mezní stav únosnosti

Posouzení průřezu třídy 1 (moment únosnosti) :

$$M_{pl,Rd} = 220{,}6\cdot 10^3\cdot\frac{235}{1{,}15} = 44{,}96\cdot 10^6\ Nmm = 44{,}96\,kNm > M_{Sd} = 38{,}12\,kNm\,.$$

Navržený průřez **IPE 200** vyhovuje.

Mezní stav použitelnosti

Průhyb (jen od stálého zatížení):

$$\delta = \frac{5}{384}\cdot\frac{4{,}00\cdot 6000^4}{210\cdot 10^3\cdot 19{,}4\cdot 10^6} = 17\ mm\ ,$$

což činí *1 / 362* rozpětí a je menší než *L / 200* a také *17 mm < 20 mm*, není tedy nutno uvažovat větší tloušťku betonové desky (zanedbává se tzv. rybníkový efekt, tj. rozdílná tloušťka betonové desky u podpor a uprostřed rozpětí). Pokud by byla překročena limitní hranice *20 mm*, je nutné zvětšit zatížení betonovou deskou: ve výpočtu zatížení by se zvětšila tloušťka betonové desky o $(0{,}7\cdot\delta)$.

B) Provozní stav - působí ocelobetonový nosník

Zatížení (zatěžovací šířka 2,0 m)	charakteristické	souč. zatížení	návrhové
stálé - vl.tíha IPE 200	0,22 kN/m	1,2	0,26 kN/m
VSŽ 11 002 $0{,}121\cdot 2$	0,24 kN/m	1,2	0,29 kN/m
železobetonová deska $24\cdot(0{,}018+0{,}050)\cdot 2$	3,26 kN/m	1,2	3,92 kN/m
stálé celkem	3,72 kNm		4,47 kN/m
nahodilé - dlouhodobé			
podlaha, podhled - krátkodobé	1,50 kN/m	1,4	2,10 kN/m
užitné $3{,}0\cdot 2$	6,00 kN/m	1,4	8,40 kN/m
celkem	**11,22 kN/m**		**14,97 kN/m**

Největší ohybový moment :

$$M_{Sd} = \frac{1}{8} g_{celk} L^2 = \frac{1}{8} \cdot 14{,}97 \cdot 6^2 = 67{,}37\,kNm .$$

Největší posouvající síla:

$$V_{Sd} = \frac{1}{2} g_{celk} L = \frac{1}{2} \cdot 14{,}97 \cdot 6 = 44{,}91\,kN .$$

Posouzení průřezu (plastické, ocelový průřez bude působit v tahu)
Únosnost ve smyku:

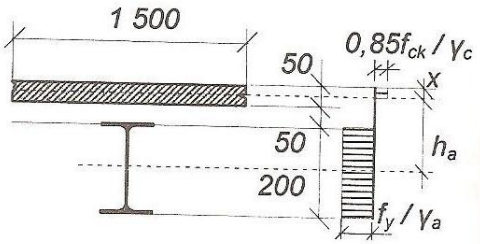
$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \frac{f_y}{\sqrt{3}\,\gamma_a} = 1{,}4 \cdot 10^3 \cdot \frac{235}{\sqrt{3} \cdot 1{,}15} = 165{,}17 \cdot 10^3 N =$$

$$= 165{,}2\,kN > V_{Sd} = 44{,}91\,kN .$$

Nosník vyhovuje.

Spolupůsobící šířka desky:

$$b_{eff} = 2 \cdot \frac{L}{8} = 2 \cdot \frac{6000}{8} = 1500\,mm ,$$



průběh napětí

Poloha neutrální osy (za předpokladu, že neutrální osa leží v betonové desce):

$$x = \frac{A_a \frac{f_y}{\gamma_a}}{b_{eff}\, 0{,}85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} = \frac{2850 \cdot \frac{235}{1{,}15}}{1500 \cdot 0{,}85 \cdot \frac{20}{1{,}5}} = 34{,}2\ mm < 50\,mm ,$$

předpoklad je splněn.

Moment únosnosti:

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_a \cdot f_y}{\gamma_a} \cdot h_a = \frac{2850 \cdot 235}{1{,}15} \cdot \left(200 - \frac{34{,}2}{2} \right) = 106{,}52 \cdot 10^6\,Nmm ,$$

$$M_{pl,Rd} = 106{,}52\,kNm > M_{Sd} = 67{,}37\,kNm .$$

Nosník **IPE 200** vyhovuje.

Spřažení
Trny o průměru *18,2 mm*, výšky *90 mm* z oceli s mezí pevnosti po přivaření f_u = *310 MPa*.

Charakteristická únosnost trnu v plné desce :

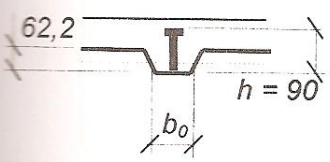
$$P_{Rk} = 0{,}8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0{,}8 \cdot 310 \cdot \frac{\pi \cdot 18{,}2^2}{4} = 64{,}52 \cdot 10^3 N$$

$$P_{Rk} = 0{,}29 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} = 0{,}29 \cdot 18{,}2^2 \cdot \sqrt{20 \cdot 29 \cdot 10^3} = 73{,}16 \cdot 10^3 N .$$

Rozhoduje $P_{Rk} = 64{,}52\ kN$.

Návrhová únosnost trnu je

$$P_{Rd} = \frac{P_{Rk}}{\gamma_v} = \frac{64{,}52}{1{,}3} = 49{,}63\,kN .$$



Redukovaná únosnost v žebrové desce :

$$k_t = \frac{0{,}7}{\sqrt{N_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \frac{h - h_p}{h_p} = \frac{0{,}7}{\sqrt{1}} \cdot \frac{71}{50} \cdot \frac{90 - 50}{50} = 0{,}795 ,$$

$$P_{Rd,r} = P_{Rd} \cdot k_t = 49{,}63 \cdot 0{,}795 = 39{,}46\,kN .$$

Počet trnů na polovině nosníku :

$$F_{cf} = N_c = N_a = \frac{A_a \cdot f_y}{\gamma_a} = \frac{2850 \cdot 235}{1{,}15} = 582{,}39 \cdot 10^3\ N ,$$

$$N_f = \frac{F_{cf}}{P_{Rd,r}} = \frac{582{,}39}{39{,}46} = 14{,}7\ ks,$$

tzn. rozteč trnů *3 000 / 14,7 = 204 mm*, jelikož trapézový plech má vlny po *200 mm*, umístí se vždy jeden trn do každé vlny a na celém nosníku pak bude *30* trnů.

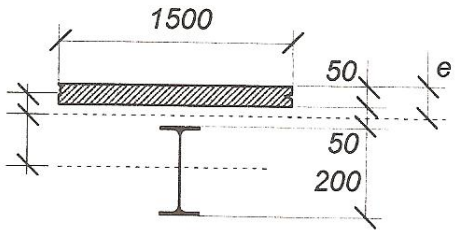
Mezní stav použitelnosti

Posoudí se průhyb spřaženého nosníku. Nosník v provozním stavu působí pružně. Účinný modul pružnosti betonu je uvažován s vlivem dotvarování betonu:

$$E'_c = \frac{E_{cm}}{2} = \frac{29 \cdot 10^3}{2} = 14{,}5 \cdot 10^3\ MPa .$$

Pracovní součinitel :

$$n = \frac{E_a}{E'_c} = \frac{210 \cdot 10^3}{14{,}5 \cdot 10^3} = 14{,}5 .$$



Poloha pružné neutrální osy:

$$e = \frac{A_a z_a + \frac{1}{n} A_c z_c}{A_a + \frac{1}{n} A_c} = \frac{2850 \cdot 200 + \frac{1}{14,5} \cdot 50 \cdot 1500 \cdot 25}{2850 + \frac{1}{14,5} \cdot 50 \cdot 1500} = 87,2 \ mm$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu:

$$I_i = 19,4 \cdot 10^6 + 2850 \cdot 112,8^2 + \frac{1}{14,5} \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 1500 \cdot 50^3 + 50 \cdot 1500 \cdot 62,2^2 \right) = 76,75 \cdot 10^6 \ mm^4$$

Zatížení nahodilé : $q_k = 1,5 + 6 = 7,50 \ kN/m$

Průhyb od nahodilého zatížení:

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{7,50 \cdot 6000^4}{210 \cdot 10^3 \cdot 76,75 \cdot 10^6} = 8 \ mm < L / 300 = 20 \ mm .$$

Průhyb vyhovuje.

Poznámky:

1) Celkový průhyb spodní hrany ocelového nosníku je $17 + 8 = 25 \ mm$, tj. $L / 245$, což je přibližně rovno $L / 250$ a nosník vyhovuje z hlediska mezního stavu použitelnosti.