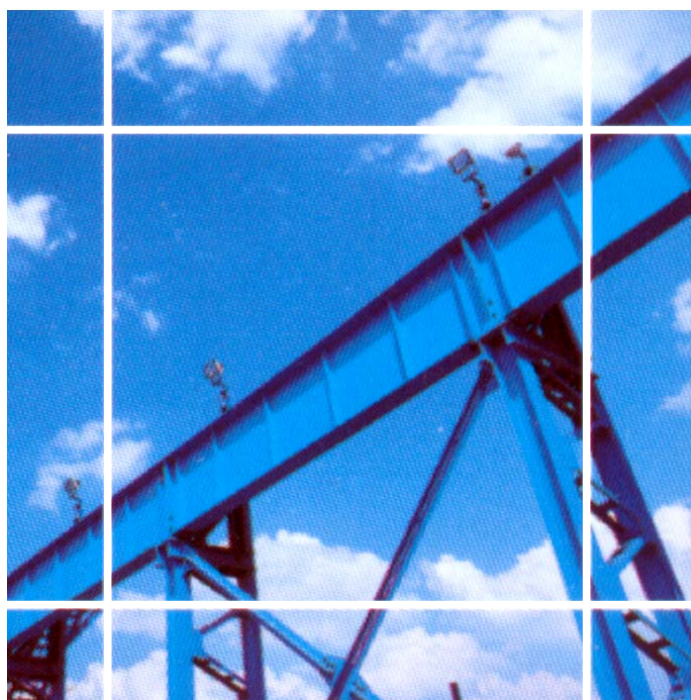


Antónia Ďuricová – Marián Rovňák – Oto Roth

DIMENZOVANIE PRVKOV OCEĽOVÝCH KONŠTRUKCIÍ



Technická univerzita v Košiciach – Stavebná fakulta

**DIMENZOVANIE
PRVKOV
OCEĽOVÝCH
KONŠTRUKCIÍ**

Antónia Ďuricová – Marián Rovňák – Oto Roth

**DIMENZOVANIE
PRVKOV OCEĽOVÝCH
KONŠTRUKCIÍ**

Technická univerzita v Košiciach – Stavebná fakulta

Košice 2004

Autori ďakujú
sponzorom za finančnú pomoc pri vydaní tejto publikácie

ISPO, spol. s r. o. – inžinierske stavby, Prešov
IK STEEL, spol. s r. o., Prešov

Autori: doc. Ing. Antónia Ďuricová, PhD., doc. Ing. Marián Rovňák, PhD., Ing. Oto Roth, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Ivan Baláž, PhD., prof. Ing. Josef Vičan, PhD.

Vydala Technická univerzita v Košiciach – Stavebná fakulta
Schválilo vedenie Stavebnej fakulty dňa 28. 01. 2004

© *Antónia Ďuricová, Marián Rovňák, Oto Roth*

ISBN 80-8073-086-5

PREDSLOV

Publikácia obsahuje príklady dimenzovania väčšiny oceľových nosných prvkov a spojov v závislosti od ich namáhania podľa normy STN 73 1401: 1998, ktorá je revíziou normy ČSN 73 1401 účinnej od marca 1986 a v januári 1993 zavedenej do sústavy STN.

Publikácia má byť pomôckou pri štúdiu navrhovania oceľových konštrukcií. Je rozdelená na 5 kapitol, v ktorých sa postupne vyšetrujú prúty zabezpečené proti strate stability, ďalej prúty, pri dimenzovaní ktorých sa musí brať do úvahy celková a miestna strata stability, prúty vystavené pohyblivému a opakovanému zaťaženiu a nakoniec spoje vytvorené pomocou zvarov a skrutiek.

Každá kapitola má úvodnú časť, v ktorej sa stručne uvádzajú základné informácie o predpokladoch a zásadách výpočtu vnútorných síl, jednotlivých druhov namáhania, návrhu a posudzovania konštrukčných prvkov alebo spojov.

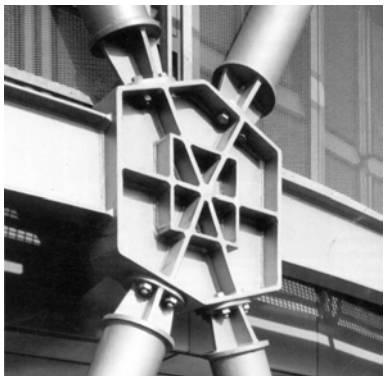
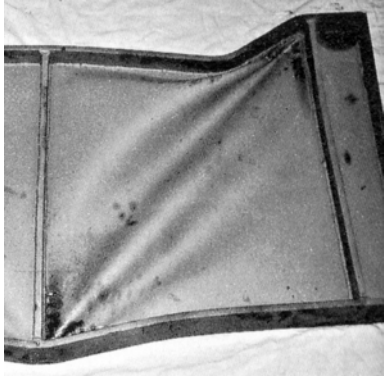
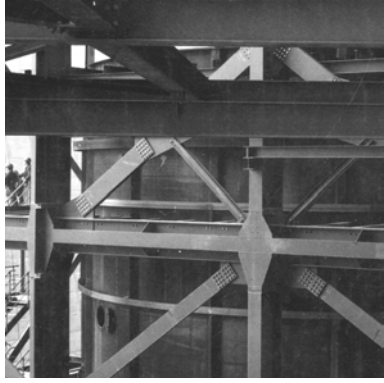
Koncepciu publikácie pripravila A. Ďuricová, korektúru textu urobil M. Rovňák a A. Ďuricová, grafickú úpravu urobil M. Rovňák. Príklady v jednotlivých kapitolách boli autormi spracované takto :

- | | | |
|------------------|---|--|
| Antónia Ďuricová | – | 1. , 2. kap., 4. kap. (príklad 4.3 až 4.7) |
| Marián Rovňák | – | 3. kap., 4. kap. (príklad 4.1 a 4.2) |
| Oto Roth | – | 5. kap., 4. kap. (príklad 4.8 a 4.9) |

Košice január 2004

Autori

Autori ďakujú recenzentom,
prof. Ing. Ivanovi Balážovi, CSc. a prof. Ing. Josefovi Vičanovi, CSc.,
a prof. Ing. Pavlovi Juhásovi, DrSc., vedúcemu Katedry kovových a drevených konštrukcií
TU–SvF v Košiciach
za dôslednú kontrolu rukopisu a cenné pripomienky, ktoré prispeli k jeho skvalitneniu.



OBSAH

ÚVOD	5
1 PRÚTY S KOMPAKTNÝM PRIEREZOM	7
1.1 Namáhanie ťahovou silou	11
1.2 Namáhanie tlakovou silou	13
1.3 Namáhanie ohybovým momentom – plastická únosnosť prierezu	14
1.4 Namáhanie ohybovým momentom – pružná a pružno-plastická únosnosť prierezu	16
1.5 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou	18
1.6 Namáhanie ohybovým momentom a tlakovou silou	21
1.7 Namáhanie ohybovým momentom a tlakovou silou.....	23
1.8 Namáhanie priečnou silou.....	25
1.9 Namáhanie ohybovým momentom, tlakovou a priečnou silou.....	26
1.10 Namáhanie ohybovým momentom, tlakovou a priečnou silou.....	28
1.11 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou	29
2 PRÚTY SO ŠTÍHLYM PRIEREZOM	33
2.1 Namáhanie ohybovým momentom	36
2.2 Namáhanie priečnou silou.....	40
2.3 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou.....	43
2.4 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou.....	52
3 TLAČENÉ PRÚTY	61
3.1 Vzperná únosnosť celistvého prúta s prierezom symetrickým podľa oboch osí.....	64
3.2 Vzperná únosnosť celistvého prúta s prierezom symetrickým podľa jednej osi.....	67
3.3 Vzperná únosnosť členeného prúta s rámovými spojkami.....	71
3.4 Vzperná únosnosť priehradového členeného prúta	77
3.5 Vzperná únosnosť zloženého členeného prúta	82
3.6 Návrh prútov priehradového väzníka	87

3.7	Vzperná únosnosť prúta s premenným prierezom	95
4	OHÝBANÉ PRÚTY	99
4.1	Namáhanie ohybovým momentom – prostý nosník	107
4.2	Namáhanie ohybovým momentom – konzola	110
4.3	Namáhanie ohybovým momentom – obojstranne votknutý nosník	115
4.4	Namáhanie ohybovým momentom – jednoosovo symetrický prierez	119
4.5	Stĺp namáhaný tlakovou silou a ohybovým momentom	128
4.6	Nosník s pohyblivým zaťažením	133
4.7	Namáhanie na únavu	142
4.8	Namáhanie ohybovým a krútiacim momentom prút s otvoreným prierezom	146
4.9	Namáhanie ohybovým a krútiacim momentom prút s uzavretým prierezom	150
5	SPOJE	153
5.1	Spoj čelným a bočnými kútovými zvarmi namáhaný osovou silou	159
5.2	Spoj bočným kútovým zvarom namáhaný osovou silou a ohybovým momentom	163
5.3	Spoj kútovým zvarom namáhaný priečnou silou a momentom v rovine spoja	167
5.4	Skrutkový spoj namáhaný osovou silou	171
5.5	Dlhý skrutkový spoj namáhaný osovou silou	174
5.6	Trecí skrutkový spoj namáhaný osovou silou	177
5.7	Skrutkový spoj namáhaný priečnou silou	179
5.8	Skrutkový spoj namáhaný priečnou silou a ohybovým momentom v rovine spoja	182
5.9	Skrutkový a zvarový spoj namáhaný priečnou silou a momentom kolmo na rovinu spoja	188
5.10	Čapový spoj	193
	LITERATÚRA	197

ÚVOD

Ocelové konštrukcie sa navrhujú podľa metódy medzných stavov, ktoré sa delia na (i) medzné stavy únosnosti a (ii) medzné stavy používateľnosti.

Podmienky spoľahlivosti v skupine medzných stavov únosnosti, ktoré zodpovedajú rôznym spôsobom vyčerpania únosnosti konštrukcie (konštrukčného prvku), musia byť splnené počas realizácie a užívania konštrukcie. Po prekročení medzného stavu je bezprostredne ohrozená bezpečnosť konštrukcie.

Podmienky spoľahlivosti v skupine medzných stavov používateľnosti zabezpečujú schopnosť konštrukcie plniť svoju funkciu pri bežnom používaní. Musia byť splnené len v stanovenom časovom úseku a definovaných podmienkach technického života konštrukcie. Po prekročení medzného stavu nie je bezpečnosť konštrukcie bezprostredne ohrozená, ale konštrukcia je nepoužiteľná.

Základnou veličinou vyjadrujúcou spoľahlivosť konštrukcie je (zvyčajne rozdielová) rezerva spoľahlivosti. Spoľahlivá konštrukcia má rezervu spoľahlivosti väčšiu ako nula, nespoľahlivá menšiu ako nula. Konštrukcia dosiahla medzný stav, keď jej rezerva spoľahlivosti sa rovná nule.

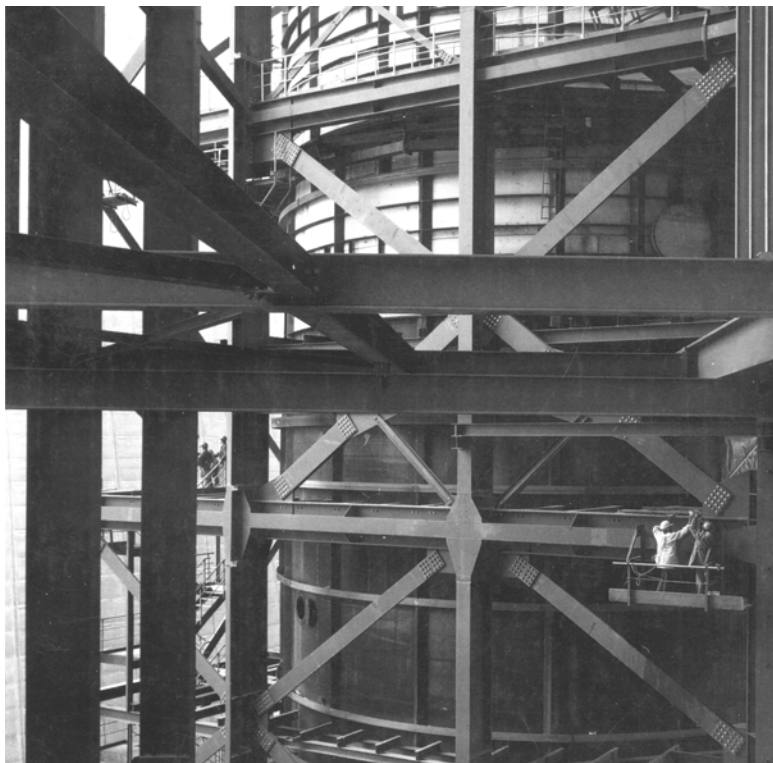
Návrh konštrukcie musí byť taký, aby pravdepodobnostná záruka jej spoľahlivosti (skrátene pravdepodobnosť spoľahlivosti) bola veľmi vysoká – blízka 1,0. Častejšie sa používa požiadavka, aby pravdepodobnosť poruchy konštrukcie (vtedy je rezerva spoľahlivosti menšia ako nula) bola veľmi malá – blízka nule, napr. 10^{-5} .

Pri praktickom návrhu a posudzovaní – dimenzovaní – konštrukcie sa to má zabezpečiť výstižným výpočtovým modelom a používaním charakteristických a návrhových hodnôt zaťaženia, resp vnútorných síl, a charakteristických a návrhových hodnôt pevností materiálov.

V príkladoch sú väčšinou priamo dané návrhové hodnoty vnútorných síl. Návrhové pevnosti materiálu konštrukčných prvkov a spájacích prostriedkov sa určujú ako podiel charakteristickej hodnoty a príslušného parciálneho súčiniteľa spoľahlivosti, ktoré spolu s postupmi pri posudzovaní nosných ocelových prvkov a spojov sú uvedené v norme STN 73 1401: 1998.

1

PRÚTY S KOMPAKTNÝM PRIEREZOM



1 PRÚTY S KOMPAKTNÝM PRIEREZOM

Vznik plastického kĺbu (idealizovaný splastizovaný prierez) je možný iba v tom prípade, ak nenastane vydutie stien alebo pásnic. Možnosť lokálnej straty stability prúta je kvantifikovaná štihlosťou steny a pásnic, na základe ktorej zaraďujeme prierezy do 4 tried :

- Trieda 1 : Prierezy schopné vytvárať plastické kĺby s dostatočnou rotačnou kapacitou na redistribúciu vnútorných síl – medzná štihlosť β_{01} .
- Trieda 2 : Prierezy schopné úplne plastizovať, ale s obmedzenou rotačnou kapacitou - medzná štihlosť β_{02} .
- Trieda 3 : Prierezy, v ktorých je síce možné v krajných vláknoch dosiahnuť napätie na medzi klzu, zvyšovanie využitia prierezu však neumožňuje vydutie - medzná štihlosť β_1 .
- Trieda 4 : Prierezy štíhle, v ktorých pred dosiahnutím medze klzu nastane vydutie tlačných častí.

Prierezy triedy 1, 2 a 3 sa nazývajú *kompaktné*. Pri výpočte prierezových charakteristík sa uvažuje s plným prierezom. Únosnosť kompaktných prierezov vyplýva z Huber-Mises-Henckyho (H-M-H) teórie konštantnej potenciálnej energie pri zmene tvaru telesa [8].

Plasticitné využitie prierezu

Medzné štihlosti β_{01} a β_{02} boli stanovené na základe závislosti (vyplývajúcej z početných experimentov) rozvoja plastických deformácií a štihlosti tlačných pásnic, resp. ohýbaných stien. To znamená, že ak štihlosť tlačenej pásnice a ohýbanej steny nepresahuje medzné štihlosti β_{01} a β_{02} , v priereze môžu vznikáť také pomerné pretvorenia (plastické pomerné pretvorenia), ktoré umožňujú uvažovať v priereze s idealizovaným plastickým kĺbom [2], [3], [4], [5].

Plasticitný výpočet je možné použiť, ak sú splnené nasledovné požiadavky :

- prierezy v miestach predpokladaných plastických kĺbov musia byť zaťažované v smere ich osi symetrie,
- prierezy v miestach predpokladaných kĺbov musia byť priečne vystužené,
- prierezy v miestach predpokladaných plastických kĺbov musia byť zabezpečené proti klopeniu (postrannému vybočeniu), pričom priečne podopretie nesmie byť vzdialené od teoretického plastického kĺbu viac ako je polovica výšky steny,
- v prípade prúta s premenným prierezom sa požaduje, aby tlačená pásnica a ohýbaná stena boli triedy 1 aspoň do vzdialenosti rovnajúcej sa dvojnásobku výšky prierezu od teoretického kĺbu, v ostatných častiach má byť tlačená pásnica triedy 1 a ohýbaná stena triedy 1, 2 alebo 3,
- plastický prierezový modul sa rovná najviac 1,5-násobku pružného prierezového modulu, čím sa obmedzuje nadmerné pretvorenie konštrukcie,

- keď prút je namáhaný prostým ohybom v úseku väčšom ako $1/5$ dĺžky prúta, potom prierezový modul sa uvažuje ako priemerná hodnota pružného a plastického prierezového modulu,
- zaťaženie musí byť statické, resp. kvázistatické, ktoré nespôsobuje dynamické, rázové a únavové účinky,
- pomer charakteristických hodnôt pevností v ťahu f_u a medze klzu f_y je aspoň $1,20$,
- ťažnosť A_5 je aspoň 15% .

Pri plasticitnom výpočte je rozdelenie normálových napätí v ťahanej a tlačenej časti prierezu konštantné. Vplyv šmyku sa uvažuje iba v prípade, ak hodnota návrhovej priečnej sily je vyššia ako $0,5$ -násobok, resp. $0,3$ -násobok (pre I-prierez namáhaný ohybom v smere pásnic) návrhovej šmykovej sily únosnosti prierezu. Vplyv šmyku sa zohľadňuje redukciou návrhového ohybového momentu, resp. návrhovej osovej sily. Interakčné závislosti pri namáhaní ohybovým momentom a osovou silou sú výsledkom teoretických a experimentálnych prác, napr. [3], [9], [10].

Pružnostné využitie prierezu

Medzná štíhlosť tlačенých a ohýbaných stien a pásnic, β_l je redukovanou hodnotou kritickej štíhlosti β_{cr} (dôsledok imperfekcií), ktorá vyplýva z ich stabilitej analýzy ako ideálnych dosko-stenových prvkov teóriou 2. rádu [6], [7]. Ak je teda štíhlosť tlačéných a ohýbaných stien a pásnic medzi hodnotami β_{02} a β_l , nenastane vydúvanie a v najviac namáhanom mieste prierezu je možné dosiahnuť medzu klzu.

Využitie prierezu v pružnej oblasti je možné v každom prípade, ak štíhlosti tlačéných a ohýbaných stien a pásnic spĺňajú aspoň podmienky pre prierez triedy 3.

Pri pružnostnom výpočte (prierez triedy 3) sa s vplyvom šmykového účinku namáhania uvažuje, ak návrhová priečna sila je väčšia ako $0,3$ -násobok návrhovej šmykovej sily únosnosti. Podmienka plasticity (H-M-H) sa overuje v najviac namáhanom mieste prierezu.

Ak štíhlosť tlačenej a ohýbanej steny alebo pásnice je väčšia ako štíhlosť β_l , (prierez triedy 4) dôjde k jej vydutiu a je potrebné použiť efektívny prierez.

Výpočet vnútorných síl

Výpočet vnútorných síl v konštrukciách môžeme vykonať:

- pružnostným výpočtom,
- plasticitným výpočtom, ktorý v prípade staticky neurčitých konštrukcií zohľadňuje úplnú, alebo čiastočnú plastizáciu prierezov, a tomu zodpovedajúcu redistribúciu vnútorných síl.

V oboch prípadoch je možné použiť teóriu 1. rádu alebo 2. rádu s uvážením vplyvu geometrických imperfekcií konštrukcie a vplyvu pretvorenia konštrukcie na vnútorné sily.

Pružnostný výpočet vychádza z predpokladu splnenia Hookovho zákona o lineárne pružnom materiáli ($\sigma = E\varepsilon$), ktorý veľmi dobre vystihuje správanie sa ocele pod úrovňou medze klzu f_y .

Plasticitný výpočet môže vychádzať zo skutočného pracovného diagramu (získaného experimentálne), z idealizovaného pružnoplastického, alebo tuhoplastického pracovného diagramu.

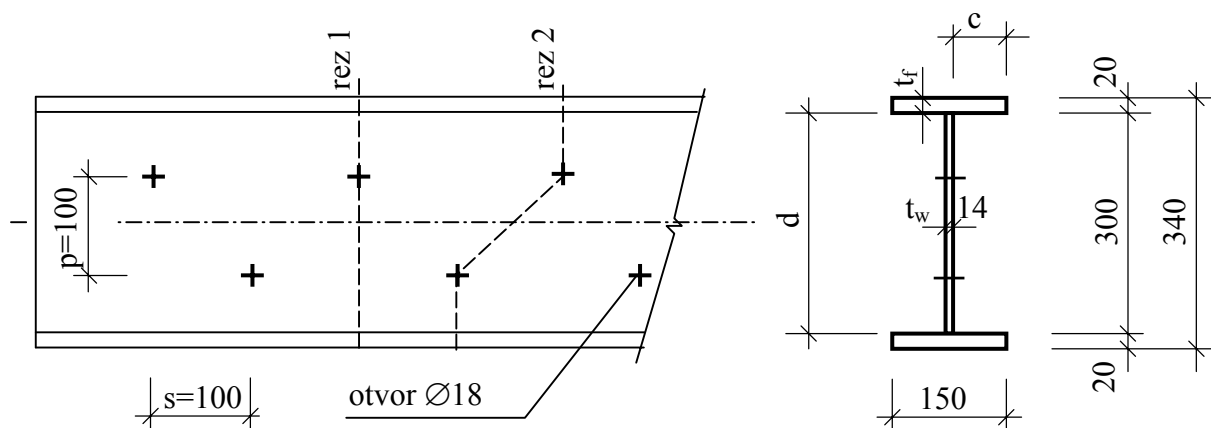
Návrh konštrukcie

Z kombinácie metód výpočtu vnútorných síl a možností využitia prierezu vyplýva :

- pružno-pružnostný návrh konštrukcie - určenie vnútorných síl pružnostným výpočtom a využitie prierezu v pružnej oblasti (prierez triedy 3 a 4),
- pružno-plasticitný návrh konštrukcie - určenie vnútorných síl pružnostným výpočtom a využitie najviac namáhaného prierezu v plastickej oblasti (prierezu triedy 2),
- plasticko-plasticitný návrh konštrukcie - výpočet vnútorných síl plasticitným výpočtom a využitie najviac namáhaného prierezu v plastickej oblasti (prierez triedy 1).

1.1 Namáhanie ťahovou silou

Určte únosnosť prúta pri namáhaní ťahovou silou. Prút je zvaraného I-priezezu z ocele S 235. Stena prúta je oslabená štandardnými otvormi priemeru 18 mm.



Hrúbka pásníc a steny je menšia než 40 mm, pre pevnostnú triedu ocele S 235 je preto medza klzu $f_y = 235 \text{ MPa}$, pevnosť v ťahu $f_u = 360 \text{ MPa}$, parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = 1,1$ a pre prierezy oslabené otvormi na skrutky $\gamma_{M2} = 1,3$.

Návrhová ťahová sila únosnosti prúta sa určí ako menšia z hodnôt únosnosti neoslabeného prierezu (stanovenej z medze klzu) a únosnosti oslabeného prierezu (stanovenej z pevnosti v ťahu).

Návrhová ťahová sila únosnosti prúta (neoslabený prierez)

$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 10\,200 \cdot 235 / 1,1 = 2\,179,1 \text{ kN}.$$

Účinná plocha prierezu sa určí ako

$$A_{net} = A - A_{osl},$$

pričom oslabenie plochy je väčšia z hodnôt $A_{osl,1}$ a $A_{osl,2}$, kde $A_{osl,1}$ je súčet plôch oslabenia v reze kolmom na os prúta (rez 1)

$$A_{osl,1} = D t_w = 18 \cdot 14 = 252 \text{ mm}^2.$$

$A_{osl,2}$ je súčet všetkých plôch oslabenia v ľubovoľnom šikmom, alebo lomenom reze (rez 2), zmenšený o hodnotu $s^2 t / (4p)$

$$A_{osl,2} = 2D t_w - s^2 t / (4p) = 2 \cdot 18 \cdot 14 - 100^2 \cdot 14 / (4 \cdot 100) = 154 \text{ mm}^2,$$

$$A_{osl} = \max(252; 154) = 252 \text{ mm}^2,$$

$$A_{net} = 150 \cdot 20 \cdot 2 + 300 \cdot 14 - 252 = 10\,200 - 252 = 9\,948 \text{ mm}^2.$$

Návrhová ťahová sila únosnosti oslabeného prierezu

$$N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0,9 \cdot 9\,948 \cdot 360 / 1,3 = 2\,479,3 \text{ kN}.$$

Návrhová ťahová sila únosnosti prierezu

$$N_{t,Rd} = \min (N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}) = \min (2\,179,1; 2\,479,3 \text{ kN}) = 2\,179,1 \text{ kN}.$$

Návrhová ťahová sila únosnosti $N_{t,Rd} = 2\,179,1 \text{ kN}$.

Pre prúty so skrutkovými spojmi kategórie C, navrhované na medznú únosnosť pri preklze (treće spoje s vysokopevnostnými skrutkami), sa ťahová sila únosnosti berie najviac ako

$$N_{net,Rd} = A_{net} f_y / \gamma_{M0} = 9\,948 \cdot 235 / 1,1 = 2\,125 \text{ kN}.$$

Ak sa požaduje pôsobenie v plastickej oblasti (plastické pôsobenie), pre oslabený prierez má byť splnená podmienka

$$N_{u,Rd} = 2\,479,3 \text{ kN} > N_{pl,Rd} = 2\,179 \text{ kN}.$$

Podmienka je splnená.

Predchádzajúcu podmienku je možné vyjadriť v tvare

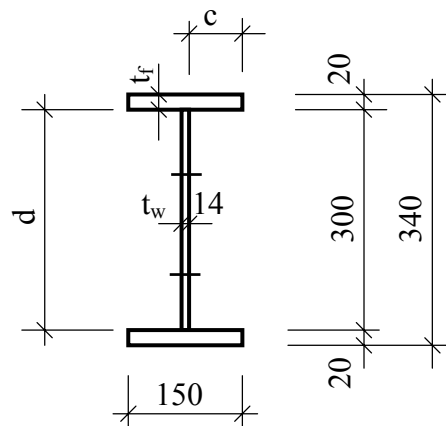
$$\begin{aligned} A_{net} / A &= 9\,948 / 10\,200 = 0,975 > f_y \gamma_{M2} / (0,9 f_u \gamma_{M0}) = \\ &= 235 \cdot 1,3 / (0,9 \cdot 360 \cdot 1,1) = 0,857. \end{aligned}$$

Podmienka je splnená.

1.2 Namáhanie tlakovou silou

Určte únosnosť prúta vzhľadom na namáhanie tlakovou silou. Prút je zváraného I-prierezu z ocele S 235 a ako celok je zabezpečený proti globálnej strate stability.

Ak je prút namáhaný tlakovou silou, je potrebné zistiť, či môže nastať vydutie steny alebo pásnic (lokálna strata stability prúta). Overuje sa to porovnaním štíhlostí steny, resp. pásnic s medznými štíhlosťami pre jednotlivé triedy prierezov.



Klasifikácia prierezu

pásnica (tlak) : $c/t_f = (75 - 7) / 20 = 3,4 < \beta_{01} = 9 (235 / f_y)^{0,5} = 9 \rightarrow$ trieda 1,

stena (tlak) : $d/t_w = 300/14 = 21,4 < \beta_{01} = 30 (235 / f_y)^{0,5} = 30 \rightarrow$ trieda 1.

Prierez je triedy 1.

Ak je prierez triedy 1, môžeme pri splnení príslušných predpokladov uvažovať s pôsobením prúta v plastickej oblasti.

Návrhová tlaková sila únosnosti prúta (zabezpečeného proti strate stability)

$$N_{c,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 10\,200 \cdot 235 / 1,1 = 2\,179 \text{ kN}.$$

Pozn.: Prierez prúta je oslabený štandardnými otvormi, preto sa s oslabením neuvažuje. Pri nadmerných alebo predĺžených dierach by sa musel overiť oslabený prierez na plasticke pôsobenie (pozri príklad 1.1).

1.3 Namáhanie ohybovým momentom - plastická únosnosť prierezu

Určte únosnosť prúta v plastickej oblasti pôsobenia vzhľadom na namáhanie ohybovým momentom okolo osi y-y. Prút je zvaraného I-prierezu z ocele S 235 a je zabezpečený proti globálnej strate stability. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = 1,1$.

Spôsob určenia návrhového ohybového momentu únosnosti je závislý od triedy prierezu.

Klasifikácia prierezu

tlačená pásnica :

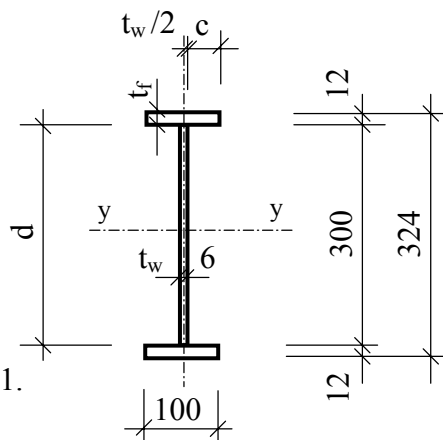
$$c/t_f = (100 - 6) / 2 / 12 = 3,9 < \beta_{01} = 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9$$

→ trieda 1,

ohýbaná stena :

$$d/t_w = 300 / 6 = 50 < \beta_{01} = 70 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 70 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

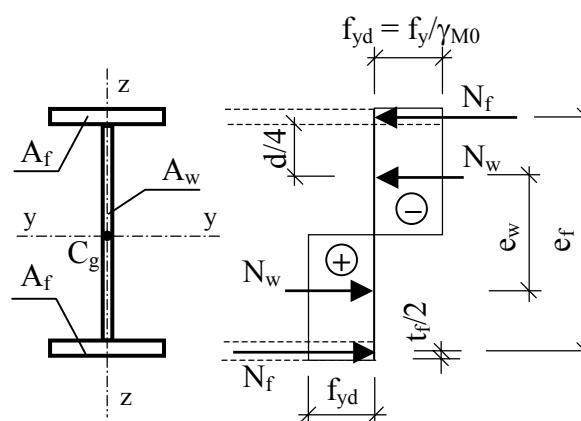
Prierez je triedy 1.



Ak je prierez triedy 1 alebo 2 a sú splnené príslušné predpoklady (uvedené v úvode tejto časti), môžeme počítať s pôsobením prúta v plastickej oblasti a tomu zodpovedajúcou plastickou únosnosťou, ktorú vyjadruje návrhový ohybový moment únosnosti $M_{pl,Rd}$.

Prierez je dvojsovo symetrický, preto rozhranie medzi konštantným tlakovým a ťahovým normálovým napätím (predpokladá sa vznik úplného plastického kĺbu) pri namáhaní čistým ohybovým momentom je na osi symetrie y-y a sily v tlačenej pásnici a v tlačenej časti steny sa veľkosťou v absolútnej hodnote rovnajú silám v ťahanej pásnici a v ťahanej časti steny.

Pozn. : Ak sú stena a pásnice prúta z rovnakého materiálu, neutrálna os delí plochu prierezu na dve rovnaké časti.



Plastický návrhový ohybový moment únosnosti prierezu $M_{pl,y,Rd}$, vypočítame ako súčet ohybového momentu únosnosti, ktorý prislúcha pásniciam ($N_f e_f$), a ohybového momentu únosnosti prislúchajúceho stene ($N_w e_w$)

$$M_{pl,y,Rd} = N_f e_f + N_w e_w = f_{yd} A_f (d + t_f) + f_{yd} (A_w/2)(d/2) = f_{yd} (b_f t_f^2 + b_f t_f d + t_w d^2/4).$$

Ak výraz v zátvorke, ktorý predstavuje prierezový modul v plastickej oblasti pôsobenia (plastický prierezový modul), označíme $W_{pl,y}$, dostávame návrhový moment únosnosti v tvare podľa STN 73 1401 [1]

$$M_{c,Rd} = M_{pl,y,Rd} = f_{yd} W_{pl,y} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} = 5,094 \cdot 10^5 \cdot 235 / 1,1 = 108,8 \text{ kNm}$$

s plastickým prierezovým modulom

$$W_{pl,y} = t_w d^2 / 4 + b_f t_f^2 + d t_f b_f = 6 \cdot 300^2 / 4 + 100 \cdot 12^2 + 300 \cdot 12 \cdot 100 = 5,094 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Plastický prierezový modul sa uvažuje najviac ako 1,5-násobok prierezového modulu v pružnej oblasti namáhania (pružného prierezového modulu). Preto overíme, či $W_{pl,y} \leq 1,5 W_{el,y}$.

Pružný prierezový modul

$$W_{el,y} = I_y / (h/2) = (2 \cdot 100 \cdot 12^3 / 12 + 6 \cdot 300^3 / 12 + 2 \cdot 100 \cdot 12 \cdot 158^2) / 162 = 3,605 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Plastická rezerva únosnosti prierezu

$$W_{pl,y} / W_{el,y} = 5,094 \cdot 10^5 / 3,605 \cdot 10^5 = 1,41 < 1,5$$

Vyhovuje.

Návrhový ohybový moment únosnosti prúta $M_{pl,y,Rd} = 108,8 \text{ kNm}$.

Pozn. : Plastický ohybový moment pre symetrický prierez vo všeobecnom tvare možno vyjadriť vzťahom

$$\begin{aligned} M_{pl,y,Rd} &= \int_0^{d/2+t_f} \sigma_x z dA = 2 f_{yd} \left[\int_0^{d/2} z dA + \int_{d/2}^{d/2+t_f} z dA \right] = \\ &= 2 f_{yd} \left[\int_0^{d/2} z t_w dz + \int_{d/2}^{d/2+t_f} z b_f dz \right] = 2 f_{yd} \left\{ [t_w z^2 / 2]_0^{d/2} + [b_f z^2 / 2]_{d/2}^{d/2+t_f} \right\} = \\ &= f_{yd} (t_w d^2 / 4 + b_f t_f^2 + d t_f b_f) = f_{yd} W_{pl,y} \end{aligned}$$

Postup na výpočet prierezového modulu pre nesymetrický I-prierez, ktorý umožňuje zohľadniť aj prípadnú rôznu medzu klzu materiálu steny a pásnic, je v príklade 4.4.

Medzná plastická deformácia je definovaná hodnotou pomerného pretvorenia (pomernej deformácie) ε_u na okraji tlačenej časti steny

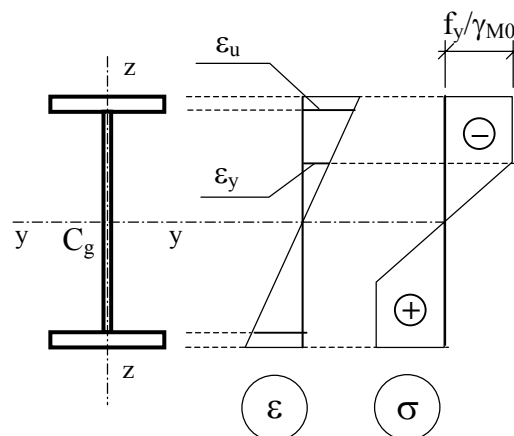
$$\varepsilon_u = [k_0 + k_1(\beta_1 - \beta)^2] / \beta^2 = [18,9 + 0,004(130 - 83,3)^2] / 83,3^2 = 0,00398,$$

$$k_0 = 18,9,$$

$$k_1 = 0,004 \frac{f_y}{235} = 0,004.$$

Pomerné pretvorenie na medzi klzu ε_y

$$\varepsilon_y = f_y / E = 235 / 210\,000 = 0,001119.$$



Pružnoplastický prierezový modul symetrického I-prierezu ohýbaného v rovine steny

$$W_{ep,y} = W_{pl,y} - \frac{W_{el,w}}{2} \left(\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_u} \right)^2,$$

$$W_{pl,y} = A_f(d + t_f) + t_w d^2 / 4 = 150 \cdot 20 \cdot 520 + 6 \cdot 500^2 / 4 = 1,925 \cdot 10^6 \text{ mm}^3,$$

$$W_{el,w} = \frac{1}{6} t_w d^2 = \frac{1}{6} 6 \cdot 500^2 = 0,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^3,$$

$$W_{ep,y} = 1,935 \cdot 10^6 - \frac{0,25 \cdot 10^6}{2} \left(\frac{0,001119}{0,00398} \right)^2 = 1,925 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

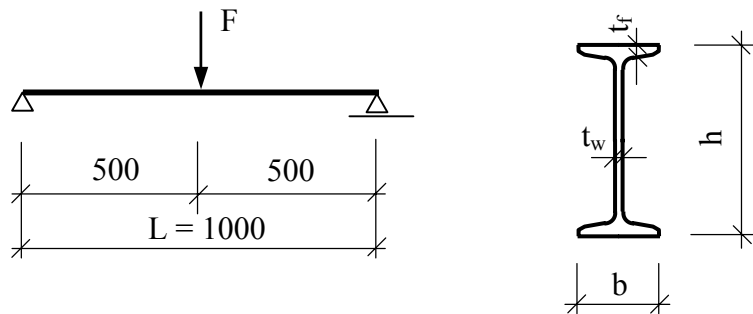
Pružnoplastický návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{ep,y,Rd} = W_{ep,y} f_y / \gamma_{M0} = 1,925 \cdot 10^6 \frac{235}{1,1} = 411,25 \text{ kNm}.$$

Pružný návrhový ohybový moment únosnosti je $M_{el,y,Rd} = 370,9 \text{ kNm}$, pružnoplastický návrhový ohybový moment únosnosti je $M_{ep,y,Rd} = 411,25 \text{ kNm}$, čo znamená zvýšenie o takmer 11%.

1.5 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou

Vypočítajte prípustnú silu F priečne zaťaženého nosníka dĺžky 1000 mm valcovaného prierezu I 200 z ocele S 235. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = 1,1$. Nosník je zabezpečený proti globálnej strate stability.



Prierezové charakteristiky

$$b = 90 \text{ mm}, \quad t_f = 11,3 \text{ mm}, \quad t_w = 7,5 \text{ mm},$$

$$A = 3,34 \cdot 10^3 \text{ mm}^2, \quad W_{el,y} = 214 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, \quad W_{pl,y} = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3.$$

Klasifikácia prierezu

$$\text{tlačená pásnica: } c/t_f = \frac{(b-t_w)/2}{t_f} = \frac{(90-7,5)/2}{11,3} = 3,65 < \beta_{01} = 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{ohýbaná stena: } d/t_w = \frac{h-2t_f}{t_w} = \frac{200-2 \cdot 11,3}{7,5} = 23,65 < \beta_{01} = 70\varepsilon_m = 70 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez patrí do triedy 1 a predpokladáme, že sú splnené aj ostatné podmienky pri ktorých je možné uvažovať s úplnou plastizáciou prierezu a vznikom plastického kĺbu.

Poloha plastického kĺbu a stanovenie prípustného zaťaženia

Polohu plastického kĺbu (a z nej vyplývajúcu hodnotu maximálneho ohybového momentu a zodpovedajúceho zaťaženia) na staticky určitých nosníkoch je možné určiť priamo z priebehu vnútorných síl. Pri staticky neurčitých konštrukciách, napr. pri spojitom nosníku, je jednoduchšie použiť kinematickú metódu. V tomto príklade si ukážeme podstatu kinematickej metódy na prostom nosníku.

Pri kinematickej metóde poloha plastických kĺbov sa zistí na základe kĺbového mechanizmu prípustného pre vyšetrovaný nosník. Pritom sa vychádza z faktu, že plastický kĺb sa vytvorí v takom priereze nosníka, vzhľadom na ktorý je potenciálna energia sústavy minimálna. Pri zaťažení osamelou silou je to vždy prierez v pôsobisku sily.

Virtuálna (myslená, neskutočná) práca sily F

$$A_e = F \bar{w},$$

kde \bar{w} je virtuálny posun.

Virtuálna práca vnútorných síl (vyvolaných silou F)

$$A_i = \sum M_{pl,Rd} \bar{\varphi},$$

kde $\bar{\varphi}$ sú virtuálne natočenia v miestach predpokladaných plastických kĺbov a

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd} &= W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} = \\ &= 248 \cdot 10^3 \cdot 235 / 1,1 = 53 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Medzná veľkosť sily F sa vypočíta z podmienky rovnosti práce vonkajších a vnútorných síl

$$\begin{aligned} A_e &= A_i, \\ F \bar{w} &= \sum M_{pl,Rd} \bar{\varphi}, \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \bar{\varphi} (L/2), \\ F \bar{\varphi} (L/2) &= 2M_{pl,Rd} \bar{\varphi} \rightarrow F = 4M_{pl,Rd} / L. \end{aligned}$$

Pozn.: Pri vyjadrení veľkosti virtuálneho posunu sa predpokladá, že $\text{tg} \bar{\varphi} \approx \bar{\varphi}$.

Prierez nosníka je namáhaný ohybovým momentom a priečnou silou, preto musíme zistiť, či pri výpočte návrhového ohybového momentu únosnosti je potrebné zohľadniť vplyv šmykového namáhania priečnou silou (skrátene vplyv šmyku)

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$\begin{aligned} A_V &= (200 - 2 \cdot 11,3) 7,5 = 1330 \text{ mm}^2, \\ V_{pl,Rd} &= A_V \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 1330 \frac{235}{1,1 \sqrt{3}} = 164 \text{ kN}. \end{aligned}$$

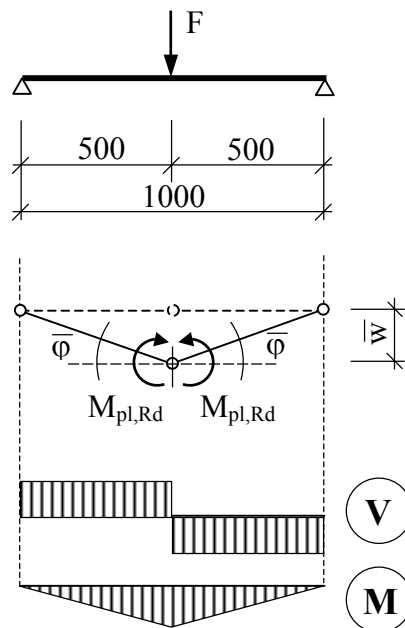
Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 106 / 164 = 0,645 > 0,5.$$

Vplyv šmyku nie je možné zanedbať.

Redukcia návrhového momentu únosnosti v tomto príklade je špecifická v tom, že priečna sila, keďže sa vypočíta z veľkosti zaťaženia (sily F) pri vzniku kĺbového mechanizmu, je závislá od veľkosti plastického návrhového ohybového momentu únosnosti.

To znamená, že ak priečna sila bude redukovať veľkosť návrhového ohybového momentu únosnosti, bude ovplyvňovať aj svoju vlastnú veľkosť.



Výpočet medznej sily F pri vzniku kĺbového mechanizmu sa musí vykonať iteračnými krokmi. Ku konečnej veľkosti zaťaženia sa budeme približovať striedavo z oboch strán. Redukcia návrhového ohybového momentu únosnosti v 1. kroku sa vykoná vplyvom šmyku (v dôsledku priečnej sily), ktorý zodpovedá neredukovanej návrhovej ohybovej momentovej únosnosti.

Iterácie skončíme, keď pomer dvoch po sebe nasledujúcich hodnôt niektorej z meniacich sa veličín je blízky 1,0, napr. ak pre pomer veľkosti bremien $\varepsilon = F_{(i+1)}/F_{(i)}$ platí

$$0,99 \leq \varepsilon \leq 1,01.$$

Bremeno má východiskovú veľkosť $F_{(0)} = 212 \text{ kN}$. Priečna sila $V_{Sd,(0)} = 106 \text{ kN}$.

1. krok :

Redukčný súčiniteľ

$$\varphi_{my,Vz} = \sqrt{1,1 \frac{1 - (V_{Sd}/V_{pl,Rd})^2}{1 - \alpha(V_{Sd}/V_{pl,Rd})^2}} = \sqrt{1,1 \frac{1 - 0,645^2}{1 - 0,7 \cdot 0,645^2}} = 0,952 .$$

Redukovaný návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{u,y,Rd} = \varphi_{my,Vz} M_{pl,Rd} = 0,952 \cdot 53 = 50,43 \text{ kNm} .$$

Veľkosť sily $F_{(1)} = 201,72 \text{ kN}$.

Kontrola presnosti $201,72 / 211,92 = 0,951 < 0,99$.

Podmienka nie je splnená.

2. krok :

Použitím sily z 1. kroku vypočítame novú veľkosť priečnej sily, redukčného súčiniteľa, návrhového ohybového momentu únosnosti a zodpovedajúcej sily

Priečna sila $V_{(1),Sd} = 201,72 / 2 = 100,86 \text{ kN} .$

Redukčný súčiniteľ $\varphi_{my,Vz} = 0,9648 .$

Návrhový ohybový moment únosnosti $M_{u,y,Rd} = 0,9648 \cdot 52,98 = 51,12 \text{ kNm} .$

Veľkosť bremena $F_{(2)} = 204,47 \text{ kN}$.

Kontrola presnosti $204,47/201,72 = 1,013 > 1,01$.

Podmienka nie je splnená.

3. krok:

Priečna sila	$V_{Sd,(2)} = 204,47/2 = 102,23 \text{ kN}.$
Redukčný súčiniteľ	$\varphi_{my, Vz} = 0,961.$
Návrhový ohybový moment únosnosti	$M_{u, y, Rd} = 50,93 \text{ kNm}.$
Veľkosť bremena	$F_{(3)} = 203,72 \text{ kN}.$
Kontrola presnosti	$203,72 / 204,47 = 0,996 > 0,99.$

Podmienka je splnená.

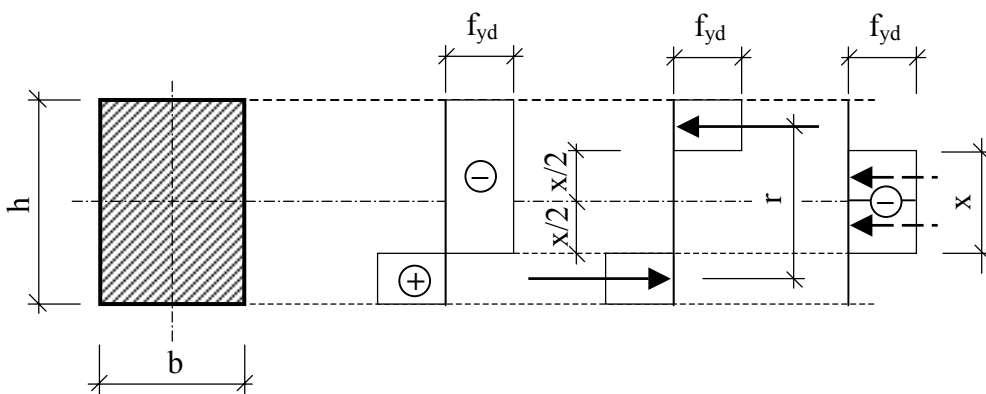
Veľkosť medznej sily pri vzniku plastického kĺbu $F = 203,7 \text{ kN}.$

Pozn.: Vidíme, že výsledná veľkosť sily sa významne nezmenila v porovnaní s veľkosťou sily z 1. kroku. Podľa toho, akú konzervatívnosť v stanovení veľkosti návrhového ohybového momentu únosnosti (a tým aj veľkosti zaťažovacej sily) chceme alebo máme možnosť pripustiť, rozhodneme, či bude postačovať najväčšia redukcia v 1. kroku, alebo nie.

Iterácie je účelné robiť, ak ide o relatívne veľkú priečnu silu a je požiadavka nájsť rezervu v konštrukcii.

1.6 Namáhanie ohybovým momentom a tlakovou silou

Odvodte interakčný vzťah únosnosti prúta obdĺžnikového prierezu (prierez triedy 1) pri namáhaní ohybovým momentom a tlakovou silou. Prút je zabezpečený proti globálnej strate stability.



Návrhová tlaková sila únosnosti a návrhový ohybový moment únosnosti

$$N_{pl,Rd} = A f_{yd} = h b f_{yd}, \quad M_{pl,Rd} = W_{pl} f_{yd} = h^2 b f_{yd} / 4.$$

Pri interakcii osovej sily a ohybového momentu predpokladáme, že osová sila N_{Sd} je prenášaná časťou prierezu pri neutrálnej osi (moment únosnosti prislúchajúci tejto časti prierezu musí byť rovný nule).

Výšku časti prierezu, ktorá prenáša osovú silu, označíme x . Osovú silu N_{Sd} potom vyjadríme vzťahom

$$N_{Sd} = x b f_{yd}.$$

Ohybový moment M_{Sd} prenášaný ostatnou časťou prierezu je

$$M_{Sd} = \left(\frac{h-x}{2} \right) \left(\frac{h+x}{2} \right) b f_{yd} = (h^2 - x^2) \frac{1}{4} b f_{yd}.$$

Kvôli všeobecnosti je výhodné interakčné vzťahy vyjadrovať v bezrozmernom tvare, preto jednotlivé silové účinky N_{Sd} a M_{Sd} , v prípade, že ide o prosté namáhanie tlakovou silou a ohybovým momentom, predelíme zodpovedajúcimi maximálnymi prípustnými hodnotami - únosnosťami $N_{pl,Rd}$ a $M_{pl,Rd}$

$$N_{Sd} / N_{pl,Rd} = x b f_{yd} / h b f_{yd} = x / h,$$

$$\frac{M_{Sd}}{M_{pl,Rd}} = (h^2 - x^2) \frac{1}{4} b f_{yd} / h^2 b f_{yd} / 4 = \frac{h^2 - x^2}{h^2} = 1 - \frac{x^2}{h^2}.$$

Po dosadení prvého podielu do druhého dostávame hľadaný interakčný vzťah

$$(N_{Sd}/N_{pl,Rd})^2 + M_{Sd}/M_{pl,Rd} = 1,0.$$

Porovnajme odvodený interakčný vzťah so vzťahom podľa čl. 6.6.6.1, STN 73 1401 pre $M_{z,Sd} = 0$.

Podmienka spoľahlivosti prierezu namáhaného ohybom a tlakom je daná interakčnou závislosťou

$$\left(\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \right)^{k_y} + \frac{M_{Sd}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0, \text{ pričom } k_y = 2 \text{ pre obdĺžnikový prierez (tab. 14, STN 73 1401).}$$

Vidíme, že odvodený interakčný vzťah pre plastickú únosnosť prúta obdĺžnikového prierezu pri namáhaní ohybovým momentom a tlakovou silou je totožný s podmienkou spoľahlivosti uvedenou v STN 73 1401.

1.7 Namáhanie ohybovým momentom a tlakovou silou

Posúďte konzolu valcovaného prierezu I 200 z ocele S 235 namáhanú ohybovým momentom $M_{y,Sd} = 40 \text{ kNm}$ a tlakovou silou $N_{Sd} = 100 \text{ kN}$ pôsobiacou excentricky s $e = 80 \text{ mm}$ (vzhľadom na ťažisko prierezu). Konzola je zabezpečená proti globálnej strate stability.

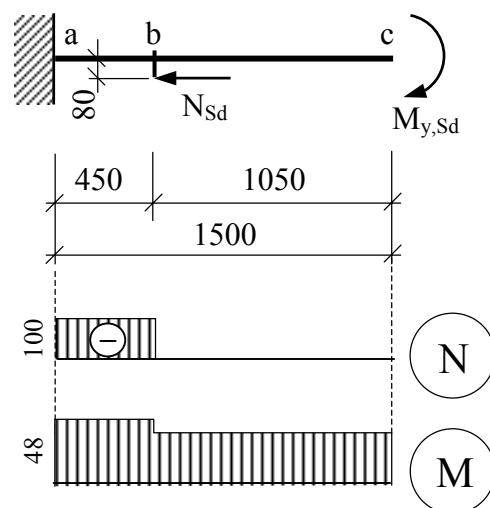
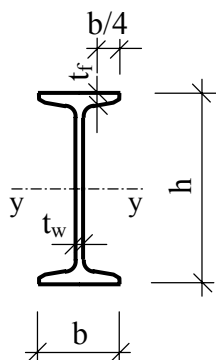
Prierezové charakteristiky

$$A = 3,34 \cdot 10^3 \text{ mm}^2,$$

$$W_{el,y} = 214 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$W_{pl,y} = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$b = 90 \text{ mm}, \quad t_f = 11,3 \text{ mm}, \quad t_w = 7,5 \text{ mm}.$$



Klasifikácia prierezu

$$\text{tlačená pásnica: } c/t_f = \frac{(b-t_w)/2}{t_f} = \frac{(90-7,5)/2}{11,3} = 3,65 < \beta_{01} = 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Aby sme mohli vykonať zatriedenie steny namáhanej ohybom a tlakom, musíme zistiť rozdelenie napätia po výške steny. Budeme predpokladať rozdelenie pri úplnej plastizácii.

Najprv overíme, či je splnený predpoklad, že tlaková sila môže byť prenášaná strednou časťou steny. Ostatnou časťou prierezu sa prenáša ohybový moment (postup ako v príklade 1.6).

$$\sigma_N = \frac{N_{Sd}}{xt_w} = f_y / \gamma_{M0} \rightarrow x = \frac{100 \cdot 10^3 \gamma_{M0}}{t_w f_y} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{7,5 \cdot 235} = 62,41 \text{ mm},$$

$$d = 200 - 2 \cdot 11,3 = 177,4 \text{ mm},$$

$$x = d_{wN} = 62,41 < 177,4 \text{ mm}.$$

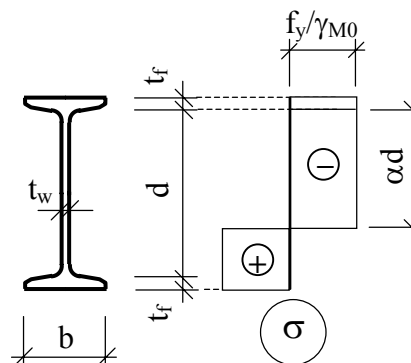
Časť steny je schopná preniesť osovú tlakovú silu.

Veľkosť tlačenej časti steny

$$200/2 - 11,3 + 62,41/2 = 119,9 \text{ mm},$$

$$\alpha d = \alpha(200 - 2 \cdot 11,3) = 177,4 \alpha$$

$$\rightarrow \alpha = 0,676.$$



Ak poznáme parameter α , je možné overiť štíhlosť steny ($\alpha = 0,676 > 0,5$)

$$\begin{aligned}\beta &= (200 - 2.11,3) / 7,5 = \\ &= 23,65 < \beta_{01,NM} = \frac{420\varepsilon_m}{16\alpha - 2,0} = \frac{420.1}{16.0,676 - 2,0} = 47,65.\end{aligned}$$

Stena spĺňa podmienku pre triedu 1, predpoklad o plastickom pôsobení bol správny.

Posúdenie konzoly

Posúdenie konzoly vo votknutí (miesto a) môžeme vykonať dvojako :

a) pomocou redukovanej ohybovej momentovej únosnosti prierezu (bez časti steny, ktorá prenáša tlakovú silu)

$$\begin{aligned}M_{pl,y,red,Rd} &= (W_{pl,y} - W_{pl,w,y,red}) f_y / \gamma_{M0} = \\ &= (248.10^3 - 7,5.62,41^2 / 4) 235 / 1,1 = 51,42 \text{ kNm}.\end{aligned}$$

$$M_{pl,y,red,Rd} = 51,42 \text{ kN} > M_{y,Sd} = 48 \text{ kNm}.$$

Konzola vyhovuje.

b) podľa všeobecnej podmienky spoľahlivosti

Použitie tejto podmienky pri plasticitnom výpočte vyžaduje, aby stena v tlaku bola triedy 1, alebo 2. Overíme preto, či stena namáhaná tlakom môže pôsobiť v plastickej oblasti

$$d/t_w = (200 - 2.11,3) / 7,5 = 23,7 < \beta_{01} = 30\varepsilon_m = 30 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 3,34.10^3 \cdot \frac{235}{1,1} = 713,5 \text{ kN},$$

$$M_{u,Rd} = M_{pl,y,Rd} = 52,98 \text{ kNm}, \quad M_{z,Sd} = 0, \quad k_{yz} = k_y = 1,2.$$

Podmienka spoľahlivosti podľa STN 73 1401

$$\begin{aligned}\left(\frac{N_{Sd}}{N_{u,Rd}} \right)^{k_{yz}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{u,y,Rd}} &\leq 1,0 \\ \left(\frac{100.10^3}{713,5.10^3} \right)^{1,2} + \frac{48.10^6}{52,98.10^6} &= 0,095 + 0,906 = 1,001 \approx 1,0.\end{aligned}$$

Posúdiť je potrebné aj úsek konzoly $b - c$, ktorý je namáhaný ohybovým momentom 40 kNm . Vzhľadom na to, že toto namáhanie je na úseku väčšom ako $1/5$ dĺžky konzoly, prierezový modul v tomto úseku sa musí uvažovať ako priemerná hodnota pružného a plastického prierezového modulu

$$(W_{el,y} + W_{pl,y})/2 = (214 \cdot 10^3 + 248 \cdot 10^3)/2 = 231 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 .$$

Posúdenie konzoly na úseku $b - c$

$$M_{y,Sd} = 40 \text{ kNm} < 231 \cdot 10^3 \cdot 235/1,1 = 49,35 \text{ kNm} .$$

Konzola vyhovuje.

1.8 Namáhanie priečnou silou

Určte šmykovú únosnosť prúta zvaraného I-priezezu z ocele S 355, ktorý je oslabený 8 otvormi priemeru 22 mm.

Hrúbka pásnic a steny prúta nepresahujú 40 mm , preto pre oceľ S 355 je medza klzu $f_y = 355 \text{ MPa}$, pevnosť v ťahu $f_u = 510 \text{ MPa}$. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = 1,2$. Predpokladáme, že prierez je vzhľadom na šmyk kompaktný.

Overenie veľkosti oslabenia

v smere osi y-y

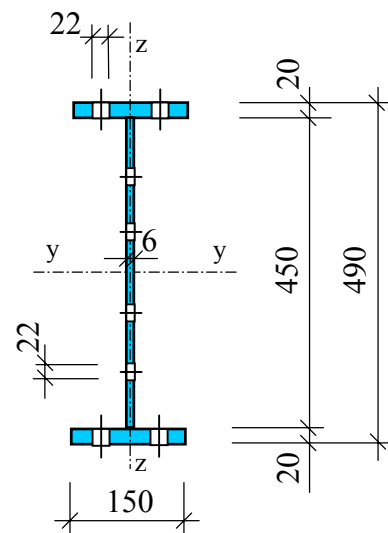
$$\begin{aligned} A_{V,net}/A_V &= (150 \cdot 20 - 8 \cdot 22 \cdot 20)/(150 \cdot 20) = \\ &= 0,71 > f_y/f_u = 355 / 510 = 0,696, \end{aligned}$$

s oslabením sa neuvažuje,

v smere osi z-z

$$A_{V,net}/A_V = (450 \cdot 6 - 8 \cdot 22 \cdot 6)/(450 \cdot 6) = 0,80 > f_y/f_u = 355 / 510 = 0,696,$$

s oslabením sa neuvažuje.



Návrhová šmyková sila únosnosti v smere osi z – z

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{450.6.355}{1,2\sqrt{3}} = 461 \text{ kN} .$$

Návrhová šmyková sila únosnosti v smere osi y – y

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{2.150.20.355}{1,2\sqrt{3}} = 1024 \text{ kN} .$$

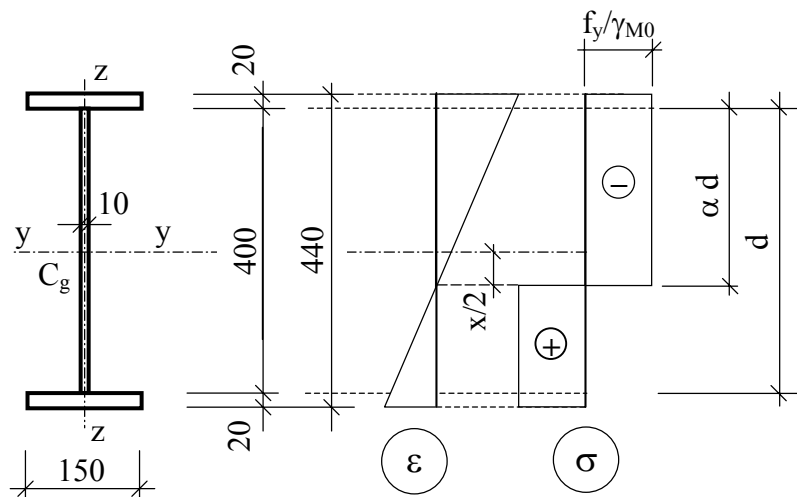
Návrhová šmyková sila únosnosti v smere osi z – z $V_{pl,z,Rd} = 461 \text{ kN}$,

v smere osi y – y $V_{pl,y,Rd} = 1024 \text{ kN}$.

1.9 Namáhanie ohybovým momentom, tlakovou a priečnou silou

Posúďte prierez zvaraného prúta z ocele S 235, ktorý je namáhaný návrhovou tlakovou silou N_{Sd} , ohybovým momentom $M_{y,Sd}$, (okolo osi y-y) a šmykovou silou $V_{z,Sd}$ (v smere osi z-z). Nosník je zabezpečený proti globálnej strate stability (vzper a klopenie nenastáva).

$$\begin{aligned} N_{Sd} &= 500 \text{ kN} , \\ M_{y,Sd} &= 300 \text{ kNm} , \\ V_{z,Sd} &= 350 \text{ kN} , \\ f_y &= 235 \text{ MPa} , \\ \gamma_{M0} &= 1,1 . \end{aligned}$$



Klasifikácia prierezu

pásnica (tlak) : $c/t_f = \left(\frac{150-10}{2} \right) / 20 = 3,5 < \beta_{01} = 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9 \rightarrow \text{trieda 1,}$

stena (ohyb a tlak): $\sigma_N = 500\,000 / (x \cdot 10) = 235 / 1,1 \rightarrow x = 234 \text{ mm} < d = 400 \text{ mm}.$

Časť steny je schopná preniesť osovú silu.

Veľkosť tlačenej časti steny

$$d\alpha = 400\alpha = 200 + 234/2 = 317 \rightarrow \alpha = 317/400 = 0,79 > 0,5,$$

$$\beta_{01} = \frac{420\varepsilon_m}{16\alpha - 2,0} = \frac{420 \cdot 1,0}{16 \cdot 0,79 - 2,0} = 39,5 < \beta = 400/10 = 40$$

$$< \beta_{02} = \frac{448\varepsilon_m}{16\alpha - 2,4} = \frac{448 \cdot 1,0}{16 \cdot 0,79 - 2,4} = 43,7$$

→ trieda 2.

Môžeme uvažovať s plasticitným výpočtom únosnosti.

Priečna sila bude ovplyvňovať veľkosť návrhového ohybového momentu únosnosti a tlakovej sily únosnosti, pretože pre namáhanie v smere steny I-prierezu platí

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \frac{400 \cdot 10 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 493,4 \text{ kN},$$

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 350 / 493,4 = 0,71 > 0,5.$$

Redukovaný návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{u,y,Rd} = M_{Vz,y,Rd} = \varphi_{my,Vz} M_{pl,y,Rd}, \quad \alpha = 0,7,$$

$$\varphi_{my,Vz} = \sqrt{1,1 \frac{1 - (V_{Sd} / V_{pl,Rd})^2}{1 - \alpha (V_{Sd} / V_{pl,Rd})^2}} = \sqrt{1,1 \frac{1 - 0,71^2}{1 - 0,7 \cdot 0,71^2}} = 0,918,$$

$$M_{u,y,Rd} = 0,918 M_{pl,Rd},$$

$$W_{pl,y} = t_w d^2 / 4 + b_f t_f^2 + d t_f b_f =$$

$$= 10 \cdot 400^2 / 4 + 150 \cdot 20^2 + 400 \cdot 20 \cdot 150 = 1,66 \cdot 10^6 \text{ mm}^3,$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} = 1,66 \cdot 10^6 \frac{235}{1,1} = 354,6 \text{ kNm},$$

$$M_{u,y,Rd} = 0,918 \cdot 354,6 = 325,5 \text{ kNm}.$$

Redukovaná návrhová normálová sila únosnosti

$$N_{u,Rd} = N_{Vz,Rd} = \varphi_{n,Vz} N_{pl,w,Rd} + 2N_{pl,f,Rd}, \quad \alpha = 0,$$

$$\varphi_{n,Vz} = \sqrt{1,1 [1 - (V_{Sd} / V_{pl,Rd})^2]} = \sqrt{1,1 (1 - 0,71^2)} = 0,738,$$

$$N_{u,Rd} = (0,738 \cdot 400 \cdot 10 + 2 \cdot 150 \cdot 20) \frac{235}{1,1} = 1\,912,5 \text{ kN}.$$

Pozn.: Redukcia normálovej sily únosnosti by sa mala vykonať podľa prílohy D STN 73 1401, pretože stena namáhaná tlakom je triedy 3. Pre $\alpha = 0$ sa však obidva postupy stotožňujú, a teda výsledky sú rovnaké.

Podmienka spoľahlivosti prierezu pre triedu 1 a 2

$$k_{yz} = \frac{k_y + k_z}{2} + \left(\frac{k_y - k_z}{2} \right) \left(\frac{m_y - m_z}{m_y + m_z} \right), \quad m_y = \frac{M_{y,Sd}}{M_{u,y,Rd}}, \quad m_z = \frac{M_{z,Sd}}{M_{u,z,Rd}},$$

$$M_{z,Sd} = 0 \rightarrow k_{yz} = k_y = 1,2,$$

$$\left(\frac{N_{Sd}}{N_{u,Rd}} \right)^{k_{yz}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{u,y,Rd}} = \left(\frac{500}{1912,5} \right)^{1,2} + \frac{300}{325,5} = 0,199 + 0,9216 = 1,12 > 1,0.$$

Prút nevyhovuje.

1.10 Namáhanie ohybovým momentom, tlakovou a priečnou silou

Posúďte prierez z predchádzajúceho príkladu. Návrhový redukovaný ohybový moment únosnosti $M_{u,Rd}$ a redukovanú návrhovú normálovú silu únosnosti $N_{u,Rd}$ určte podľa informatívnej prílohy D normy STN 73 1401.

Vplyv priečnej sily na jednotlivé únosnosti prierezu sa zohľadňuje redukciou medze klzu, resp. návrhovej hodnoty pevnosti ocele tých častí prierezu, ktoré sa podieľajú na prenose priečnej sily.

Redukčný súčiniteľ a redukovaná návrhová hodnota pevnosti ocele

$$\varphi_{yV} = \sqrt{1,1 \left[1 - (V_{Sd}/V_{pl,Rd})^2 \right]} = 0,738,$$

$$f_{yVz,d} = \varphi_{yV} f_{yd} = \varphi_{yV} f_y / \gamma_{M0} = 0,738 \cdot 235 / 1,1 = 157,7 \text{ MPa}.$$

Návrhová normálová sila plastickej únosnosti (redukovaná vplyvom šmykovej sily V_z)

$$\begin{aligned} N_{Vz,Rd} &= f_{yVz,d} \sum_i A_{Vz,i} + f_{yd} \sum_k A_k = 157,7 \cdot 400 \cdot 10 + \frac{235}{1,1} \cdot 2 \cdot 150 \cdot 20 = \\ &= 1912,5 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Návrhový ohybový moment únosnosti (redukovaný vplyvom šmykovej sily V_z)

$$\begin{aligned} M_{Vz,y,Rd} &= f_{yVz,d} \sum_j W_{pl,y,j} + f_{yd} \sum_k W_{pl,y,k} = \\ &= 157,7 \frac{1}{4} 10 \cdot 400^2 + \frac{235}{1,1} 150 \cdot 20 \cdot 420 = 332,3 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Podmienka spoľahlivosti

$$\left(\frac{N_{Sd}}{N_{u,Rd}} \right)^{k_{yz}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{u,y,Rd}} = \left(\frac{500}{1912,5} \right)^{1,2} + \frac{300}{332,3} = 0,199 + 0,90 = 1,10 > 1,0 .$$

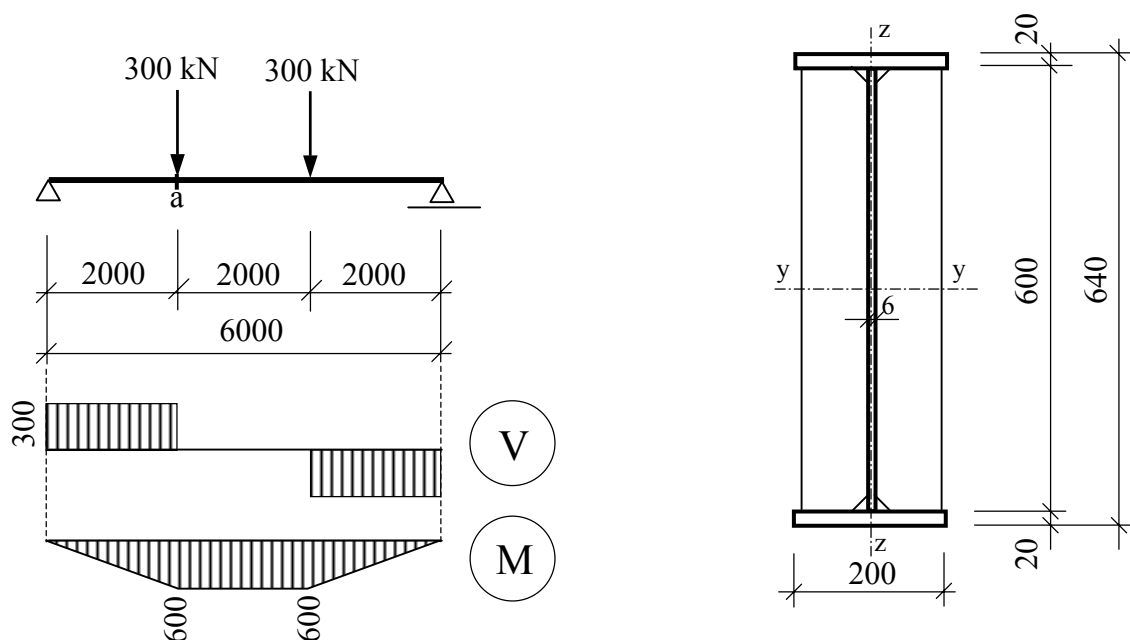
Prút nevyhovuje .

Vidíme, že obidva postupy pre I-prierez dávajú takmer rovnaký výsledok, rozdiel je 1,8 %.

1.11 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou

Posúďte zváraný prierez nosníka z ocele S 355. Nosník je zabezpečený proti globálnej strate stability (klopenie nenastáva). Pod pôsobiskami síl sú priečne výstuhy. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = 1,2$.

Navrhnutý je symetrický prierez so stenou $600 \times 6 \text{ mm}$ a pásnicami $2 \times 200 \times 20 \text{ mm}$.



Klasifikácia prierezu

tlačená pásnica : $c/t_f = (200-6)/2/20 = 4,85 < \beta_{01} = 9(235/355)^{0,5} = 7,32 \rightarrow$ trieda 1,

ohýbaná stena : $\beta_{02} = 80(235/355)^{0,5} = 65,09 < d/t_w = 600/6 = 100 <$

$< \beta_1 = 130(235/355)^{0,5} = 105,8 \rightarrow$ trieda 3.

Prierez je triedy 3, preto použijeme pružnostný výpočet. Posúdenie vykonáme podľa všeobecnej podmienky spoľahlivosti (uplatnia sa pružné únosnosti prierezu a súčiniteľ $k_{yz} = 1,0$) a podľa alternatívnej podmienky spoľahlivosti, ktorou sa overuje napätie v ľubovoľnom mieste vyšetřovaného prierezu.

Prierezové charakteristiky

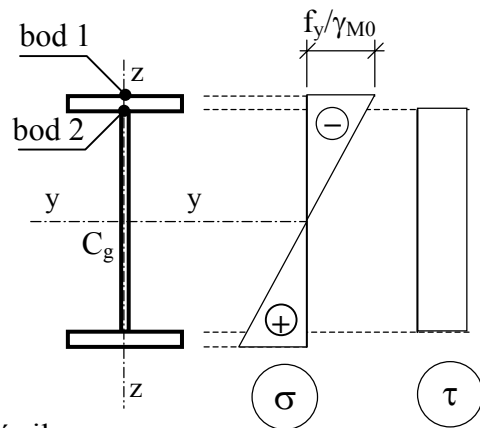
$$A_V = 600.6 = 3600 \text{ mm}^2,$$

$$I_y = 2 \frac{1}{12} 200.20^3 + 2.200.20.310^2 + \frac{1}{12} 6.600^3 =$$

$$= 8,77.10^8 \text{ mm}^4,$$

$$W_{el,y1} = 8,77.10^8 / 320 = 2,74.10^6 \text{ mm}^3,$$

$$W_{el,y2} = 8,77.10^8 / 300 = 2,92.10^6 \text{ mm}^3.$$



Návrhový ohybový moment a návrhová šmyková sila

$$M_{y,Sd} = 600 \text{ kNm}, \quad V_{Sd} = 300 \text{ kN}.$$

Posúdenie – všeobecná podmienka spoľahlivosti

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 300 / [3 \cdot 600 \cdot 355 / (1,2 \cdot 3^{0,5})] = 300 / 614,8 = 0,487 > 0,3$$

Je potrebné redukovať návrhový moment únosnosti vplyvom šmyku podľa informatívnej prílohy D.

Redukčný súčiniteľ a redukovaná návrhová hodnota pevnosti

$$\varphi_{yV} = \sqrt{1,1[1 - (V_{Sd} / V_{pl,Rd})^2]} = \sqrt{1,1[1 - (300 / 614,8)^2]} = 0,916.$$

$$f_{yV,d} = \varphi_{yV} f_{yd} = \varphi_{yV} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,916 \frac{355}{1,2} = 271 \text{ MPa}.$$

Návrhový ohybový moment únosnosti nosníka (redukovaný vplyvom šmyku)

$$M_{u,y,Rd} = W_{el,y} f_{yV,d} = 2,74.10^6 \cdot 271 = 742,5 \text{ kNm}.$$

Všeobecná podmienka spoľahlivosti

$$M_{y,Sd} / M_{u,y,Rd} = 600 / 742,5 = 0,808 < 1.$$

Nosník vyhovuje.

Posúdenie – alternatívna podmienka spoľahlivosti

Prierez a – (bod 2) krajné vlákno steny

$$\sigma_{x,Ed} = M_{Sd} / W_{el,y2} = 600 \cdot 10^6 / 2,9235 \cdot 10^6 = 205,2 \text{ MPa},$$

$$\tau_{Ed} = V_{Sd} / A_V = 300 \cdot 10^3 / 3600 = 83,3 \text{ MPa},$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3})} \right)^2 = \left(\frac{205,2 \cdot 1,2}{355} \right)^2 + \left(\frac{83,3 \cdot 1,2 \sqrt{3}}{355} \right)^2 = 0,72 < 1,0.$$

Nosník vyhovuje.

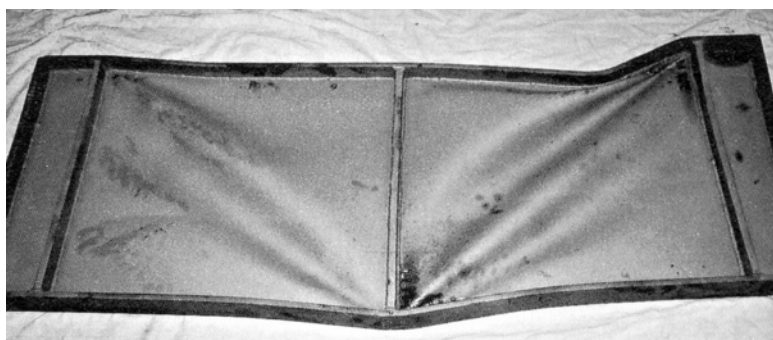
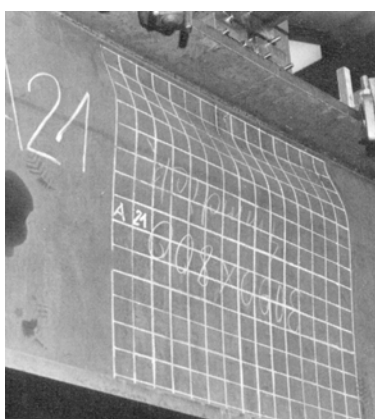
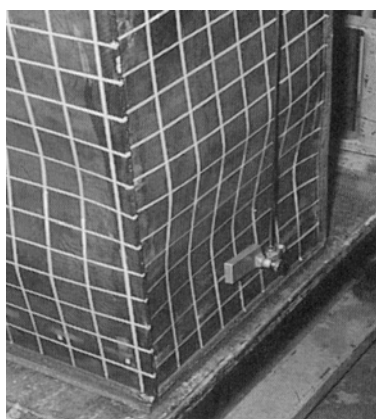
Prierez a – (bod 1) krajné vlákno pásnice

$$\sigma_{x,Ed} / (f_y / \gamma_{M0}) = 600 \cdot 10^6 / 2,74 \cdot 10^6 / (355 / 1,2) = 0,74 < 1,0.$$

Nosník vyhovuje.

2

PRÚTY SO ŠTÍHLYM PRIEREZOM



2 PRÚTY SO ŠTÍHLYM PRIEREZOM

Prierezy sa považujú za štíhle, ak pri namáhaní prúta ohybovým momentom, tlakovou a priečnou silou (alebo ich interakciou) môže v dôsledku normálového alebo šmykového účinku namáhania dôjsť k vydutiu ich steny, alebo tlačenej pásnice. Takéto prierezy sú klasifikované ako prierezy triedy 4.

Skutočné štíhle steny, to znamená steny so začiatočnou imperfekciou (geometrickou, materiálou a konštrukčnou) sa deformujú od začiatku namáhania. Medzný stav je možné definovať dosiahnutím medze klzu v najviac namáhanom mieste steny (pružnostný prístup), alebo vyčerpaním únosnosti vytvorením plastického mechanizmu porušenia pozostávajúceho z ťahového pásu v stene a plastických kĺbov v pásniciach.

Namáhanie ohybovým momentom a tlakovou silou

Pri prierezoch, ktorých stena alebo pásnica je klasifikovaná ako štíhla (stena alebo tlačaná pásnica sa môže vyduť), uvažujeme iba s ich efektívnymi prierezovými charakteristikami. Vydutie stien a pásnic sa zohľadňuje súčiniteľmi ρ_{NM} pri výpočte tzv. efektívnych šírok.

Veľkosť efektívnej šírky tlačenej časti prierezu závisí od veľkosti ich namáhania. Na druhej strane však, veľkosť namáhania závisí od veľkosti efektívneho prierezu. Efektívny prierez sa preto stanovuje iteratčným postupom. Pre jednoosovo symetrický I-prierez je možné určiť efektívny prierezový modul zjednodušeným výpočtom [11].

Vydutie stien je podobný jav, ako vybočenie prúta [7]. Rozdiel medzi vydutím steny a vybočením prúta je ten, že kým únosnosť prúta je zhora obmedzená kritickou silou N_{cr} , stena je schopná prenášať zaťaženie vyššie ako je kritické zaťaženie. Tento jav, nazvaný ako *pokritické pôsobenie steny*, vzniká preto, že v stene, ktorej nezaťažené okraje sú podopreté v rovine steny (aj vplyvom pásnic a výstuh), vznikajú ťahové membránové napätia, ktoré stabilizujú priehyb pri vydutí steny, a tým zvyšujú jej medzné namáhanie.

Únosnosť tlačenej a ohýbaných prútov so štíhlymi prierezmi sa môže teda zvýšiť pomocou dostatočne tuhých priečných a pozdĺžnych výstuh. V tomto prípade sa jedná o vystužené pole steny. Z hľadiska hospodárnosti je výhodné navrhovať prierezy, ktorých pásnice sú kompaktné a steny štíhle.

Namáhanie priečnou silou

Vzhľadom na šmykový účinok namáhania priečnou silou je stanovená medzná štíhlosť steny, ktorá rozhoduje, či ide o kompaktnú alebo štíhlu stenu. Závisí od charakteristickej hodnoty medze klzu steny a od pomeru strán poľa steny vymedzeného pásnicami a priečnymi výstuhami. Vzďalenosť priečných výstuh má byť maximálne 3-násobok výšky steny, aby boli z hľadiska únosnosti steny ešte účinné.

Návrhová šmyková sila únosnosti môže byť určená jednoduchou a úplnou pokritickou metódou, pomocou plnej plastickej šmykovej únosnosti $V_{pl,Rd}$ a redukčných súčiniteľov ρ_{Va} a

ρ_{vb} . Na rozdiel od úplnej pokritickej metódy, jednoduchá pokritická metóda neuvažuje s ohybovou tuhosťou pásníc. V oboch metódach sa predpokladá vznik diagonálneho pásu, ktorý je od vodorovnej roviny odklonený o uhol φ . V úplnej pokritickej metóde uhol odklonu pásu a jeho šírka závisí od ohybovej tuhosti pásníc. V tomto prípade ku zrúteniu nosníka dochádza vtedy, keď sa v pásniciach vytvorí sústava plastických kĺbov, tzv. kombinovaný trémový mechanizmus [6].

Návrhová šmyková sila únosnosti určená pomocou úplnej pokritickej metódy je vo všeobecnosti väčšia ako návrhová šmyková sila únosnosti určená pomocou jednoduchej pokritickej metódy.

Interakcia osovej sily, ohybového momentu a šmyku

Súčasné pôsobenie (interakcia) osovej sily, ohybového momentu a priečnej sily je vyjadrená interakčnou závislosťou medzi normálovými a šmykovými účinkami namáhania, v ktorej je zahrnutý vplyv veľkosti osovej a priečnej sily.

Interakcia je závislá od spôsobu výpočtu šmykovej únosnosti, teda či bola použitá jednoduchá alebo úplná pokritická metóda. S vplyvom šmyku sa uvažuje, ak návrhová priečna sila je väčšia ako polovica návrhovej šmykovej sily únosnosti.

Ak návrhová priečna sila je práve rovná návrhovej šmykovej sile únosnosti, návrhový ohybový moment únosnosti je rovný momentu, ktorý prenesú pásnice prierezu (únosnosť steny je vyčerpaná šmykom). Ak návrhová priečna sila je menšia ako polovica návrhovej šmykovej sily únosnosti, návrhový ohybový moment únosnosti sa rovná únosnosti celého prierezu.

Pre návrhovú priečnu silu, ktorá sa nachádza medzi týmito hraničnými hodnotami, sa na výpočet návrhového ohybového momentu únosnosti podľa jednoduchej pokritickej metódy použije interakčný vzťah. V úplnej pokritickej metóde sa interakčný vzťah môže použiť až po veľkosť návrhovej priečnej sily rovnú veľkosti návrhovej šmykovej sily únosnosti pri jednoduchom šmyku, teda pri namáhaní len priečnou silou ($N_{Sd} = 0$, $M_{Sd} = 0$).

Výstuhy

Vytvorením priečných a pozdĺžnych výstuh sa stena nosníka rozdelí na čiastkové vystužené polia. Priečne výstuhy sa posudzujú na tuhosť a na pevnosť. Potrebná tuhosť výstuh vyplýva z podmienky, aby sa stena miestach nevydula. Vnútorne (medziľahlé) priečne výstuhy sa posudzujú na účinky miestneho bremena, alebo na tlakovú silu vyplývajúcu z pokritického pôsobenia steny. Koncové (podperové) výstuhy sa okrem toho posudzujú na ohybový moment v rovine steny, ktorý vzniká od pokritického pôsobenia steny a na ohybový moment vznikajúci od prípadného excentrického uloženia vzhľadom na prierez koncovej výstuhy [6].

Potrebná tuhosť pozdĺžnych výstuh vyplýva z podmienky, aby výstuhy vytvorili tuhé podopretie steny. Vzperná únosnosť pozdĺžnej výstuhy sa posudzuje iba v prípade, ak jej namáhanie je väčšie ako 2/3 namáhania tlačenej pásnice. Prierezy výstuh pozostávajú zo samotných vystužných prvkov a spolupôsobiacej časti steny.

2.1 Namáhanie ohybovým momentom

Vypočítajte návrhový ohybový moment únosnosti prierezu prúta z ocele S 355. V priereze nepôsobí priečna sila. Nosník je zabezpečený proti globálnej strate stability klopením.

Medza klzu a súčiniteľ spoľahlivosti

$$t_f < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}, \gamma_{M1} = 1,2.$$

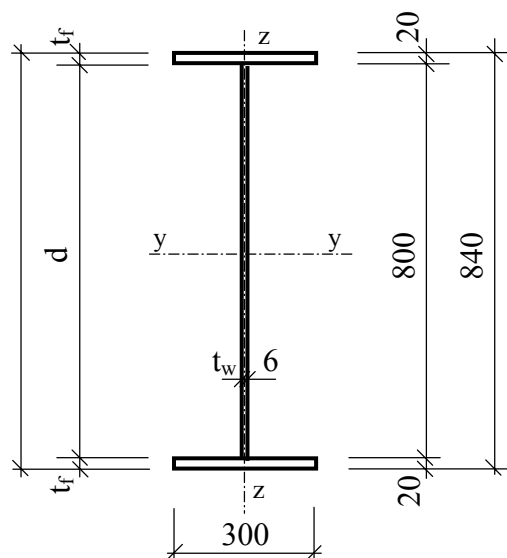
Klasifikácia prierezu

$$\varepsilon_m = (235/f_y)^{0,5} = (235/355)^{0,5} = 0,81,$$

$$\text{tlačená pásnica} : c/t_f = (150-3)/20 = 7,35,$$

$$7,35 > \beta_{01} = 9\varepsilon_m = 9 \cdot 0,81 = 7,3,$$

$$7,35 < \beta_{02} = 10\varepsilon_m = 8,1 \rightarrow \text{trieda 2},$$



$$\text{ohýbaná stena} : d/t_w = 800/6 = 133,3 > \beta_1 = 130\varepsilon_m = 105,7 \rightarrow \text{trieda 4}.$$

Prierez je triedy 4, to znamená, že ide o štíhly prierez, ktorého únosnosť bude v tomto prípade redukovaná v dôsledku vydúvania steny, použijeme pružnostný výpočet.

Štíhlosť steny β_w nesmie prekročiť medznú hodnotu β_{2M} , aby nedošlo k vtlačeniu pásnice do steny. V našom prípade

$$\beta_w = d/t_w = 800/6 = 133 < \beta_{2M} = kE/f_{yf} \sqrt{A_w/A_{fc}} =$$

$$= 210000 \cdot 0,4 / 355 \sqrt{800 \cdot 6 / (300 \cdot 20)} = 264,5,$$

$$k = 0,4 \text{ (pásnica triedy 2)}.$$

Podmienka je splnená.

Charakteristiky efektívneho prierezu vzhľadom na ohyb

Prierezový modul efektívneho prierezu vypočítame dvojako, všeobecným postupom pre ľubovoľný prierez a zjednodušeným postupom pre symetrický I-prierez.

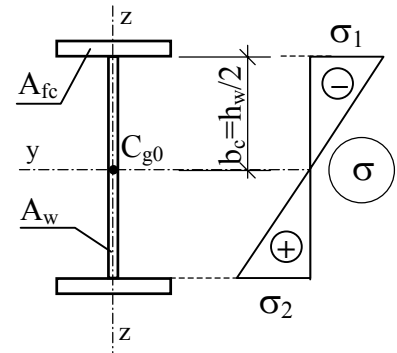
a) Všeobecný postup

Výpočet redukčného súčiniteľa sa musí zvyčajne vykonať v niekoľkých iteračných krokoch, pretože vylúčením časti prierezu (v našom prípade časti steny) z nosnosti nastáva zmena polohy neutrálnej osi a nadväzne na to aj zmena pomeru normálových napätí na okraji steny

(parameter ψ). Výpočet ukončíme, keď pomer veľkostí redukčných súčiniteľov v dvoch po sebe nasledujúcich krokoch bude vo zvolenom intervale.

1. krok :

Vychádza sa z plného (neredukovaného) symetrického prierezu, preto absolútne hodnoty napätia na okrajoch steny sú rovnaké. Pomer napätí $\psi = \sigma_1/\sigma_2 = -1,0$.



Štíhlosti a redukčný súčiniteľ

$$\beta_{l,NM} = \beta_{l,M} = 65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} (1 - \psi) \sqrt{-\psi} = 65 \cdot 0,8136 (1 + 1) \sqrt{1} = 130 \varepsilon_m = 105,7,$$

$$\beta_{r,NM} = \beta_{r,M} = 0,8\beta + 0,2\beta_{l,M} = 0,8 \cdot 133,3 + 0,2 \cdot 105,7 = 127,78,$$

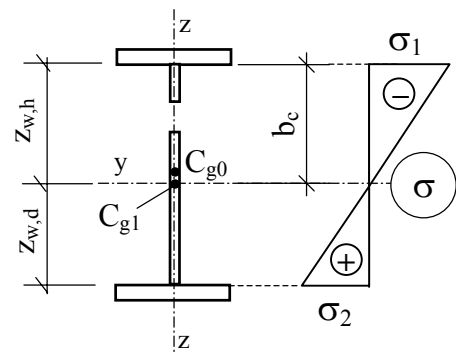
$$\rho_{N,M} = \rho_M = \frac{\beta_{l,M}}{\beta_{r,M}} = \frac{105,7}{127,78} = 0,827 < 1,0.$$

Efektívna výška tlačenej časti steny

$$b_{c,eff} = b_c \rho_{NM} = 400 \cdot 0,827 = 330,9 \text{ mm},$$

$$b_{e1} = 0,4b_{c,eff} = 132,4 \text{ mm},$$

$$b_{e2} = 0,6b_{c,eff} = 198,5 \text{ mm}.$$



Poloha ťažiska efektívneho prierezu (C_{g1})

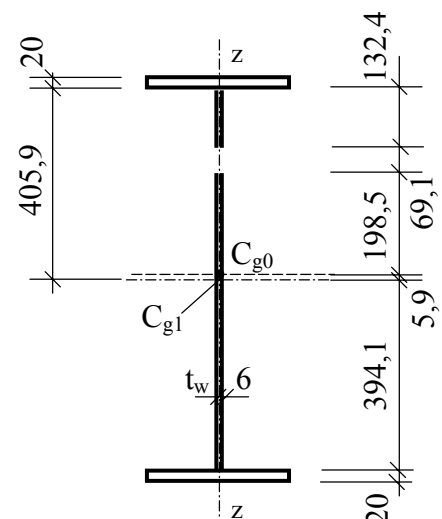
$$z_T = (300 \cdot 20 \cdot 10 + 132,4 \cdot 6 \cdot 86,2 + 198,5 \cdot 6 \cdot 320,75 + 400 \cdot 6 \cdot 620 + 300 \cdot 20 \cdot 830) / (300 \cdot 20 \cdot 2 + 730 \cdot 9,6) = 425,9 \text{ mm}.$$

Vzdialenosť horného a dolného okraja steny od neutrálnej osi

$$z_{w,h} = 405,9 \text{ mm}, \quad z_{w,d} = 394,1 \text{ mm}.$$

2. krok :

Vychádza sa z prierezu s posunutým ťažiskom. Vzhľadom na to, že ide o namáhanie ohybom (bez osovej sily), pomer napätí na okraji steny, a tým aj parameter ψ je rovný pomeru ťažiskových vzdialeností okrajov steny.



Parameter ψ môžeme preto určiť ako pomer vzdialenosti ťažiskovej osi od okrajov steny.

$$\psi = z_{w,d} / z_{w,h} = 394,1 / (-405,9) = -0,97,$$

$$\psi > -1 \rightarrow \beta_I = 40.0,8136 / (0,654 - 0,346.0,97) = 102,2 ,$$

$$\beta_{r,M} = 0,8.133,3 + 0,2.102,2 = 127,08 \rightarrow \rho_{NM} = \frac{102,2}{127,08} = 0,804.$$

Kontrola presnosti

$$0,804 / 0,827 = 0,972.$$

Odchýlka oproti 1,0 je menej ako 3%, čo je postačujúce.

Efektívna výška tlačenej steny

$$b_{c,eff} = b_c \cdot \rho_{NM} = 405,9 \cdot 0,804 = 326,3 \text{ mm} ,$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{c,eff} = 0,4 \cdot 326,3 = 130,5 \text{ mm} ,$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{c,eff} = 0,6 \cdot 326,3 = 195,8 \text{ mm} .$$

Poloha ťažiska efektívneho prierezu

$$z_T = (300.20.10 + 130,5.6.85,25 + 195,8.6.328 + \\ + 394,1.6.622,95 + 300.20.830) / (300.20.2 + 720.4.6) = 426,7 \text{ mm} .$$

Moment zotrvačnosti a prierezové moduly efektívneho prierezu

$$I_y = 2 \frac{1}{12} 300.20^3 + 300.20(426,7 - 10)^2 + 6.130,5 \left(426,7 - 20 - \frac{130,5}{2} \right)^2 + \\ + 6.196,6(196,6 / 2)^2 + 300.20.403,3^2 + 6.393,3(393,3 / 2)^2 \\ + \frac{1}{12} 6.130,5^3 + \frac{1}{12} 196,6^3 \cdot 6 + \frac{1}{12} 6.393,3^3 = 2,247411.10^9 \text{ mm}^4 ,$$

$$W_{eff,c} = \frac{2,247411.10^9}{426,7} = 5,266958.10^6 \text{ mm}^3 ,$$

$$W_{eff,t} = \frac{2,247411.10^9}{413,3} = 5,437723.10^6 \text{ mm}^3 .$$

b) Zjednodušený postup

V prípade monosymetrických prierezov bez pozdĺžnych výstuh, namáhaných ohybom, na výpočet prierezového modulu k tlačnému okraju možno použiť priamo vzťah

$$W_{eff,c} = W_c \left[1 - \frac{I_{wc}}{I_y} (1 - \rho_M) \right],$$

a na výpočet prierezového modulu efektívneho prierezu k ťahanému okraju vzťah

$$W_{eff,t} = W_t = 2I/h,$$

kde I_y je moment zotrvačnosti plného prierezu

$$I_y = 2 \frac{I}{12} 300 \cdot 20^3 + 2 \cdot 300 \cdot 20 \cdot 410^2 + \frac{I}{12} 6 \cdot 800^3 = 2,2736 \cdot 10^9 \text{ mm}^4,$$

I_{wc} je moment zotrvačnosti steny s výškou $2d_c$ (d_c je výška tlačenej časti steny)

$$I_{wc} = \frac{I}{12} t_w (2d_c)^3 = \frac{I}{12} 6 (2 \cdot 400)^3 = 2,56 \cdot 10^8 \text{ mm}^4,$$

W_c je prierezový modul k tlačnému okraju

$$W_c = I_y / (h/2) = 5,4133 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Súčiniteľ vydúvania sa uvažuje pre stenu s výškou $2d_c$. V našom prípade je $\rho_M = 0,827$.

Prierezové moduly efektívneho prierezu

$$W_{eff,c} = 5,4133 \cdot 10^6 \left[1 - \frac{2,56 \cdot 10^8}{2,2736 \cdot 10^9} (1 - 0,827) \right] = 5,30785 \cdot 10^6 \text{ mm}^3,$$

$$W_{eff,t} = 2,2736 \cdot 10^9 / 420 = 5,4133 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Návrhový ohybový moment únosnosti prierezu

- a) všeobecný postup: $M_{c,y,Rd}^a = W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1} = 5,266958 \cdot 10^6 \frac{355}{1,2} = 1558,1 \text{ kNm},$
- b) zjednodušený postup: $M_{c,y,Rd}^b = W_{eff,c} f_y / \gamma_{M1} = 5,30785 \cdot 10^6 \frac{355}{1,2} = 1570,2 \text{ kNm}.$

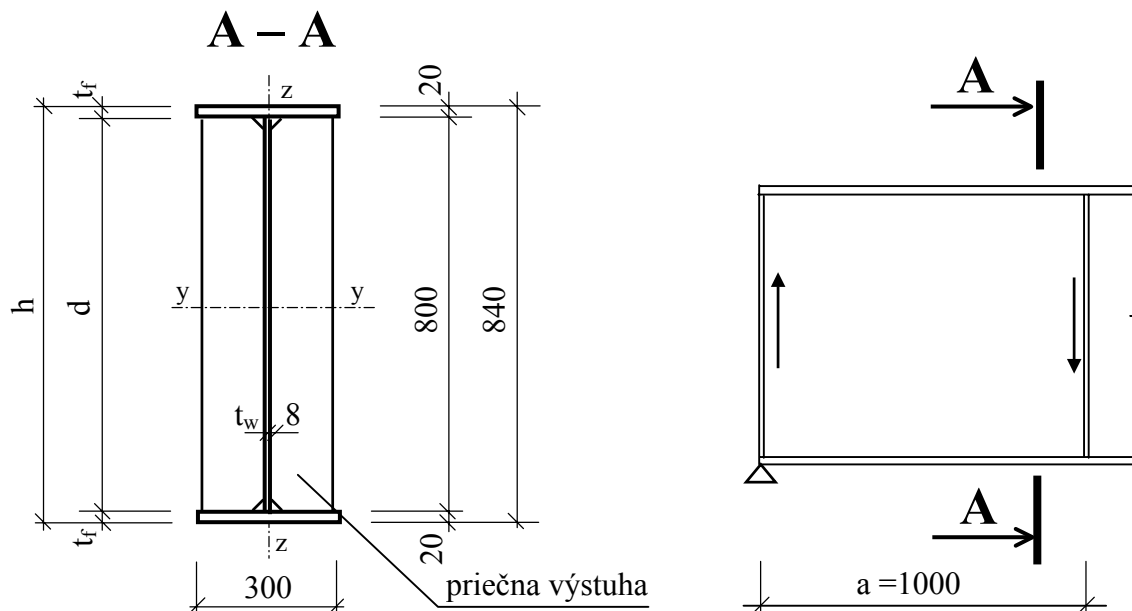
Porovnanie výsledkov

$$\frac{M_{c,y,Rd}^b}{M_{c,y,Rd}^a} = \frac{1570,2}{1558,6} = 1,0074 \rightarrow \text{rozdiel } 0,74\%.$$

Zjednodušený postup dáva síce výsledok na strane nebezpečnej, ale odlišnosť veľkostí ohybových momentov únosnosti je bezvýznamná.

2.2 Namáhanie priečnou silou

Určte šmykovú únosnosť poľa steny nosníka z ocele S 235. Pole steny nie je namáhané normálovou silou ($N_{Sd} = 0$) a ohybový moment považujte za zanedbateľný ($M_{Sd} \approx 0$).



Pri výpočte šmykovej sily únosnosti je potrebné určiť štíhlosť steny β_w a pomer strán polí α , aby bolo možné zistiť, či ide o kompaktnú, alebo štíhlu stenu vzhľadom na šmykové namáhanie. V prípade, že ide o štíhlu stenu, musí sa návrhová šmyková sila únosnosti (vypočítaná pre kompaktnú stenu) zmenšiť redukčným súčiniteľom ρ_V .

Štíhlosť steny sa určuje ako menšia z dvoch hodnôt

$$d / t_w = 800 / 8 = 100 ; \quad a / t_w = 1000 / 8 = 125,$$

$$\beta_w = \min(100; 125) = 100 .$$

Pomer strán polí sa určuje ako maximálna z hodnôt dvoch pomerov

$$a / d = 1000 / 800 = 1,25 ; \quad d / a = 800 / 1000 = 0,8$$

$$\alpha = \max(1,25; 0,8) = 1,25 .$$

Medzná štíhlosť kompaktnej steny

$$\beta_{l,V} = 100 (0,7 + 0,3 / \alpha^2) \sqrt{235 / f_y} = 100 (0,7 + 0,3 / 1,25^2) 1 = 89,2,$$

$$\beta_w = 100 > \beta_{l,V} = 89,2.$$

Štíhlosť steny je väčšia ako medzná štíhlosť kompaktného prierezu $\beta_{l,V}$, to znamená, že stenu pri namáhaní šmykom musíme považovať za štíhlu.

Redukčný súčiniteľ ρ_V , resp. návrhovú šmykovú silu únosnosti určíme postupne jednoduchou pokritickou metódou a úplnou pokritickou metódou.

Výpočet návrhovej šmykovej sily únosnosti steny

a) Jednoduchá pokritická metóda

Metóda sa môže použiť nielen pre vystužené steny, ale aj pre steny bez medziľahlých priečných výstuh, ktoré však musia mať minimálne podperové priečne výstuhy.

Plastická šmyková sila únosnosti

$$V_{b,pl,Rd} = A_w \tau_w / \gamma_{M1} = 800.8 \frac{235}{\sqrt{3}} \frac{1}{1,1} = 789,4 \text{ kN} .$$

Redukovaná štíhlosť

$$\beta_{r,V} = 0,8\beta_w + 0,2\beta_{l,V} = 0,8.100 + 0,2.89,2 = 97,84 .$$

Redukčný súčiniteľ

$$\rho_{V,a} = \beta_{l,V} / \beta_{r,V} = 89,2 / 97,84 = 0,911 .$$

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{ba,Rd} = V_{b,pl,Rd} \rho_{V,a} = 789,4.0,911 = 719,7 \text{ kN} .$$

b) Úplná pokritická metóda

Metóda sa môže použiť len pre vystužené steny, ktoré nie sú priamo namáhané pohyblivým zaťažením, s pomerom strán polí $1 \leq \alpha \leq 3$. V našom prípade pomer $\alpha = 1,25$ má prípustnú veľkosť a nosník nie je namáhaný pohyblivým zaťažením.

Redukčný súčiniteľ $\rho_{V,b}$ je súčtom redukčného súčiniteľa $\rho_{V,a}$ určeného bez uváženia pásnic a súčiniteľa $\rho_{V,f}$, ktorým sa zohľadňuje priaznivý vplyv pásnic na únosnosť.

Súčiniteľ $\rho_{V,f}$ sa vypočíta zo vzťahu

$$\rho_{V,f} = \varphi_f \left(\sqrt{\frac{M_{N,fc}}{M_{pl,w}}} + \sqrt{\frac{M_{N,ft}}{M_{pl,w}}} \right),$$

kde $M_{N,fc}$ ($M_{N,ft}$) je plastický ohybový moment únosnosti tlačenej (ťahanej) pásnice, v prípade jednoduchého šmykového namáhania ($N_{Sd} = 0$, $M_{Sd} = 0$) sú oba momenty rovnaké

$$M_{N,fc} = M_{N,ft} = \frac{1}{4} b_f t_f^2 f_{yf} = \frac{1}{4} 300 \cdot 20^2 \cdot 235 = 7,05 \text{ kNm} ,$$

$M_{pl,w}$ je plastický ohybový moment únosnosti steny

$$M_{pl,w} = \frac{1}{4} t_w d^2 f_{yw} = \frac{1}{4} 8.800^2 \cdot 235 = 300,8 \text{ kNm} ,$$

súčiniteľ $\varphi_f = f(\alpha)$ sa určí z prílohy J STN 73 1401 pre oceľ S 235, štíhlosť $\beta = 100$ a pomer strán poľa $\alpha = 1,25 \rightarrow \varphi_f = 0,2895$.

Redukčný súčiniteľ

$$\rho_{V,f} = 0,2895 [(7,05/300,8)^{0,5} + (7,05/300,8)^{0,5}] = 0,088$$

$$\rho_{V,b} = \rho_{V,a} + \rho_{V,f} = 0,911 + 0,088 = 0,9996.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti pre prípad $N_{Sd} = 0$, $M_{Sd} = 0$

$$V_{bb,Rd} = V_{b0,Rd} = V_{pl,Rd} \rho_{V,b} = 789,4 \cdot 0,9996 = 789 \text{ kN} .$$

Porovnanie únosnosti podľa jednotlivých metód

$$(V_{bb,Rd}/V_{ba,Rd} - 1)100 = (789)/719,7 - 1)100 = 9,6\% .$$

S uvážením vplyvu pásnic sa návrhová šmyková sila únosnosti vystuženého poľa zvýšila o 9,6%.

2.3 Namáhanie ohybovým momentom a pričnou silou

Posúďte nosník zo zváraného I-priezezu z ocele S 235. Dĺžka nosníka je 12,0 m. Stena nosníka je vystužená priečnymi výstuhami vo vzdialenostiach 2,0 m. V miestach priečných výstuh je nosník zaťažený osamelými bremenami. Tlačená pásnica je podporená v horizontálnej rovine tak, že ku globálnej strate stability (klopeniu) nosníka nedôjde.

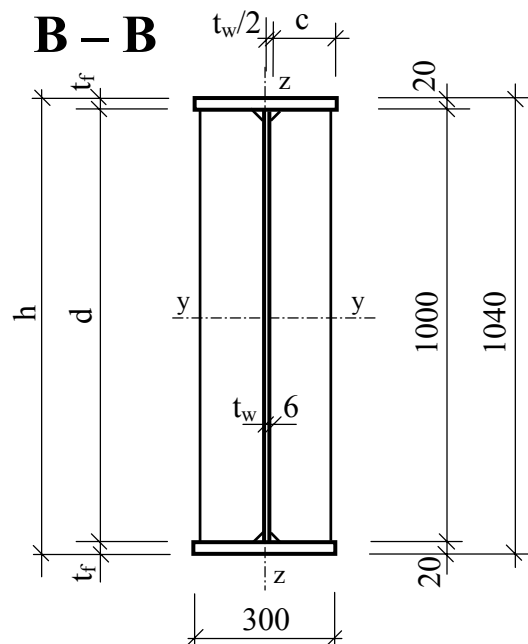
Klasifikácia prierezu

tlačená pásnica: $c/t_f = \frac{150-3}{20} = 7,35 < \beta_{01} = 9$
 → trieda 1,

ohýbaná stena: $d/t_w = \frac{1000}{6} = 166,7 > \beta_1 = 130$
 → trieda 4.

Ak sa mení namáhanie prúta po dĺžke posudzovaného poľa, uvažuje sa s hodnotami, ktoré prislúchajú k tzv. charakteristickému prierezu, za ktorý sa považuje stredný prierez najviac namáhaného úseku poľa s dĺžkou d , ak $a > d$, t. j. $a_m = d/2$

$$a = 2000 \text{ mm} > d = 1000 \text{ mm} \rightarrow a_m = d/2 = 500 \text{ mm} .$$



Vnútorne sily v charakteristických prierezoch (pribeh vnútorných síl je na ďalšej strane)

Prierez 1	$M_{Sd} = 562,5 \text{ kNm}$,	$V_{Sd} = 375 \text{ kN}$.
Prierez 2	$M_{Sd} = 1087,5 \text{ kNm}$,	$V_{Sd} = 225 \text{ kN}$.
Prierez 3	$M_{Sd} = 1312,5 \text{ kNm}$,	$V_{Sd} = 75 \text{ kN}$.

Efektívny prierez vzhľadom na ohyb

Prierezové charakteristiky určíme zjednodušeným postupom podľa STN 73 1401 (monosymetrický prierez bez pozdĺžnych výstuh).

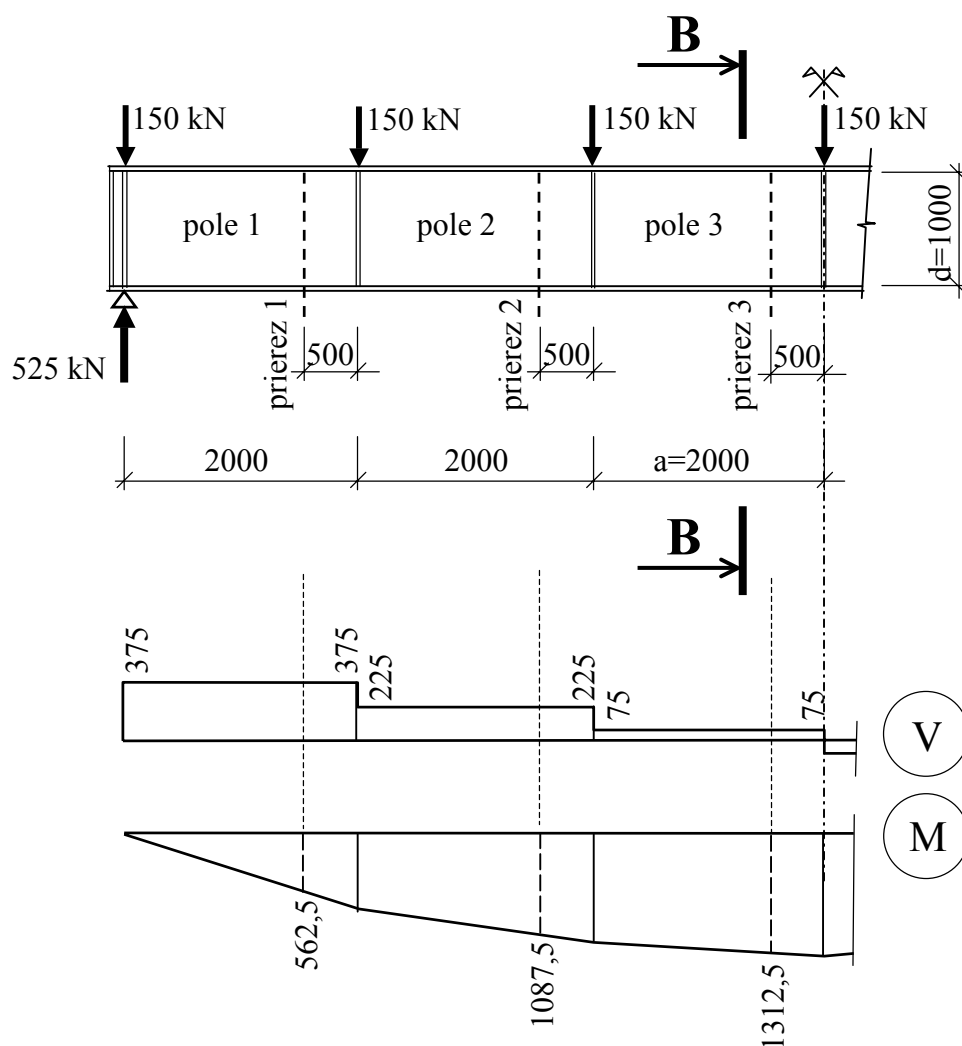
Moment zotrvačnosti plného prierezu

$$I_y = 2 \frac{I}{12} 300 \cdot 20^3 + 2 \cdot 300 \cdot 20 \cdot 510^2 + \frac{I}{12} 6 \cdot 1000^3 = 3,621 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 .$$

Moment zotrvačnosti steny s výškou $2d_c$

$$d_c = d/2 = 1000/2 = 500 \text{ mm},$$

$$I_{wc} = \frac{1}{12} t_w (2d_c)^3 = \frac{1}{12} 6 (2 \cdot 500)^3 = 5,0 \cdot 10^8 \text{ mm}^4.$$



Prierezový modul plného prierezu k tlačnému okraju

$$W_c = I_y / (h/2) = 3,621 \cdot 10^6 / (1040/2) = 6,96346 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Súčiniteľ vydúvania sa uvažuje pre stenu s výškou $2d_c$

$$\beta_w = 166,7, \quad \beta_{r,M} = 0,8\beta_w + 0,2\beta_{l,M} = 0,8 \cdot 166,7 + 0,2 \cdot 130 = 159,3,$$

$$\beta_{l,M} = 130,$$

$$\rho_M = \beta_{l,M} / \beta_{r,M} = 130 / 159,3 = 0,8158.$$

Prierezový modul efektívneho prierezu k tlačnému okraju

$$\begin{aligned} W_{eff,c} &= W_c \left[1 - \frac{I_{wc}}{I_y} (1 - \rho_M) \right] = \\ &= 6,96346 \cdot 10^6 \left[1 - \frac{5,0 \cdot 10^8}{3,621 \cdot 10^9} (1 - 0,8158) \right] = 6,78634 \cdot 10^6 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Prierezový modul efektívneho prierezu k ťahanému okraju

$$W_{eff,t} = W_t = 2I_y / h = 3,621 \cdot 10^9 / 520 = 6,96346 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti vystuženého poľa

Štíhlosť steny v šmyku

$$\beta_w = d / t_w = \frac{1000}{6} = 166,7 \quad \text{alebo} \quad \beta_w = a / t_w = \frac{2000}{6} = 333,3.$$

Pomer strán poľa

$$\alpha = a / d = \frac{2000}{1000} = 2 \quad \text{alebo} \quad \alpha = d / a = \frac{1000}{2000} = 0,5,$$

$$\beta_w = \min(166,7; 333,3) = 166,7,$$

$$\alpha = \max(2,0; 0,5) = 2.$$

Medzná štíhlosť kompaktnej steny v šmyku

$$\beta_{1,V} = 100(0,7 + 0,3/\alpha^2) \varepsilon_m = 100(0,7 + 0,3/2^2) 1 = 77,5 < \beta_w = 166,7 \quad \rightarrow \text{štíhla stena.}$$

a) Jednoduchá pokritická metóda

$$\beta_{r,V} = 0,8 \cdot 166,7 + 0,2 \cdot 77,5 = 148,9,$$

$$\rho_{V,a} = \frac{77,5}{148,9} = 0,52.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{ba,Rd} = V_{pl,Rd} \rho_{V,a} = 6 \cdot 1000 \frac{235}{1,1\sqrt{3}} 0,52 = 384,8 \text{ kN}.$$

Nosník posúdime na interakciu ohybu a šmyku jednoduchou pokritickou metódou. Pokiaľ návrhová šmyková sila V_{Sd} je menšia ako šmyková sila únosnosti určená jednoduchou pokritickou metódou, samozrejme vyhovie aj pri úplnej pokritickej metóde. V našom prípade $V_{ba,Rd} = 384 \text{ kN} > V_{Sd,max} = 360 \text{ kN}$, takže jednoduchú pokritickú metódu môžeme uplatniť pri posúdení každého poľa steny. Aj keď teda návrhová šmykovú silu únosnosti podľa úplnej pokritickej metódy nie je potrebné určovať, uvádzame jej výpočet na rozšírenie príkladu 2.2.

b) Úplná pokritická metóda

Návrhová šmykovú silu únosnosti $V_{bb,Rd}$ stanovíme napr. pre stredné pole nosníka v reze 3, v ktorom postupne vypočítame napätie (pomocou efektívnych prierezových modulov), sily a momenty prislúchajúce pásniciam a stene, súčiniteľ φ_f a redukčný súčiniteľ $\rho_{V,f}$.

Pole 3 – prierez 3

$$M_{Sd} = 1312,5 \text{ kNm}, \quad V_{Sd} = 75 \text{ kN},$$

$$\sigma_h = \frac{1312,5 \cdot 10^6}{6,78634 \cdot 10^6} = 193,4 \text{ MPa},$$

$$\sigma_d = \frac{1312,5 \cdot 10^6}{6,96346 \cdot 10^6} = 188,5 \text{ MPa},$$

$$N_{f,Sd,c} = 193,4 \cdot 300 \cdot 20 = 1160 \text{ kN}, \quad N_{f,Sd,t} = 188,5 \cdot 300 \cdot 20 = 1131 \text{ kN},$$

$$M_{N,fc} = \frac{1}{4} b t_f^2 f_{yf} \left[1 - \left(\frac{N_{fc,Sd}}{b t_f f_{yf} / \gamma_{M0}} \right)^2 \right] = \frac{1}{4} 300 \cdot 20^2 \cdot 235 \left[1 - \left(\frac{1160 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{300 \cdot 20 \cdot 235} \right)^2 \right] = 1,276 \text{ kNm},$$

$$M_{N,ft} = \frac{1}{4} b t_f^2 f_{yf} \left[1 - \left(\frac{N_{ft,Sd}}{b t_f f_{yf} / \gamma_{M0}} \right)^2 \right] = \frac{1}{4} 300 \cdot 20^2 \cdot 235 \left[1 - \left(\frac{1131 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{300 \cdot 20 \cdot 235} \right)^2 \right] = 1,561 \text{ kNm},$$

$$M_{pl,w} = \frac{1}{4} t_w d^2 f_{yw} = \frac{1}{4} 6 \cdot 1000^2 \cdot 235 = 352,5 \text{ kNm}.$$

Súčiniteľ φ_f určíme z prílohy J STN 73 1401 pre oceľ S 235, pomer strán $\alpha = 2$ a štíhlosť $\beta = 166,7$ lineárnou interpoláciou

$$\varphi_f = 0,37.$$

Redukčný súčiniteľ

$$\rho_{V,f} = \varphi_f \left(\sqrt{\frac{M_{N,fc}}{M_{pl,w}}} + \sqrt{\frac{M_{N,ft}}{M_{pl,w}}} \right) = 0,37 \left(\sqrt{\frac{1,276}{352,5}} + \sqrt{\frac{1,561}{352,5}} \right) = 0,046,$$

$$\rho_{V,b} = 0,52 + 0,046 = 0,566.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti vystuženého poľa

$$V_{bb,Rd} = 1000.6 \frac{235.0,566}{1,1\sqrt{3}} = 418,9 \text{ kN}.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti vystuženého poľa určená úplnou pokritickou metódou je (418,9 kN) o 10 % väčšia ako návrhová šmyková sila únosnosti vypočítaná pomocou jednoduchej pokritickej metódy (384,8 kN).

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} = 75 \text{ kN} < 0,5V_{ba,Rd} = 0,5.384,8 = 192,4 \text{ kN} \rightarrow \text{neuvažuje sa s vplyvom priecnej sily.}$$

Návrhový ohybový moment únosnosti efektívneho prierezu (pre $N_{Sd} = 0$)

$$M_{c,Rd} = W_{eff,c} f_y / \gamma_{M1} = 6,78634.10^6.235/1,1 = 1449,8 \text{ kNm}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} = 1312,5 \text{ kNm} < M_{c,Rd} = 1449,8 \text{ kNm}.$$

Nosník vyhovuje.

Pole 2 – prierez 2

$$M_{Sd} = 1087,5 \text{ kNm}, \quad V_{Sd} = 225 \text{ kN},$$

$$V_{Sd} = 225 \text{ kN} > 0,5V_{ba,Rd} = 0,5.384,8 = 192,4 \text{ kN} \rightarrow \text{uvažuje sa s vplyvom priecnej sily.}$$

$$V_{Sd} = 225 \text{ kN} < V_{ba,Rd} = 384,8 \text{ kN} \rightarrow \text{použijeme jednoduchú pokritickú metódu.}$$

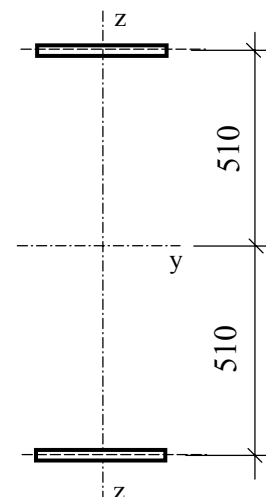
Moment zotrvačnosti a prierezový modul pásnic

$$I_{y,f} = \frac{I}{12} 2.300.20^3 + 300.20.2.510^2 = 3,1216.10^9 \text{ mm}^4,$$

$$W_{y,f} = \frac{3,1216.10^9}{520} = 6,003076.10^6 \text{ mm}^3.$$

Moment únosnosti pásnic

$$M_{fN,Rd} = 6,0030.10^6 \frac{235}{1,1} = 1282,5 \text{ kNm}.$$



Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} < M_{fN,Rd} + (M_{cN,Rd} - M_{fN,Rd}) [1 - (2V_{Sd} / V_{ba,Rd} - 1)^2],$$

$$M_{Sd} = 1087,5 \text{ kNm} < 1282,5 + (1449,8 - 1282,5) \left[1 - \left(\frac{2.225}{384,8} - 1 \right)^2 \right] =$$

$$= 1445 \text{ kNm}.$$

Nosník vyhovuje.

Pole 1 – prierez 1

$$M_{Sd} = 562,5 \text{ kNm}, \quad V_{Sd} = 375 \text{ kN},$$

$$0,5V_{ba,Rd} = 192,4 \text{ kN} < V_{Sd} = 375 \text{ kN} < V_{ba,Rd} = 384,8 \text{ kN}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} < M_{fN,Rd} + (M_{cN,Rd} - M_{fN,Rd}) [1 - (2V_{Sd} / V_{ba,Rd} - 1)^2],$$

$$M_{Sd} = 860 \text{ kNm} < 1282,5 + (1449,8 - 1282,5) \left[1 - \left(\frac{2.375}{384,8} - 1 \right)^2 \right]$$

$$= 1299,1 \text{ kNm}.$$

Nosník vyhovuje.

Priečne výstuhy steny

Posúdenie tuhosti vnútornej (medziláhlej) priečnej výstuhy

Spolupôsobiaci časť steny a moment zotrvačnosti výstuhy

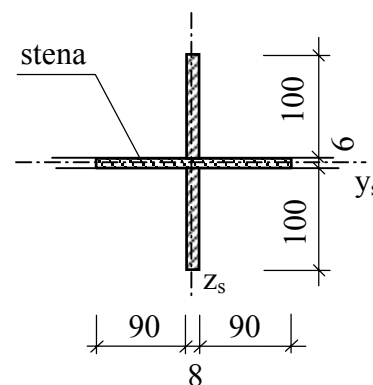
$$s_l = 15 t_w (235 / f_y)^{0,5} = 15 \cdot 6 \cdot 1 = 90 \text{ mm},$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{1000}{6} = 166,7 > 130 \rightarrow \kappa_s = 3,$$

$$\frac{a}{d} = \frac{2000}{1000} = 2 > 1 \rightarrow \gamma_s = 6,$$

$$I_s = \frac{1}{12} 8.206^3 + 2 \frac{1}{12} 90.6^3 = 5,83.10^6 \text{ mm}^4,$$

$$I_s = 5,83.10^6 \text{ mm}^4 > 0,1 d t_w^3 \kappa_s \gamma_s = 0,1 \cdot 1000 \cdot 6^3 \cdot 3 \cdot 6 = 0,39.10^6 \text{ mm}^4.$$



Výstuha vyhovuje.

Posúdenie vzpernej pevnosti 1. vnútornej (medzil'ahlej) priečnej výstuhy

Klasifikácia prierezu výstuhy

$$\beta_{02} = 10 < c / t_s = 100 / 8 = 12,5 < 15 \quad \rightarrow \text{trieda 3,}$$

$$c / t_w = 90 / 6 = 15 = 15 \quad \rightarrow \text{trieda 3.}$$

Prierez výstuhy je triedy 3.

Minimálna šmyková sila únosnosti poľa steny

$$\rho_{V,m} = \frac{\beta_{1,V}}{\beta_w} = \frac{77,5}{166,7} = 0,465,$$

$$V_{bm,Rd} = V_{pl,Rd} \rho_{V,m} = 6.1000 \frac{235}{1,1\sqrt{3}} 0,465 = 344,1 \text{ kN}.$$

Tlaková sila (z pokritického pôsobenia)

$$N_{Sd} = V_{Sd} - V_{bm,Rd} = 375 - 344,1 = 30,9 \text{ kN} < F_{Sd} = 150 \text{ kN}$$

→ uvažujeme miestnu silu F_{Sd} .

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

Pozn. : Posúdenie vzpernej únosnosti tlačných prútov je vysvetlené v 3. časti.

$$i_s = \sqrt{\frac{I_s}{A}} = \sqrt{\frac{5,83 \cdot 10^6}{206,8 + 2 \cdot 90,6}} = 46,2 \text{ mm},$$

$$L_{s,cr} = 0,75d = 0,75 \cdot 1000 = 750 \text{ mm},$$

$$\lambda = \frac{750}{46,6} = 16,2 \rightarrow \bar{\lambda} = \frac{16,2}{93,9} = 0,17 < 0,2 \rightarrow \chi = 1,0.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$F_{Sd} = 150 \text{ kN} \leq A \frac{\chi f_y}{\gamma_{M1}} = 2140 \frac{235}{1,1} = 457,2 \text{ kN}.$$

1. vnútorná priečna výstuha vyhovuje.

Posúdenie tuhosti podperovej priečnej výstuhy

$$I_s = (10 \cdot 280^3 + 10 \cdot 276^3 + 90 \cdot 6^3 \cdot 2) / 12 = 35,817 \cdot 10^6 > 0,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Výstuha vyhovuje.

Pozn.: Overená bola tuhosť priečnej výstuhy pri vybočení kolmo na rovinu steny. Pri splnení podmienky stena v mieste priečnej výstuhy sa nevyduje.

Predpokladom pokritického pôsobenia steny je dostatočná tuhosť podperových výstuh v rovine steny. STN 73 1401 neuvádza postup na overenie takejto tuhosti, ale vyžaduje posúdenie pevnosti podperovej priečnej výstuhy s uvažovaním vplyvu pokritického pôsobenia steny.

Posúdenie únosnosti koncovej (podperovej) priečnej výstuhy

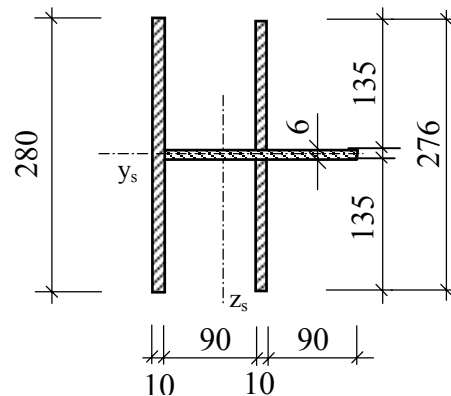
Klasifikácia prierezu výstuhy

$$\beta_{02} = 10 < c / t_s = (140 - 3) / 10 = 13,7 < \beta_1 = 15 \rightarrow \text{trieda 3,}$$

$$\beta_{02} = 10 < d / t_w = 90 / 6 = 15 = \beta_1 = 15 \rightarrow \text{trieda 3.}$$

Miestna priečna sila (podperová reakcia)

$$F_{Sd} = 525 \text{ kN}.$$



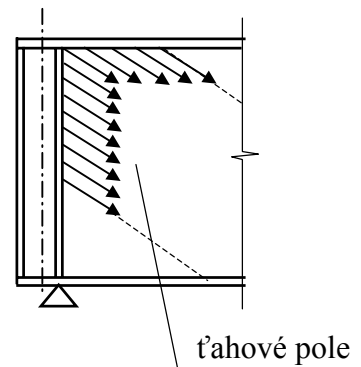
Ohybový moment v rovine steny pri pokritickom pôsobení steny vzniká v dôsledku pôsobenia ťahového poľa v stene len z jednej strany výstuhy.

Ohybový moment (od pokritického pôsobenia)

$$\tau = \frac{V_{Sd}}{A_v} = \frac{375 \cdot 10^3}{6 \cdot 1000} = 62,5 \text{ MPa},$$

$$\tau_m = \frac{f_y \rho_{V,m}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} = \frac{235 \cdot 0,465}{1,1 \sqrt{3}} = 57,35 \text{ MPa},$$

$$M_{Sd} = \frac{A_w (\tau - \tau_m) d}{10(\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha)} = \frac{6 \cdot 1000 (62,5 - 57,35) 1000}{10(\sqrt{1 + 2^2} - 2)} = 13,1 \text{ kNm}.$$



Podperová výstuha sa vo všeobecnosti vyšetruje na interakciu vzperného tlaku a ohybu. Ak je prierez výstuhy triedy 3 (čo zvyčajne je splnené), posudzuje sa napätie v najviac namáhanom vlákne prierezu. S klopením sa neuvažuje.

Prierezové charakteristiky výstuhy

$$A = 280 \cdot 10 + 276 \cdot 10 + 90 \cdot 6 \cdot 2 = 6\,640 \text{ mm}^2,$$

$$y_{T,s} = (280 \cdot 10 \cdot 5 + 276 \cdot 10 \cdot 105 + 90 \cdot 6 \cdot 55 + 90 \cdot 6 \cdot 155) / 6\,640 = 62,8 \text{ mm},$$

$$I_{z,s} = 280 \cdot 10 \cdot 58^2 + 276 \cdot 10 (105 - 62,8)^2 + 2 \cdot 90^3 \cdot 6 / 12 + 90 \cdot 6 (55 - 62,8)^2 + 90 \cdot 6 (155 - 62,8)^2 = 19,6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 .$$

Moment z excentricity podperovej reakcie

$$e = 105 - 62,8 = 42,2 \text{ mm} ,$$

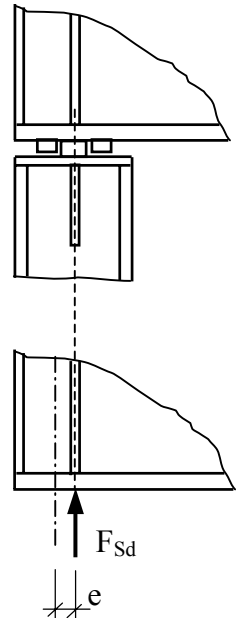
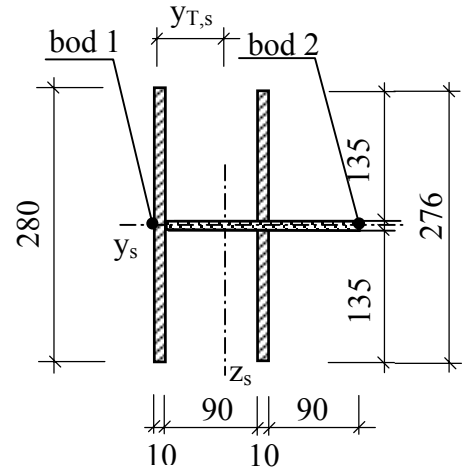
$$M_{exc} = F_{Sd} e = 525 \cdot 0,042 = 22 \text{ kNm} .$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$i_s = \sqrt{\frac{I_s}{A}} = \sqrt{\frac{36,589 \cdot 10^6}{6640}} = 74,2 ,$$

$$L_{s,cr} = 0,75d = 0,75 \cdot 1000 = 750 ,$$

$$\lambda = \frac{750}{74,2} = 10,1 \rightarrow \bar{\lambda} = \frac{10,2}{93,9} = 0,108 < 0,2 \rightarrow \chi = 1,0 .$$



Podmienka spoľahlivosti (vyjadrená v napätiach)

Bod 1

$$\begin{aligned} \sigma_{(1)} &= F_{Sd} / A_s + (M_{Sd} - M_{exc}) y_{(1)} / I_{z,s} = \\ &= 525 \cdot 10^3 / 6640 + (13,1 - 22) 10^6 \cdot 63 / (19,6 \cdot 10^6) = \\ &= 50,5 \text{ MPa} < 235 / 1,1 = 213,6 \text{ MPa} . \end{aligned}$$

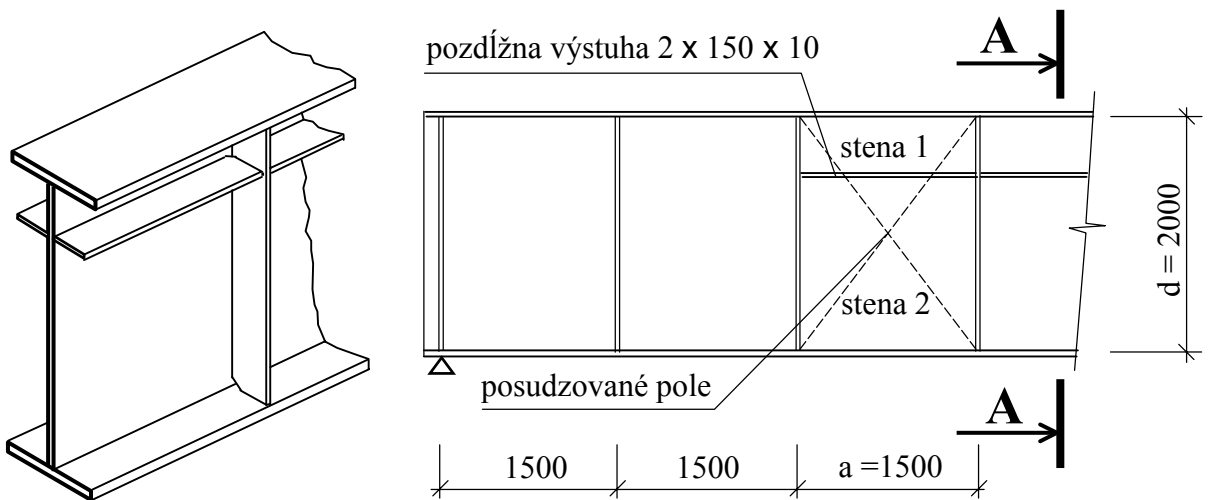
Bod 2

$$\begin{aligned} \sigma_{(2)} &= F_{Sd} / A_s + (M_{Sd} - M_{exc}) y_{(2)} / I_{z,s} = \\ &= 525 \cdot 10^3 / 6640 - (13,1 - 22) 10^6 \cdot (200 - 63) / (19,6 \cdot 10^6) = \\ &= 141,2 \text{ MPa} < 235 / 1,1 = 213,6 \text{ MPa} . \end{aligned}$$

Podperová priečna výstuha vyhovuje z hľadiska tuhosti a únosnosti.

2.4 Namáhanie ohybovým momentom a priečnou silou

Posúďte pole steny nosníka z ocele S 235, ktoré je namáhané návrhovým ohybovým momentom $M_{Sd} = 4400$ kNm a návrhovou priečnou silou $V_{Sd} = 1100$ kN. Stena je vystužená priečnymi a pozdĺžnymi výstuhami. Nosník je zabezpečený proti klopeniu.



Klasifikácia prierezu (bez pozdĺžnej výstuhy)

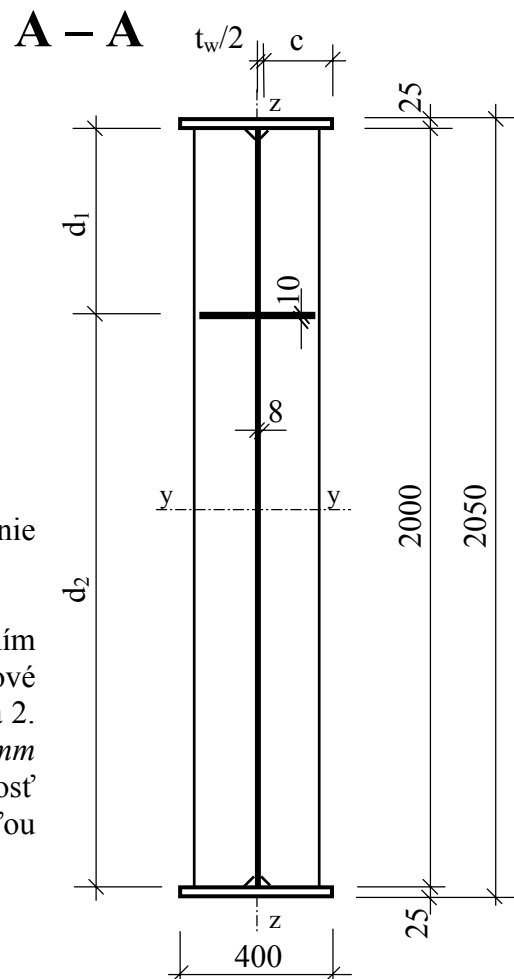
$$\varepsilon_m = (235/f_y)^{0.5} = 1,0,$$

tlačená pásnica : $c/t_f = (200-4)/25 = 7,8 < \beta_{01} = 9\varepsilon_m$
→ trieda 1,

ohýbaná stena : $d/t_w = 2000/8 = 250 > \beta_1 = 130\varepsilon_m$
→ trieda 4.

Prierez bez pozdĺžnej výstuhy je triedy 4, stena teda nie je plne účinná.

Únosnosť steny sa dá zvýšiť vhodným umiestnením tuhej pozdĺžnej výstuhy, čím sa vytvoria dve čiastkové polia steny – v obrázku označené ako stena 1 a stena 2. Pozdĺžnu výstuhu zvolíme vo vzdialenosti $d_1 = 500$ mm od tlačeneho okraja steny a porovnáme štíhlosť čiastkových polí stien s medznou štíhlosťou kompaktného prierezu.



Napätie na okrajoch čiastkových stien

Predpokladáme, že prenos normálových napätí do pozdĺžnych výstuhy nie je zabezpečený (výstuha nie je priebežná), preto ich pri výpočte prierezových charakteristík neuvažujeme.

$$I_y = 2 \frac{I}{12} 400.25^3 + 2.400.25.1012,5^2 + \frac{I}{12} 8.2000^3 = 2,5837.10^{10} \text{ mm}^4,$$

$$W_y^h = W_y^d = \frac{2,5837.10^{10}}{1025} = 2,5206.10^7 \text{ mm}^3,$$

$$\sigma_{(1)} = -\sigma_{(2)} = \frac{4400.10^6}{2,5206.10^7} = 175 \text{ MPa} < 213,6 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{(3)} = -\sigma_{(4)} = 4400.10^6.1000 / 2,5837.10^{10} = 171 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{(5)} = 500\sigma_{(3)} / 100 = 85,5 \text{ MPa}.$$

Prierez pôsobí v pružnej oblasti.

Posudzované pole - stena 1

$$\psi = \sigma_{(5)} / \sigma_{(3)} = -85,5 / (-171) = 0,5 > -1,$$

$$\beta_{I,NM} = 40(235/235)^{0,5} / (0,654 + 0,346.0,5) = 48,4,$$

$$\beta_w = d_1/t_w = 500/8 = 62,5 > 48,4$$

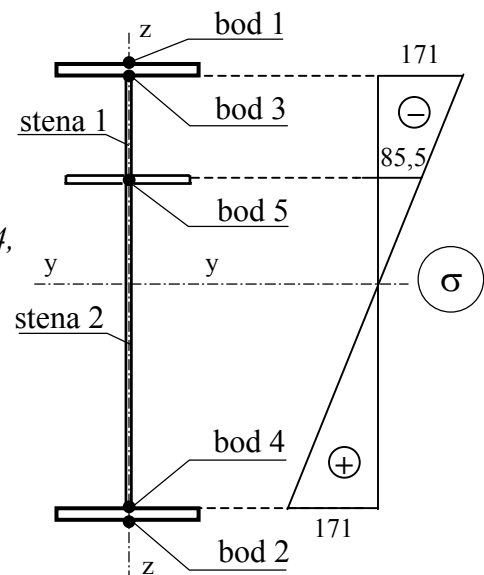
→ stena nie je kompaktná, je štíhla.

Posudzované pole - stena 2

$$\psi = \sigma_{(4)} / \sigma_{(5)} = 171 / (-85,5) = -2,0 < -1,$$

$$\beta_{I,NM} = 65(235/235)^{0,5} (1 + 2)(2)^{0,5} = 275,7,$$

$$\beta_w = (d-d_1)/t_w = 1500/8 = 187,5 < \beta_{I,NM} = 275,7 \quad \rightarrow \text{stena je kompaktná.}$$



Vidíme, že pozdĺžna výstuha nebráni vydutiu steny 1. Štíhlosť steny 2 tvorí 68 % medznej štíhlosti. Môžeme preto zmenšiť výšku steny 1 napr. na $d_1=360 \text{ mm}$ a opäť overíme štíhlosti.

Napätie v stene v mieste pozdĺžnej výstuhy

$$\sigma_{(5)} = 109 \text{ MPa}.$$

Stena 1

$$\psi = \sigma_{(5)} / \sigma_{(3)} = -109 / (-171) = 0,54 > -1,$$

$$\beta_{I,NM} = 40(235/235)^{0,5} / (0,654 + 0,346.0,54) = 47,5$$

$$\beta_w = 360/8 = 45,0 < \beta_{I,NM} = 47,5 \quad \rightarrow \text{stena 1 je kompaktná.}$$

Stena 2

$$\psi = \sigma_{(4)}/\sigma_{(5)} = 171/(-109) = -1,56 < -1,$$

$$\beta_{l,NM} = 65(235/235)^{0,5}(1 + 1,56)(1,56)^{0,5} = 207,8,$$

$$\beta_w = 1\,640/8 = 205 < \beta_{l,NM} = 207,8 \rightarrow \text{stena 2 je kompaktná.}$$

Poloha pozdĺžnej výstuhy je vyhovujúca.

Návrhová šmyková sila únosnosti vystuženého poľa

Stena 1

$$d_1/t_w = 360/8 = 45 \text{ alebo } a/t_w = 1500/8 = 187,5,$$

$$\beta_w = \min(45; 187,5) = 45,$$

$$a/d_1 = 1\,500/360 = 4,2 \text{ alebo } d_1/a = 360/1\,500 = 0,24,$$

$$\alpha = \max(4,2; 0,24) = 4,2,$$

$$\beta_{l,V} = 100(0,7 + 0,3/\alpha^2) \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{4,2^2} \right) I = 71,7,$$

$$\beta_w = 45 < 71,7 \rightarrow \text{stena 1 je kompaktná vzhľadom na šmyk } (\rho_V = 1,0).$$

Šmyková sila únosnosti steny 1

$$V_{pl,Rd,1} = 360,8 \frac{235}{1,1\sqrt{3}} = 355 \text{ kN}.$$

Stena 2

$$d_2/t_w = 1\,640/8 = 205 \text{ alebo } a/t_w = 1\,500/8 = 187,5,$$

$$\beta_w = \min(205; 187,5) = 187,5,$$

$$a/d_2 = 1\,500/1\,640 = 0,914; \quad d_2/a = 1\,640/1\,500 = 1,1,$$

$$\alpha = \max(0,914; 1,1) = 1,1,$$

$$\beta_{l,V} = 100(0,7 + 0,3/\alpha^2) \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{1,1^2} \right) I = 94,8,$$

$$\beta_w = 205 > 94,8 \rightarrow \text{stena 2 je štíhla vzhľadom na šmyk.}$$

Šmykovú únosnosť steny 2 stanovíme jednoduchou pokritickou metódou

$$\beta_{l,V} = 94,8, \quad \beta_{r,V} = 0,8 \cdot 205 + 0,2 \cdot 94,8 = 183,$$

$$\rho_{V,a} = \frac{94,8}{183} = 0,518,$$

Šmyková sila únosnosti steny 2

$$V_{ba,Rd,2} = V_{Pl,Rd,2} \rho_{V,a} = 1640,8 \frac{235}{1,1\sqrt{3}} 0,518 = 838 \text{ kN}.$$

Návrhová šmyková únosnosť vystuženého poľa (stena 1 + stena 2)

$$V_{Rd} = 355 + 838 = 1193 \text{ kN}.$$

Posúdenie poľa steny na interakciu namáhania ohybovým momentom a priečnou silou

Použijeme jednoduchú pokritickú metódu

$$V_{Sd} = 1100 \text{ kN} < V_{Rd} = 1193 \text{ kN},$$

$$V_{Sd} = 1100 \text{ kN} > V_{Rd}/2 = 596,5 \text{ kN} \rightarrow \text{uvažujeme s vplyvom priečnej sily},$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,y} f_y / \gamma_{M1} = 2,5206 \cdot 10^7 \cdot 235 / 1,1 = 5384 \text{ kNm},$$

$$I_f = 2 \frac{I}{12} 400 \cdot 25^3 + 400 \cdot 25 \cdot 2 \cdot 1012,5^2 = 2,050 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4,$$

$$M_{fN,Rd} = \frac{2,050 \cdot 10^{10}}{1025} \frac{235}{1,1} = 4273 \text{ kNm}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} < M_{fN,Rd} + (M_{cN,Rd} - M_{fN,Rd}) [1 - (2V_{Sd} / V_{ba,Rd} - 1)^2],$$

$$M_{Sd} = 4400 \text{ kNm} < 4273 + (5384 - 4273) [1 - (2 \frac{1100}{1193} - 1)^2] = 4446 \text{ kNm}.$$

Pole steny vyhovuje.

Posúdenie tuhosti pozdĺžnej výstuhy

Spolupôsobiaci časť steny

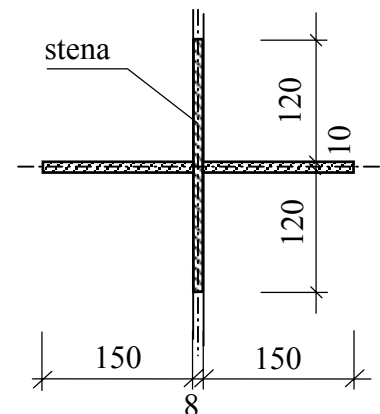
$$s_2 = 15,8 \sqrt{\frac{235}{235}} = 120 \text{ mm}.$$

Klasifikácia prierezu výstuhy

$$c / t_s = 150 / 10 = 15 = \beta_1 = 15 \rightarrow \text{trieda 3}.$$

Moment zotrvačnosti pozdĺžnej výstuhy

$$I_{ys} = 2 \frac{I}{12} 8^3 \cdot 120 + \frac{I}{12} 10 \cdot 308^3 = 24,358 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$



Požadovaný moment zotrvačnosti pozdĺžnej výstuhy

$$I_{s,min} = 0,1d t_{we}^3 \kappa_s \gamma_s .$$

Keďže $d/t_w = 2\ 000/8 = 250 > 240$, a ide o výstuhu otvoreného prierezu súčiniteľ $\kappa = 4$ (STN 73 1401, tab. 15).

Súčiniteľ γ_s sa stanoví pre obe čiastkové steny priliehajúce k pozdĺžnej výstuhe. Pri výpočte požadovaného momentu zotrvačnosti sa uvažuje s väčšou hodnotou súčiniteľa γ_s .

Výpočet súčiniteľov γ_N , γ_M , γ_V

Stena namáhaná ohybovým momentom, pozdĺžna výstuha vo vzdialenosti $d_1 = 360\text{ mm} < d/5 = 400\text{ mm}$ od tlačenej pásnice (STN 73 1401, tab. 16, riadok 7)

$$a/d = 1\ 500/2\ 000 = 0,75 > 0,5 ,$$

$$\delta = A_{s,i}/(d t_w) = (2.150.10 + 2.120.8)/(2\ 000.8) = 0,3 ,$$

$$\delta_1 = d/(d - d_1) = 2\ 000/(2\ 000 - 360) = 1,22 ,$$

$$\begin{aligned} \gamma_M &= 3,87 + 5,1a/d + (8,82 + 77,6 \delta) a^2/d^2 = \\ &= 3,87 + 5,1.0,75 + (8,82 + 77,6.0,3)0,75^2 = 25,75, \text{ alebo} \end{aligned}$$

$$\gamma_M = 50 + 200 \delta = 50 + 200.0,3 = 110,$$

$$\gamma_M = \min(25,75 ; 110) = 25,75 .$$

Stena namáhaná šmykom, pozdĺžna výstuha vo vzdialenosti $d_1 = 360\text{ mm} < d/4 = 2000/4 = 500\text{ mm}$ od tlačenej pásnice (STN 73 1401, tab. 16, riadok 9)

$$\begin{aligned} \gamma_V &= 7,2 \frac{a^2}{d^2} (1 - 3,3 \frac{a}{d} + \frac{a^2}{d^2} 3,9 - 1,1 \frac{a^3}{d^3}) = \\ &= 7,2.0,75^2 (1 - 3,3.0,75 + 3,9.0,75^2 - 1,1.0,75^3) = 1,03 . \end{aligned}$$

Stena namáhaná osovou silou (STN 73 1401, tab. 16, riadok 1)

$$\delta_1 = 1,22 , \delta = 0,3 ,$$

$$\begin{aligned} K_1 &= \sqrt{(1,25 - 1,17 \delta_1 + 0,935 \delta_1^2)^2 + 2 \delta_1^3 \delta} \\ &= \sqrt{(1,25 - 1,17.1,22 + 0,935.1,22^2)^2 + 2.1,22^3.0,3} = 1,6 , \end{aligned}$$

$$a/d = 0,75 < K_1 = 1,6 ,$$

$$\begin{aligned} \gamma_N &= \frac{1}{\delta_1} \left[4 \delta_1^2 (1 + 2 \delta) - 2 \right] \frac{a^2}{d^2} - \frac{1}{\delta_1} \frac{a^4}{d^4} + \frac{1 + \delta \cdot \delta_1}{\delta_1} + \\ &+ 2 \left(\frac{a}{d} - 1,1 \right)^2 \left(1 - \frac{16}{\delta_1^4} \right) - \frac{1}{2} + \frac{8}{\delta_1^4} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_N &= 1/1,22 [4,1,22^2(1 + 2,0,3) - 2] 0,75^2 - (1/1,22) 0,75^4 + \\ &+ (1 + 0,3,1,22)/1,22 + 2(0,75 - 1,1)^2(1 - 16/1,22^4) - 0,5 + 8/1,22^4 = \\ &= 5,91 (> 2,5).\end{aligned}$$

Výpočet súčiniteľov ρ_N , ρ_M , ρ_V

Stena 1

tlak : $\psi = 1,0 \rightarrow \beta_{l,N} = 40(235/235)^{0,5} = 40 < 360/8 = 45,$
 $\beta_{r,N} = 0,8,45 + 0,2,40 = 44,$
 $\rho_N = \beta_{l,N}/\beta_{r,N} = 40/44 = 0,91,$

ohyb : $\psi = -1,0 \rightarrow \beta_{l,M} = 130(235/235)^{0,5} = 130 > 45,$
 $\rho_M = 1,0,$

šmyk : $\rho_V = 1,0$ (pozri výpočet šmykovej únosnosti steny 1).

Stena 2

Priebeh normálových napätí v stene 2 je súčtom ťahového a ohybového napätia, preto sa stena uvažuje s upravenou štíhlosťou, ktorá zodpovedá dvojnásobku výšky tlačenej časti steny 2.

ohyb : $\psi = -1,0 \rightarrow \beta_{l,M} = 130(235/235)^{0,5} = 130 < 2,640/8 = 160,$
 $\beta_{r,M} = 0,8,160 + 0,2,130 = 154,$
 $\rho_M = \beta_{l,M}/\beta_{r,M} = 130/154 = 0,844,$

šmyk : $\rho_V = 0,518$ (pozri výpočet šmykovej únosnosti steny 2).

Napätie v stene 1

$$\sigma_N = (\sigma_{(3)} + \sigma_{(5)})/2 = (171 + 109)/2 = 140 \text{ MPa},$$

$$\sigma_M = \sigma_{(3)} - \sigma_N = 171 - 140 = 31 \text{ MPa},$$

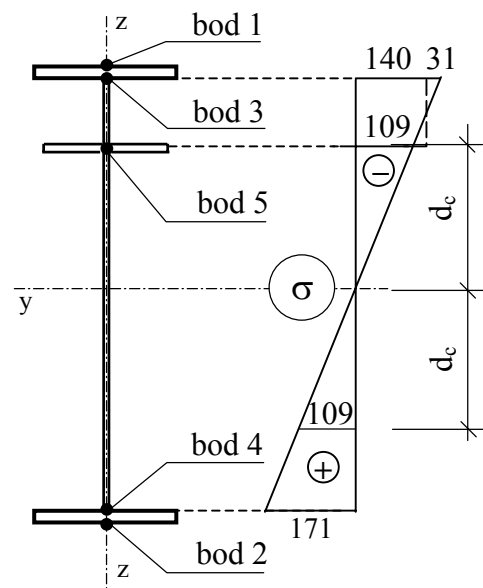
$$\tau = V_{Sd}/A_w = 1\,100 \cdot 10^3 / (2\,000 \cdot 8) = 69 \text{ MPa}.$$

Napätie v stene 2

σ_N – ťahové napätie,

$$\sigma_M = \sigma_{(5)} = 109 \text{ MPa},$$

$$\tau = V_{Sd}/A_w = 1\,100 \cdot 10^3 / (2\,000 \cdot 8) = 69 \text{ MPa}.$$



Pozn.: Napätie by sa malo uvažovať v krajných vláknoch čiastkových stien. Pri výpočte sme uvažovali napätie v ťažisku pozdĺžnej výstuhy (bod 5), ktoré sa neparťne líši od napätia na spodnom okraji steny 1 a na hornom okraji steny 2.

Súčiniteľ γ_s pre stenu 1

$$\gamma_s = \sqrt{\left(\gamma_N \frac{\sigma_{N,i}}{\rho_{N,i} f_{yw} / \gamma_{M1}} + \gamma_M \frac{\sigma_{M,i}}{\rho_{M,i} f_{yw} / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\gamma_V \frac{\tau_{V,i}}{\rho_{V,i} f_{yw} / (\gamma_{M1} \sqrt{3})} \right)^2},$$

$$\gamma_s = \sqrt{\left(5,91 \frac{140}{0,91 \frac{235}{1,1}} + 25,75 \frac{31}{1,0 \frac{235}{1,1}} \right)^2 + \left(1,03 \frac{69}{1,0 \frac{235}{1,1 \sqrt{3}}} \right)^2} = 8,0.$$

Súčiniteľ γ_s pre stenu 2

$$\gamma_s = \sqrt{\left(25,75 \frac{109}{0,844 \frac{235}{1,1}} \right)^2 + \left(1,03 \frac{69}{0,518 \frac{235}{1,1 \sqrt{3}}} \right)^2} = 15,6.$$

Súčiniteľ γ_s pre celú stenu

$$\gamma_s = \max(8,0; 15,6) = 15,6.$$

Posúdenie tuhosti pozdĺžnej výstuhy

$$I_{s,min} = 0,1 \cdot 2000 \cdot 8^3 \cdot 4 \cdot 15,6 = 6,389 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 < I_{st} = 19,5 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Pozdĺžna výstuha vyhovuje.

Posúdenie pevnosti pozdĺžnej výstuhy

Pozdĺžna výstuha sa nemusí posudzovať z hľadiska pevnosti, pretože nie je priebežná (nie je na celej dĺžke nosníka).

Posúdenie priečnej výstuhy

Posúdenie priečnej výstuhy sa vykoná postupom uvedeným v príklade 2.3 tak, že skutočná hrúbka steny t_w sa nahradí ekvivalentnou hrúbkou $t_{w,e}$, ktorá sa určí z podmienky rovnosti šmykovej únosnosti steny s pozdĺžnou výstuhou a bez pozdĺžnej výstuhy.

Štíhlosť steny bez pozdĺžnej výstuhy

$$\beta_w = a / t_{we} = 1500 / t_{we} ,$$

$$\alpha = d / a = 2000 / 1500 = 1,333 .$$

Medzná štíhlosť v šmyku

$$\beta_{l,V} = 100(0,7 + 0,3/\alpha^2) \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{1,333^2} \right) 1 = 87,0 ,$$

$$\beta_{r,V} = 0,8 \cdot 1500 / t_{we} + 0,2 \cdot 87 = 1200 / t_{we} + 17,4 ,$$

$$\rho_{V,a} = \frac{87,0}{1200 / t_{we} + 17,4} .$$

Návrhová šmyková sila únosnosti steny s pozdĺžnou výstuhou

$$V_{Rd} = 1\,193\,000 \text{ N} .$$

Návrhová šmyková sila únosnosti steny bez pozdĺžnej výstuhy (s neznámou hrúbkou $t_{w,e}$)

$$V_{ba,Rd} = V_{b,pl,Rd} \rho_{V,a} = 2000 t_{w,e} \frac{235}{1,1\sqrt{3}} \frac{87,0}{1200 / t_{we} + 17,4} = 1\,193\,000 .$$

Po úprave dostávame kvadratickú rovnicu

$$21\,461\,684,1 t_{we}^2 - 20\,758\,200 t_{we} - 1\,431\,600\,000 = 0$$

$$t_{we} = 8,66 \text{ mm} .$$

Ekvivalentná hrúbka steny $t_{we} = 8,66 \text{ mm}$.

Pozn. : Postup posúdenia priečnej výstuhy je v príklade 2.3.

3

TLAČENÉ PRÚTY



3 TLAČENÉ PRÚTY

Vysoká pevnosť materiálu umožňuje navrhovať oceľové prúty spravidla veľmi štíhle. Ak sú takéto prúty namáhané tlakovou silou, a zvyčajne aj ohybovým momentom, môžu sa náhle zrútiť. Preťaženie prúta nie je vopred signalizované plynulým narastaním deformácií. Pri takýchto prútoch, na rozdiel od prútov, ktorých konštrukčné usporiadanie vylučuje stratu stability, je možné od začiatku zaťažovania až po dosiahnutie medzného stavu predpokladať lineárnu závislosť medzi deformáciou a zaťažením.

Základy teórie stability položil Euler, ktorý podal matematické riešenie stability centricky tlačeného ideálneho (bezchybného) prúta, obojstranne kĺbovo uloženého, s konštantným prierezom. Skutočné prúty sa samozrejme líšia od ideálneho prúta množstvom, viac alebo menej, nevyhnutných nepresností a nedokonalostí (imperfekcií), ktoré znižujú ich únosnosť.

V súčasnosti sa na vystihnutie tejto skutočnosti používa model začiatkových odchýliek. Vplyv geometrických a štrukturálnych imperfekcií na správanie sa skutočného prúta sa nahrádza začiatkovým zakrivením prúta, nazvaným ekvivalentná imperfekcia. Pre únosnosť vopred zakriveného prúta je rozhodujúce napätie v najviac namáhanom mieste. Stabilitný problém ideálneho prúta (rozdvorenie rovnováhy) sa pri skutočnom prúte nahradil pevnostným problémom.

Samotné geometrické imperfekcie by mohli byť zohľadnené jedným tvarom zakrivenia prúta s jednou maximálnou výchylkou. Ak však ekvivalentná imperfekcia mala nahradiť vplyv nielen geometrických, ale aj štrukturálnych imperfekcií, museli sa pri jej stanovení brať do úvahy nasledovné skutočnosti :

- zatiaľ čo geometrické imperfekcie viac ovplyvňujú správanie sa prúta väčších štíhlostí, štrukturálne imperfekcie naopak, viac ovplyvňujú správanie sa prúta s menšími štíhlostami,
- zo štrukturálnych imperfekcií sú rozhodujúce zvyškové (reziduálne) napätia, ktorých veľkosť a rozloženie závisí od spôsobu výroby a tvaru prierezu prúta, a preto
- vo vplyve reziduálnych napätí sa musí prejaviť aj smer možného vybočenia prúta vzhľadom na orientáciu prierezu.

Na základe týchto predpokladov boli, po spracovaní výsledkov relatívne rozsiahleho experimentálneho programu, vytvorené skupiny prierezov s rôznou mierou imperfekcie, ktorým zodpovedajú príslušné krivky vzpernej pevnosti na výpočet súčiniteľa vzperu [12], [13].

Norma STN 73 1401 umožňuje stanoviť vzpernú únosnosť centricky tlačených

- celistvých prútov pri rovinnom a priestorovom vzpere,
- priehradových, rámových a zložených členených prútov pozostávajúcich z čiastkových prútov, únosností ktorých ovplyvňuje šmyková poddajnosť spojenia čiastkových prútov a interakcia globálneho vybočenia prúta ako celku a lokálneho vybočenia čiastkového prúta.

Vzperná únosnosť oceleového prúta je v STN 73 1401 vyjadrená pomocou piatich parametrov

$$N_{b,Rd} = f(A, f_y, \beta_A, \chi, \gamma_{M1}) ,$$

kde f_y je charakteristická hodnota medze klzu ocele v závislosti od hrúbky častí vyšetrovaného prierezu, A je prierezová plocha, $\beta_A \leq 1$ je súčiniteľ, ktorým sa zohľadňuje prípadné vydutie stien a pásnic prierezu, je definovaný ako pomer redukovanej a plnej prierezovej plochy $\beta_A = A_{eff} / A$, $\chi \leq 1,0$ je súčiniteľ vzperu, ktorým sa vyjadruje znížená únosnosť prúta v dôsledku straty stability a $\gamma_{M1} > 1,0$ je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu pri vyšetrovaní stability prvku v závislosti od pevnostnej triedy ocele.

Súčiniteľ vzperu je vyjadrený

$$\chi = f(\bar{\lambda}, \alpha_1, \text{príp. } \alpha_{LT}) ,$$

kde $\bar{\lambda}$ je pomerná štíhlosť prúta, v ktorej je zahrnutý vplyv medze klzu a modulu pružnosti materiálu (occele) a vplyv lokálneho vydutia, α_1 , príp. α_{LT} je miera imperfekcie prislúchajúca jednotlivým krivkám vzpernej únosnosti v závislosti od tvaru prierezu, spôsobu výroby prúta a spôsobu straty stability – vybočením, príp. skrútením prúta.

Strata stability, pri ktorej nastane vybočenie prúta kolmo na niektorú z hlavných osí prierezu, sa nazýva rovinný vzper. Strata stability, pri ktorej nastane skrútenie prúta okolo pozdĺžnej osi, prípadne nastane vybočenie a skrútenie, sa nazýva priestorový vzper.

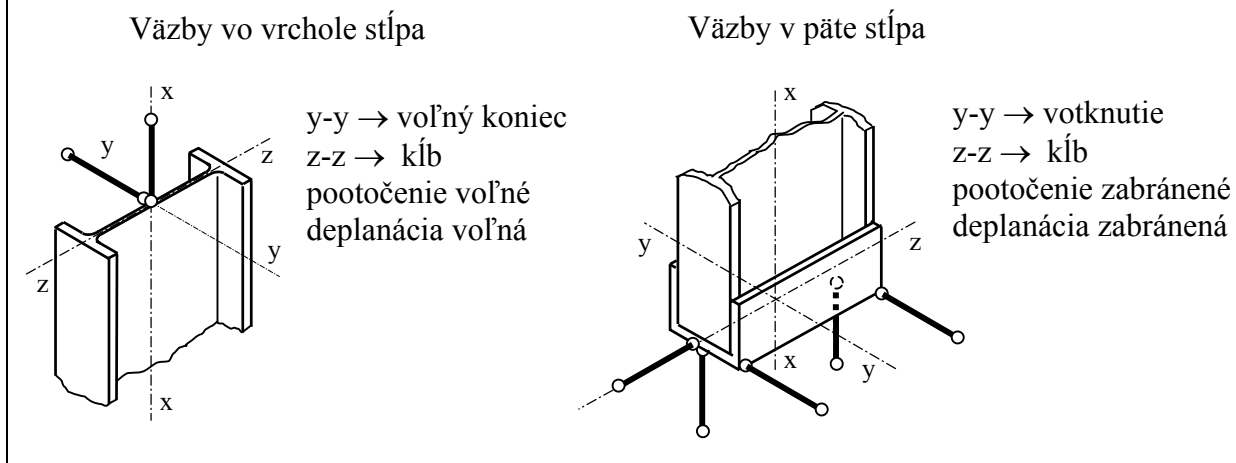
Pri výpočte vzpernej únosnosti centricky tlačeného prúta sa najprv vykoná klasifikácia prierezu, aby sa zistilo, či je potrebné uvažovať s redukovanou prierezovou plochou (prierez triedy 4), ktorá bezprostredne ovplyvňuje veľkosť súčiniteľa β_A a následne aj pomernú štíhlosť $\bar{\lambda}$. Pri kompaktných prierezoch (triedy prierezu 1 až 3) strata stability stien prúta nenastáva a súčiniteľ $\beta_A = 1,0$.

V podmienke spoľahlivosti sa uplatní minimálna vzperná únosnosť, to znamená únosnosť stanovená pomocou najmenšieho súčiniteľa vzperu.

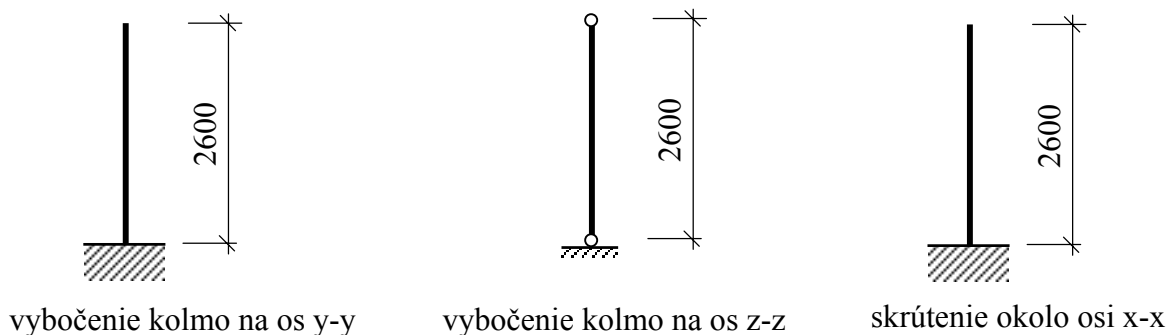
Výpočet vzpernej únosnosti prierezu je v niektorých príkladoch vykonaný alternatívne pre oceľ S 235 a S 355.

3.1 Vzperná únosnosť celistvého prúta s prierezom symetrickým podľa oboch osí

Vypočítajte vzpernú únosnosť stĺpa valcovaného prierezu IPE 180 dvakrát, a to z ocele S 235 a z ocele S 355. Výška stĺpa je 2 600 mm. Statické schémy pre jednotlivé spôsoby straty stability stanovte na základe väzieb koncov stĺpa.



Statické schémy stĺpa pre jednotlivé spôsoby straty stability



Tvar prierezu a prierezové charakteristiky

IPE 180

$$A = 2\,390 \text{ mm}^2,$$

$$i_y = 74,2 \text{ mm}, i_z = 20,5 \text{ mm},$$

$$h = 180 \text{ mm},$$

$$b = 91 \text{ mm},$$

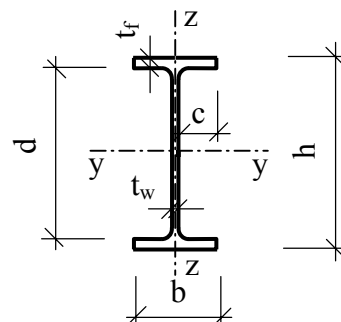
$$t_f = 8 \text{ mm}, t_w = 5,3 \text{ mm},$$

$$c = 45,5 - 2,65 \text{ mm},$$

$$d = 180 - 2 \cdot 8 = 164 \text{ mm},$$

$$W_{el,y} = 146 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, W_{pl,y} = 166 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$I_y = 13,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, I_z = 1,01 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, I_t = 47,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^4, I_\omega = 7,43 \cdot 10^9 \text{ mm}^6.$$



Klasifikácia prierezu IPE 180 (ocel' S 235)

$$t_f = 8 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \varepsilon_m = (235/235)^{0.5} = 1,0,$$

$$\text{stena (tlak)} : \beta_{01} = 30 < d/t_w = 164/5,3 = 30,9 < \beta_{02} = 33,1 = 33 \rightarrow \text{trieda 2,}$$

$$\text{pásnica (tlak)} : c/t_f = (45,5 - 2,65)/8 = 5,4 < \beta_{01} = 9,1 = 9 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 2.

Klasifikácia prierezu IPE 180 (ocel' S 355)

$$t_f = 8 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}, \varepsilon_m = (235/355)^{0.5} = 0,81,$$

$$\text{stena (tlak)} : \beta_{02} = 33 \cdot 0,81 = 26,7 < d/t_w = 164/5,3 = 30,9 < \beta_1 = 40 \cdot 0,81 = 32,4 \rightarrow \text{trieda 3,}$$

$$\text{pásnica (tlak)} : c/t_f = (45,5 - 2,65)/8 = 5,4 < \beta_{01} = 9 \cdot 0,81 = 7,3 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 3.

Výpočet vzpernej únosnosti práta IPE 180 (ocel' S 235)

Prierez s dvoma osami symetrie môže stratiť stabilitu vybočením kolmo na niektorú z hlavných prierezových osí alebo skrútením okolo pozdĺžnej osi. Jednotlivé spôsoby straty stability navzájom nesúvisia. Nastane vždy len jeden z nich, a to ten, pre ktorý sú vlastnosťami prierezu, imperfekciami a konštrukčným usporiadaním vytvorené najpriaznivejšie podmienky, čo vyjadruje najnižšia hodnota súčiniteľa vzperu.

Pozn. : Veličiny majú index y alebo z podľa toho, či ide o vybočenie kolmo na os y-y, alebo kolmo na os z-z. Ak ide o stratu stability skrútením, používa sa index ω .

Vybočenie kolmo na os y-y

Vzperná dĺžka

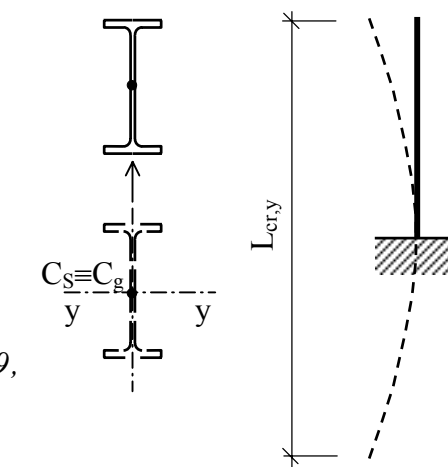
$$L_{cr,y} = \beta L = 2,2 \cdot 600 = 5\,200 \text{ mm}.$$

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / f_y} = 93,9 \sqrt{235 / 235} = 93,9,$$

$$\lambda_y = L_{cr,y} / i_y = 5\,200 / 74,2 = 70,$$

$$\bar{\lambda} = (\lambda / \lambda_1) \sqrt{\beta_A} = (70 / 93,9) \sqrt{1,0} = 0,75 \rightarrow \chi_y = 0,823$$



(tab. E.1, krivka a, STN 73 1401).

Vybočenie kolmo na os z-z

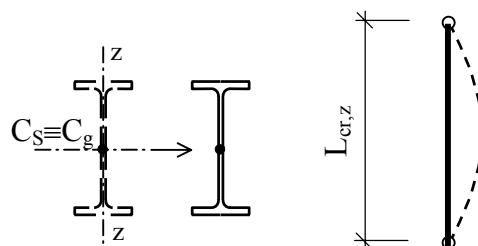
Vzperná dĺžka

$$L_{cr,z} = 1,0 \cdot 2600 = 2600 \text{ mm}.$$

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_1 = 93,9, \quad \lambda_z = L_{cr,z} / i_z = 2600 / 20,5 = 127,$$

$$\bar{\lambda} = (127 / 93,9) \sqrt{1,0} = 1,35 \rightarrow \chi_z = 0,404 \text{ (tab. E.1, krivka b).}$$

**Skrútenie okolo osi x-x**

Momenty zotrvačnosti v ohybe a prostom krútení

$$I_p = I_y + I_z = (13,2 + 1,01) \cdot 10^6 = 14,21 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

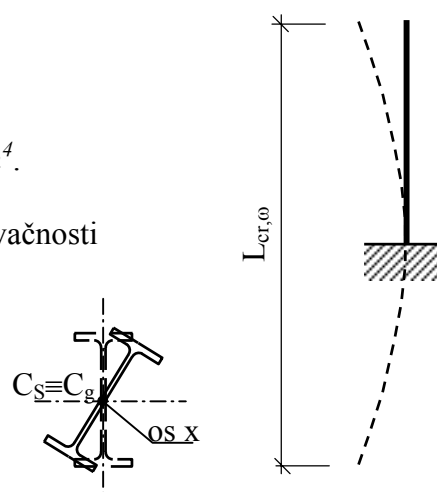
Vzperná dĺžka na krútenie a výsekový moment zotrvačnosti

$$L_{cr,\omega} = 2,2 \cdot 2600 = 5200 \text{ mm},$$

$$I_\omega = 7,43 \cdot 10^9 \text{ mm}^6.$$

Štíhlosť prúta pri strate stability skrútením

$$\begin{aligned} \lambda_\omega &= [I_p / (I_\omega / L_{cr,\omega}^2 + I_t / 25)]^{0,5} = \\ &= \sqrt{14,21 \cdot 10^6 / (7,43 \cdot 10^9 / 5200^2 + 47,8 \cdot 10^3 / 25)} = 81. \end{aligned}$$



Súčiniteľ vzperu pri skrútení sa počíta podľa vzťahu pre súčiniteľ vzperu pri klopení χ_{LT} na základe pomernej štíhlosti $\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}$, v ktorej štíhlosť $\lambda = \lambda_\omega$.

$$\bar{\lambda}_{LT} = (\lambda_\omega / \lambda_1) \sqrt{\beta_A} = (81 / 93,9) \sqrt{1,0} = 0,87 \rightarrow \chi_{LT} = 0,853 \text{ (tab. E.1, } \alpha_{LT} = 0,13).$$

Rozhodujúci súčiniteľ vzperu

$$\chi = \min(\chi_y, \chi_z, \chi_{LT}) = \min(0,823; 0,404; 0,853) = 0,404.$$

Vzperná únosnosť prúta (rozhoduje vybočenie kolmo na os z-z)

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} = 0,404 \cdot 1,0 \cdot 2390 \cdot 235 / 1,1 = 206,3 \text{ kN}.$$

Výpočet vzpernej únosnosti prúta (ocel' S 355)

Pre medzu klzu $f_y = 355 \text{ MPa}$ je súčiniteľ spoľahlivosti materiálu podľa STN 73 1401 $\gamma_{MI} = 1,2$.

Rozhodujúca štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_1 = 93,9(235/f_y)^{0,5} = 76,4; \quad \bar{\lambda} = 127/76,4\sqrt{I} = 1,67 \rightarrow \chi_z = 0,287$$

(tab. E.1, krivka b).

Vzperná únosnosť prúta

$$N_{b,Rd} = 0,287 \cdot 1,0 \cdot 2390 \cdot 355 / 1,20 = 202,9 \text{ kN}.$$

Vidíme, že zväčšením pevnostnej triedy ocele nemusíme dosiahnuť zvýšenie vzpernej únosnosti prúta, pretože pomer únosností $N_{b,Rd,(S355)} / N_{b,Rd,(S235)}$ je menší ako 1,0 ($202,9 / 206,3 = 0,984$).

3.2 Vzperná únosnosť celistvého prúta s prierezom symetrickým podľa jednej osi

Vypočítajte vzpernú únosnosť prúta valcovaného prierezu UPE 200 z ocele S 235 aj z ocele S 355 dĺžky 2 600 mm. Väzby koncov stĺpa sú rovnaké ako v príklade 3.1.

Prierezové charakteristiky a uloženie prúta

UPE 200

$$A = 2350 \text{ mm}^2, \quad h = 200 \text{ mm},$$

$$i_y = 80,9 \text{ mm}, \quad b = 76 \text{ mm},$$

$$i_z = 24,1 \text{ mm},$$

$$i_p = 84,4 \text{ mm},$$

$$t_f = 9,0 \text{ mm}, \quad t_w = 5,2 \text{ mm},$$

$$d = 200 - 2 \cdot 9 = 182 \text{ mm},$$

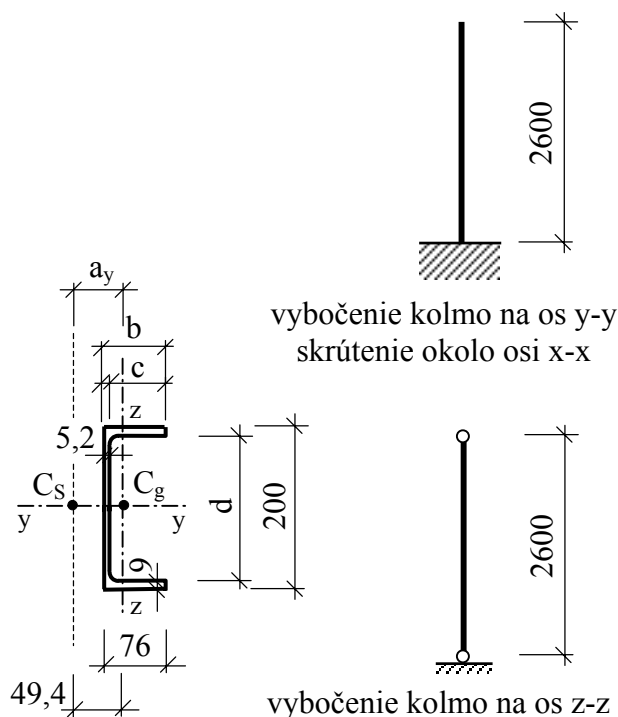
$$I_y = 15,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$I_z = 1,37 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$I_t = 49,1 \cdot 10^3 \text{ mm}^4,$$

$$I_\omega = 8,81 \cdot 10^9 \text{ mm}^6,$$

$$a_y = 49,4 \text{ mm}.$$



Klasifikácia prierezu UPE 200 (ocel' S 235)

$$t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = \sqrt{235 / 235} = 1,0,$$

$$\text{stena (tlak)} : \beta_{02} = 33 < d/t_w = 182/5,2 = 35 < \beta_1 = 40\varepsilon_m = 40 \rightarrow \text{trieda 3,}$$

$$\text{pásnica (tlak)} : c/t_f = (76-5,2)/9,0 = 7,9 < \beta_1 = 9\varepsilon_m = 9,0 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 3.

Klasifikácia prierezu UPE 200 (ocel' S 355)

$$t_f = 9 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = \sqrt{235 / 355} = 0,81,$$

$$\text{stena (tlak)} : d/t_w = 182/5,2 = 35 > \beta_1 = 40 \cdot 0,81 = 32,4 \rightarrow \text{trieda 4,}$$

$$\text{pásnica (tlak)} : \beta_{01} = 0,81 \cdot 9 = 7,3 < c/t_f = (76-5,2)/9,0 = 7,9 < \beta_{02} = 10 \cdot 0,81 = 8,1$$

\rightarrow trieda 2.

Prierez je triedy 4.

Prierez UPE 200 z ocele S 355 je triedy 4, to znamená, že sa považuje za štíhly prierez, pri ktorom je potrebné určiť redukovanú plochu v dôsledku možného lokálneho vydutia steny, $\beta_A < 1,0$.

Výpočet vzpernej únosnosti prúta prierezu UPE 200 – ocel' S 235**Vybočenie kolmo na os y-y**

Stabilitný problém prúta s monosymetrickým prierezom (prierez s jednou osou symetrie) je charakteristický tým, že môže nastať súčasne strata stability vybočením (ohybom) a skrútením prúta.

Vzperná dĺžka a štíhlosti pri vybočení a skrútení

$$L_{cr,y} = L_{cr,\omega} = 2.2600 = 5200 \text{ mm}.$$

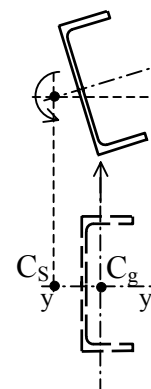
Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$I_p = I_y + I_z + A a_y^2 = 15,4 \cdot 10^6 + 1,37 \cdot 10^6 + 2 \cdot 350 \cdot 49,4^2 = 22,5 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$\lambda_y = L_{cr,y} / i_y = 5200 / 80,9 = 64,3,$$

$$\lambda_\omega = [I_p / (I_\omega / L_{cr,\omega}^2 + I_t / 25)]^{0,5} =$$

$$= \sqrt{(22,5 \cdot 10^6 / (8,81 \cdot 10^9 / 5200^2 + 49,1 \cdot 10^3 / 25))} = 98,86.$$



Vzhľadom na to, že ide o vybočenie v smere osi z-z, na ktorej neleží stred krútenia C_S , vybočenie prúta nastane spolu s jeho skrútením.

$$\kappa_y = \sqrt{(1 + a_y / i_p) / 2} = \sqrt{(1 + 49,4 / 84,4) / 2} = 0,89,$$

$$\lambda_{y\omega} = \kappa_y \sqrt{\lambda_\omega^2 + \lambda_y^2} = 0,89 \sqrt{98,86^2 + 64,3^2} = 104,95,$$

$$\lambda = \lambda_{cr} = \max(\lambda_\omega, \lambda_y, \lambda_{y\omega}) = \max(98,86; 64,3; 104,95) = 104,95,$$

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / f_y} = 93,9,$$

$$\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1 \sqrt{\beta_A} = 104,95 / 93,9 \sqrt{1} = 1,12 \rightarrow \chi = 0,5234 \text{ (tab. E.1, krivka b),}$$

$$\chi_{LT} = 0,6553 \text{ (}\alpha_{LT} = 0,13\text{)}.$$

Súčiniteľ priestorového vzperu

$$\chi_r = \chi_{LT} - (\chi_{LT} - \chi) \lambda_y / \lambda_{cr} = 0,6553 - (0,6553 - 0,5234) 64,3 / 104,95 = 0,574.$$

Vybočenie kolmo na os z-z

Ide o vybočenie v smere osi symetrie, na ktorej leží stred šmyku, preto skrútenie prierezu nenastáva.

Vzperná dĺžka

$$L_{cr,z} = 1,0 \cdot 2\,600 = 2\,600 \text{ mm.}$$

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_z = 2\,600 / 24,1 = 107,9,$$

$$\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1 \sqrt{\beta_A} = 107,9 / 93,9 \sqrt{1,0} = 1,15 \rightarrow \chi_z = 0,4583 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$

Rozhodujúci súčiniteľ vzperu

$$\chi = \min(\chi_r; \chi_z) = \min(0,574; 0,4583) = 0,4583.$$

Vzperná únosnosť prúta

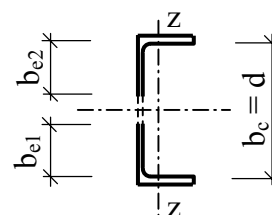
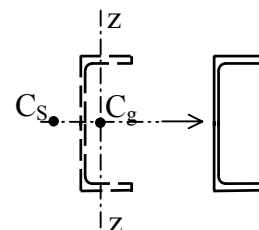
$$N_{b,Rd} = 0,4583 \cdot 1,0 \cdot 2\,350 \cdot 235 / 1,10 = 229,9 \text{ kN.}$$

Vzperná únosnosť prúta prierezu UPE 200 – oceľ S 355

Efektívna šírka tlačenej obojstranne podopretej steny

$$\beta_{1,NM} = \beta_{1N} = 40 \sqrt{235 / f_y} = 40 \sqrt{235 / 355} = 32,4,$$

$$\beta = 181 / 5,2 = 35 > \beta_{1,NM} = 32,4 \rightarrow \text{trieda 4,}$$



$$\beta_{r,NM} = 0,8\beta + 0,2\beta_{l,NM} = 0,8 \cdot 35 + 0,2 \cdot 32,4 = 34,5,$$

$$\rho_{NM} = \beta_{l,NM} / \beta_{r,NM} = 32,4 / 34,5 = 0,94,$$

$$b_{c,eff} = \rho_{NM} d = 182 \cdot 0,94 = 171 \text{ mm}; \quad b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot 171 = 85,5 \text{ mm}.$$

Efektívna prierezová plocha (redukcia plochy steny prierezu)

$$A_{eff} = 2350 - (182 - 171) \cdot 5,2 = 2293 \text{ mm}^2.$$

$$\beta_A = \frac{A_{eff}}{A} = \frac{2293}{2350} = 0,976.$$

Vybočenie kolmo na os y-y

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_{y\omega} = 104,95,$$

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / 355} = 76,1,$$

$$\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1 \sqrt{\beta_A} = (104,95 / 76,1) \sqrt{0,976} = 1,36$$

$$\rightarrow \chi = 0,3991 \text{ (tab. E.1, krivka b) ,}$$

$$\rightarrow \chi_{LT} = 0,4787 \text{ (tab. E.1, } \alpha_{LT} = 0,13 \text{)}.$$

Súčiniteľ priestorového vzperu

$$\chi_r = 0,4787 - (0,4787 - 0,3991) 64,3 / 104,95 = 0,429.$$

Vybočenie kolmo na os z-z

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

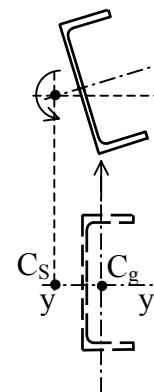
$$\bar{\lambda} = (107,9 / 76,1) \sqrt{0,976} = 1,40 \rightarrow \chi_z = 0,3492 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$

Vzperná únosnosť prúta

$$\chi = \min(\chi_r, \chi_z) = \min(0,429; 0,3492) = 0,3492,$$

$$N_{b,Rd} = 0,3492 \cdot 2293 \cdot 355 / 1,20 = 236,7 \text{ kN}.$$

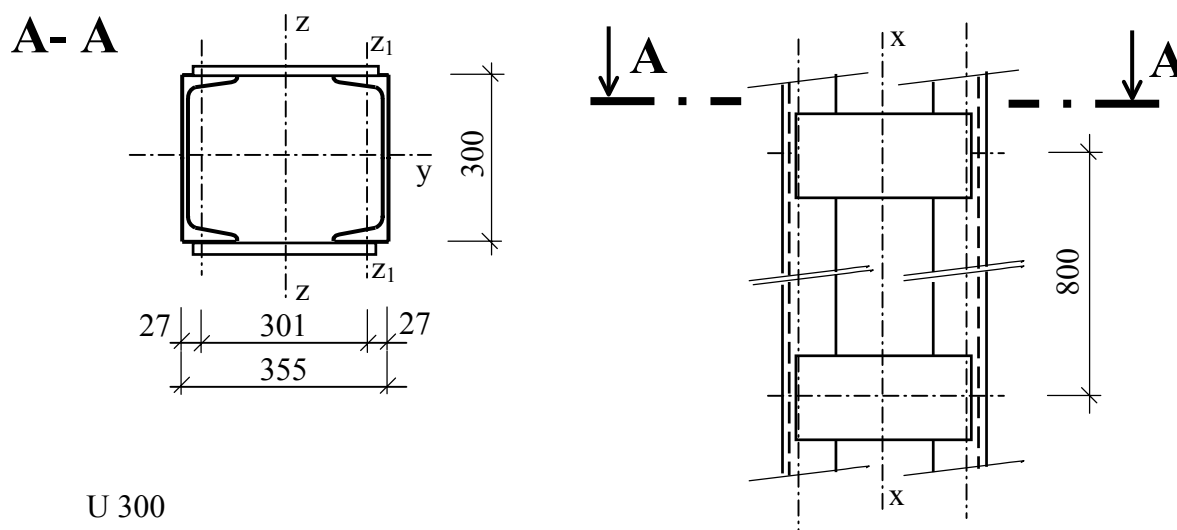
Zvýšenie únosnosti prúta z ocele S 355 v porovnaní s prútom z ocele S 235 je 3%
($236,7 / 229,9 = 1,029$).



3.3 Vzperná únosnosť členeného prúta s rámovými spojkami

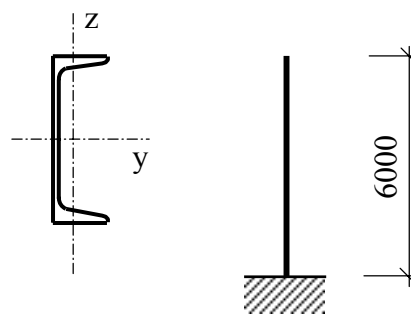
Posúďte stĺp, ktorý je vytvorený ako členený prút s rámovými spojkami z ocele S 235. Čiastkové prúty sú z valcovaného prierezu U 300. Návrhová tlaková sila $N_{Sd} = 1200$ kN. Vzhľadom na vybočenie kolmo na os y - y a z - z stĺp pôsobí ako konzola.

Prierezové charakteristiky, tvar a uloženie stĺpa



U 300

$$\begin{aligned}
 A &= A_f = 5880 \text{ mm}^2, \\
 I_y &= 80,3 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \\
 I_z &= I_f = 4,930 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \\
 i_y &= 117 \text{ mm}, \quad i_z = 29 \text{ mm}, \\
 b &= 100 \text{ mm}, \\
 t_f &= 16 \text{ mm}, \quad t_w = 10 \text{ mm} \\
 W_{el,z} &= 67,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$



vybočenie kolmo na os y - y , z - z

Klasifikácia prierezu U 300

$$\begin{aligned}
 f_y &= 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = (235/235)^{0,5} = 1,0, \\
 \text{pásnica (tlak)} &: c/t_f = (100 - 10)/16 = 5,6 < \beta_{01} = 9,1 = 9 \rightarrow \text{trieda 1,} \\
 \text{stena (tlak)} &: d/t_w = (300 - 2 \cdot 16)/10 = 26,8 < \beta_{01} = 30,1 = 30 \rightarrow \text{trieda 1.}
 \end{aligned}$$

Prierez čiastkového prúta je triedy 1.

Pri členenom prúte rozlišujeme tzv. hmotnú a nehmotnú os priečného rezu. Os, ktorá pretína prierezy čiastkových prútov, je hmotná os členeného prúta – v našom prípade os y-y. Os, ktorá nepretína prierez čiastkových prútov, je nehmotná os – v našom prípade os z-z.

Vybočenie kolmo na os y-y (hmotná os)

Pri posúdení kolmo na hmotnú os postupujeme ako pri celistvých prútoch.

Vzperná dĺžka

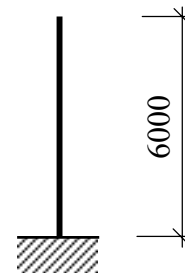
$$L_{cr,y} = 2.6 \cdot 000 = 12 \cdot 000 \text{ mm} .$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{12000}{117} = 102,6,$$

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A} = \frac{102,6}{93,9} \cdot 1 = 1,09 \rightarrow \chi = 0,4896 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$



vybočenie kolmo na os y-y

Návrhová sila vzpernej únosnosti členeného prúta

$$\beta_A = 1 \text{ (prierez triedy 1),}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} = 0,4896 \cdot 1.5880 \cdot 2.235 / 1,1 = 1 \cdot 230 \text{ kN} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 1 \cdot 200 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 1 \cdot 230 \text{ kN} .$$

Stĺp vyhovuje.

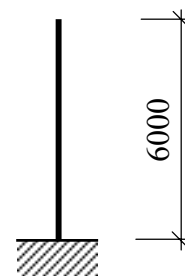
Vybočenie kolmo na os z-z (nehmotná os)

Rámový členený prút pri vybočení kolmo na nehmotnú os sa posudzuje v strede vzpernej dĺžky a na konci vzpernej dĺžky mimo a v mieste spojky.

Posúdenie uprostred vzpernej dĺžky

Vzperná dĺžka

$$L_{cr,z} = 2.6 \cdot 000 = 12 \cdot 000 \text{ mm} .$$



vybočenie kolmo na os z-z

Amplitúda ekvivalentnej imperfekcie

$$e_0 = L_{cr,z}/500 = 12\,000/500 = 24\text{ mm}.$$

Efektívny moment zotrvačnosti

$$I_1 = 0,5 A_f h_0^2 + 2\mu I_f = 0,5 \cdot 5\,880 \cdot 300^2 + 4\,930 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = 2,7446 \cdot 10^8 \text{ mm}^4,$$

pre $\mu=1$,

$$i_0 = \sqrt{\frac{0,5 I_1}{A_f}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 2,7446 \cdot 10^8}{5\,880}} = 152,7 \text{ mm},$$

$$\lambda = L_{cr,z} / i_0 = 12\,000 / 152,7 = 78,5,$$

$$75 < \lambda = 78,5 < 150 \rightarrow \mu = 2 - \frac{\lambda}{75} = 2 - \frac{78,5}{75} = 0,953,$$

$$I_{eff} = 0,5 A_f h_0^2 + 2\mu I_f = 0,5 \cdot 5\,880 \cdot 300^2 + 2 \cdot 0,953 \cdot 4\,930 \cdot 10^3 = 2,73996 \cdot 10^8 \text{ mm}^4.$$

Kritická sila členeného prúta

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 2,73996 \cdot 10^8}{12\,000^2} = 3\,943 \text{ kN}.$$

Návrh prierezu medziľahlej spojky

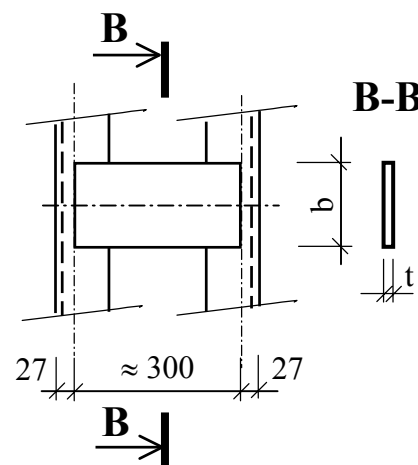
$$\text{šírka : } b = 0,5 h_0 = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ mm},$$

$$\text{hrúbka : } t = 12 \text{ mm}.$$

Návrh prierezu koncovej spojky

$$\text{šírka : } b = h_0 = 300 \text{ mm},$$

$$\text{hrúbka : } t = 12 \text{ mm}.$$



Moment zotrvačnosti medziľahlej spojky

$$I_b = \frac{1}{12} t b^3 = \frac{1}{12} \cdot 12 \cdot 150^3 = 3,375 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \text{ počet rovín spojok } n=2.$$

Pri výpočte šmykovej tuhosti rámového spojenia je potrebné uvažovať vplyv poddajnosti rámových spojok, pretože

$$(n I_b) / h_0 = \frac{2 \cdot 3,375 \cdot 10^6}{300} = 22\,500 \text{ mm}^3 < 10 I_f / a = 10 \frac{4\,930 \cdot 10^3}{800} = 61\,625 \text{ mm}^3.$$

Šmyková tuhosť rámového spojenia

$$S_v = \frac{24EI_f}{a^2 \left(1 + \frac{2I_f h_0}{nI_b a} \right)} = \frac{24 \cdot 210\,000 \cdot 4\,930 \cdot 10^3}{800^2 \left(1 + \frac{2 \cdot 4\,930 \cdot 10^3 \cdot 300}{2 \cdot 3\,375\,000 \cdot 800} \right)} = 25\,083,5 \text{ kN},$$

$$\frac{2\pi^2 EI_f}{a^2} = \frac{2\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 4\,930 \cdot 10^3}{800^2} = 31\,931 \text{ kN},$$

$$S_v = 25\,083,5 \text{ kN} < 31\,931 \text{ kN} \rightarrow S_v = 25\,083,5 \text{ kN}.$$

Ohybový moment vyjadrujúci vplyv teórie II. rádu a vplyv šmykovej poddajnosti rámového spojenia

$$M_s = \frac{N_{Sd} e_0}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} - \frac{N_{Sd}}{S_v}} = \frac{1200 \cdot 0,024}{1 - \frac{1200}{3\,943} - \frac{1200}{25\,083,5}} = 44,5 \text{ kNm}.$$

Návrhová osová sila na čiastkový prút

$$N_{f,Sd} = 0,5(N_{Sd} + M_s h_0 A_f / I_{eff}),$$

$$N_{f,Sd} = 0,5 \left(1200 \cdot 10^3 + \frac{44,5 \cdot 10^6 \cdot 300 \cdot 5\,880}{2,73996 \cdot 10^8} \right) = 743,2 \text{ kN}.$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

Pozn.: Vzperná dĺžka čiastkového prúta sa rovná osovej vzdialenosti rámových spojok
 $L_{cr} = a = 800 \text{ mm}$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i_{zf}} = \frac{800}{29} = 27,6; \quad \bar{\lambda} = \frac{27,6}{93,9} = 0,29 \rightarrow \chi = 0,9542 \text{ (tab. E.1, krivka c)}.$$

Vzperná únosnosť čiastkového prúta a podmienka spoľahlivosti

$$N_{f,b,Rd} = \chi \beta_A A_f f_y / \gamma_{M1} = 0,9542 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 880 \cdot \frac{235}{1,1} = 1\,198,6 \text{ kN} > N_{f,Sd} = 743,2 \text{ kN}.$$

Stĺp vyhovuje.

Posúdenie čiastkového prúta na konci mimo rámovej spojky

Prierez je namáhaný priečnou silou, ohybovým momentom a osovou silou, v ktorej sa neuplatní vplyv vybočenia členeného prúta ako celku, ale iba vplyv vybočenia čiastkového prúta medzi rámovými spojkami. Posúdenie vykonáme v pružnej oblasti pôsobenia.

Pozn.: Posúdenie v plastickej oblasti je možné vykonať v prípade, že prierez nevyhoví v pružnej oblasti pôsobenia. Je potrebné však preveriť, či prierez spĺňa požiadavky na triedu 1 alebo 2.

Priečna sila na konci prúta

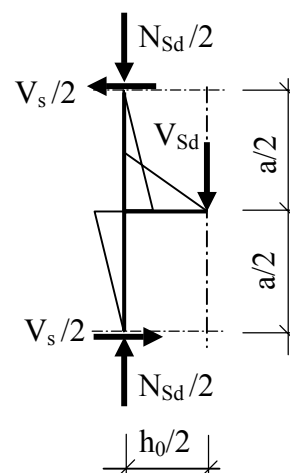
$$V_s = \pi M_s / L_{cr,z} = \pi 44,5 / 12 = 11,7 \text{ kN} .$$

Ohybový moment pôsobiaci v čiastkovom prúte

$$M_{z,Sd} = V_s a / 4 = 11,7 \cdot 0,8 / 4 = 2,33 \text{ kNm} .$$

Osová sila v priereze čiastkového prúta

$$N_{f,Sd} = \frac{N_{Sd}}{2} = 1200 / 2 = 600 \text{ kN} .$$



Z priebehu ohybových momentov vyplýva, že pomer momentov $\psi = -1$. Súčiniteľ ekvivalentného konštantného ohybového momentu

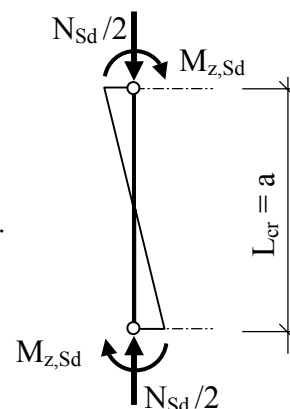
$$\beta_{Mz} = 1,8 - 0,7\psi = 1,8 - 0,7(-1) = 2,5,$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z (2\beta_{Mz} - 4) = 0,29(2 \cdot 2,5 - 4) = 0,29 < 0,9,$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{f,Sd}}{\chi_z A_f f_y} = 1 - \frac{0,29 \cdot 600 \cdot 10^3}{0,9542 \cdot 5880 \cdot 235} = 0,868 < 1,5 .$$

Posúdenie interakcie vzperného tlaku a ohybu

$$\begin{aligned} & \frac{N_{f,Sd}}{\chi_{min} A_f f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} = \\ & = \frac{600 \cdot 10^3}{0,9542 \cdot 5880 \cdot \frac{235}{1,1}} + \frac{0,868 \cdot 2,33 \cdot 10^6}{67,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{235}{1,1}} = 0,5 + 0,14 = 0,64 < 1,0. \end{aligned}$$



Stĺp vyhovuje .

Posúdenie čiastkového prúta v mieste rámovej spojky

V mieste rámovej spojky je ohybový moment od vybočenia čiastkového prúta rovný nule, preto sa vplyv vzperu neprejaví

$$\begin{aligned} \frac{N_{Sd,l}}{A_f f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} &= \\ = \frac{600 \cdot 10^3}{5880 \frac{235}{1,1}} + \frac{2,33 \cdot 10^6}{67,6 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} &= 0,48 + 0,16 = 0,64 < 1,0. \end{aligned}$$

Stĺp vyhovuje.

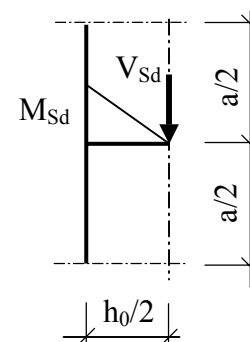
Posúdenie rámovej spojky

Návrhová sila a moment na jednu spojku

$$V_{Sd} = \frac{V_s}{2} \frac{a}{h_0} = \frac{11,7 \cdot 0,8}{2 \cdot 2,0,3} = 15,6 \text{ kN}, \quad M_{Sd} = V_{Sd} h_0 / 2 = 15,6 \cdot 0,15 = 2,34 \text{ kNm}.$$

Prierezové charakteristiky a návrhové sily únosnosti rámovej spojky

$$\begin{aligned} W_{pl} &= \frac{1}{4} t b^2 = \frac{1}{4} 12 \cdot 150^2 = 67\,500 \text{ mm}^3, \\ M_{pl,Rd} &= W_{pl} f_y / \gamma_{M0} = 67\,500 \frac{235}{1,1} = 14,42 \text{ kNm}, \\ V_{pl,Rd} &= b t \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 12 \cdot 150 \frac{235}{1,1 \sqrt{3}} = 222 \text{ kN}, \end{aligned}$$



$$V_{Sd} = 15,6 \text{ kN} < 0,5 V_{pl,Rd} = 111 \text{ kN} \rightarrow \text{nie je potrebné redukovať momentovú návrhovú únosnosť vplyvom šmyku.}$$

Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} = 2,34 < M_{pl,Rd} = 14,42 \text{ kNm},$$

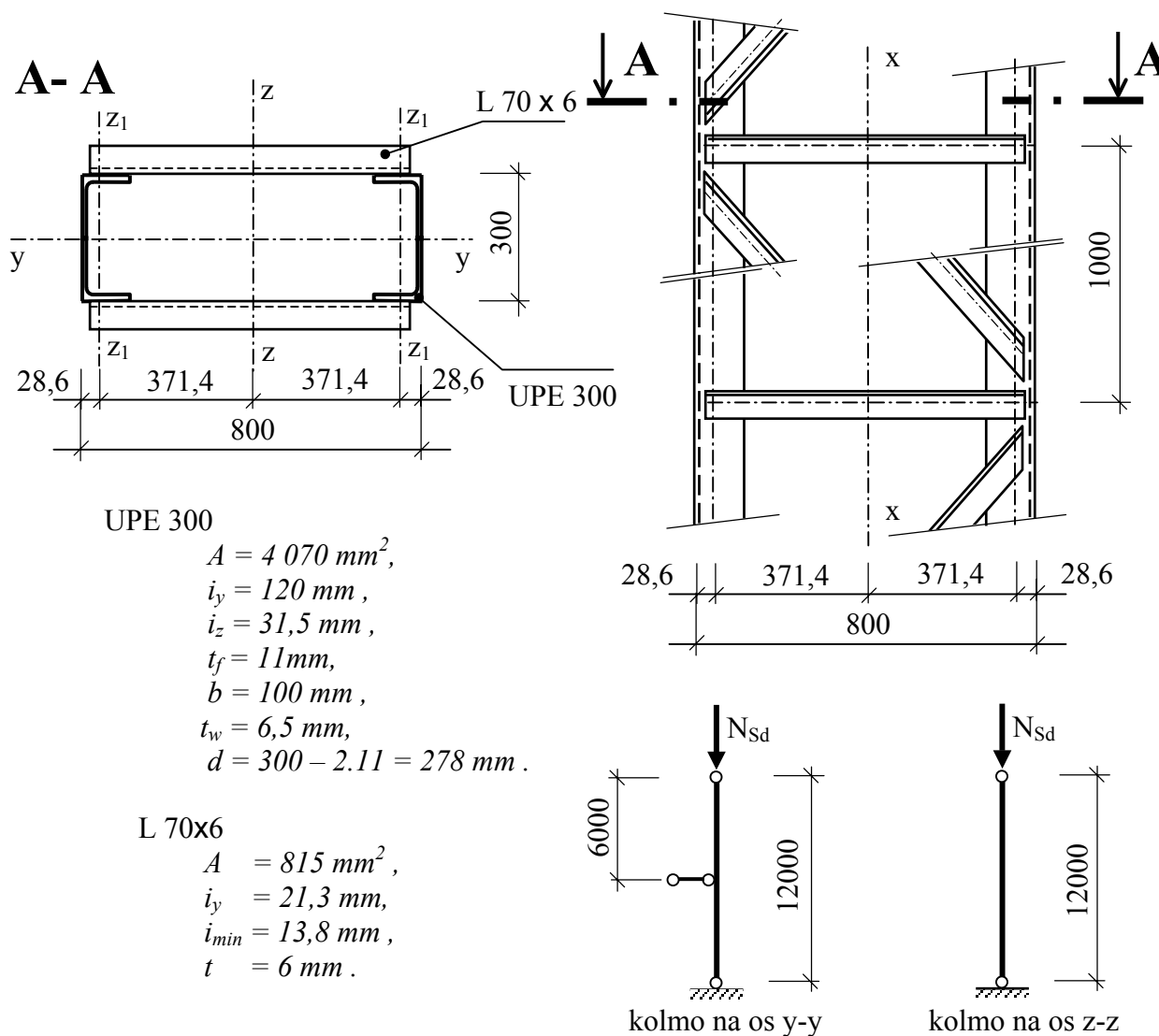
$$V_{Sd} = 15,6 \text{ kN} < V_{pl,Rd} = 222 \text{ kN}.$$

Rámová spojka vyhovuje.

3.4 Vzperná únosnosť priehradového členeného prúta

Vypočítajte návrhovú silu vzpernej únosnosti priehradového členeného stúpa výšky 12,0 mm z ocele S 235. Čiastkové prúty sú valcovaného prierezu UPE 300, priehradové spojenie je vytvorené z rovnoramenných uholníkov L 70x6.

Prierezové charakteristiky, tvar a uloženie prúta



Klasifikácia prierezu UPE 300

$$t_f = 11\text{ mm} < 40\text{ mm} \rightarrow f_y = 235\text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = \sqrt{235 / 235} = 1,0,$$

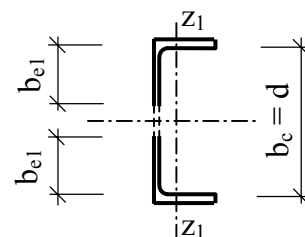
stena (tlak) : $d / t_w = 278 / 6,5 = 43 > \beta_1 = 40\varepsilon_m = 40 \rightarrow$ trieda 4,

pásnica (tlak) : $\beta_{01} = 9,1 < c / t_f = (100 - 6,5) / 11 = 8,5 < \beta_{01} = 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow$ trieda 1.

Prierez je triedy 4.

Efektívny prierez (s redukovanou stenou)

$$\begin{aligned}\beta_{I,NM} &= \beta_{IN} = 40 (235 / 235)^{0,5} = 40, \\ \beta &= 278 / 6,5 = 43, \\ \beta_{r,NM} &= 0,8\beta + 0,2\beta_{I,NM} = 0,8 \cdot 43 + 0,2 \cdot 40 = 42,4, \\ \rho_{NM} &= \beta_{I,NM} / \beta_{r,NM} = 40 / 42,4 = 0,94, \\ b_{c,eff} &= \rho_{NM} b_c = 0,94 \cdot 278 = 261 \text{ mm}.\end{aligned}$$

**Efektívna prierezová plocha (pásnice sú kompaktné)**

$$A_{eff} = A - (d - b_{c,eff}) t_w = 4070 - (278 - 261) 6,5 = 3959 \text{ mm}^2$$

Vybočenie kolmo na hmotnú os (y-y)

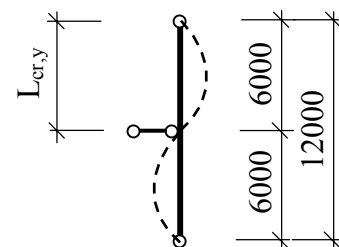
Členený prút pri vybočení kolmo na hmotnú os sa posudzuje ako prút celistvý. Únosnosť členeného prúta môžeme preto vyjadriť ako súčet únosností čiastkových prútov.

Vzperná dĺžka

$$L_{cr,y} = 0,5 \cdot 12\,000 = 6\,000 \text{ mm}.$$

Štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\begin{aligned}\lambda_y &= L_{cr} / i_y = 6\,000 / 120 = 50, \\ \lambda_1 &= 93,9 \sqrt{235 / f_y} = 93,9 (235 / 235)^{0,5} = 93,9, \\ \sqrt{\beta_A} &= \sqrt{A_{eff} / A} = (3959 / 4070)^{0,5} = 0,986, \\ \bar{\lambda} &= \lambda / \lambda_1 \sqrt{\beta_A} = (50 / 93,9) 0,986 = 0,53 \rightarrow \chi_y = 0,826 \text{ (tab. E.1, krivka c)}.\end{aligned}$$



kolmo na os y-y

Návrhová sila vzpernej únosnosti členeného prúta

$$N_{b,Rd} = 0,826 \cdot 2 \cdot 3959 \cdot 235 / 1,1 = 1397 \text{ kN}.$$

Pozn.: Členený prút sa neposudzuje na stratu stability skrútením, pretože prierezy čiastkových prútov spolu s priehradovinou vytvárajú uzavretý prierez.

Vybočenie kolmo na nehmotnú os (z-z)

Pri vybočení kolmo na nehmotnú os sa posudzuje čiastkový prút (v našom prípade prút s prierezom UPE 300), ktorého vzperná dĺžka sa rovná vzdialenosti styčníc a ktorý je

zaťažený silou $N_{f,Sd}$. Vo veľkosti sily $N_{f,Sd}$ sa prejavuje šmyková poddajnosť spojenia (priehradoviny) čiastkových prútov.

Vzperná dĺžka čiastkového prúta

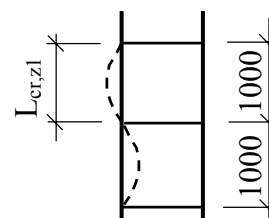
$$L_{cr} = 1\,000 \text{ mm (vzdialenosť styčnícov) .}$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_z = L_{cr} / i_{min} = 1\,000 / 31,5 = 32,$$

$$\bar{\lambda} = (32 / 93,9) 0,986 = 0,34 \rightarrow$$

$$\chi_z = 0,928 \text{ (tab. E.1, krivka c) .}$$



kolmo na os z_1-z_1

Pozn.: Vzperná únosnosť členeného prúta je v STN 73 1401 označená ako $N_{b,Rd}$. Označenie $N_{1,b,Rd}$ sme použili preto, aby sme odlišili únosnosť čiastkového prúta od únosnosti členeného prúta.

Vzperná únosnosť čiastkového prúta

$$N_{1,b,Rd} = 0,928 \cdot 3\,959 \cdot 235 / 1,1 = 784\,890 \text{ N .}$$

Únosnosť priehradového členeného prúta (prípustná sila na prút ako celok)

Vybočenie kolmo na os z-z

Vzperná dĺžka

$$L_{cr} = 1,0 \cdot 12\,000 = 12\,000 \text{ mm .}$$

Amplitúda ekvivalentnej imperfekcie

$$e_0 = L_{cr} / 500 = 12\,000 / 500 = 24 \text{ mm .}$$

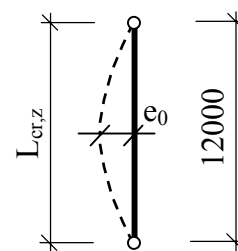
Efektívny moment zotrvačnosti

$$h_0 = 800 - 2 \cdot 28,6 = 742,8 \text{ mm ,}$$

$$I_{eff} = 0,5 A_f h_0^2 = 0,5 \cdot 4\,070 \cdot 742,8^2 = 1,1228 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 .$$

Kritická sila členeného prúta

$$N_{cr} = \pi^2 EI_{eff} / L_{cr}^2 = \pi^2 210\,000 \cdot 1,1228 \cdot 10^9 / 12\,000^2 = 16,16 \cdot 10^6 \text{ N .}$$



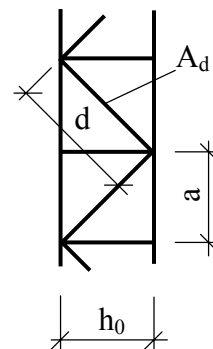
kolmo na os z-z

Šmyková tuhosť priehradového spojenia

$$d = (1000^2 + 742,8^2)^{0,5} = 1246 \text{ mm},$$

$$S_v = n E A_d a h_0^2 / d^3 = 2.210000.815.1000.742,8^2 / 1246^3 =$$

$$= 97,6.10^6 \text{ N}.$$



Za návrhovú silu únosnosti členeného prúta k nehmotnej osi budeme považovať prípustnú návrhovú silu N_{Sd} na prút ako celok, teda

$$N_{Sd} = N_{b,Rd},$$

pričom za návrhovú silu čiastkového prúta $N_{f,Sd}$ považujeme jeho únosnosť $N_{1,b,Rd}$

$$N_{f,Sd} = N_{1,b,Rd}.$$

Pôvodný vzťah $N_{f,Sd} = 0,5N_{Sd} + M_s/h_0$ sa po dosadení zmení na $N_{1,b,Rd} = 0,5N_{b,Rd} + M_s/h_0$, z ktorého vyjadríme návrhovú silu únosnosti členeného prúta

$$N_{b,Rd} = 2(N_{1,b,Rd} - M_s/h_0),$$

kde $M_s = N_{b,Rd} e_0 / h_0 / (1 - N_{b,Rd} / N_{cr} - N_{b,Rd} / S_v)$.

Po úprave dostávame rekurentný vzťah, v ktorom sú doplnené indexy označujúce iteračné kroky.

$$N_{b,Rd(i+1)} = 2N_{1,b,Rd} - 2N_{b,Rd(i)} e_0 / h_0 / (1 - N_{b,Rd(i)} / N_{cr} - N_{b,Rd(i)} / S_v).$$

Ako vstupnú hodnotu únosnosti $N_{b,Rd}$ v prvom kroku ($i=1$) volíme

$$N_{b,Rd(1)} = 2N_{1,b,Rd} / (1 + 2e_0 / h_0) = 2.784890 / (1 + 2.24 / 742,8) = 1474,5 \text{ kN}.$$

Po dosadení do rekurentného vzťahu dostávame

$$N_{b,Rd(2)} = 2.784890 - 2.1474498 \cdot 24 / 742,8 / (1 - 1474498 / 16,16.10^6 -$$

$$- 1474498 / 97,6.10^6) = 1463,2 \text{ kN}.$$

Kontrola presnosti: $N_{b,Rd(1)} / N_{b,Rd(2)} = 1474,5 / 1463,2 = 1,008$.

Odlíšnosť hodnôt je zanedbateľná (menej ako 1%), takže návrhová sila únosnosti členeného prúta vzhľadom na nehmotnú os z-z

$$N_{b,Rd} = 1463,2 \text{ kN}.$$

Vzperná únosnosť členeného prúta

$$N_{b,Rd} = \min(1397; 1463) = 1397 \text{ kN}.$$

Posúdenie prvkov priehradového spojenia čiastkových prútov

Prvky spojenia posúdime na priečnu silu vyplývajúcu z únosnosti členeného prúta, preto moment M_s určíme pre $N_{Sd} = N_{b,Rd}$

$$\begin{aligned} M_s &= N_{Sd} e_0 / (1 - N_{Sd} / N_{cr} - N_{Sd} / S_v) = \\ &= 1397.10^3 \cdot 24 / [1 - 1397.10^3 / (16,16.10^6) - 1397.10^3 / (97,6.10^6)] = \\ &= 37,3 \text{ kNm} . \end{aligned}$$

Priečna sila na konci prúta

$$V_s = \pi M_s / L_{cr} = \pi 37,3 / 12,0 = 9,8 \text{ kN} .$$

Osová sila v krajnej diagonále

$$N_d = V_s d / (n h_0) = 9800 \cdot 1246 / (2 \cdot 742,8) = 8,2 \text{ kN} .$$

Klasifikácia prierezu diagonály L 70.6

$$\begin{aligned} t &= 6 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = \sqrt{235 / 235} = 1,0 , \\ \beta_{02} &= 10 < c / t = 70 / 6 = 12 < \beta_1 = 15.1,0 = 15 \rightarrow \text{trieda 3, } \beta_A = 1,0 . \end{aligned}$$

Vzperná dĺžka, maximálna štíhlosť diagonály a súčiniteľ vzperu

$$\begin{aligned} L_{cr} &= d = 1246 \text{ mm} , \quad \lambda = L_{cr} / i_{min} = \frac{1246}{13,8} = 90, \quad \lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / 235} = 93,9 , \\ \bar{\lambda} &= 90 \sqrt{1} / 93,9 = 0,96 \rightarrow \chi = 0,5635 \text{ (tab. E.1, krivka c) .} \end{aligned}$$

Návrhová sila únosnosti diagonály L 70 x 6

$$N_{b,Rd} = 0,5635 \cdot 1,0 \cdot 815 \cdot 235 / 1,1 = 98113 \text{ N} = 98,1 \text{ kN}$$

Podmienka spoľahlivosti

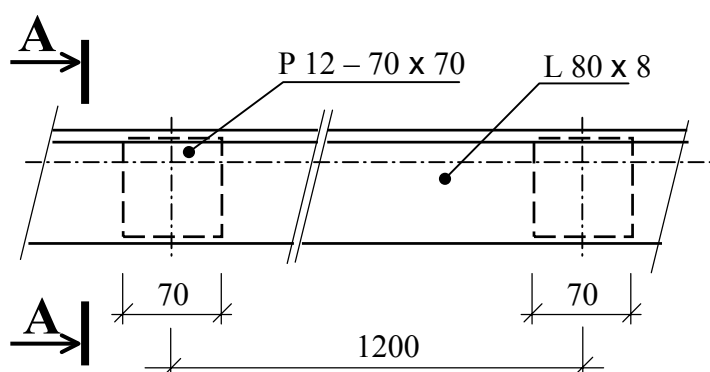
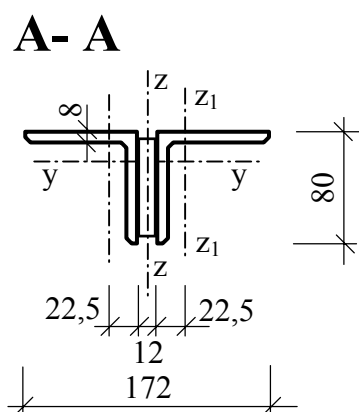
$$N_d = 8,2 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 98,1 \text{ kN}$$

Diagonála vyhovuje.

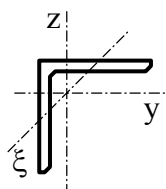
3.5 Vzperná únosnosť zloženého členeného prúta

Posúďte tlačný zložený členený prút, ktorý je vytvorený z dvoch uholníkov L 80 x 8 z ocele S 235. Dĺžka prúta je 3 600 mm. Návrhová tlaková sila $N_{Sd} = 150$ kN. Vložky sú umiestnené na koncoch a v tretinách dĺžky prúta.

Prierezové charakteristiky, tvar a uloženie prúta



L 80 x 8



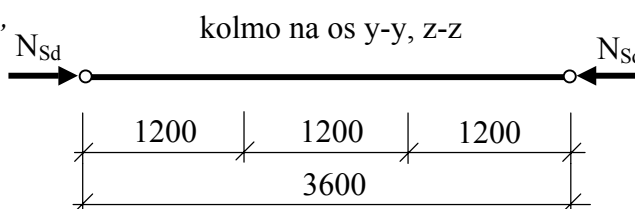
$$A = A_f = 1230 \text{ mm}^2,$$

$$I_z = I_y = I_f = 0,725 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$i_z = i_y = 24,3 \text{ mm},$$

$$i_{\min} = i_{\xi} = 15,7 \text{ mm},$$

$$W_{el,z1(\min)} = 12,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3.$$



Klasifikácia prierezu L 80 x 8

$$t_f = 8,0 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = \sqrt{235 / 235} = 1,0,$$

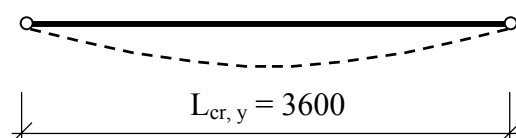
$$\text{štíhlosť: } \beta = \frac{h}{t} = \frac{80}{8} = 10 = \beta_{02} = 10\varepsilon_m = 10 \rightarrow \text{trieda 2.}$$

Prierez je triedy 2.

Vybočenie kolmo na os y-y

Vzperná dĺžka

$$L_{cr,y} = 3\,600 \text{ mm}.$$



Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$I_y = 2I_{yf}, \quad A = 2A_f \rightarrow i_y = i_{y1} = 24,3 \text{ mm},$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3600}{24,3} = 148,1, \quad \lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9, \quad \beta_A = 1,0,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \cdot \sqrt{\beta_A} = \frac{148,1}{93,9} \sqrt{1} = 1,57 \rightarrow \chi = 0,2929 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$

Návrhová normálová sila vzpernej únosnosti prúta

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} = 0,2929 \cdot 1,0 \cdot 2 \cdot 1230 \frac{235}{1,1} = 153,9 \text{ kN}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 150,0 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 153,9 \text{ kN}.$$

Prút vyhovuje.

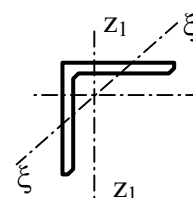
Vybočenie kolmo na os z-z

Spôsob posúdenia zloženého členeného prúta závisí od štíhlosti čiastkového prúta medzi vložkami. Ak platí

$$a_j = L/3 - 2,35 = 1200 - 70 = 1130 \text{ mm},$$

$$a_j = 1130 \text{ mm} > 15 i_{min} = 15 i_\xi = 15 \cdot 15,7 \text{ mm} = 235,5 \text{ mm},$$

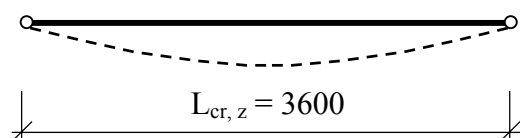
zložený prút sa musí posudzovať ako členený rámový prút.



Posúdenie uprostred vzpernej dĺžky zloženého členeného prúta

Vzperná dĺžka

$$L_{cr,z} = 3600 \text{ mm}.$$

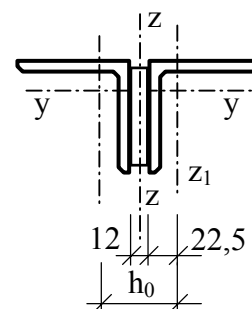


Efektívny moment zotrvačnosti

$$h_0 = 22,5 \cdot 2 + 12 = 57 \text{ mm},$$

$$I_1 = 0,5 A_f h_0^2 + 2 I_f = 0,5 \cdot 1230 \cdot 57^2 + 2 \cdot 0,725 \cdot 10^6 =$$

$$= 3,448135 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$



$$i_0 = \sqrt{\frac{0,5I_1}{A_f}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 3,448135 \cdot 10^6}{1230}} = 37,43 \text{ mm},$$

$$\lambda = \frac{L_{cr,z}}{i_0} = \frac{3600}{37,43} = 96,15,$$

$$75 < \lambda = 96,15 < 150 \rightarrow \mu = 2 - \frac{\lambda}{75} = 2 - \frac{96,15}{75} = 0,718,$$

$$I_{eff} = 0,5A_f h_0^2 + 2\mu I_f = 0,5 \cdot 1230 \cdot 57^2 + 2 \cdot 0,718 \cdot 0,725 \cdot 10^6 = 3,039235 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Kritická sila zloženého členeného prúta

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 3,039235 \cdot 10^6}{3600^2} = 486,0 \text{ kN}.$$

Šmyková tuhosť spojenia

$$S_v = 2\pi^2 EI_f / a^2 = \frac{2\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 0,725 \cdot 10^6}{1200^2} = 2087,0 \text{ kN}.$$

Pozn. : Poddajnosť vložiek je zanedbateľná.

Amplitúda ekvivalentnej imperfekcie

$$e_0 = L_{cr,z} / 500 = 3600 / 500 = 7,2 \text{ mm}.$$

Ohybový moment (vyplývajúci z teórie II. rádu)

$$M_s = N_{Sd} e_0 / \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} - \frac{N_{Sd}}{S_v} \right) = \frac{150 \cdot 0,0072}{1 - \frac{150}{486} - \frac{150}{2087}} = 1,743 \text{ kNm}.$$

Návrhová osová sila čiastkového prúta

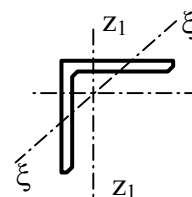
$$N_{f,Sd} = 0,5 \left(N_{Sd} + M_s h_0 \frac{A_f}{I_{eff}} \right) = 0,5 \left(150 + 1,743 \cdot 0,057 \frac{1230 \cdot 10^{-6}}{3,039235 \cdot 10^{-6}} \right) = 95,1 \text{ kN}.$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu čiastkového prúta

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{i_{min}} = \frac{a}{i_{\xi}} = \frac{1200}{15,7} = 76,4,$$

$$(\beta_A = 1; \lambda_1 = 93,9),$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{76,4}{93,9} = 0,814 \rightarrow \chi = 0,6527 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$



Návrhová sila vzpernej únosnosti čiastkového prúta a podmienka spoľahlivosti

$$N_{f,Sd} = 95,1 \text{ kN} < N_{b,Rd} = \chi \beta_A A_f \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,6527 \cdot 1,0 \cdot 1230 \cdot \frac{235}{1,1} = 171,5 \text{ kN}.$$

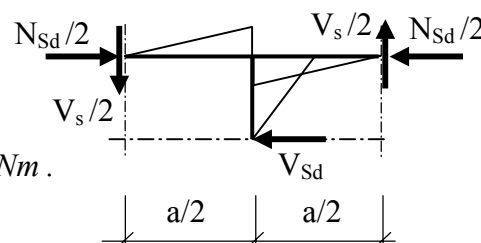
Zložený prút uprostred vzpernej dĺžky vyhovuje.

Posúdenie čiastkového prúta na konci, mimo miesta vložky

Prút je namáhaný tlakovou silou $N_{f,Sd} = N_{Sd} / 2 = 75 \text{ kN}$ a ohybovým momentom $M_{z,Sd}$ vyplývajúcim z priečnej sily V_s na konci zloženého prúta

$$V_s = \pi M_s / L_{cr} = \pi 1,743 / 3,6 = 1,52 \text{ kN},$$

$$M_{z,Sd} = (V_s / 2) \frac{a}{2} = (1,52 / 2) \frac{1,2}{2} = 0,456 \text{ kNm}.$$



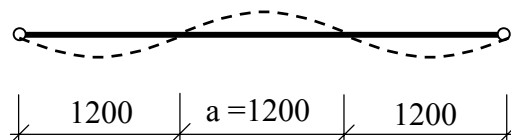
Vzperná dĺžka čiastkového prúta sa rovná osovej vzdialenosti vložiek. Vybočenie čiastkového prúta uvažujeme v smere pôsobenia ohybového momentu $M_{z,Sd}$

$$L_{cr} = a = 1200 \text{ mm}.$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_z = \frac{a}{i_z} = \frac{1200}{24,3} = 49,4,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{49,4}{93,9} = 0,53 \rightarrow \chi = 0,8261 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$



Prierez posúdime v pružnej oblasti pôsobenia.

Pozn.: Posúdenie v plastickej oblasti je možné vykonať v prípade, že prierez nevyhovuje v pružnej oblasti pôsobenia. Je potrebné však preveriť, či prierez spĺňa požiadavky na triedu 1 alebo 2.

Súčiniteľ ekvivalentného konštantného ohybového momentu.

Z priebehu ohybových momentov vyplýva, že $\psi = -1$.

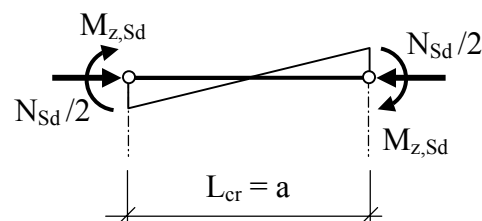
$$\beta_{Mz} = 1,8 - 0,7\psi = 1,8 - 0,7(-1) = 2,5,$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z(2\beta_{Mz} - 4) = 0,53(2 \cdot 2,5 - 4) = 0,526 < 0,9,$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{f,Sd}}{\chi_z A_f f_y} = 1 - \frac{0,526 \cdot 75 \cdot 10^3}{0,8261 \cdot 1230 \cdot 235} = 0,835 < 1,5.$$

Podmienka spoľahlivosti pri interakcii namáhania tlakovou silou a ohybovým momentom

$$\begin{aligned} & \frac{N_{f,Sd}}{\chi_{min} \frac{A_f f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} = \\ & = \frac{75 \cdot 10^3}{0,6527 \cdot 1230 \frac{235}{1,1}} + \frac{0,835 \cdot 0,456 \cdot 10^6}{12,6 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} = 0,437 + 0,141 = 0,578 < 1,0. \end{aligned}$$



Čiastkový prút vyhovuje.

Posúdenie čiastkového prúta v mieste koncovej vložky

V mieste vložky je ohybový moment od vybočenia čiastkového prúta rovný nule, preto sa vplyv vybočenia neprejaví.

Podmienka spoľahlivosti pri interakcii namáhania tlakovou silou a ohybovým momentom

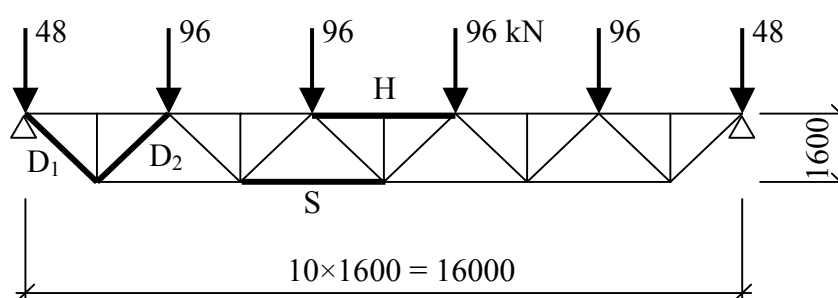
$$\begin{aligned} & \frac{N_{f,Sd}}{A_f f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Sd}}{W_{el,z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{75 \cdot 10^3}{1230 \frac{235}{1,1}} + \frac{0,456 \cdot 10^6}{12,6 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} = 0,285 + 0,169 = 0,454 < 1,0. \end{aligned}$$

Čiastkový prút v mieste koncovej vložky vyhovuje.

3.6 Návrh prútov priehradového väzníka

Nadimenzujte strešný priehradový väzník z ocele S 235 s rozpätím 16,0 m a výškou 1,6 m. Všetky prúty sú z valcovaných rovnoramenných uholníkov. Horný pás je z dvoch uholníkov navzájom zvarovaných bez medzery. Spodný pás je z jedného uholníka v strechovitej polohe. Medzipásové prúty majú zložené prierezy z dvojíc uholníkov, k hornému a spodnému pásu sú pripojené pomocou styčkových plechov zvarmi. S oslabením prútov otvormi pre montážny styk sa neuvažuje.

Tvar a uloženie väzníka



Vnútorne sily (maximálne osové sily vo zvýraznených prútoch)

tlačený (horný) pás	$H = 576 \text{ kN}$,
ťahaný (spodný) pás	$S = 576 \text{ kN}$,
ťahaná (zostupná) diagonála	$D_1 = 271 \text{ kN}$,
tlačená (vzostupná) diagonála	$D_2 = 271 \text{ kN}$.

Potrebnú prierezovú plochu ťahaných prútov je možné priamo určiť z podmienky spoľahlivosti. Podobne sa dá postupovať aj pri tlačených prútoch, je však potrebné odhadnúť veľkosť súčiniteľa vzperu (bežne $\chi = 0,5 \sim 0,7$).

Pri voľbe veľkosti prierezu ťahaných prútov je potrebné brať do úvahy jeho prípadné konštrukčné oslabenie otvormi pre montážny styk a prispôsobiť tomu zväčšenie vypočítanej potrebnej prierezovej plochy a pri posúdení brať do úvahy aj iný súčiniteľ spoľahlivosti materiálu.

Horný pás

$$N_{Sd} = 576 \text{ kN}.$$

Súčiniteľ vzperu odhadneme hodnotou $\chi = 0,6$. Potrebná prierezová plocha bude

$$A_{potr} = N_{Sd} \gamma_{M1} / (f_y \chi) = 576 \cdot 1,1 / (235 \cdot 0,6) = 4485 \text{ mm}^2$$

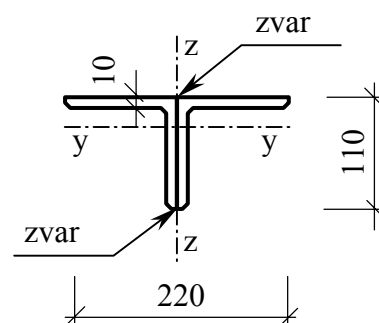
Volíme prierez 2L 110 x 10 .

2 L 110 x 10

$$A = 4\,240 \text{ mm}^2,$$

$$i_y = 33,6 \text{ mm},$$

$$i_z = 45,5 \text{ mm}.$$



Klasifikácia prierezu

$$t = 10 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \gamma_{M1} = 1,1,$$

$$\varepsilon_m = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 235} = 1,0,$$

$$\beta_{02} = 10 < h / t = 110 / 10 = 11 < \beta_1 = 15 \varepsilon_m = 15,0 \rightarrow \text{trieda 3}, \beta_A = 1,0.$$

Vybočenie kolmo na os y-y (v rovine väzníka)

Vzperná dĺžka tlačeného pásu priehradového nosníka pri vybočení v rovine nosníka je daná teoretickou vzdialenosťou styčnícok $L_{cr,y} = 1\,600 \text{ mm}$.

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_y = L_{cr,y} / i_y = 1600 / 33,6 = 48,$$

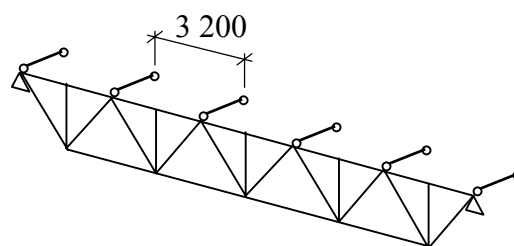
$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\beta_A} / \lambda_1 = 48 \sqrt{1} / 93,9 = 0,52 \rightarrow \chi_y = 0,8317$$

(tab. E.1, krivka c, STN 73 1401).

Vybočenie kolmo na os z-z (z roviny väzníka)

Pri vybočení z roviny je vzperná dĺžka daná vzdialenosťou susedných bodov pásu zabezpečených proti posunutiu z roviny nosníka. Zvyčajne sú to miesta uloženia väzníc, teda pôsobiská osamelých bremien, za predpokladu, že každá väznica je súčasťou stuženia v strešnej rovine

$$L_{cr,z} = 3\,200 \text{ mm}.$$



Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_z = L_{cr,z} / i_z = 3\,200 / 45,5 = 71,$$

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\beta_A} / \lambda_1 = 71 \sqrt{1} / 93,9 = 0,76 \rightarrow \chi_z = 0,6873$$

(tab. E.1, krivka c, STN 73 1401).

Rozhodujúci súčiniteľ vzperu

$$\chi = \min(0,8317; 0,6873) = 0,6873.$$

Návrhová sila únosnosti horného pásu

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} = 0,6873 \cdot 1,0 \cdot 4\,240 \cdot 235 / 1,1 = 622\,568 \text{ N}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 576 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 622 \text{ kN}.$$

Horný pás väzníka vyhovuje (využitie $575/622 \cdot 100 = 92\%$).

Pozn.: Pri posúdení prierezov je uvedené aj využitie únosnosti navrhnutého prierezu, z ktorého sa dá zistiť najviac namáhaný prvok, a tým aj prípadné prípustné zväčšenie zaťaženia na väzník ako celok.

Spodný pás

$$N_{Sd} = 576 \text{ kN}.$$

Návrh prierezu

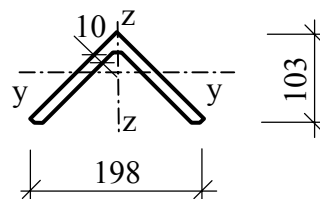
$$A_{potr.} = N_{Sd} \gamma_{M0} / f_y = 576\,000 \cdot 1,1 / 235 = 2\,692 \text{ mm}^2$$

Volíme prierez L 140 x 10 .

L 140 x 10

$$A = 2\,720 \text{ mm}^2,$$

$$i_{min} = 27,8 \text{ mm}.$$



Návrhová únosnosť spodného pásu

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 2\,720 \cdot 235 / 1,1 = 581 \text{ kN}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 576 \text{ kN} < N_{t,Rd} = 581 \text{ kN}.$$

Spodný pás väzníka vyhovuje (využitie $575/581 \cdot 100 = 99\%$).

Ťahaná diagonála

$$N_{Sd} = 271 \text{ kN}.$$

Návrh prierezu

$$A_{potr.} = N_{Sd} \gamma_{M0} / f_y = 271 \cdot 1,1 / 235 = 1269 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{volíme prierez } 2L \ 60 \times 6.$$

$$2L \ 60 \times 6$$

$$A = 2 \cdot 691 = 1382 \text{ mm}^2.$$

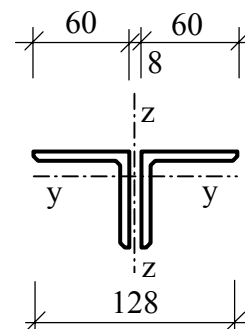
Návrhová únosnosť ťahanej diagonály

$$N_{t,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 1382 \cdot 235 / 1,1 = 295245 \text{ N}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 271 < N_{t,Rd} = 295 \text{ kN}.$$

Ťahaná diagonála vyhovuje (využitie $271/295 \cdot 100 = 92\%$).

**Tlačená diagonála**

$$N_{Sd} = 271 \text{ kN}.$$

Návrh prierezu (súčiniteľ vzperu odhadneme hodnotou $\chi = 0,6$)

$$A_{potr.} = N_{Sd} \gamma_{M1} / f_y / \chi = 271 \cdot 1,1 / 235 / 0,6 = 2115 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{volíme prierez } 2L \ 90 \times 8.$$

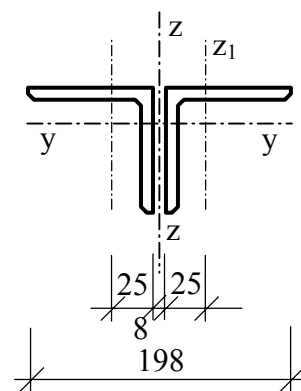
$$2L \ 90 \times 8$$

$$2A_f = 2 \cdot 1390 = 2780 \text{ mm}^2,$$

$$i_y = 27,5 \text{ mm}; i_{min} = 17,7 \text{ mm},$$

$$I_f = 1,05 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$h_0 = 2 \cdot 25,0 + 8 = 58 \text{ mm}, \text{ vložky v tretinách rozpätia.}$$

**Klasifikácia prierezu**

$$\beta_{02} = 10 < b/t = 90/8 = 11,3 < \beta_1 = 15,1,0 \rightarrow \text{trieda } 3, \beta_A = 1,0.$$

Vybočenie kolmo na hmotnú os y-y (v rovine väzníka)

Vzperná dĺžka medzipásových (výplňových) prútov pri vybočení v rovine nosníka sa rovná vzdialenosti stredov prípojov (približne 90% teoretickej vzdialenosti styčníc)

$$L_{cr,y} = 0,9\sqrt{2 \cdot 1600^2} \approx 0,9 \cdot 2263 = 2070 \text{ mm}.$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_y = 2070 / 27,5 = 76,$$

$$\bar{\lambda} = 76\sqrt{1,0} / 93,9 = 0,81 \rightarrow \chi = 0,6559 \text{ (tab. E.1, krivka c).}$$

Návrhová vzperná únosnosť tlačenej diagonály

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} = 0,6559 \cdot 2780 \cdot 235 / 1,1 = 389\,544 \text{ N}.$$

Posúdenie pri vybočení kolmo na hmotnú os

$$N_{Sd} = 271 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 389 \text{ kN}.$$

Tlačená diagonála vyhovuje (využitie $271/389 \cdot 100 = 70\%$).

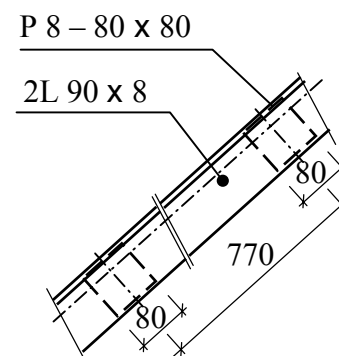
Vybočenie kolmo na nehmotnú os z-z (z roviny väzníka)

Vzdialenosť vložiek (rozmery vložiek $80 \times 80 \times 8 \text{ mm}$)

$$a = L_{teor} / 3 = \sqrt{2 \cdot 1600^2} / 3 \doteq 2300 / 3 = 770 \text{ mm},$$

$$a_j = 770 - 2 \cdot 40 = 690 \text{ mm} > 15 i_{min} = 15 \cdot 17,7 = 266 \text{ mm} \rightarrow$$

posudzujeme ako členený rámový prút.

**Posúdenie uprostred vzpernej dĺžky zloženého členeného prúta**

Vzperná dĺžka medzipásových (výplňových) prútov pri vybočení z roviny nosníka je rovná teoretickej vzdialenosti styčníc.

$$L_{cr,z} = 2300 \text{ mm}, \quad a = 2300 / 3 \approx 770 \text{ mm}.$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu čiastkového prúta

$$\lambda_{1,max} = a / i_{min} = 770 / 17,7 = 44,$$

$$\bar{\lambda} = 44\sqrt{1,0} / 93,9 = 0,47 \rightarrow \chi_{min} = 0,8596 \text{ (tab. E.1, krivka c, STN 73 1401).}$$

Návrhová sila únosnosti čiastkového prúta

$$N_{I,b,Rd} = \chi_{min} A f_y / \gamma_{MI} = 0,8596 \cdot 1\,390 \cdot 235 / 1,1 = 255\,262 \text{ N}.$$

Efektívny moment zotrvačnosti

$$I_I = 0,5 A_f h_0^2 + 2I_f = 0,5 \cdot 1\,390 \cdot 58^2 + 2 \cdot 1,05 \cdot 10^6 = 4,4379 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$i_0 = \sqrt{0,5 I_f / A_f} = \sqrt{0,5 \cdot 4,4379 \cdot 10^6 / 1390} = 39,9 \text{ mm},$$

$$\lambda_z = 2\,300 / 39,9 = 58 < 75 \rightarrow \mu = 1 \rightarrow I_{eff} = I_I.$$

Šmyková tuhosť spojenia

$$S_v = 2\pi^2 E I_f / a^2 = 2\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 1,05 \cdot 10^6 / 770^2 = 7,341 \cdot 10^6 \text{ N}.$$

Amplitúda ekvivalentnej imperfekcie

$$e_0 = 2\,300 / 500 = 4,6 \text{ mm}.$$

Kritická sila členeného prúta

$$N_{cr} = \pi E I_{eff} / L_{cr,z}^2 = \pi \cdot 210\,000 \cdot 4,43798 \cdot 10^6 / 2\,300^2 = 553\,476 \text{ N}.$$

Ohybový moment (vyplývajúci z teórie II. rádu)

$$\begin{aligned} M_s &= N_{Sd} e_0 / (1 - N_{Sd} / N_{cr} - N_{Sd} / S_v) = \\ &= 271\,000 \cdot 4,6 / (1 - 271\,000 / 553\,476 - 271\,000 / 7,341 \cdot 10^6) = 2,634 \cdot 10^6 \text{ Nmm}. \end{aligned}$$

Návrhová sila pôsobiaca na čiastkový prút

$$\begin{aligned} N_{f,Sd} &= 0,5 (N_{Sd} + M_s h_0 A_f / I_{eff}) = \\ &= 0,5 (271\,000 + 2,634 \cdot 10^6 \cdot 58 \cdot 1\,390 / 4,4379 \cdot 10^6) = 160 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{f,Sd} = 160 \text{ kN} < N_{I,b,Rd} = 255 \text{ kN}.$$

Tlačená diagonála vyhovuje (využitie $160/255 = 0,63$).

Posúdenie na konci zloženého členeného prúta

Priečna sila

$$V_s = \pi M_s / L_{cr,z} = \pi 2,634 \cdot 10^6 / 2300 = 3598 \text{ N}.$$

Vnútorne sily v čiastkovom prúte

$$M_{z,Sd} = V_s a/4 = 3598 \cdot 770/4 = 0,693 \cdot 10^6 \text{ Nmm},$$

$$N_{f,Sd} = 271000 / 2 = 135500 \text{ N}.$$

Podmienka spoľahlivosti pri interakcii namáhania tlakovou silou a ohybovým momentom

$$\begin{aligned} & \frac{N_{f,Sd}}{\chi_{min} \frac{A_f f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{f,z} f_y / \gamma_{M1}} = \\ & = \frac{135,5 \cdot 10^3}{0,6559 \cdot 1390 \frac{235}{1,1}} + \frac{1,0 \cdot 0,693 \cdot 10^6}{16,2 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} = 0,696 + 0,200 = 0,896 < 1,0. \end{aligned}$$

Diagonála vyhovuje (využitie je 90 %).

Pozn.: Pri posúdení interakcie namáhania, kvôli zjednodušeniu výpočtu, nebol uvážený ekvivalentný ohybový moment, ktorý je pre daný priebeh ohybového momentu (prút zaťažený koncovými momentmi s opačnými znamienkami) vždy menší ako skutočný ohybový moment. Jeho zohľadnenie vo výpočte je účelné urobiť až vtedy, keď podmienka spoľahlivosti pri zjednodušenom postupe nie je splnená.

Úplný postup pri posúdení interakcie ohybu a tlaku je uvedený v príklade 3.5.

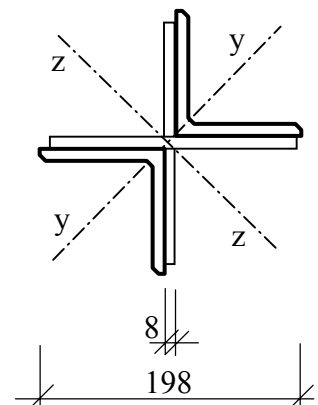
Z hľadiska údržby konštrukcie je vhodnejšie, ak medzipásové prúty sú navrhnuté ako krížové členené prúty.

Alternatívny návrh prierezu tlačenej diagonály

Vzhľadom na to, že pôvodný prierez 2L 90 x 8 má využitie len 70%, volíme prierez 2L 90 x 6

$$A = 2A_f = 2 \cdot 1050 = 2100 \text{ mm}^2,$$

$$i_{1,min} = 17,9 \text{ mm},$$



$$i_y = i_{max} = 34,8 \text{ mm} .$$

Klasifikácia prierezu

$$\beta_{02} = 10,1 < b/t = 90/6 = 15 = \beta_1 = 15\epsilon_m \rightarrow \text{trieda 3} \rightarrow \beta_A = 1,0 .$$

Vzperné dĺžky a vzdialenosti vložiek

Ak sú vzperné dĺžky prúta s krížovým prierezom rovnaké vzhľadom na obidve osi a štíhlosť čiastkového prúta medzi vložkami nepresiahne hodnotu 70, potom stačí posudzovať prút ako celistvý na vybočenie kolmo na hmotnú os

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 2\,300 \text{ mm},$$

$$a = 770 \text{ mm} < 70 i_{l,min} = 70 \cdot 17,9 = 1\,253 \text{ mm} \rightarrow \text{posudzujeme ako celistvý prút na vybočenie kolmo na hmotnú os.}$$

Vybočenie kolmo na os y-y (hmotná os)

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu

$$\lambda_y = L_{cr,y}/i_y = 2\,300/34,8 = 67,$$

$$\bar{\lambda}_y = 67\sqrt{1}/93,9 = 0,72 \rightarrow \chi = 0,7123 \text{ (tab. E1, krivka c).}$$

Návrhová vzperná únosnosť tlačenej diagonály

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} = 0,7123 \cdot 2\,100 \cdot 235 / 1,1 = 319\,563 \text{ N} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$N_{Sd} = 271 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 319 \text{ kN} .$$

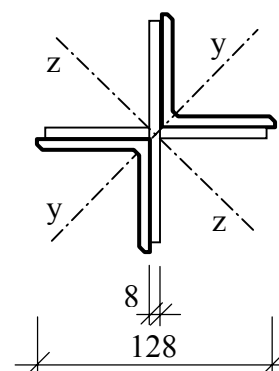
Diagonála vyhovuje (vyžitie $271/319 \cdot 100 = 85\%$) .

Alternatívny prierez ťahanej diagonály

Pôvodný prierez 2L 60 x 6 má prijateľné využitie 92%, preto jeho veľkosť nebudeme meniť. Zmení sa len tvar prierezu na krížový.

$$2 \text{ L } 60 \times 6$$

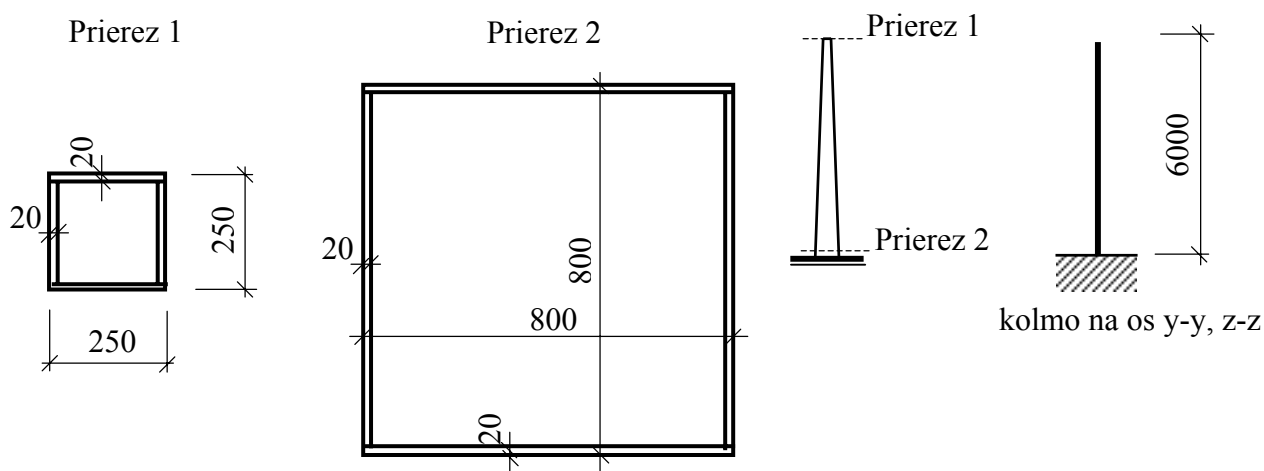
$$A = 2.691 = 1\,382 \text{ mm}^2 .$$



3.7 Vzperná únosnosť prúta s premenným prierezom

Určte návrhovú silu vzpernej únosnosti centricky tlačeného prúta z ocele S 235 s premenným prierezom.

Rozmery prierezov, tvar a uloženie prúta



Klasifikácia prierezu

$$t_w = 20 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \quad \gamma_{M1} = 1,1,$$

$$\varepsilon_m = (235/235)^{0,5} = 1,0,$$

$$\text{stena prierezu 1 : } \frac{d_1}{t_w} = \frac{(250 - 2 \cdot 20)}{20} = 12,5 < \beta_{01} = 30 \quad \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{stena prierezu 2 : } \beta_{02} = 33 < \frac{d_2}{t_w} = \frac{800 - 2 \cdot 20}{20} = 38 < \beta_1 = 40 \quad \rightarrow \text{trieda 3.}$$

Prierez je triedy 3.

Výpočet je vykonaný podľa časti C.6 (príloha C, STN 73 1401)

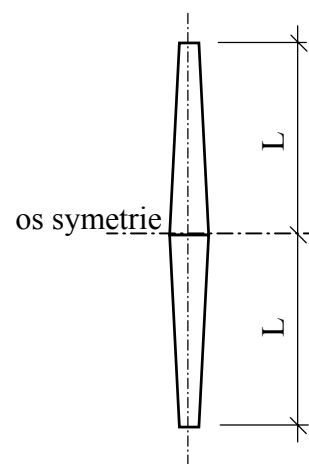
Výška (šírka) prierezu v mieste x (smerom od voľného konca)

$$h_{(x)} = 250 + 0,091667x.$$

Plocha prierezu v mieste x

$$\begin{aligned} A_{(x)} &= (250 + 0,091667x)20,2 + (250 + 0,091667x - 40)20,2 = \\ &= 18\,400 + 7,33336x \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Časť C.6 STN 73 1401 umožňuje určiť súčiniteľ vzperu len pre prút obojstranne kĺbovo uložený. V určitých prípadoch (s ohľadom na zmenu prierezu a tvar vybočenia) je možné tento postup použiť aj na konzolový prút. Fiktívny kĺbovo uložený prút však musí byť súmerný vzhľadom na os prechádzajúcu stredom jeho dĺžky (výšky), ktorá sa rovná dvojnásobku dĺžky (výšky) konzoly.



Efektívna dĺžka prúta (vybočenie kolmo na os y-y a z-z)

$$L_y = L_z = 2L = 12\,000\text{ mm},$$

Momenty zotrvačnosti najväčšieho a najmenšieho prierezu

$$I_{max} = 2 \frac{I}{12} 800 \cdot 20^3 + 2 \cdot 800 \cdot 20 \cdot 390^2 + 2 \frac{I}{12} 20 \cdot 760^3 = 6,3315 \cdot 10^9 \text{ mm}^4,$$

$$I_{min} = 2 \frac{I}{12} 250 \cdot 20^3 + 2 \cdot 250 \cdot 20 \cdot 115^2 + 2 \frac{I}{12} 20 \cdot 210^3 = 1,63453 \cdot 10^8 \text{ mm}^4.$$

Vybočenie kolmo na os y-y, z-z

Premennivý prierez má tvar 3 (obr. C.8, STN 73 1401). Vzhľadom na tvar vybočenia, zmena prierezu prúta je typu B, pričom $\kappa = 0$ (obr. C.9, STN 73 1401).

Súčiniteľ štíhlosti γ prúta premenného prierezu

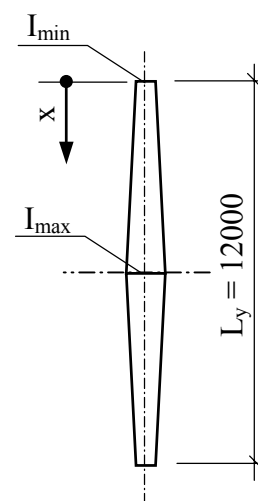
$$I_{min}/I_{max} = 0,025 \rightarrow \gamma = 1,877.$$

Súčiniteľ γ bol určený lineárnou interpoláciou medzi hodnotami

$$\text{pre } I_{min}/I_{max} = 0,01 \rightarrow \gamma = 1,97,$$

$$\text{pre } I_{min}/I_{max} = 0,1 \rightarrow \gamma = 1,41$$

(STN 73 1401, tab. C.3, riadok 3, stĺpec B, $\kappa = 0$).



Štíhlosť a súčiniteľ vzperu prúta s premenným prierezom

$$\lambda_{e(x)} = \gamma L_y \sqrt{\frac{A_{(x)}}{I_{max}}} = 1,877 (2 \cdot 6\,000) \sqrt{\frac{18\,400 + 7,33336x}{6,3315 \cdot 10^9}}$$

$$\bar{\lambda}_{e(x)} = \frac{\lambda_{e(x)}}{\lambda_1} = \frac{1,877 \cdot 12\,000}{93,9} \sqrt{\frac{18\,400 + 7,33336x}{6,3315 \cdot 10^9}} \rightarrow \chi_{e(x)} \text{ (tab. E.1, krivka b),}$$

$$\chi_{(x)} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1}{\chi_{e(x)}} - 1 \right) \sin \frac{\pi x}{L_y} \right]}.$$

Návrhová sila vzpernej únosnosti v mieste x

$$N_{b,Rd(x)} = \chi_{(x)} A_{(x)} f_y / \gamma_{M1}$$

Výpočet návrhovej sily vzpernej únosnosti pre zvolené výškové úrovne (smerom od voľného konca) bol vykonaný v tab. 3.1

Tab. 3.1

x [mm]	$A_{(x)}$ [mm ²]	$\bar{\lambda}_{e(x)}$	$\chi_{e(x)}$	$\chi_{(x)}$	$N_{b,Rd(x)}$ [kN]
0	18 400	0,41	0,9221	1,0	3 931
1 000	25 733	0,49	0,8886	0,968	5 321
2 000	33 067	0,55	0,8614	0,9255	6 538
3 000	40 400	0,61	0,8320	0,8750	7 552
4 000	47 733	0,66	0,8058	0,8273	8 436
5 000	55 067	0,71	0,7780	0,7839	9 222
6 000	62 400	0,75	0,7547	0,7547	10 060

Únosnosť stĺpa $N_{b,Rd} = N_{b,Rd,min} = 3931 \text{ kN}$.

Kritická sila určená metódou konečných prvkov

Na porovnanie sme vzpernú dĺžku určili aj na základe kritickej sily pomocou metódy konečných prvkov programom COSMOS/M použitím škrupinových prvkov SHELL4T.

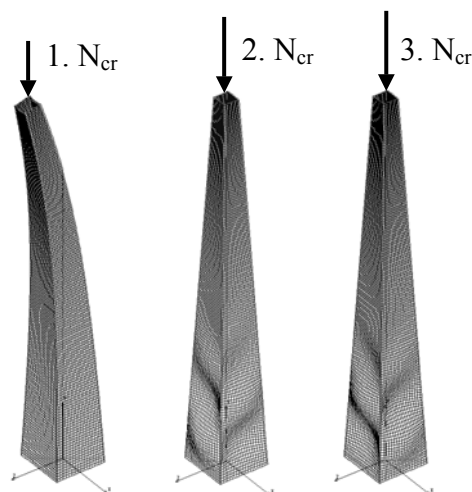
Pozn.: Prvky SHELL4T majú tvar štvoruholníka, v každom zo štyroch uzlov sa uvažujú tri uzlové posunutia a tri pootočená okolo osí globálnej kartézskej súradnicovej sústavy. Pri odvodzovaní týchto prvkov, ktoré sú určené pre modelovanie hrubostenných dosiek a škrupín sa vychádza z Mindlinovej teórie. Tá na rozdiel od klasickej Kirchhoffovej teórie uvažuje so šmykovým pretvorením. Riešenie dosiek a škrupín je preto najmä pre relatívne hrubé škrupiny presnejšie. Pre veľmi tenké dosky a škrupiny sú rozdiely vo výsledkoch podľa oboch teórií zanedbateľné.

Modelované sú strednicové roviny stien prúta. Model obsahuje 3200 konečných prvkov, 3240 uzlov a má 19199 stupňov voľnosti. V uzloch v mieste votknutia boli predpísané nulové hodnoty posunutí a pootočení. Na hornom konci bolo predpísané nulové posunutie v smere osi x jediného uzla v rovine symetrie xy . Bremeno vo vrchole stĺpa bolo modelované silami v 40 uzloch na hornom konci prúta.

V tab. 3.2 sú uvedené 3 kritické sily, z ktorých len prvá prislúcha vybočeniu prúta, ďalšie dve strate stability steny. Tvar vybočenia a vydutia stien zodpovedajúci jednotlivým kritickým silám je na obrázku vedľa tab. 3.2.

Tab. 3.2

Typ prvkov	SHELL4T
1. kritická sila [kN]	29615,6
2. kritická sila [kN]	37667,2
3. kritická sila [kN]	38834,0
Počet stupňov voľnosti	19199
Trvanie výpočtu [s]	82



Na súvislosť kritickej sily so spôsobom straty stability upozorňujeme len preto, že pri tenkostenných prútoch sa môže stať, že najnižšia kritická sila zodpovedá vydutiu steny, a nie vybočeniu prúta ako celku.

Napr. ak by vyšetrovaný stĺp, ktorého najväčší prierez patrí do triedy 3, mal vo vrchole kĺbové podopretie, prvá, teda najmenšia kritická sila by neprislúchala vybočeniu prúta, ale vydutiu steny.

Vzperná dĺžka (vzhľadom na maximálny prierez)

$$L_{cr,MKP} = \pi \sqrt{\frac{E I_{max}}{N_{cr,MKP}}} = \pi \sqrt{\frac{210000 \cdot 6,3315 \cdot 10^9}{29615600}} = 21050 \text{ mm}.$$

Súčiniteľ štíhlosti podľa Prílohy C (časť C.6) je $\gamma = 1,877$. Zo vzpernej dĺžky určenej pomocou programu COSMOS/M vychádza súčiniteľ

$$\gamma = L_{cr} / L = 21\,050 / 12\,000 = 1,754.$$

Súčiniteľ podľa STN 73 1401 je teda väčší (bezpečnejší) o 7 %, čo je pri zjednodušenom výpočte primerané.

4

OHÝBANÉ PRÚTY



4 OHÝBANÉ PRÚTY

Ohýbané prúty – nosníky sú vystavené zaťaženiu pôsobiacemu priečne na ich pozdĺžnu os (priečne zaťaženie). Ak výslednica zaťaženia neprechádza stredom šmyku, nosník je okrem ohybového momentu a priečnej sily namáhaný aj krútiacim momentom, ktorý pri zvyčajnom tvare prierezu (I a U prierez) v ňom vyvolá prídavné normálové a šmykové napätia. Nosníky sa navrhujú spravidla tak, aby zaťaženie pôsobilo v rovine ich väčšej tuhosti.

Podobne, ako centricky tlačенý prút, aj nosník môže stratiť stabilitu. Tento jav sa nazýva klopenie (globálna strata stability ohýbaného prúta). Pri klopení sa prierezy nosníka posunú vo zvislom smere, vybočia z roviny zaťaženia a skrútia sa. Základy teórie o klopení položil Vlasov. Klopenie nosníkov môže byť kombinované s vydutím stien a pásnic (lokálna strata stability nosníka so štíhlym prierezom – prierez triedy 4). V takom prípade sa pri výpočte uvažuje iba s účinnými, efektívnymi prierezovými charakteristikami nosníka.

Namáhanie nosníkov bez klopenia

Nosníky nie sú ohrozené klopením, a teda sa na klopenie neposudzujú, ak :

- ohyb nosníka sa deje v hlavnej rovine menšej tuhosti,
- prierez prúta je tuhý v krútení (napr. uzavretý prierez),
- tlačенý pás je zabezpečený proti vybočeniu z roviny ohybu, alebo ak je nosník zabezpečený proti pootočeniu spojite, alebo vo vzdialenostiach $L_{z1} \leq 40 i_1$, kde i_1 je polomer zotrvačnosti vzhľadom na zvislú os konvenčného tlačенého pásu, zloženého z tlačenej pásnice a 1/5 prierezovej plochy steny.

Pri posúdení pevnosti nosníkov sa vychádza z nasledovných predpokladov :

- zaťaženie je rovnobežné s hlavnou rovinou, prierezy sa pootáčajú okolo neutrálnej osi, kolmej na rovinu zaťaženia,
- priehyby sú malé v porovnaní s výškou nosníka,
- prierezy nemenia svoj tvar.

Návrhový ohybový moment únosnosti sa stanovuje (v závislosti od triedy prierezu) v pružnej, pružnoplastickej a plastickej oblasti pôsobenia a je vyjadrený pomocou troch parametrov

$$M_{Rd} = f(W, f_y, \gamma_{Mi}),$$

kde W je prierezový modul (W_{eff} , W_{el} , W_{ep} , W_{pl}), f_y je medza klzu materiálu a γ_{Mi} ($i = 0$ alebo 1) je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu.

V oblasti, kde pôsobí aj priečna sila, stanovuje sa šmyková sila únosnosti, ktorá je vyjadrená pomocou troch parametrov

$$V_{Rd} = f(A_V, f_y, \gamma_{Mi}),$$

kde A_V je plocha tej časti prierezu, ktorá v rozhodujúcej miere prenáša šmykovú silu. V prípade, že návrhová priečna sila je relatívne veľká, redukuje sa návrhový ohybový moment únosnosti vplyvom jej šmykového účinku.

Ohyb nosníkov s klopením

Teoretické riešenie stability nosníkov predpokladá zachovanie tvaru prierezu, to znamená, že prierez sa nedeformuje vo svojej rovine. Tento predpoklad spĺňajú valcované a kompaktné zvarané prierezy. Tvar prierezu vysokých zvaraných a nitovaných nosníkov sa zabezpečuje priečnymi výstuhami. Štíhlosť pri klopení λ sa uvažuje ako väčšia z hodnôt štíhlosti pri klopení nosníka a kritickej štíhlosti konvenčného tlačeneho pásu pri jeho vybočení medzi priečnymi výstuhami [14], [15], [16], [17], [6].

Náchylnosť nosníkov na klopenie ovplyvňuje :

- vzdialenosť bodov tlačeneho pásu zabezpečených proti vybočeniu L_{z1} ,
- tvar prierezu,
- okrajové podmienky – miera votknutia pri ohybe vo zvislej aj vodorovnej rovine a miera votknutia v krútení, t.j. miera zabránenia deplanácie,
- typ zaťaženia a poloha jeho pôsobiska v priereze (najnepriaznivejšie je namáhanie konštantným ohybovým momentom; zaťaženie pôsobí nepriaznivo – destabilizujúco, ak pôsobisko zaťaženia je, vzhľadom na smer ohybu, nad stredom šmyku).

Návrhový ohybový moment únosnosti je vyjadrený pomocou štyroch parametrov

$$M_{b,Rd} = f(\chi_{LT}, W, f_y, \gamma_{M1}),$$

kde χ_{LT} je súčiniteľ vzperu pri klopení, ktorý sa určuje na základe pomernej štíhlosti pri klopení $\bar{\lambda}_{LT}$ (STN 73 1401, príloha E) pre valcované prierezy s mierou imperfekcie $\alpha_{LT} = 0,13$ a pre zvarané prierezy s mierou imperfekcie $\alpha_{LT} = 0,34$.

Pomerná štíhlosť pri klopení vyplýva z kritickej štíhlosti nosníka, ktorá sa v STN 73 1401 stanovuje dvojako : i) pre valcované prierezy (bisymetrické a monosymetrické prierezy zaťažené kolmo na rovinu symetrie, pričom rovina zaťaženia prechádza stredom šmyku C_s) a ii) pre vysoké zvarané a nitované bisymetrické prierezy a pre monosymetrické prierezy zaťažené v rovine symetrie.

Kritická štíhlosť λ závisí od spôsobu uloženia, druhu zaťaženia a jeho polohy vzhľadom na prierez a tuhostí nosníka.

Kritická štíhlosť pri klopení λ vysokých zvaraných alebo nitovaných nosníkov sa uvažuje väčšou z hodnôt kritickej štíhlosti pásu λ_f a kritickej štíhlosti nosníka λ . Kritická štíhlosť pásu závisí od vzdialenosti priečných výstuh a , od súčiniteľa vzpernej dĺžky κ_M , ktorý zohľadňuje priebeh ohybového momentu na vyšetrovanom úseku, a od polomeru zotrvačnosti konvenčného tlačeneho pásu i_1 .

Kritická štíhlosť nosníkov λ (vysokých valcovaných alebo nitovaných bisymetrických prierezo, resp. monosymetrických prierezo zaťažených v rovine symetrie) závisí od vzdialenosti bodov tlačeneho pásu zabezpečených proti vybočeniu z roviny L_{z1} , od súčiniteľa vzpernej dĺžky pri klopení κ_M , od polomeru zotrvačnosti tlačeneho pásu i_{z1} a od súčiniteľa štíhlosti γ . Súčiniteľ štíhlosti pri klopení je aj tabuľkovo spracovaný v závislosti od parametra krútenia pre symetrický I-prierez a pre T-prierez (STN 73 1401, príloha H). Pomocou parametra nesymetrie ψ je možné pre medziľahlé prierezy (nesymetrický I-prierez) súčiniteľ štíhlosti určiť lineárnou interpoláciou.

Priehyb nosníkov

Priehyby sú obmedzené rôznymi prevádzkovými podmienkami, pretože napr. :

- môžu spôsobiť trhliny alebo iné poruchy stavebného diela,
- môžu nepriaznivo ovplyvniť pohodu užívateľa stavby,
- môžu byť sprevádzané chvením konštrukcie,
- môžu vyvolať deformáciu v spojoch a tým vznik podružných napätí.

Pri posúdení medzného stavu použiteľnosti sa uvažujú pružné pretvorenia od prevádzkového návrhového zaťaženia (parciálny súčiniteľ spoľahlivosti zaťaženia $\gamma_F = 1,0$ – charakteristické zaťaženie). Je preto potrebné overovať, či konštrukcia alebo jej časti pôsobia pri takomto zaťažení v pružnej oblasti namáhania.

Medzné hodnoty pretvorenia nosných prvkov sú uvedené v STN 73 1401 (tab. 11).

Namáhanie nosníkov priečnym zaťažením mimo výstuh

So zaťažením pôsobiacim mimo výstuh sa stretávame napr. pri výpočte nosníkov žeriavových dráh a pri posúdení montážnych štádií veľkých plnostenných a komorových oceľových mostov, ktoré sa do definitívnej polohy premiestňujú zasúvaním v smere mostnej osi. Podperové tlakové sily od valcov, po ktorých sa mostná konštrukcia zasúva, sú miestnym priečnym zaťažením, ktoré pôsobí prostredníctvom spodnej pásnice na stenu nosníka. Pri určovaní únosnosti takto zaťažených nosníkov je potrebné zohľadniť lokálnu (miestnu) únosnosť, lokálne borteenie a lokálnu stabilitu steny od miesteo priečneho zaťaženia.

Únosnosť steny nosníka pri lokálnom priečnom zaťažení sa vyšetrovala najmä experimentálne [6]. Z tohto experimentálneho výskumu vyplynul mechanizmus porušenia nosníkov, podľa ktorého porušenie nastáva vznikom troch plastických kĺbov v zaťaženej pásnici a segmentového líniového plastického kĺbu v stene. Prostredný kĺb sa vytvára uprostred pôsoiaceo priečneho zaťaženia, vzdialenosť oboch krajných kĺbov od prostredného kĺbu sa zväčšuje s rastúcou hrúbkou zaťaženej pásnice. V prípade nosníkov s tuhými pásnicami sa plastické kĺby vôbec nevytvárajú. Ku zrúteniu nosníkov dochádza zaborením zaťaženej pásnice do steny vtedy, keď štíhlosť steny je taká veľká, že stena nemôže poskytovať podopretie pásnici.

Lokálna únosnosť steny

Lokálna únosnosť steny $R_{y,Rd}$ sa určí z podmienky prostého tečenia stien pod miestnym priečnym zaťažením a rozhoduje v prípade, keď nenastáva ani lokálne vydúvanie, ani lokálne bortenie steny.

Lokálna únosnosť steny závisí od veľkosti dĺžky tuhého uloženia s_s , od dĺžky s_y , od hrúbky steny t_w a od medze klzu materiálu steny f_{yw} . Roznesením zaťaženia sa dĺžka s_s zväčší o dĺžku s_y . Roznášanie prostredníctvom voľne vložených vložiek sa neuvažuje. Lokálna únosnosť steny, ktorá je namáhaná aj ohybovým momentom, je redukovaná zmenšením dĺžky s_y pomocou normálového napätia v zaťaženej pásnici.

Lokálne bortenie steny

Návrhová únosnosť steny pri lokálnom bortení $R_{s,Rd}$ sa v STN 73 1401 stanoví pre nepohyblivé a pohyblivé zaťaženie zvlášť. V oboch prípadoch návrhová únosnosť pri lokálnom bortení závisí od hrúbky steny t_w , hrúbky pásnice t_f a dĺžky s_s . Pre nepohyblivé zaťaženie návrhová únosnosť steny je ďalej funkciou modulu pružnosti materiálu E , medze klzu materiálu steny f_{yw} a výšky steny d . Pre pohyblivé zaťaženie návrhová únosnosť steny závisí aj od medze klzu materiálu pásnice f_{yf} a momentu zotrvačnosti pásnice k vlastnej vodorovnej osi I_f . V prípade namáhania pohyblivým miestnym tlakom sa návrhová únosnosť steny pri lokálnom bortení stanoví zvlášť pre stenu bez pozdĺžnej výstuhy a zvlášť pre stenu s pozdĺžnou výstuhou, ktorá sa nachádza vo vzdialenosti menšej ako $1/5$ výšky steny od zaťaženej pásnice.

Interakcia miestneho bortenia a namáhania ohybovým momentom je zohľadnená v interakčnom vzťahu pre nepohyblivý miestny tlak a redukciou návrhovej únosnosti steny pre pohyblivý miestny tlak.

Lokálna stabilita steny

Lokálna strata stability steny znamená vydutie steny na prevažnej časti jej výšky. Za návrhovú únosnosť steny nosníka $R_{b,Rd}$ sa považuje vzperná únosnosť fiktívneho prúta, vytvoreného z časti steny s efektívnou šírkou b_{eff} , so vzpernou dĺžkou rovnou $0,75$ -násobku výšky steny. Súčiniteľ vzperu sa uvažuje podľa krivky c .

Návrhová lokálna únosnosť steny, návrhová únosnosť steny pri lokálnom bortení a návrhová únosnosť steny pri lokálnej strate stability musia byť väčšie ako je návrhová miestna priečna sila.

Únava

Posudzovanie na únavu sa uplatňuje v takých konštrukciách, ktoré sú zaťažené výrazne premenným zaťažením. Posudzovanie na únavu je jedným z kritérií 1. skupiny medzných stavov únosnosti. Úlohou tohto kritéria je zabrániť vzniku a šíreniu únavových trhlin, ktoré vedú k porušeniu konštrukčného prvku.

Pod pojmom mnohokmitová únava (v literatúre sa používa starší pojem mnohocyklová únava) rozumieme proces, pri ktorom vzniká v konštrukcii napätie pod medzou klzu a počet kmitov napätia počas životnosti dosahuje rádové hodnoty 10^4 až 10^8 .

Únava kovov je podmienená lokálnou cyklickou plasticou deformáciou v miestach s tzv. koncentráciou napätia (napr. náhla zmena hrúbky, výrez alebo okraj defektu v prvku, zvar a iné). Amplitúda tejto plastickej deformácie je veľmi malá a sama o sebe nevedie k žiadnym závažnejším zmenám v štruktúre materiálu. Až mnohonásobné opakovanie plastickej deformácie, aj keď takej malej, že z globálneho hľadiska ide o zaťažovanie v pružnej oblasti, vedie ku kumulatívne poškodzovaniu, ktoré končí únavovým lomom.

Únavový proces v ideálne homogénnom kovovom materiáli sa delí na tri štádiá :

- štádium zmien mechanických vlastností v mikroštruktúre materiálu (zmeny mechanických, elektrických, magnetických a iných vlastností),
- štádium vzniku trhliny (vytváranie únavových sklzových pásiem, vytvorenie zárodočnej trhliny – povrchové mikrotrhliny),
- štádium šírenia trhlín (prepojenie mikrotrhlín, rast mikrotrhlín do magistrálnej trhliny).

Prvé dve štádiá sa označujú aj ako štádium iniciácie trhliny [18].

Podkladom na hodnotenie únavovej pevnosti materiálu sú Wöhlerove krivky, ktoré udávajú závislosť medzi rozkmitom napätia $\Delta\sigma$ ($\Delta\tau$) a počtom kmitov N , pri ktorom nastane porušenie konštrukčného detailu. Wöhlerove krivky nemôžu byť určené výpočtom z iných mechanických vlastností materiálu, stanovujú sa výhradne na základe únavových skúšok.

Podľa wöhlerovského prístupu je celý únavový proces (ktorý začína štádiom zmien mechanických vlastností, pokračuje štádiom vzniku únavovej trhliny a končí štádiom rastu únavovej trhliny včítane krehkého lomu) hodnotený ako jeden celok.

Táto metóda nestanovuje časový podiel jednotlivých štádií únavového procesu. Predpokladá sa, že akonáhle je konštrukcia uvedená do prevádzky, začína prebiehať únavový proces, dochádza ku kumulácii čiastkových poškodení, k rastu iniciačných a neskôr makroskopických trhlín, ktorých veľkosť na základe wöhlerovského prístupu nedokážeme kvantitatívne hodnotiť.

Premennosť zaťaženia v čase zachytáva tzv. história zaťaženia, ktorej zodpovedá história odozvy konštrukcie. História odozvy vyšetrujeme v miestach vrubov s najväčším rozkmitom napätia. Jej kvantitatívnym vyjadrením je spektrum napätí, ktoré udáva počet kmitov napätí rôznej veľkosti za určitú reprezentatívnu časovú jednotku. Spektrum napätí sa získa pomocou triediacich metód a ďalej sa spracuje podľa niektorej z hypotéz kumulácie únavového poškodenia.

Najjednoduchšia a doteraz najviac používaná je lineárna hypotéza kumulácie poškodenia, tzv. Palmgren-Minerova hypotéza. Táto hypotéza vychádza z predstavy, že každý cyklus napätia s rozkmitom $\Delta\sigma_i$ ($\Delta\tau_i$) vyvolá čiastkové poškodenie konštrukcie, resp. sledovaného prvku.

Wöhlerove krivky a Palmgren-Minerova kumulatívna hypotéza tvoria základ normových postupov [1] na posúdenie únavovej pevnosti, resp. životnosti oceľových konštrukcií.

STN 73 1401 definuje :

- prípady nevyžadujúce posúdenie na únavu,
- predpoklady výpočtu na únavu,
- parciálne súčinitele spoľahlivosti pri výpočte na únavu,
- menovité, upravené menovité a efektívne tvarové napätia,
- únavovú pevnosť,
- posúdenie na únavu, ktoré sa delí na posúdenie s konštantným rozkmitom napätí a s premenným, resp. ekvivalentným rozkmitom napätí.

Konštrukcie pozemných stavieb sa neposudzujú na únavu okrem prípadov, keď :

- podopierajú zdvíhacie zariadenia,
- prenášajú pohyblivé zaťaženie,
- prenášajú opakované namáhanie od nevyváženosti strojov,
- sú namáhané kmitajúcimi účinkami vetra a kmitajúcimi účinkami od pohyblivého zaťaženia,
- ak najväčší rozkmit napätí, resp. celkový počet kmitov v návrhovom spektre neprekročí normou danú hodnotu.

Pri výpočte na únavu sa predpokladá, že :

- menovité napätia sú v pružnej oblasti pôsobenia materiálu,
- najväčší rozkmit napätí neprevyšuje $1,5f_y$ pri normálovom napätí a $1,5f_y/\sqrt{3}$ pri šmykovom napätí.

Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavového zaťaženia γ_{Ff} , ktorý v [1] je zatiaľ rovný $1,0$, by mal zahrňovať neistoty vyplývajúce z :

- uvažovanej úrovne únavového zaťažovania,
- prepočtu týchto zaťažení na napätia a rozkmity napätí,
- určovania návrhovej životnosti konštrukcie,
- vývoja únavového namáhania v priebehu návrhovej životnosti konštrukcie.

Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavovej pevnosti γ_{Mf} zahrňuje neistoty od vplyvu :

- rozmerov konštrukcie,
- určenia typu, veľkosti a rozmiestnenia defektov,
- rozptylu vlastností materiálu vrátane spojov,
- koncentrácie napätí od tvaru povrchu zvaru, zvyškových napätí a dodatočných úprav spoja po zváraní.

Hodnota γ_{Mf} vyplýva z hľadiska kontroly a údržby (prístupnosť ku kontrole, zabezpečenie údržby) a dôsledkov únavového porušenia (mierne, závažné).

Hospodárny návrh vzhľadom na únavové poškodenie závisí od vhodnej voľby konštrukčného detailu. Odporúča sa navrhovať detaily s menším vrubovým účinkom [20]. Ak sme nútení navrhnuť detail so značným vrubovým účinkom, nenavrhuje ho do najviac namáhaných miest konštrukcie. Je potrebné sa vyhnúť takému návrhu, kde by sa stretlo niekoľko vrubových účinkov v jednom mieste. Preto napr. priečne výstupy nie je vhodné navrhnuť v mieste, kde nosník je zároveň zosilnený.

Únavová pevnosť skrutkových spojov sa znižuje napr. s rastúcou vôľou drieku skrutky v otvoroch. Z hľadiska únavového porušenia dvojstrižné skrutky pôsobia priaznivejšie ako jednostrižné. Najvýhodnejšie sú trecie skrutkové spoje, ktoré prenášajú zaťaženie plošne, a nie bodovo, ako obyčajné skrutky.

Únavové vlastnosti zvarového spoja sú podmienené predovšetkým geometrickým tvarom spoja, druhom a polohou zvaru, spôsobom namáhania a kvalitou opracovania.

Únavovú pevnosť tupých zvarov značne znižuje:

- neúplný závar,
- neprevarený koreň,
- povrchové vruby,
- vruby na začiatku a na konci zvaru (odstraňujú sa brúsením),
- podložky zvarov.

Ak únavová pevnosť konštrukčného detailu je nevyhovujúca, možno urobiť tieto opatrenia [20]:

- zvoliť vhodnejší tvar konštrukčného detailu, s vyššou hodnotou únavovej pevnosti,
- zvýšiť únavovú pevnosť zvarových spojov zmenšením vrubových účinkov spojov obrúsením povrchu zvarov, pretavením prechodu zvaru do základného materiálu (materiálu spojených prvkov),
- zmenšiť rozkmit napätí zväčšením hrúbky prvku (je to nevhodné riešenie, preto sa odporúča sa len v krajnom prípade).

Krútenie

Ohýbané prúty sú zvyčajne (najmä v konštrukciách pozemných stavieb) navrhované tak, aby nedochádzalo k namáhaniu krútiacim momentom. Ak sa predsa len krútenie nedá vylúčiť, je potrebné stanoviť zodpovedajúce vnútorné sily a napätosť prútov podľa teórie krútenia, ktorej základy položil Vlasov (otvorené prierezy) a Umanskij (uzavreté prierezy) a ktorá je prehľadne spracovaná napr. v [20] a [25].

STN 73 1401 (príloha G) poskytuje zjednodušený, ale v bežných prípadoch postačujúci spôsob výpočtu vnútorných síl a napätia v prútoch namáhaných krútiacim momentom v pružnej oblasti. Vzhľadom na veľkú tuhosť v krútení prútov s uzavretým prierezom (a z toho vyplývajúce malé normálové napätia od viazaného krútenia), norma v takýchto prútoch požaduje len výpočet a overenie šmykového napätia.

4.1 Namáhanie ohybom – prostý nosník

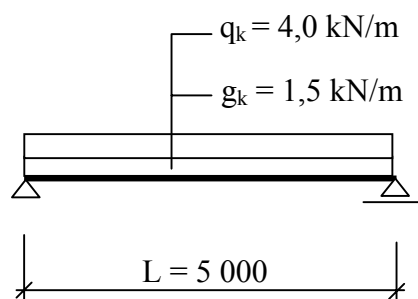
Navrhnete stropný nosník z ocele S 235, ktorý je klbovo uložený na väzníkoch. Charakteristická hodnota stáleho zaťaženia bez vlastnej tiaže stropného nosníka $g_k = 1,5 \text{ kN/m}$. Charakteristická hodnota premenného zaťaženia $q_k = 4,0 \text{ kN/m}$. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti stáleho zaťaženia $\gamma_F = 1,2$, občasného zaťaženia $\gamma_F = 1,4$. Nosník je zabezpečený proti strate stability klopením.

Návrhová hodnota stáleho zaťaženia

$$g_d = g_k \gamma_F = 1,5 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ kN/m} .$$

Návrhová hodnota premenného zaťaženia

$$q_d = q_k \gamma_F = 4 \cdot 1,4 = 5,6 \text{ kN/m} .$$



Pozn.: Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti zaťaženia sa v STN 73 0035 Zaťaženie stavebných konštrukcií nazýva súčiniteľ zaťaženia a označuje sa γ_f .

Návrh prierezu

Stropný nosník navrhujeme valcovaného prierezu na základe medzného stavu únosnosti, pričom budeme predpokladať pružné pôsobenie ($g_d + q_d$).

Maximálny ohybový moment v strede rozpätia

$$M_{max} = \frac{1}{8} (g_d + q_d) L^2 = \frac{1}{8} (1,8 + 5,6) 5^2 = 23,125 \text{ kNm} .$$

Potrebný prierezový modul

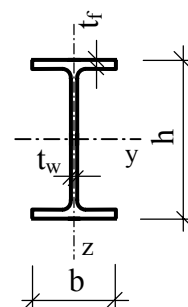
$$W_{y,postr} = \frac{M_{max}}{f_y / \gamma_{M0}} = \frac{23,125 \cdot 10^6}{235 / 1,1} = 1,0824 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \rightarrow \text{navrhujeme IPE 160} .$$

Prierezové charakteristiky

$$I_y = 8,69 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 , \quad t_f = 7,0 \text{ mm} ,$$

$$W_{el,y} = 109 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 , \quad t_w = 5,0 \text{ mm} ,$$

$$W_{pl,y} = 123,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 , \quad b = 82 \text{ mm} .$$



Charakteristická a návrhová hodnota vlastnej tiaže stropného nosníka

$$g_{0,k} = 0,158 \text{ kN/m}, \quad g_{0,d} = g_{0,k} \gamma_F = 0,158 \cdot 1,1 = 0,18 \text{ kN/m}.$$

Klasifikácia prierezu

$$t_f = 7,0 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_m = (235/235)^{0,5} = 1,0,$$

$$\text{tlačená pásnica: } \frac{c}{t_f} = \frac{41 - 2,5}{7,4} = 5,2 < \beta_{01} = 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{stena (ohyb): } \frac{d}{t_w} = \frac{160 - 2 \cdot 7,4}{5} = 29,04 < \beta_{01} = 70\varepsilon_m = 70 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 1, preto je možné použiť plasticitný výpočet pri posúdení medzného stavu únosnosti (predpokladáme, že sú splnené aj ostatné podmienky plasticitného výpočtu, uvedené v úvode 1. časti).

Medzný stav únosnosti

Prierez v strede rozpätia

Návrhový ohybový moment (s uvážením vlastnej tiaže)

$$\begin{aligned} M_{Sd} &= \frac{1}{8} (g_d + q_d + g_{0,d}) L^2 = \\ &= \frac{1}{8} (1,8 + 5,6 + 0,18) 5^2 = 23,70 \text{ kNm}, \end{aligned}$$

$$V_{Sd} = 0.$$

Návrhový ohybový moment únosnosti prierezu

$$\begin{aligned} M_{c,Rd} &= W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} = \\ &= 123,8 \cdot 10^3 \cdot 235 / 1,1 = 26,45 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Podmienka spoľahlivosti

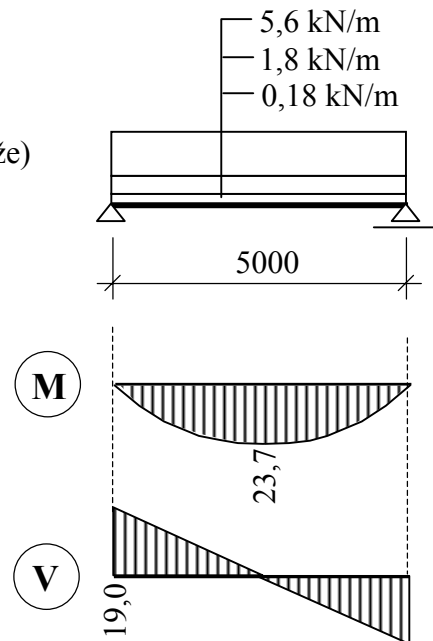
$$M_{Sd} = 23,70 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd} = 26,45 \text{ kNm}.$$

Nosník vyhovuje.

Prierez v mieste podpery

Návrhová priečna sila

$$V_{Sd} = \frac{1}{2} (g_d + q_d + g_{0,d}) L = \frac{1}{2} (1,8 + 5,6 + 0,18) 5 = 19 \text{ kN}.$$



Plocha prierezu účinná pri prenose priečnej sily

$$A_V = (h - 2 t_f) t_w = (160 - 2 \cdot 7,4) 5 = 726 \text{ mm}^2 .$$

Návrhová šmyková sila únosnosti a podmienka spoľahlivosti

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{726 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 89,5 \text{ kN} .$$

$$V_{Sd} = 19 \text{ kN} < V_{pl,Rd} = 89,5 \text{ kN} .$$

Nosník vyhovuje.

Medzný stav použiteľnosti (priehyb)

Overíme, či nosník v medznom stave použiteľnosti pri návrhovom prevádzkovom (charakteristickom) zaťažení pôsobí v pružnej oblasti.

Ohybový moment v strede rozpätia

$$M_{Sk} = \frac{1}{8} (1,5 + 4 + 0,158) 5^2 = 17,7 \text{ kNm} .$$

Pružný návrhový ohybový moment únosnosti prúta (pre medzný stav použiteľnosti je $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$)

$$M_{el,y,Rd} = W_{el,y} f_y / \gamma_{M1} = 109 \cdot 10^3 \frac{235}{1,0} = 25,6 \text{ kNm} ,$$

$$M_{Sk} = 17,7 \text{ kNm} < M_{el,y,Rd} = 25,6 \text{ kNm} .$$

Nosník pri charakteristickom zaťažení pôsobí v pružnej oblasti.

Priehyb od stáleho a dlhodobého občasného zaťaženia

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \frac{(g_k + g_{0,k}) L^4}{EI_y} = \frac{5(1,5 + 0,158) 5000^4}{384 \cdot 210000 \cdot 8,69 \cdot 10^6} = 7,4 \text{ mm} .$$

Priehyb od občasného zaťaženia

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \frac{4 \cdot 5000^4}{210000 \cdot 8,69 \cdot 10^6} = 17,8 \text{ mm} < L / 250 = 5000 / 250 = 20 \text{ mm} .$$

Podmienka, aby vlastná frekvencia stropnej konštrukcie nebola menšia ako 3Hz, sa nahrádza približnou podmienkou, aby výsledný priehyb neprekročil hodnotu 28 mm. V našom prípade

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 7,4 + 17,3 = 25,8 \text{ mm} < 28 \text{ mm} .$$

Nosník vyhovuje .

4.2 Namáhanie ohybom – konzola

Navrhnete konzolu dĺžky 800 mm valcovaného prierezu z ocele S 235. Premenné zaťaženie tvorí sila na konci konzoly, ktorej charakteristická hodnota $F_k = 60$ kN a pôsobí nad stenou konzoly na hornom povrchu ťahanej pásnice. Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti stáleho zaťaženia $\gamma_F = 1,1$, premenného zaťaženia $\gamma_F = 1,2$.

Volíme prierez IPE 240.

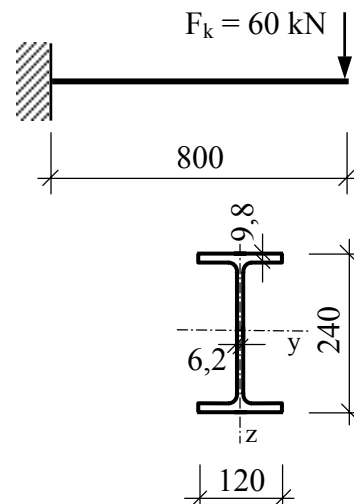
Prierezové charakteristiky

$$A = 3,91 \cdot 10^3 \text{ mm}^2, \quad W_{el,y} = 324 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$I_y = 38,9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \quad W_{pl,y} = 366 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$I_z = 2,83 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \quad \text{hmotnosť } 30,7 \text{ kg/m},$$

$$I_t = 131 \cdot 10^3 \text{ mm}^4.$$



Klasifikácia prierezu

$$t_f = 9,8 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \quad \gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1,$$

$$\varepsilon_m = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1,0,$$

$$\text{pásnica (tlak): } \frac{c}{t_f} = \frac{60 - 3,1}{9,8} = 5,8 < 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{stena (ohyb, } \alpha = 0,5): \frac{d}{t_w} = \frac{240 - 2 \cdot 9,8}{6,2} = 35,5 < \beta_{01} = 35 / 0,5 = 70 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 1, použijeme plasticitný výpočet.

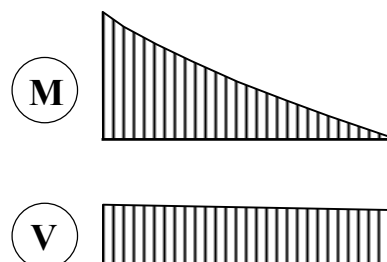
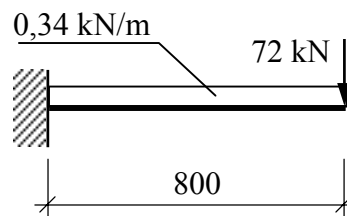
Zaťaženie

Návrhová hodnota vlastnej tiaže konzoly

$$g_{0,d} = \gamma_F g_k = 1,1 \cdot 0,307 = 0,34 \text{ kN/m}.$$

Návrhová hodnota premenného zaťaženia

$$F_{Sd} = \gamma_F F_k = 1,2 \cdot 60 = 72 \text{ kN}.$$



Vnútorne sily

Návrhový ohybový moment a návrhová priečna sila vo votknutí

$$M_{Sd} = M_{max} = 72 \cdot 0,8 + 0,34 \frac{0,8^2}{2} = 57,7 \text{ kNm} ,$$

$$V_{Sd} = 72 + 0,34 \cdot 0,8 = 72,3 \text{ kN} .$$

Podrobnejšie údaje o konštrukčnom usporiadaní konzoly nie sú známe, preto budeme predpokladať, že tlačný pás konzoly nie je zabezpečený proti klopeniu a návrhový moment únosnosti určíme s uvažovaním tohto javu (STN 73 1401, príloha H).

Medzný stav únosnosti

Vzperná dĺžka konzoly pri klopení

$$L_z = 2L = 1600 \text{ mm} .$$

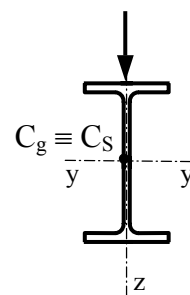
Parameter krútenia α_t a súčiniteľ vplyvu uloženia, zaťaženia a tuhosti prúta γ

$$\alpha_t = 0,62 \frac{L_z}{h} \sqrt{\frac{I_t}{I_z}} = 0,62 \frac{1600}{240} \sqrt{\frac{0,131 \cdot 10^6}{2,83 \cdot 10^6}} = 0,89 \rightarrow \gamma = 0,80 \text{ (tab. H.2, STN 73 1401)} .$$

Pozn.: Súčiniteľ γ stanovíme pre rozhodujúce zaťaženie, to znamená, pre osamelé bremeno pôsobiace destabilizujúco na ťahanej pásnici konzoly (nad stredom šmyku C_S).

Kritická štíhlosť konzoly

$$\lambda = \gamma \frac{2L_z}{h} \sqrt{\frac{I_y}{I_z}} = 0,8 \frac{2 \cdot 1600}{240} \sqrt{\frac{38,9 \cdot 10^6}{2,83 \cdot 10^6}} = 39,5 .$$



Porovnávacia štíhlosť a štíhlosť pri klopení

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / f_y} = 93,9 ,$$

$$\lambda_{LT} = \lambda / (W_{el,y} / W_{pl,y})^{0,5} = 39,5 / (324 \cdot 10^3 / 366 \cdot 10^3)^{0,5} = 42,03 ,$$

$$\beta_W = 1,0 \text{ (pre prierez triedy 1 a 2)} .$$

Pomerná štíhlosť a súčiniteľ vzperu pri klopení

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_W} = \frac{42,03}{93,9} \cdot 1 = 0,45 \rightarrow \chi_{LT} = 0,9919$$

(tab. E.1, $\alpha_{LT} = 0,13$, STN 73 1401).

Návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} = 0,9919 \cdot 1 \cdot 366 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1} = 77,5 \text{ kNm}.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{(240 - 2 \cdot 9,8) 6,2 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 168,5 \text{ kN}.$$

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} = 72,3 \text{ kN} < 0,5 V_{pl,Rd} = 168,5 / 2 = 84,25 \text{ kN}.$$

Návrhový ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.

Podmienky spoľahlivosti

$$M_{Sd} = 57,7 \text{ kNm} < M_{b,Rd} = 77,5 \text{ kNm},$$

$$V_{Sd} = 72,3 \text{ kNm} < V_{pl,Rd} = 168,5 \text{ kN}.$$

Konzola vyhovuje.

Medzný stav použiteľnosti

Overenie pružného pôsobenia konzoly pri návrhovom prevádzkovom (charakteristickom) zaťažení

Ohybový moment a priečna sila vo votknutí (bez vlastnej tiaže konzoly, ktorú zanedbáme aj pri výpočte priehybu)

$$M_{Sk} = 60 \cdot 0,8 = 48 \text{ kNm}, \quad V_{Sk} = 60 \text{ kN}.$$

Porovnávacia štíhlosť a štíhlosť pri klopení

$$\lambda_I = 93,9, \quad \lambda_{LT} = 42,03.$$

Súčiniteľ β_W (prierez triedy 3)

$$\beta_W = W_{el,y} / W_{pl,y} = 324 \cdot 10^3 / 366 \cdot 10^3 = 0,885.$$

Pomerná štíhlosť a súčiniteľ vzperu pri klopení

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_I} \sqrt{\beta_W} = \frac{42,03}{93,9} \sqrt{0,885} = 0,42 \rightarrow \chi_{LT} = 0,9969 \text{ (tab. E.1, } \alpha_{LT} = 0,13).$$

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} / V_{pl, Rd} = 72,3 / 168,5 = 0,43 > 0,3 \rightarrow \text{je potrebné uvažovať vplyv šmyku.}$$

Vplyv šmyku sa zohľadní redukciou návrhovej pevnosti podľa informatívnej prílohy D normy STN 73 1401. Pri posúdení medzného stavu použiteľnosti použijeme súčinitele spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M1} = \gamma_{M0} = 1,0$

$$\varphi_{y,V} = \sqrt{1,1[1 - (V_{Sd} / V_{pl, Rd})^2]} = \sqrt{1,1[1 - (0,43)^2]} = 0,95,$$

$$f_{y,V,d} = \varphi_{y,V} f_{yd} = \varphi_{y,V} f_y / \gamma_{M0} = 0,95 \cdot 235 / 1,0 = 223,25 \text{ MPa.}$$

Návrhový ohybový moment únosnosti (v pružnej oblasti pôsobenia)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_{y,V,d} = 0,9969 \cdot 0,885 \cdot 366 \cdot 10^3 \cdot 223,25 = 72,0 \text{ kNm.}$$

$$M_{Sk} = 48,1 \text{ kNm} < M_{b,Rd} = 72,0 \text{ kNm.}$$

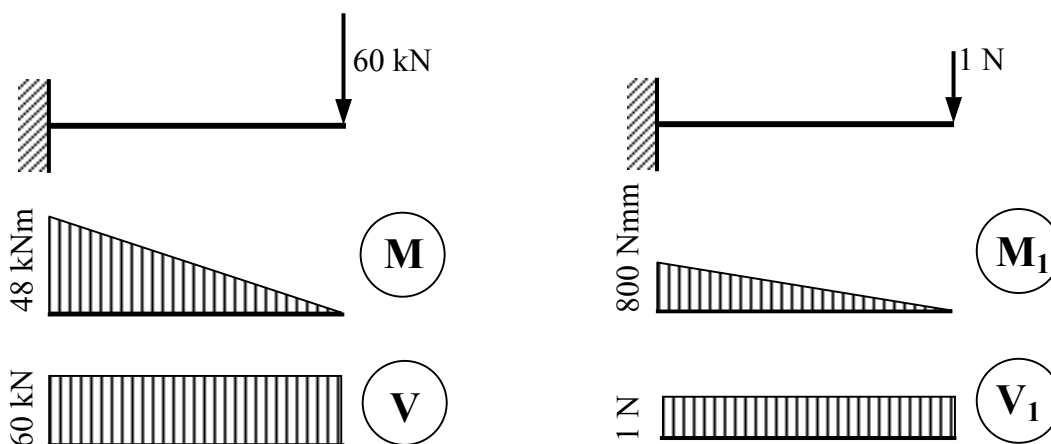
Konzola pri charakteristickom zaťažení pôsobí v pružnej oblasti.

Pozn.: Návrhový ohybový moment únosnosti v pružnej oblasti pôsobenia je možné vyjadriť priamo vzťahom $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{el,y} f_{y,V,d}$.

Medzný priehyb konzoly sa stanovuje pre dvojnásobok jej dĺžky, uvažujeme ho hodnotou

$$\delta_{max} = 2L / 400 = 2 \cdot 800 / 400 = 4,0 \text{ mm.}$$

Priehyb vypočítame pomocou vety o virtuálnej práci, pričom zanedbáme priehyb od vlastnej tiaže konzoly. Konzola je relatívne krátka $h/L = 240 / 800 = 0,3 > 1/8 = 0,125$, preto vo veľkosti priehybu zohľadníme aj vplyv priečných síl.



Priehyb na konci konzoly

$$\begin{aligned}\delta &= \int_0^L \frac{M M_l}{EI} dx + \kappa \int_0^L \frac{V V_l}{G A} dx \cong \int_0^L \frac{M M_l}{EI} dx + \int_0^L \frac{V V_l}{G A_w} dx = \\ &= \frac{M M_l L}{3 EI} + \frac{V V_l L}{G A_w} = \frac{48 \cdot 10^6 \cdot 800 \cdot 800}{3 \cdot 210000 \cdot 38,9 \cdot 10^6} + \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 800}{81000 \cdot 1366,5} = \\ &= 1,25 + 0,43 = 1,70 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Pozn.: Porovnanie prierezovej plochy steny A_w (valcovaný prierez IPE 240)

$$A_w = (h - 2 t_f) t_w = (240 - 2 \cdot 9,8) 6,2 = 1366,5 \text{ mm}^2,$$

a redukovanej plochy celého prierezu A/κ , ktorou sa zohľadňuje vplyv šmykového skosenia na priehyb

$$\frac{A}{\kappa} = \frac{I}{I_y A} \int \left(\frac{S_{y(s)}}{t(s)} \right)^2 dA = 1366,7 \text{ mm}^2,$$

ukazuje, že veľkosť týchto plôch je približne rovnaká $A/\kappa \cong A_w$ (platí to pre I-prierez všeobecne).

Výpočet redukovanej plochy prierezu A/κ bol vykonaný programom DUENQ od firmy Ing – Software DLUBAL.

Podmienka spoľahlivosti

$$\delta = 1,70 \text{ mm} < \delta_{max} = 4,0 \text{ mm}.$$

Konzola vyhovuje.

4.3 Namáhanie ohybom – obojstranne votknutý nosník

Posúďte obojstranne votknutý prievlak dĺžky 6 m valcovaného prierezu IPE 300 z ocele S 235. Charakteristická hodnota premenného rovnomerného spojitého zaťaženia $q_k = 20$ kN/m, parciálny súčiniteľ spoľahlivosti zaťaženia $\gamma_F = 1,4$. Stále zaťaženie vrátane vlastnej tiaže nosníka má charakteristickú hodnotu $g_k = 10$ kN/m, $\gamma_F = 1,2$. Nosník je zabezpečený proti klopeniu iba vo votknutí, kde je zabránená aj deplanácia prierezu.

Prierezové charakteristiky

$$b = 150 \text{ mm},$$

$$I_y = 83,6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm},$$

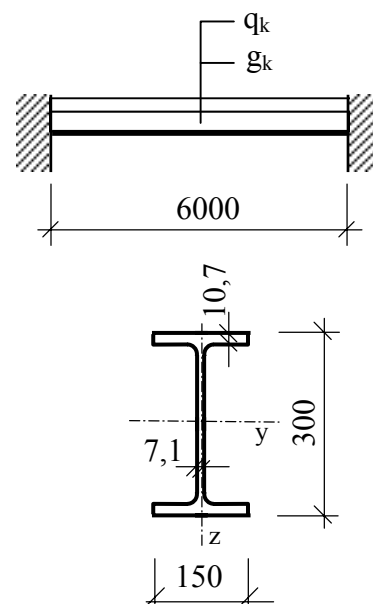
$$I_z = 6,04 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm},$$

$$W_{el,y} = 557 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, \quad W_{pl,y} = 628 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$I_t = 201 \cdot 10^3 \text{ mm}^4, \quad I_\omega = 126 \cdot 10^9 \text{ mm}^6,$$

$$i_{z1} = 38,8 \text{ mm}.$$



Klasifikácia prierezu

$$t_f = 10,7 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}, \quad \gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1,$$

$$\varepsilon_m = (235 / f_y)^{0,5} = (235 / 235)^{0,5} = 1,0,$$

$$\text{pásnica (tlak)} : \frac{75 - 3,55}{10,7} = 6,7 < 9\varepsilon_m = 9 \quad \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{stena (ohyb)} : \frac{300 - 2 \cdot 10,7}{7,1} = 39,2 < 70\varepsilon_m = 70 \quad \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Návrhové zaťaženie

$$\text{stále zaťaženie} : \quad g_d = \gamma_g g_k = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ kN/m},$$

$$\text{premenné zaťaženie} : \quad q_d = \gamma_q q_k = 1,4 \cdot 20 = 28 \text{ kN/m}.$$

Pôsobisko zaťaženia (vrátane vlastnej tiaže nosníka, ktorá v skutočnosti pôsobí v jeho ťažisku) uvažujeme na povrchu hornej pásnice, na ktorej občasné zaťaženia a väčšinou aj stále zaťaženie zvyčajne reálne pôsobia.

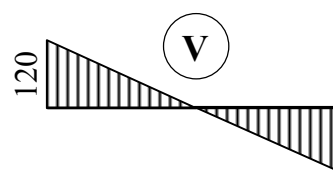
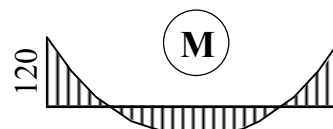
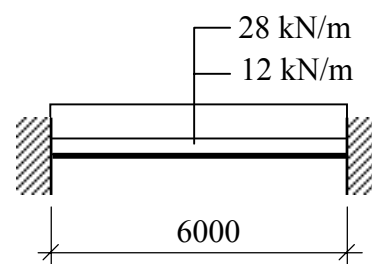
Vnútorne sily

Návrhový ohybový moment vo votknutí

$$M_{sd} = \frac{1}{12}(g_d + q_d)L^2 = \frac{1}{12}40.6^2 = 120 \text{ kNm} .$$

Návrhová priečna sila vo votknutí

$$V_{sd} = A = B = \frac{1}{2}(g_d + q_d)L = \frac{1}{2}40.6 = 120 \text{ kN} .$$

**Medzný stav únosnosti**

Overíme, či nosník je potrebné posudzovať z hľadiska straty stability klopením. Tlačený pás nosníka nie je na celej dĺžke zabezpečený proti vybočeniu, preto 40-násobok polomeru zotrvačnosti konvenčného tlačeného pásu nosníka ($40 i_{z1}$) porovnáme so vzpernou dĺžkou pri klopení

$$L_{z1} = L_{\omega} = 0,5L = 3000 \text{ mm} > 40 i_{z1} = 40 \cdot 38,8 = 1552 \text{ mm} .$$

Nosník je potrebné posudzovať z hľadiska straty stability klopením.

Pri výpočte postupujeme podľa prílohy H.2, STN 73 1401, prierez je dvojsovo symetrický.

Parameter krútenia

$$\alpha_t = 0,62 \frac{L_z}{h} \sqrt{\frac{I_t}{I_z}} = 0,62 \frac{3000}{300} \sqrt{\frac{201 \cdot 10^3}{6,04 \cdot 10^6}} = 1,131 .$$

Súčinitele κ_1 a κ_2 sa určia z tab. H.1, STN 73 1401 pre rovnomerné zaťaženie a okrajové podmienky : votknutie v rovine ohybu zx a yz a votknutie v krútení (V, V, V)

$$\kappa_1 = 1,61, \quad \kappa_2 = 1,36 .$$

Parameter deplanácie

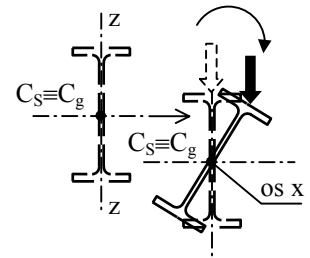
$$\delta = \frac{2}{h} \sqrt{\frac{I_{\omega}}{I_z}} = \frac{2}{300} \sqrt{\frac{126 \cdot 10^9}{6,04 \cdot 10^6}} = 0,963 .$$

Parameter tuhosti prierezu pri klopení

$$d_{z\omega} = \delta^2 \left(\frac{L_z}{L_\omega} \right)^2 + \frac{4}{\pi^2} \alpha_t^2 = 0,963^2 \cdot 1^2 + \frac{4}{\pi^2} 1,131^2 = 1,445.$$

Zaťaženie pôsobiace na hornej pásnici má destabilizujúci účinok, pretože pri natočení pruťa vzniká vzhľadom na stred ohybu krútiaci moment, ktorý má tendenciu toto natočenie ďalej zväčšovať. Vo vzťahu na výpočet súčiniteľa vplyvu uloženia, zaťaženia a tuhosti pruťa γ použijeme zápornú hodnotu excentricity ($e = -150 \text{ mm}$).

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\frac{1,0}{\kappa_1 \left[\frac{2e}{h} + \sqrt{\left(\frac{2e}{h} \right)^2 + \kappa_2 d_{z\omega}} \right]}} = \\ &= \sqrt{\frac{1,0}{1,61 \left[\frac{-2.150}{300} + \sqrt{\left(\frac{-2.150}{300} \right)^2 + 1,36 \cdot 1,445} \right]}} = 0,927. \end{aligned}$$



Kritická štíhlosť

$$\lambda = \gamma \frac{2L_z}{h} \sqrt{\frac{I_y}{I_z}} = 0,927 \frac{2 \cdot 3000}{300} \sqrt{\frac{83,6 \cdot 10^6}{6,04 \cdot 10^6}} = 69.$$

Štíhlosť pri klopení

$$\lambda_{LT} = \lambda / (W_{el,y} / W_{pl,y})^{0,5} = 69 / (557 \cdot 10^3 / 628 \cdot 10^3)^{0,5} = 73,3.$$

Pomerná štíhlosť ($\beta_W = 1,0$) a súčiniteľ vzperu pri klopení

$$\bar{\lambda}_{LT} = 73,3 / 93,9 \cdot 1 = 0,78 \rightarrow \chi_{LT} = 0,9014$$

(tab. E.1, $\alpha_{LT} = 0,13$, STN 73 1401).

Návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} / \gamma_{M1} = 0,9014 \cdot 1 \cdot 628 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1} = 120,9 \text{ kNm}.$$

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{278,6 \cdot 7,1 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 244 \text{ kN}.$$

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} = 120 \text{ kN} < 0,5V_{pl,Rd} = 122 \text{ kN} \rightarrow$$

návrhový ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.

Podmienka spoľahlivosti vo votknutí

$$M_{Sd} = 120 \text{ kNm} < M_{b,Rd} = 120,9 \text{ kNm}.$$

Prievlak vyhovuje.

Medzný stav použiteľnosti

Je potrebné overiť, či nosník pri charakteristickom zaťažení pôsobí v pružnej oblasti. Zmení sa parameter β_W a súčiniteľ vzperu pri klopení χ_{LT}

$$\beta_W = W_{el,y} / W_{pl,y} = 557 \cdot 10^3 / 628 \cdot 10^3 = 0,887,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_W} = \frac{73,3}{93,9} \sqrt{0,887} = 0,735 \rightarrow \chi_{LT} = 0,92 \text{ (tab. E.1, } \alpha_{LT} = 0,13 \text{)}.$$

Overenie vplyvu šmyku na ohybovú únosnosť

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 120 / 244 = 0,49 > 0,3 \rightarrow \text{je potrebné uvažovať s vplyvom šmyku.}$$

Vplyv šmyku sa zohľadní redukciou návrhovej pevnosti podľa informatívnej prílohy D normy STN 73 1401. Pri posúdení medzného stavu použiteľnosti použijeme súčinitele spoľahlivosti materiálu $\gamma_{M1} = \gamma_{M0} = 1,0$

$$\varphi_{y,V} = \sqrt{1,1[1 - (V_{Sd} / V_{pl,Rd})^2]} = \sqrt{1,1[1 - (0,49)^2]} = 0,913,$$

$$f_{y,V,d} = \varphi_{y,V} f_{yd} = \varphi_{y,V} f_y / \gamma_{M0} = 0,913 \cdot 235 / 1,0 = 214,6 \text{ MPa}.$$

Návrhový ohybový moment únosnosti

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_{y,V,d} = 0,92 \cdot 0,887 \cdot 628 \cdot 10^3 \cdot 214,6 = 109,9 \text{ kNm}.$$

Ohybový moment pri charakteristickom zaťažení

$$M_{Sk} = \frac{1}{12} (g_k + q_k) L^2 = \frac{1}{12} (20 + 10) 6^2 = 90 \text{ kNm}.$$

$$M_{Sk} = 90 \text{ kNm} < M_{b,el,Rd} = 109,9 \text{ kNm} \rightarrow \text{prierez pôsobí v pružnej oblasti.}$$

Priehyb od stálego zaťaženia

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \frac{g_k L^4}{EI_y} - \frac{1}{96} \frac{g_k L^4}{EI_y} = \frac{1}{384} \frac{g_k L^4}{EI_y} = \frac{1 \cdot 10 \cdot 6000^4}{384 \cdot 210\,000 \cdot 83,6 \cdot 10^6} = 2 \text{ mm}.$$

Priehyb od občasnégó zaťaženia

$$\delta_2 = \frac{1}{384} \frac{q_k L^4}{EI_y} = \frac{1}{384} \frac{20 \cdot 6000^4}{210\,000 \cdot 83,6 \cdot 10^6} = 4 \text{ mm}.$$

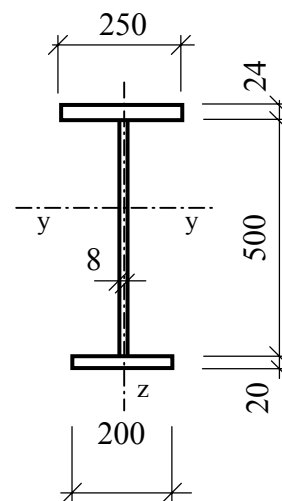
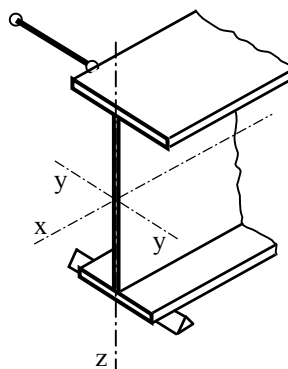
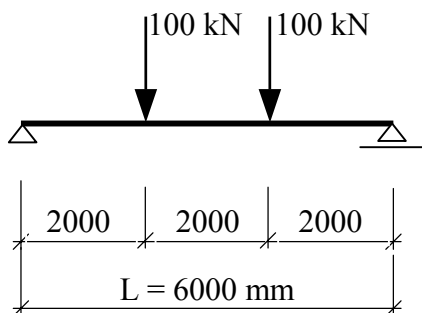
Podmienka spoľahlivosti

$$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 = 2 + 4 = 6 \text{ mm} < L / 400 = 6000 / 400 = 15 \text{ mm}.$$

Prievlak vyhovuje z hľadiska medznégó stavu únosnosti a používateľnosti.

4.4 Namáhanie ohybom – jednoosovo symetrický prierez

Posúďte prievlak z ocele S 235, ktorý má jednoosovo symetrický zvaraný prierez. Nosník je súmerne zaťažený dvoma bremenami (občasnégó zaťaženie) na hornom povrchu tlačenej pásnice, ktorých veľkosť je daná charakteristickou hodnotou $F_k = 100 \text{ kN}$. Parciálny súčiniteľ zaťaženia $\gamma_F = 1,3$. Nosník je kľbovo uložený vzhľadom na ohyb v rovinách zx a yx . Deplanácia obidvoch koncových prierezov prievlaku je voľná. Pri posúdení je možné zanedbať vlastnú tiaž prievlaku. Vzdialenosť priečných výstuh je 1000 mm .



Prierezové charakteristiky

$$h = 544 \text{ mm}, \quad t_{f,c} = 24 \text{ mm}, \quad t_{f,t} = 20 \text{ mm}, \quad t_w = 8 \text{ mm},$$

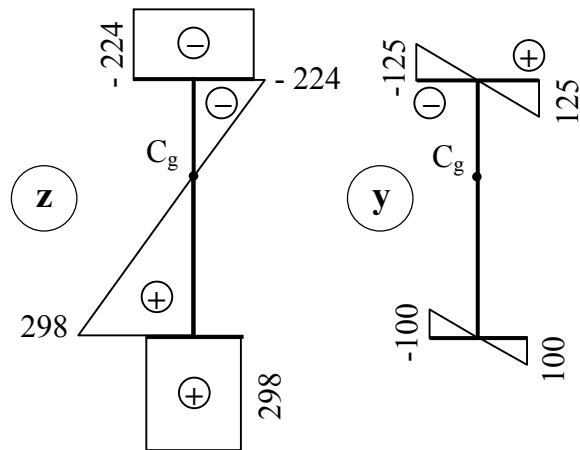
$$A = 250 \cdot 24 + 500 \cdot 8 + 200 \cdot 20 = 14\,000 \text{ mm}^2,$$

$$z_T = \frac{250 \cdot 24 \cdot 12 + 500 \cdot 8 \cdot 274 + 200 \cdot 20 \cdot 534}{14000} = 236 \text{ mm},$$

$$I_z = \frac{1}{12} 24 \cdot 250^3 + \frac{1}{12} 500 \cdot 8^3 + \frac{1}{12} 20 \cdot 200^3 = 4,46046 \cdot 10^7 \text{ mm}^4,$$

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{1}{12} 250 \cdot 24^3 + 250 \cdot 24 \cdot 224^2 + \frac{1}{12} 8 \cdot 500^3 + 8 \cdot 500 \cdot 38^2 + \\ &+ \frac{1}{12} 200 \cdot 20^3 + 200 \cdot 20 \cdot 298^2 = \\ &= 7,458 \cdot 10^8 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Priebeh súradníc y a z



Výpočet výsekových charakteristík

Počiatok odčítania (pól A_0) volíme v bode 3, to znamená, že súradnica $y_{A_0} = 0$, $z_{A_0} = -224 \text{ mm}$

$$\omega_{0(1)} = \omega_{0(2)} = \omega_{0(3)} = \omega_{0(4)} = 0,$$

$$\omega_{0(5)} = -2 \frac{522 \cdot 100}{2} = -52200 \text{ mm}^2,$$

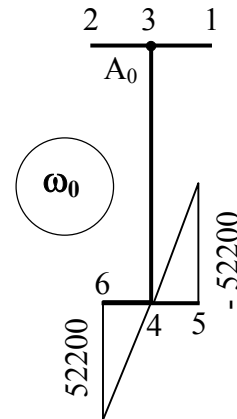
$$\omega_{0(6)} = +52200 \text{ mm}^2.$$

Výsekový statický moment

$$S_{\omega_0 y} = 0 \rightarrow \alpha_y = \frac{S_{\omega_0 y}}{I_y} = 0,$$

$$\begin{aligned} S_{\omega_0 z} &= \int \omega_0 z \, dA = \\ &= 52200 \cdot 20 \cdot (-100) / 3 - 52200 \cdot 20 \cdot 100 / 3 = \\ &= -6,96 \cdot 10^9 \text{ mm}^5, \end{aligned}$$

$$\alpha_z = -\frac{S_{\omega_0 z}}{I_z} = +\frac{6,96 \cdot 10^9}{4,46046 \cdot 10^7} = 156 \text{ mm}.$$



Súradnice stredu stredu krútenia (šmyku) C_S

$$y_{C_S} = 0, \quad y_{C_S} = y_{A_0} + \alpha_y = 0,$$

$$z_{C_S} = z_{A_0} + \alpha_z = -224 + 156 = -68 \text{ mm}.$$

Výpočet výsekových súradníc ω

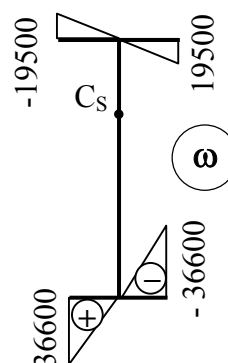
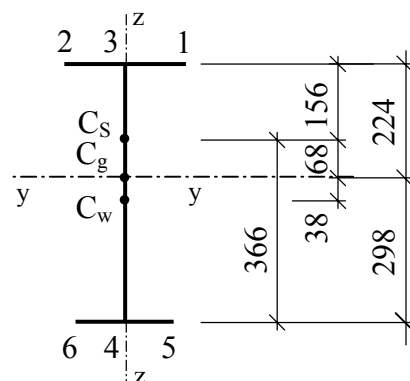
$$\omega_{(1)} = 2 \frac{156 \cdot 125}{2} = 19\,500 \text{ mm}^2,$$

$$\omega_{(2)} = -2 \frac{156 \cdot 125}{2} = -19\,500 \text{ mm}^2,$$

$$\omega_{(5)} = -2 \frac{366 \cdot 100}{2} = -36\,600 \text{ mm}^2,$$

$$\omega_{(6)} = 2 \frac{366 \cdot 100}{2} = 36\,600 \text{ mm}^2,$$

$$\omega_{(3)} = \omega_{(4)} = 0.$$



Výsekový moment zotrvačnosti

$$I_\omega = \int \omega^2 dA = 2 \frac{1}{3} 19\,500^2 \cdot 125 \cdot 24 + 2 \frac{1}{3} 36\,600^2 \cdot 100 \cdot 20 = 2,54658 \cdot 10^{12} \text{ mm}^6.$$

Pozn. : Výpočet integrálov sme urobili podľa Vereščaginovho pravidla.

Moment zotrvačnosti v prostom krútení

$$I_t = \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 = \frac{1}{3} 250 \cdot 24^3 + \frac{1}{3} 500 \cdot 8^3 + \frac{1}{3} 200 \cdot 20^3 = 1,77067 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Určíme polohu neutrálnej osi prierezu pri úplnej plastizácii. Poloha neutrálnej osi vyplýva všeobecne z podmienky rovnováhy horizontálnych síl v priereze, ktorá v prípade namáhania ohybovým momentom vyjadruje rovnosť výsledníc tlakového a ťahového napätia v priereze.

Výslednica tlakového napätia

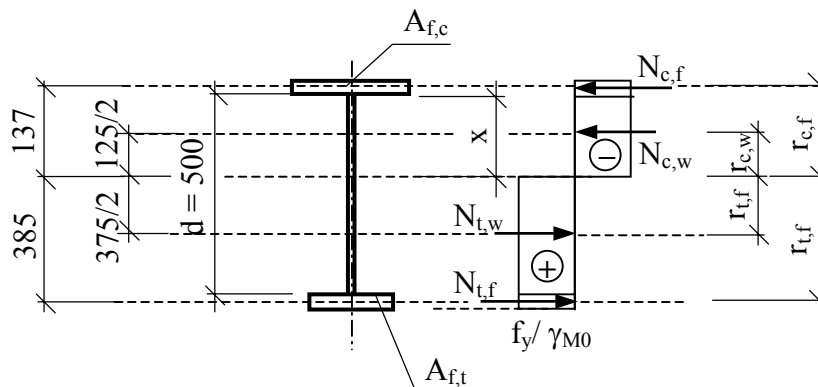
$$N_c = N_{c,f} + N_{c,w} = (A_{f,c} + t_w x) f_{yd} = (250 \cdot 24 + 8 x) f_y / \gamma_{M0}.$$

Výslednica ťahového napätia

$$N_t = N_{t,f} + N_{t,w} = [A_{f,t} + t_w (d - x)] f_{yd} = [200 \cdot 20 + 8 (500 - x)] f_y / \gamma_{M0}.$$

Rovnosť výsledníc a vzdialenosť neutrálnej osi (od horného okraja steny)

$$(250 \cdot 24 + 8x) f_y / \gamma_{M0} = [(500 - x) 8 + 200 \cdot 20] f_y / \gamma_{M0} \rightarrow x = 125 \text{ mm}$$



Plastický moment únosnosti

$$\begin{aligned} M_{pl,y} &= (N_{c,f} r_{c,f} + N_{c,w} r_{c,w} + N_{t,f} r_{t,f} + N_{t,w} r_{t,w}) f_y / \gamma_{M0} = \\ &= (250 \cdot 24 \cdot 137 + 8 \cdot 125^2 / 2 + 200 \cdot 20 \cdot 385 + 8 \cdot 375^2 / 2) f_y / \gamma_{M0}. \end{aligned}$$

Na základe analógie so vzťahom pre pružný moment únosnosti ($M_{el,y} = W_{el,y} f_y / \gamma_{M0}$), plastický moment únosnosti vyjadríme v tvare

$$M_{pl,y} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0}.$$

To znamená, že výraz v zátvorke v predchádzajúcom vzťahu vyjadruje veľkosť plastického prierezového modulu

$$W_{pl,y} = 250 \cdot 24 \cdot 137 + 8 \frac{125^2}{2} + 8 \frac{375^2}{2} + 200 \cdot 20 \cdot 385 = 2,987 \cdot 10^6 \text{ mm}^3.$$

Klasifikácia prierezu

$$f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = 1,0,$$

$$\text{pásnica (tlak): } c / t_f = (125 - 4) / 24 = 5 < 9 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Veľkosť tlačenej časti steny

$$\alpha d = 125 \rightarrow \alpha = 125 / 500 = 0,25 < 0,5.$$

$$\text{stena: } \frac{d}{t_w} = \frac{500}{8} = 62,5 < \frac{35 \varepsilon_m}{\alpha} = \frac{35}{0,25} = 140 \rightarrow \text{trieda 1.}$$

Prierez je triedy 1.

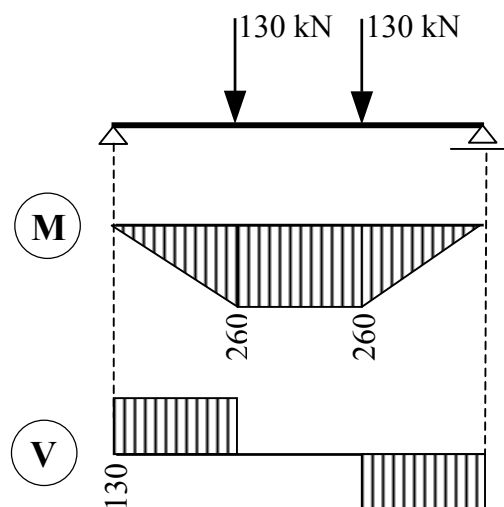
Návrhové vnútorné sily

$$M_{Sd} = 130 \cdot 2 = 260 \text{ kNm} ,$$

$$V_{Sd} = A = 130 \text{ kN} .$$

Posúdenie nosníka so zohľadnením klopenia

Nosník je proti strate stability klopením zabezpečený len v uložení (schéma pri zadaní príkladu). Vzdialenosť bodov tlačeneho pásu zaistených proti vybočeniu z roviny ohybu je teda rovná rozpätiu nosníka $L_{z1} = 6000 \text{ mm}$.

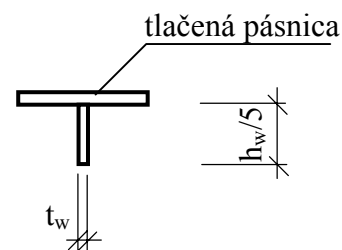


Moment zotrvačnosti, plocha a polomer zotrvačnosti konvenčného tlačeneho pásu

$$I_1 = \frac{1}{12} 24.250^3 + \frac{1}{12} 100.8^3 = 3,125 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 ,$$

$$A_1 = 24 \cdot 200 + 100 \cdot 8 = 6800 \text{ mm}^2 ,$$

$$i_1 = \sqrt{\frac{3,125 \cdot 10^7}{6800}} = 67,8 \text{ mm} .$$



$40 i_1 = 40 \cdot 67,8 = 2712 \text{ mm} < L_{z1} = 6000 \text{ mm} \rightarrow$ nosník je potrebné posudzovať na klopenie.

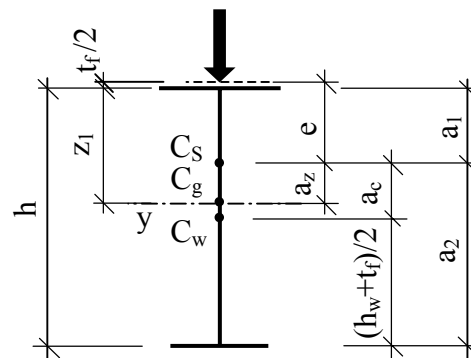
Súčiniteľ štihlosti pri klopení γ nosníka s monosymetrickým prierezom vypočítame dvojako:

- pomocou všeobecného vzorca,
- interpoláciou medzi symetrickým I-prierezom a T-prierezom.

a) Výpočet súčiniteľa štihlosti pomocou vzorca

Parameter krútenia pre $L_z = L_{z1}$

$$\begin{aligned} \alpha_t &= 0,62 \frac{L_z}{h} \sqrt{\frac{I_t}{I_z}} = \\ &= 0,62 \frac{6000}{522} \sqrt{\frac{1,77067 \cdot 10^6}{4,46046 \cdot 10^7}} = 1,419, \end{aligned}$$



$$C = \frac{h}{2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} \left(\frac{2}{h}\right)^2 \left(\frac{L_{z1}}{L_\omega}\right)^2 + \left(\frac{2\alpha_t}{\pi}\right)^2} =$$

$$= \frac{522}{2} \sqrt{\frac{2,54658 \cdot 10^{12}}{4,46046 \cdot 10^7} \left(\frac{2}{522}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 1,419}{\pi}\right)^2} = 339,0,$$

$$\kappa \approx 0,5,$$

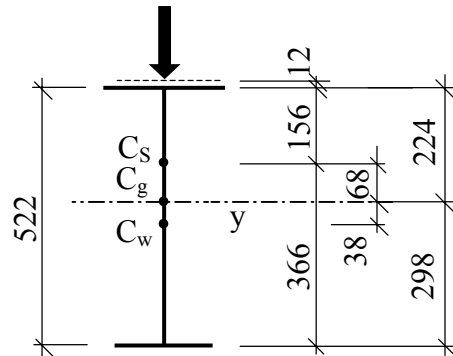
$$a_c = 106 \text{ mm}, a_i = \max(156; 366),$$

$$e = -(156+12) = -168 \text{ mm},$$

(zaťaženie pôsobí destabilizujúco)

$$\gamma = \frac{I}{\sqrt{\kappa \frac{a_c + e}{a_i} + \sqrt{\left(\kappa \frac{a_c + e}{a_i}\right)^2 + \left(\frac{C}{a_i}\right)^2}}} =$$

$$= \frac{I}{\sqrt{0,5 \frac{106 - 168}{366} + \sqrt{\left(0,5 \frac{106 - 168}{366}\right)^2 + \left(\frac{339}{366}\right)^2}}} = 1,09.$$



b) Výpočet súčiniteľa štíhlosti interpoláciou (približný výpočet)

Symetrický I-prierez ($\psi = 0$) – zaťaženie na hornej pásnici a uloženie KK pre $\alpha_t = 1,419$ dostávame

$$\gamma_0 = 1,0378 \text{ (tab. H3, STN 73 1401).}$$

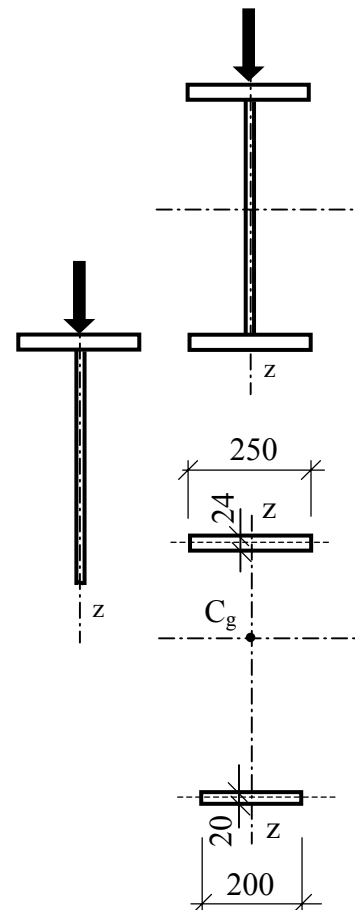
Prierez T ($\psi = 1$) – zaťaženie na hornej pásnici, nosník priečne zaťažený a pre $\alpha_t = 1,419$ lineárnou interpoláciou dostávame

$$\gamma_1 = 1,152 \text{ (tab. H3 STN 73 1401).}$$

Momenty zotrvačnosti pásov k osi z

$$I_1 = \frac{1}{12} 250^3 \cdot 24 = 3,125 \cdot 10^7 \text{ mm}^4,$$

$$I_2 = \frac{1}{12} 200^3 \cdot 20 = 1,333 \cdot 10^7 \text{ mm}^4.$$



Parameter nesymetrie

$$\psi = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{3,125 \cdot 10^{87} - 1,333 \cdot 10^7}{3,125 \cdot 10^7 + 1,333 \cdot 10^7} = 0,402.$$

Súčiniteľ štiľlosti pre medziľahlý prierez $0 < \psi < 1$

$$\gamma = \gamma_0 + \psi (\gamma_1 - \gamma_0) = 1,0378 + 0,402 (1,152 - 1,0378) = 1,0837.$$

Polomer zotrvačnosti tlačeneho pásu

$$a_i = \max(a_1; a_2) = \max(156; 366) = 366 \text{ mm},$$

$$i_{z1} = \sqrt{\frac{I_z}{I_y} z_1 a_i} = \sqrt{\frac{4,46046 \cdot 10^7}{7,458 \cdot 10^8} 224 \cdot 366} = 70,0 \text{ mm}.$$

Súčiniteľ vzpernej dĺžky $\kappa_M = 0,94$ sme určili pre parabolický priebeh ohybového momentu, ktorý sa podobá skutočnému priebehu v tvare lichobežníka (hodnota súčiniteľa je na bezpečnej strane).

Kritická štiľlosť prúta s jednou osou symetrie zaťaženého v rovine symetrie (použili sme súčiniteľ štiľlosti vypočítaný pomocou všeobecného vzorca $\gamma = 1,09$)

$$\lambda = \gamma \frac{\kappa_M L_{z1}}{i_{z1}} = 1,09 \frac{0,94 \cdot 6000}{70,0} = 87,6.$$

Štiľlosť a súčiniteľ vzperu pri klopení

$$\lambda_{LT} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}}} = \frac{87,6}{\sqrt{\frac{2,4214 \cdot 10^6}{2,987 \cdot 10^6}}} = 97,3,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = 97,3 \sqrt{1} / 93,9 = 1,04 \rightarrow \chi_{LT} = 0,61$$

(tab. E1, $\alpha_{LT} = 0,34$, STN 73 1401).

Medzný stav únosnosti – prierez v mieste maximálneho ohybového momentu

$$M_{Sd} = 260 \text{ kNm} < M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} =$$

$$= 0,61 \cdot 1 \cdot 2,987 \cdot 10^6 \cdot 235 / 1,1 = 389 \text{ kNm}.$$

Prievlak vyhovuje.

Šmyková únosnosť

Štíhlosť steny v šmyku

$$\beta_w = d / t_w = \frac{500}{6} = 62,5 \quad \text{alebo} \quad \beta_w = a / t_w = \frac{1000}{8} = 125.$$

Pomer strán poľa

$$\alpha = a / d = \frac{1000}{500} = 2 \quad \text{alebo} \quad \alpha = d / a = \frac{500}{1000} = 0,5,$$

$$\beta_w = \min(62,5; 125) = 62,5,$$

$$\alpha = \max(2,0; 0,5) = 2.$$

Medzná štíhlosť kompaktnej steny v šmyku

$$\beta_{1,V} = 100(0,7 + 0,3/\alpha^2) \varepsilon_m = 100(0,7 + 0,3/2^2) 1 = 77,5 > \beta_w = 62,5.$$

Vzhľadom na šmyk je stena kompaktná.

Šmyková sila únosnosti a overenie vplyvu šmyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{500 \cdot 8 \cdot 235}{1,1\sqrt{3}} = 493 \text{ kN},$$

$$V_{Sd} = 130 \text{ kN} < 0,5 \cdot 493 = 246,5 \text{ kN} \rightarrow \text{ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.}$$

Medzný stav používateľnosti

Návrhový moment pri charakteristickom zaťažení

$$M_{Sk} = 2 \cdot 100 = 200 \text{ kNm}.$$

Pomerné štíhlosti a súčiniteľ vzperu pri klopení (prierez triedy 3)

$$\beta_w = W_{el,y} / W_{pl,y} = 0,81,$$

$$\lambda_{LT} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}}} = \frac{87,6}{\sqrt{0,81}} = 97,3,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{97,3}{93,9} \sqrt{0,81} = 0,93 \rightarrow \chi_{LT} = 0,6908 \text{ (tab. E1, } \alpha_{LT} = 0,34).$$

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 130 / 493 = 0,26 < 0,3 \rightarrow \text{ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.}$$

Overenie pôsobenia prúta pri charakteristickom zaťažení

$$\begin{aligned} M_{Sk} = 200 \text{ kNm} < M_{b,el,Rd} &= \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} = \\ &= 0,6908 \cdot 0,81 \cdot 2,987 \cdot 10^6 \cdot 235 / 1,1 = 357 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Pri charakteristickom zaťažení prút pôsobí v pružnej oblasti.

Podmienka spoľahlivosti

$$\delta \doteq 0,0035494 \frac{F_{Sk} L^3}{EJ} = \frac{0,0035494 \cdot 100 \cdot 6000^3 \cdot 10^3}{210000 \cdot 7,458 \cdot 10^8} = 0,5 \text{ mm} < \frac{L}{400} = 15 \text{ mm.}$$

Prievlak vyhovuje.

4.5 Stĺp namáhaný tlakovou silou a ohybovým momentom

Navrhňte prierez stĺpa z ocele S 235, ktorý je zaťažený návrhovou tlakovou silou $N_{Sd} = 400$ kN a návrhovým ohybovým momentom $M_{Sd} = 75$ kNm okolo osi y-y. Výška stĺpa je 3 m. Vzhľadom na vybočenie kolmo na os y-y, z-z a na klopenie stĺp pôsobí ako konzola.

Potrebnú veľkosť momentu zotrvačnosti prierezu určíme z maximálneho prípustného vodorovného priehybu konzoly. Medzná hodnota vodorovného posunu vrcholu stĺpa (podľa STN 73 1401)

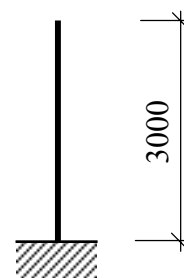
$$\delta_{max} = \frac{H}{300} = \frac{3000}{300} = 10,0 \text{ mm.}$$

Priehyb konzoly vypočítame pre charakteristickú hodnotu ohybového momentu.

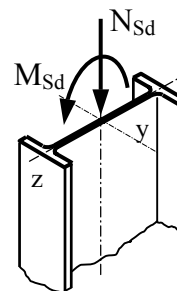
$$M_k = 75 / 1,3 = 57,7 \text{ kNm,}$$

$$\delta = \int_0^H \frac{M_1 M}{EI} dx = \frac{H^2 M}{2EI_y} = \frac{3000^2 \cdot 57,7 \cdot 10^6}{2 \cdot 210000 \cdot I_y} \leq \delta_{max} = 10,0 \text{ mm,}$$

$$I_y \geq 1,236 \cdot 10^8 \text{ mm}^4.$$



kolmo na os y-y, z-z



Vzhľadom na možné vybočenie a klopenie stĺpa navrhujeme valcovaný prierez IPE 400 s nasledovnými prierezovými charakteristikami

$$h = 400 \text{ mm, } t_f = 13,5 \text{ mm, } t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$A = 8,45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2,$$

$$I_y = 2,31 \cdot 10^8 \text{ mm}^4,$$

$$I_z = 13,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4,$$

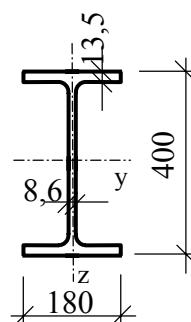
$$i_y = 165 \text{ mm,}$$

$$i_z = 39,5 \text{ mm,}$$

$$W_{el,y} = 1160 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

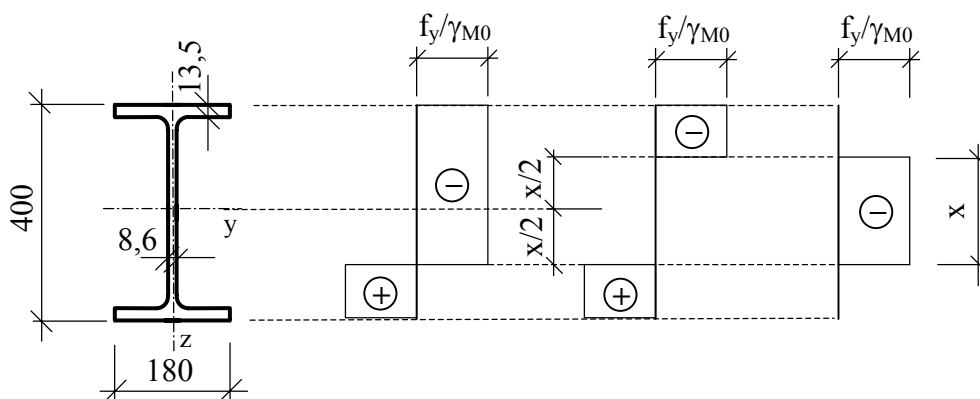
$$W_{pl,y} = 1308 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$I_t = 514 \cdot 10^3 \text{ mm}^4, \quad i_{z1} = 46,3 \text{ mm.}$$



Klasifikácia prierezu

Predpokladáme, že v najviac namáhanom priereze môže vzniknúť plastický kĺb, teda že prierez je triedy 1 alebo 2. Ďalším postupom sa tento predpoklad potvrdí, alebo vyvráti.



Overíme, či je stena schopná prenieť osovú silu

$$f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = 1,0.$$

$$x = \frac{N_{Sd}}{t_w \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{400 \cdot 10^3}{8,6 \frac{235}{1,1}} = 217 \text{ mm} < h_w = 400 - 2 \cdot 13,5 = 373 \text{ mm}.$$

Stena prenesie osovú silu.

Výška tlačenej časti steny

$$(h/2 - t_f) + x/2 = 200 - 13,5 + 217 / 2 = 295 \text{ mm},$$

$$\alpha = \frac{295}{400 - 2 \cdot 13,5} = 0,79 > 0,5.$$

$$d/t_w = (400 - 2 \cdot 13,5) / 8,6 = 43,3 > \beta_{01} = \frac{420 \varepsilon_m}{16\alpha - 2,0} = \frac{420 \cdot 1}{16 \cdot 0,79 - 2} = 39$$

→ prierez nezodpovedá triede 1.

$$43,3 < \beta_{02} = \frac{448 \varepsilon_m}{16\alpha - 2,4} = \frac{448 \cdot 1}{16 \cdot 0,79 - 2,4} = 48,7 \rightarrow \text{trieda 2.}$$

Tlačená pásnica : $c/t_f = (90 - 4,3) / 13,5 = 6,3 < \beta_{01} = 9 \rightarrow$ trieda 1.

Prierez je triedy 2.

Posúdenie stĺpa

Vzperné dĺžky stĺpa

$$L_{cr,y} = 2H = 2 \cdot 3\,000 = 6\,000 \text{ mm} \quad (\text{vybočenie kolmo na os } y\text{-}y),$$

$$L_{cr,z} = 2H = 2 \cdot 3\,000 = 6\,000 \text{ mm} \quad (\text{vybočenie kolmo na os } z\text{-}z).$$

Štíhlosti stĺpa

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{6\,000}{165} = 36,4, \quad \lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{6\,000}{39,5} = 151,9,$$

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9.$$

Pomerné štíhlosti a súčinitele vzperu ($t_f < 40 \text{ mm}$, $h/b = 400 - 180 = 2,2 > 1,2$)

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{36,4}{93,9} = 0,39 \rightarrow \chi_y = 0,9554 \quad (\text{tab. E1, krivka a, STN 73 1401}),$$

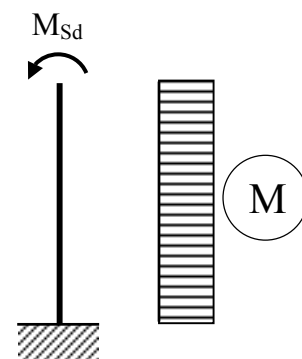
$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{151,9}{93,9} = 1,62 \rightarrow \chi_z = 0,3261 \quad (\text{tab. E1, krivka b, STN 73 1401}).$$

Súčiniteľ ekvivalentného konštantného momentu pri vybočení v smere ohybu, to znamená kolmo na os y - y . Pri zaťažení proti sebe pôsobiacimi koncovými momentmi rovnakej veľkosti je $\psi = 1$

$$\beta_{My} = 1,8 - 0,7\psi = 1,8 - 0,7 \cdot 1 = 1,1,$$

$$\begin{aligned} \mu_y &= \bar{\lambda}_y (2\beta_{My} - 4) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] = \\ &= 0,39(2 \cdot 1,1 - 4) + \left(\frac{1308 \cdot 10^3 - 1160 \cdot 10^3}{1160 \cdot 10^3} \right) = -0,574 < 0,90, \end{aligned}$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Sd}}{\chi_y A f_y} = 1 - \frac{-0,574 \cdot 400 \cdot 10^3}{0,9554 \cdot 8\,450 \cdot 235} = 1,121 < 1,5.$$

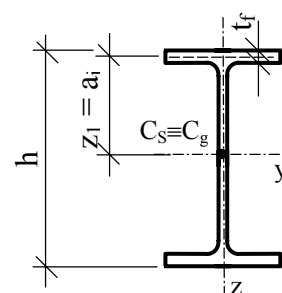


Podmienka spoľahlivosti pri interakcii osovej sily a ohybového momentu bez klopenia

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Sd}}{\chi_{min} A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} = \\ & = \frac{400 \cdot 10^3}{0,3261 \cdot 8450 \frac{235}{1,1}} + \frac{1,121 \cdot 75 \cdot 10^6}{1308 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} = 0,679 + 0,30 = 0,979 < 1. \end{aligned}$$

Stĺp vyhovuje.

Overíme, či prierez je potrebné posudzovať na klopenie. Ne-použijeme však polomer zotrvačnosti tzv. konvenčného tlačene-ho pásu, ale polomer zotrvačnosti i_{z1} pre $z_1 = a_i = (h - t_f)/2$, ktorý vyplýva z definície kritickej štíhlosti pri klopení bisymet-rických prierezov a ktorý sa pre valcované prierezy uvádza v tabuľkách, napr. [24].



Vzperná dĺžka stĺpa pri klopení

$$L_z = 2 \cdot 3\,000\text{ mm} = 6\,000\text{ mm} > 40 i_{z1} = 40 \cdot 46,3 = 1852\text{ mm}.$$

Pri posúdení stĺpa je potrebné uvažovať klopenie.

Posúdenie stĺpa s uvažovaním straty stability pri ohybe (klopenie)

Súčiniteľ štíhlosti γ a parameter krútenia α_t určíme pre konzolu namáhanú čistým ohybom so vzpernou dĺžkou $L_z = 2H = 6\,000\text{ mm}$.

Parameter krútenia

$$\begin{aligned} \alpha_t &= 0,62 \frac{L_z}{h} \sqrt{\frac{I_t}{I_z}} = 0,62 \frac{6\,000}{400} \sqrt{\frac{514 \cdot 10^3}{13,2 \cdot 10^6}} = 1,84 \\ &\rightarrow \gamma = 0,69 \text{ (tab. H2, STN 73 1401)}. \end{aligned}$$

Štíhlosti a súčiniteľ vzperu pri klopení

$$\begin{aligned} \lambda &= \gamma \frac{2L_z}{h} \sqrt{\frac{I_y}{I_z}} = 0,69 \frac{2 \cdot 6\,000}{400} \sqrt{\frac{2,31 \cdot 10^8}{13,2 \cdot 10^6}} = 85,2, \\ \lambda_{LT} &= \lambda / \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}} = 85,2 / \sqrt{\frac{1160 \cdot 10^3}{1308 \cdot 10^3}} = 90,5, \\ \beta_W &= 1 \text{ (pre triedu 2)}, \quad \lambda_1 = 93,9 \sqrt{235 / f_y} = 93,9, \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_w} = \frac{90,5}{93,9} = 0,96$$

$$\rightarrow \chi_{LT} = 0,7892 \quad (\text{tab. E1, } \alpha_{LT} = 0,13, \text{ STN 73 1401}).$$

Súčiniteľ ekvivalentného konštantného momentu pre klopenie (pri zaťažení proti sebe pôsobiacimi koncovými momentmi rovnakej veľkosti je $\psi = 1$)

$$\beta_{M,LT} = 1,8 - 0,7\psi = 1,1,$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0,15 = 0,15 \cdot 1,62 \cdot 1,1 - 0,15 = 0,1173 \leq 0,90.$$

Podmienka je splnená.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{Sd}}{\chi_z A f_y} = 1 - \frac{0,1173 \cdot 400 \cdot 10^3}{0,3261 \cdot 8450 \cdot 235} = 0,927 \leq 1.$$

Podmienka je splnená.

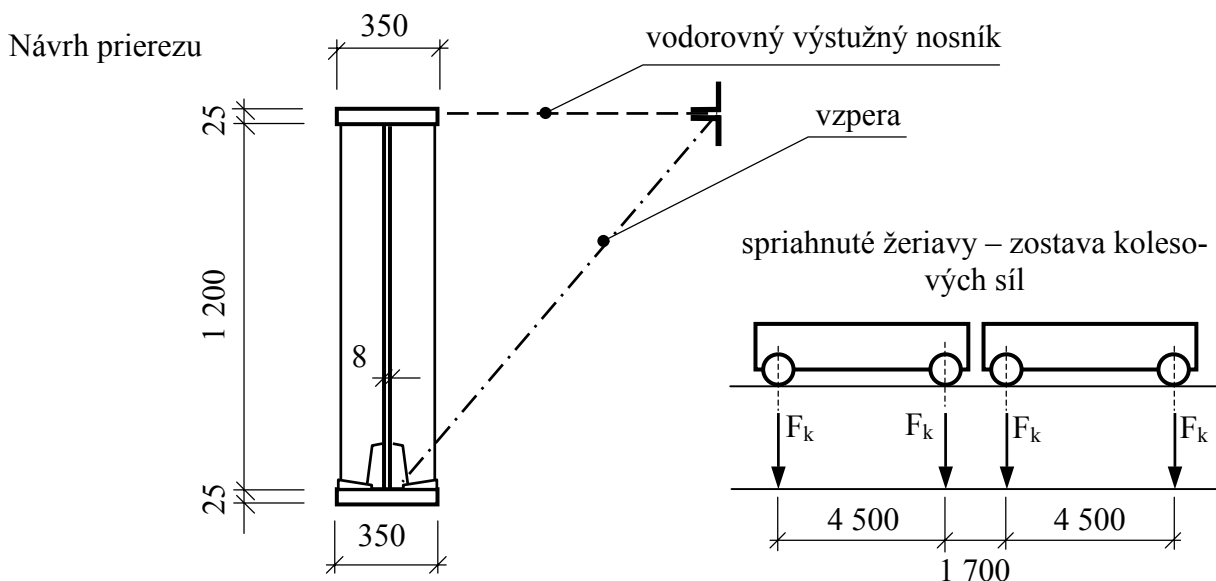
Podmienka spoľahlivosti pri interakcii osovej sily a ohybového momentu

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Sd}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} M_{y,Sd}}{\chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} = \\ & = \frac{400 \cdot 10^3}{0,3261 \cdot 8450 \frac{235}{1,1}} + \frac{0,927 \cdot 75 \cdot 10^6}{0,7892 \cdot 1308 \cdot 10^3 \frac{235}{1,1}} = 0,679 + 0,315 = 0,994 < 1,0. \end{aligned}$$

Stĺp vyhovuje.

4.6 Nosník s pohyblivým zaťažením

Navrhňte a posúďte zvaraný nosník žeriavovej dráhy z ocele S 235, ktorý je zaťažený dvoma mostovými žeriavmi s nosnosťou 32/8 t. Charakteristická hodnota maximálnych kolesových tlakových síl $F_k = 253,0$ kN, parciálny súčiniteľ zaťaženia $\gamma_F = 1,2$. Dĺžka nosníka je 12000 mm, dynamický súčiniteľ nosníka $\delta = 1,1$. Nosník má priečne výstuhy vo vzdialenostiach $a = 1200$ mm. Tlačný pás je zabezpečený proti klopeniu vodorovným priehradovým výstužným nosníkom. Koľajnica JKL 100 je uložená priamo na pásnici a nie je k nej privarená.



Zaťaženie

Stále a dlhodobé zaťaženie	charakteristické [kN/m]	γ_F	návrhové [kN/m]
vlastná tiaž nosníka	0,0271.78,50	1,1	2,34
koľajnica JKL 100	0,676	1,1	0,75
výstuhy (odhad)	0,3	1,1	0,33
Spolu	3,106		3,42

Vnútorne sily

Ohybový moment a podperová reakcia od stáleho a dlhodobého zaťaženia :

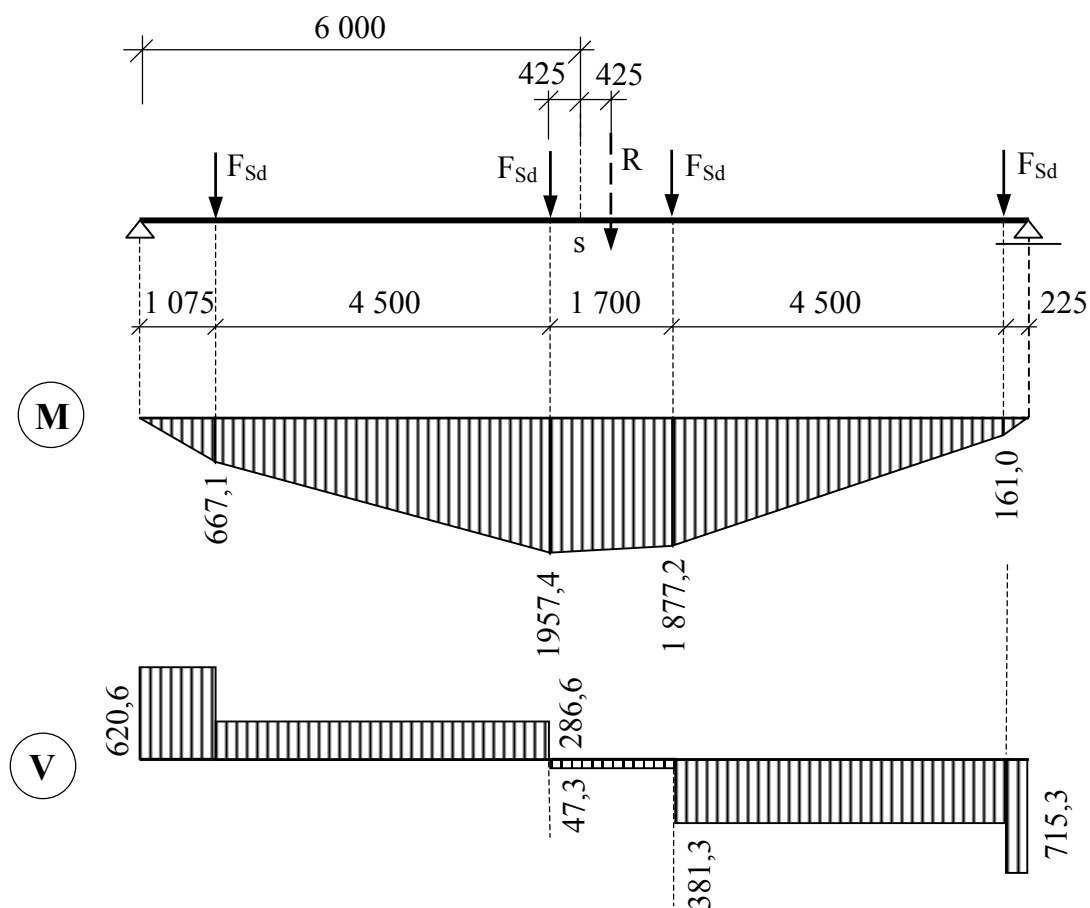
$$M_{g,Sd} = 1/8 \cdot 3,42 \cdot 12^2 = 61,6 \text{ kNm},$$

$$A_{g,Sd} = 3,42 \cdot 12/2 = 20,52 \text{ kN}.$$

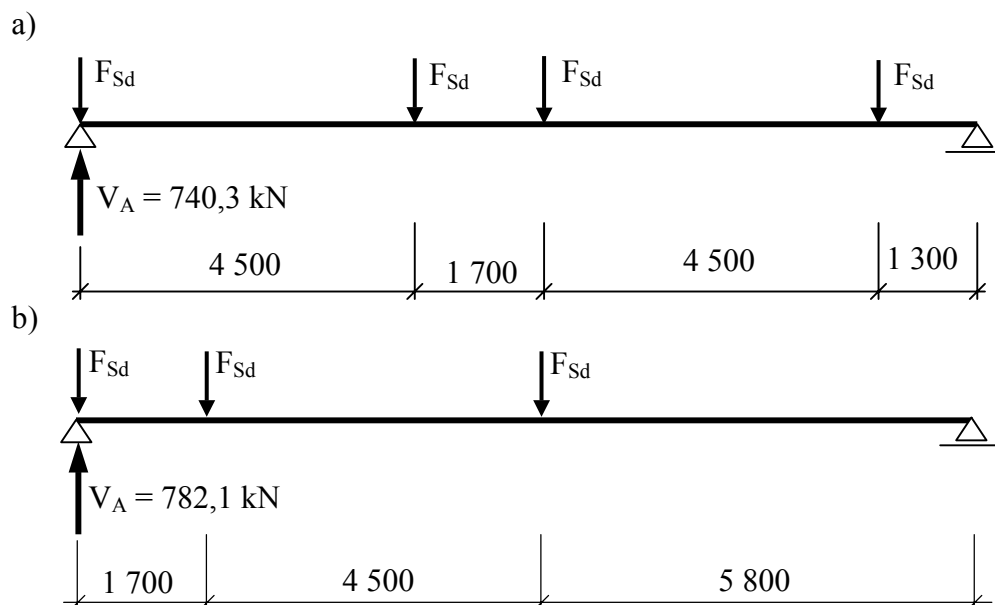
Maximálny ohybový moment od pohyblivých bremien vzniká pod aritmeticky stredným bremenom.

Kolesová tlaková sila (s dynamickým súčiniteľom)

$$F_{Sd} = \gamma_F \delta F_k = 1,2 \cdot 1,1 \cdot 253 = 334 \text{ kN.}$$



Maximálna reakcia sa určí ako väčšia z reakcií dvoch zaťažovacích stavov.



Maximálny ohybový moment a reakcia

$$M_{Sd} = 61,6 + 1\,957,5 = 2\,019,1 \text{ kNm} ,$$

$$A_{max} = V_{Sd,max} = 20,5 + 782,1 = 802,6 \text{ kNm} .$$

Klasifikácia prierezu

$$t_f < 40 \text{ mm}, f_y = 235 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon_m = 1,0,$$

$$\text{pásnica (tlak): } c/t_f = (175-4)/25 = 6,85 < \beta_{0l} = 9\varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1,}$$

$$\text{stena (ohyb): } d/t_w = 1200/8 = 150 > \beta_l = 130\varepsilon_m \rightarrow \text{trieda 4.}$$

Prierez je triedy 4.

Prierezové charakteristiky

Plocha prierezu

$$A = 2.350.25 + 1\,200.8 = 27100 \text{ mm}^2.$$

Moment zotrvačnosti plného prierezu

$$I_y = 2 \frac{I}{12} 350.25^3 + 2.350.25.612,5^2 + \frac{I}{12} 8.1200^3 = 7,7181.10^9 \text{ mm}^4 .$$

Moment zotrvačnosti steny s výškou $2d_c$ (d_c je výška tlačenej časti steny, pri symetrickom priereze $d_c = d/2$)

$$I_{wc} = \frac{I}{12} t_w (2d_c)^3 = \frac{I}{12} 8 (2.600)^3 = 1,152.10^9 \text{ mm}^4 .$$

Prierezový modul ku krajnému tlačnému vláknu plného prierezu

$$W_c = I_y / (h/2) = 7,7181.10^9 / 625 = 1,2349.10^9 \text{ mm}^3 .$$

Redukčný súčiniteľ pri ohybe

$$\beta_{l,NM} = \beta_{l,M} = 130, \quad \beta_w = 150,$$

$$\beta_{r,NM} = \beta_{r,M} = 0,8\beta_w + 0,2\beta_{l,M} = 0,8.150 + 0,2.130 = 146,$$

$$\rho_{NM} = \rho_M = \beta_{l,M} / \beta_{r,M} = 130 / 146 = 0,89.$$

Prierezový modul efektívneho prierezu k tlačnému okraju

$$W_{eff,c} = W_c \left[1 - \frac{I_{wc}}{I_y} (1 - \rho_M) \right] =$$

$$= 1,2349 \cdot 10^9 \left[1 - \frac{1,152 \cdot 10^9}{7,7181458 \cdot 10^9} (1 - 0,89) \right] = 1,2146 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 .$$

Prierezový modul efektívneho prierezu k ťahanému okraju

$$W_{eff,t} = W_t = I_y / (h/2) = 7,7181 \cdot 10^9 / 625 = 1,2349 \cdot 10^9 \text{ mm}^3 .$$

Medzný stav únosnosti – prierez pri podpere namáhaný priečnou silou

Maximálna návrhová priečna sila

$$V_{Sd} = A_{max} = 802,6 \text{ kN} .$$

Pomer strán polí, štíhlosť steny a medzná štíhlosť steny v šmyku

$$\alpha = \max (a/d, d/a) = 1\,200/1\,200 = 1,0,$$

$$\beta_w = \min (d/t_w, a/t_w) = 1\,200/8 = 150,$$

$$\beta_{1,V} = 100(0,7 + 0,3 / \alpha^2) \sqrt{235 / f_y} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{1,0^2} \right) \sqrt{1} = 100 < 150.$$

Stena je štíhla vzhľadom na šmyk.

Na určenie šmykovej sily únosnosti steny použijeme jednoduchú pokritickú metódu

$$\beta_{r,V} = 0,8\beta_w + 0,2\beta_{1,V} = 0,8 \cdot 150 + 0,2 \cdot 100 = 140 ,$$

$$\rho_{V,a} = \beta_{1,V} / \beta_{r,V} = \frac{100}{140} = 0,714 .$$

Šmyková sila únosnosti

$$V_{ba,Rd} = V_{Pl,Rd} \rho_{V,a} = \frac{1\,200 \cdot 8 \cdot 235}{1,1 \cdot \sqrt{3}} 0,714 = 845,4 \text{ kN} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$V_{Sd} = 802,6 \text{ kN} < V_{ba,Rd} = 845,4 \text{ kN} .$$

Nosník vyhovuje .

Medzný stav únosnosti – prierez v mieste aritmeticky stredného bremena (bez lokálnych účinkov)

Návrhový ohybový moment a zodpovedajúca priečna sila

$$M_{Sd} = 2\,019,1 \text{ kNm} ,$$

$$\begin{aligned} V_{Sd} &= \max(V_{Sd,L} ; V_{Sd,P}) = \\ &= \max(286,7 ; 47,3) = 286,7 \text{ kN} < 0,5 V_{ba,Rd} = 422,7 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Návrhový ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.

Podmienka spoľahlivosti (tlačená pásnica je zabezpečená proti klopeniu, $\chi_{LT} = 1,0$)

$$M_{Sd} = 2\,019,1 \text{ kNm} < M_{eff,y,Rd} = 1,2146 \cdot 10^7 \cdot 235 / 1,1 = 2595 \text{ kNm}.$$

Nosník vyhovuje.

Keďže na nosník pôsobí pohyblivá sústava bremien, je potrebné posúdiť lokálne účinky na nevystuženú stenu, pretože bremeno sa môže nachádzať aj mimo priečnej výstupy. Nosník teda posudzujeme s uvažovaním lokálnych účinkov, ktoré zahŕňajú plastizáciu a vydúvanie pod pásnicou (lokálna únosnosť a lokálne bortenie steny) a vydúvanie prevažnej časti steny (lokálna stabilita steny).

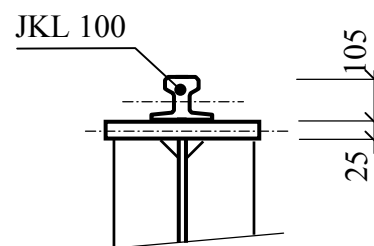
Lokálna únosnosť steny

Moment zotrvačnosti pásnice

$$I_f = \frac{1}{12} 350 \cdot 25^3 = 4,5573 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 .$$

Moment zotrvačnosti koľajnice

$$I_r = 10,376 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 .$$



Pozn.: Prierezové charakteristiky koľajníc pre žeriavové dráhy sú uvedené napr. v [20].

Normálové napätie v pásnici (na hornom povrchu)

$$\sigma_{f,ED} = M_{Sd} / W_{eff,y} = \frac{2019,1 \cdot 10^6}{1,2146248 \cdot 10^7} = 166,3 \text{ MPa} .$$

Koľajnica je uložená priamo na pásnicu, teda $k_r = 3,25$. Dĺžka tuhého uloženia s_s (zaťažovacia dĺžka, na ktorej pôsobí zaťaženie) je rovná dvojnásobku výšky koľajnice teda $s_s = 210 \text{ mm}$.

Roznášacia dĺžka s_y v mieste maximálneho momentu

$$\begin{aligned} s_y &= k_R \sqrt[3]{(I_f + I_r) / t_w} \sqrt{1 - (\sigma_{f,ED} \gamma_{M0} / f_y)^2} = \\ &= 3,25 \sqrt[3]{\frac{4,5573 \cdot 10^5 + 10,376 \cdot 10^6}{8}} \sqrt{1 - (166,3 \cdot 1,1 / 235)^2} = 225,7 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Roznášacia dĺžka s_y na konci nosníka ($\sigma_{f,Ed} = 0$)

$$s_y = 3,25 \sqrt[3]{\frac{(4,5573 \cdot 10^5 + 10,376 \cdot 10^6)}{8}} / 2 = 179,8 \text{ mm}.$$

Návrhová lokálna únosnosť steny nosníka (v mieste maximálneho momentu)

$$R_{y,Rd} = s_y t_w f_{yw} / \gamma_{M0} = 225,7 \cdot 8 \cdot 235 / 1,1 = 385,7 \text{ kN} > F_{Sd} = 334 \text{ kN}.$$

Stena nosníka v mieste maximálneho momentu vyhovuje.

Návrhová lokálna únosnosť steny nosníka (na konci nosníka)

$$R_{y,Rd} = s_y t_w f_{yw} / \gamma_{M0} = 179,8 \cdot 8 \cdot 235 / 1,1 = 307,3 \text{ kN} < F_{Sd} = 334 \text{ kN}.$$

Stena na konci nosníka nevyhovuje.

Lokálne bortenie steny

Návrhová únosnosť steny pri lokálnom bortení pri pohyblivom miestnom tlaku

$$\begin{aligned} R_{s,Rd} &= 10 f_{yw} t_w^2 \left(1 + 0,004 \frac{s_s}{t_w} \right) \left(\frac{I_f}{t_w^4} \sqrt{f_{yf} / 235} \right)^{0,132} / \gamma_{M1} = \\ &= 10 \cdot 235 \cdot 8^2 \left(1 + 0,004 \frac{210}{8} \right) \left(\frac{4,5573 \cdot 10^5}{8^4} \sqrt{1} \right)^{0,132} / 1,1 = 309,5 \text{ kN} < F_{Sd} = 334 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Stena v lokálnom bortení nevyhovuje.

Napätie na hornom okraji steny

$$\sigma_{we} = 166,3 \cdot 600 / 625 = 159,6 \text{ MPa}.$$

Nosník namáhaný aj ohybovým momentom musí spĺňať podmienku

$$F_{Sd} \leq R_{s,Rd} [1 - (\sigma_{we} \gamma_{M0} / f_{yw})^2]^{0,5} = 309,5 [1 - (159,6 \cdot 1,1 / 235)^2]^{0,5} = 205,7 \text{ kN}.$$

$$F_{Sd} = 334 \text{ kN} > F_{s,Rd} = 205,7 \text{ kN}.$$

Stena namáhaná ohybovým momentom a miestnym bremenom nevyhovuje.

Lokálna stabilita steny

Lokálne vydúvanie steny na prevažnej časti jej výšky modelujeme fiktívnym prútom, ktorý je vytvorený časťou steny šírky b_{eff} so vzpernou dĺžkou rovnou 0,75-násobku výšky steny. Efektívna šírka prierezu

$$b_{eff} = 2(d/2 + t_f) = 2(600 + 25) = 1\,250\text{ mm}.$$

Prierezové charakteristiky efektívneho prierezu

Plocha prierezu

$$A_{eff} = 1\,250 \cdot 8 = 10\,000\text{ mm}^2.$$

Moment a polomer zotrvačnosti k osi y–y

$$I_y = \frac{1}{12} 1\,250 \cdot 8^3 = 53\,333\text{ mm}^4,$$

$$i_y = 2,31\text{ mm}.$$

Štíhlosť a pomerná štíhlosť a súčiniteľ vzperu

$$\lambda = \frac{0,75 \cdot 1\,200}{2,31} = 389,6, \quad \bar{\lambda} = \frac{389,6}{93,9} = 4,15 > 2,15.$$

Štíhlosť $\bar{\lambda}$ prekračuje rozsah tab. E (STN 73 1401), preto súčiniteľ vzperu vypočítame priamo vzorcom pre krivku c → miera imperfekcie $\alpha_1 = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_1 (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,49(4,15 - 0,2) + 4,15^2 \right] = 10,079,$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{10,079 + \sqrt{10,079^2 - 4,15^2}} = 0,052.$$

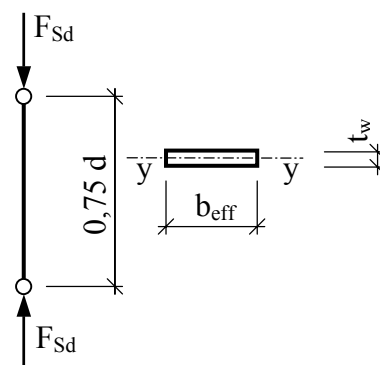
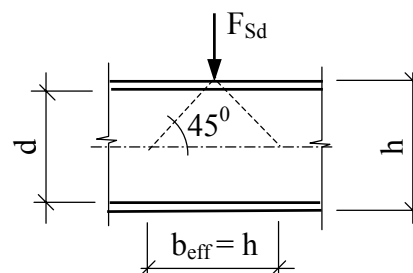
Stabilitná únosnosť steny

$$R_{b,Rd} = \chi \beta_A A_{eff} f_y / \gamma_{M1} = 0,052 \cdot 1 \cdot 10\,000 \cdot \frac{235}{1,1} = 111,1\text{ kN} < F_{Sd} = 334\text{ kN}.$$

Stena nevyhovuje.

Medzný stav použiteľnosti

Na výpočet priehybu je potrebné použiť vplyvovú čiaru priehybu a stanoviť také postavenie síl na nosníku, ktoré vyvolá v strede rozpätia maximálny priehyb. Pre jednoduchosť priehyb v strede nosníka určíme od takého postavenia bremien, ktoré vyvolalo maximálny ohybový moment. Odlišnosť takéhoto priehybu od maximálneho priehybu je zanedbateľná.



Použijeme vzťah na výpočet priehybu v strede nosníka od sily $P_{k,i}$ v ľubovoľnej polohe a_i od podpory. Pri výpočte budeme uvažovať moment zotrvačnosti plného prierezu. Priehyb od vlastnej tiaže oceľovej konštrukcie zanedbáme.

$$\begin{aligned}\delta &= \sum_{i=1}^4 \frac{P_k a_i}{48 EI_y} (3L^2 - 4a_i^2) = \\ &= \sum_{i=1}^4 \frac{1,1.253.10^3}{48.21.10^4 \cdot 7,7181.10^9} [1075 (3.12000^2 - 4.1075^2) + 5575 (3.12000^2 - \\ &\quad - 4.5575^2) + 7275 (3.12000^2 - 4.7275^2) + 11775 (3.12000^2 - 4.11775^2)] \\ \delta &= 8,4 \text{ mm} < L / 600 = 20 \text{ mm} .\end{aligned}$$

Nosník vyhovuje.

Vzhľadom na to, že stena nosníka nevyhovuje na lokálne účinky, hrúbka steny bola zmenená na 12 mm. Ďalej sú postupne uvedené zmenené hodnoty a posúdenie steny.

stena (ohyb): $\beta_{02} = d/t_w 1200/12 = 100 < \beta_l = 130 \rightarrow$ trieda 3

Štíhlosť steny $\beta = 100 = \beta_{l,v} = 100$ (pre pomer $\alpha = 1,0$), preto stena v šmyku je kompaktná.

$$\begin{aligned}I_y &= 8,244.10^9 \text{ mm}^4, \quad W_{el,y} = 1,327.10^7 \text{ mm}^3, \quad V_{pl,Rd} = 1776 \text{ kN}, \\ \sigma_{f,Ed} &= 152,1 \text{ MPa}, \quad \sigma_{we} = 146 \text{ MPa}, \\ s_y &= 220,5 \text{ mm} \text{ (v mieste } M_{max}), \quad s_y = 157 \text{ mm} \text{ (na konci nosníka)}, \\ A_{eff} &= 15\,000 \text{ mm}^2, \quad I_y = 180\,000 \text{ mm}^4, \quad i_y = 3,46 \text{ mm}, \quad \lambda = 260 \rightarrow \chi = 0,12.\end{aligned}$$

Návrhová lokálna únosnosť steny

$$R_{y,Rd} = 565,3 \text{ kN} \text{ (v mieste } M_{max}), \quad R_{y,Rd} = 492,5 \text{ kN} \text{ (na konci nosníka).}$$

Návrhová únosnosť steny pri lokálnom bortení

$$R_{s,Rd} = 562 \text{ kN}.$$

Stabilitná únosnosť steny

$$R_{b,Rd} = 384,5 \text{ kN}.$$

Podmienka spoľahlivosti

$$F_{Sd} = 334 \text{ kN} < \min (R_{y,Rd}; R_{s,Rd}; R_{b,Rd}) = 384,5 \text{ kN}.$$

Stena vyhovuje na zaťaženie miestnou priečnou silou.

Nosník, ktorý je namáhaný aj ohybovým momentom, musí spĺňať podmienku

$$F_{Sd} \leq R_{s,Rd} [1 - (\sigma_{we} \gamma_{M0} / f_{yw})^2]^{0,5} = 562 [1 - (146,1 / 235)^2]^{0,5} = 410,3 \text{ kN}.$$

$$F_{Sd} = 334 \text{ kN} < F_{s,Rd} = 410,3 \text{ kN}.$$

Stena vyhovuje

Prierez je triedy 3, preto je potrebné posúdiť rovinnú napätosť v najviac namáhanom bode steny. V našom prípade ide o horný okraj steny, kde pôsobí aj návrhové priečne normálové napätie od kolesovej tlakovej sily mimo priečnej výstuhy.

Posúdenie rovinatej napätosti na hornom okraji steny

a) v mieste maximálneho ohybového momentu M_{max}

návrhové pozdĺžne normálové napätie : $\sigma_{x,Ed} = 146 \text{ MPa}$,

návrhové priečne normálové napätie : $\sigma_{z,Ed} = F_{Sd} / (s_y t_w) = 334 \cdot 10^3 / (220 \cdot 5,12)$,

$$\sigma_{z,Ed} = 126,2 \text{ MPa},$$

návrhové šmykové napätie :

$$\tau_{Ed} = V_{Sd} / A_V,$$

$$\tau_{Ed} = 286,7 \cdot 10^3 / (12,1 \cdot 200) = 20 \text{ MPa}.$$

Ak $V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 286,7 / 1776 = 0,16 < 0,3$, musí byť splnená podmienka

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{yd}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{yd}} \right) = \left(\frac{146}{213,6} \right)^2 + \left(\frac{126,2}{213,6} \right)^2 - \left(\frac{146}{213,6} \right) \left(\frac{126,2}{213,6} \right) = 0,412 \leq 1,0.$$

Stena vyhovuje.

b) v mieste maximálnej priečnej sily $V_{Sd,max}$

návrhové pozdĺžne normálové napätie : $\sigma_{x,Ed} = 0 \text{ MPa}$,

návrhové priečne normálové napätie : $\sigma_{z,Ed} = F_{Sd} / (s_y t_w) = 334 \cdot 10^3 / (157 \cdot 12)$,

$$\sigma_{z,Ed} = 177,3 \text{ MPa},$$

návrhové šmykové napätie :

$$\tau_{Ed} = V_{Sd,max} / (A_V),$$

$$\tau_{Ed} = 802,6 \cdot 10^3 / (1200 \cdot 12) = 55,7 \text{ MPa}.$$

Ak $V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 802,6 / 1776 = 0,45 > 0,3$, musí byť splnená podmienka

$$\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{yd}} \right)^2 + 1,1 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_{yd} / \sqrt{3}} \right)^2 = \left(\frac{177,3}{213,6} \right)^2 + 1,1 \left(\frac{55,7}{213,6 / \sqrt{3}} \right)^2 = 0,913 \leq 1,1.$$

Stena vyhovuje.

4.7 Namáhanie na únavu

Posúďte pripojenie styčnickového plechu vodorovného výstužného nosníka a pripojenie priečnej výstuhy na únavu v nosníku žeriavovej dráhy z príkladu 4.6. Dynamický súčiniteľ $\delta = 1,1$, parciálny súčiniteľ zaťaženia $\gamma_F = 1,2$. Požadovaná životnosť je $n = 4 \cdot 10^6$ zaťažovacích kmitov.

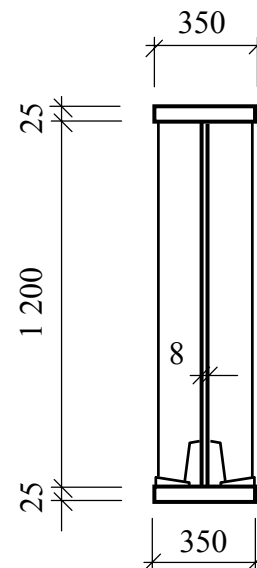
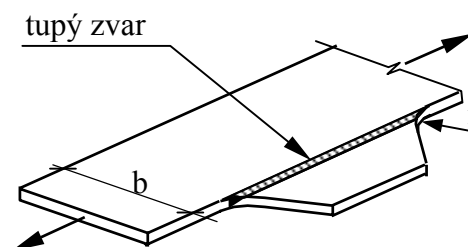
Namáhanie

$\Delta\sigma_i/\Delta\sigma_{\max}$	0,25	0,5	0,75	1,0
Počet kmitov [%]	77	15	5	3
n_i	$3,08 \cdot 10^6$	$0,6 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,12 \cdot 10^6$

Detail – pripojenie styčnickového plechu

Variety detailu pripojenia styčnickového plechu vodorovného výstužného nosníka sú v klasifikačnej tabuľke konštrukčných detailov (tab. K4, STN 73 1401 – príloha K) uvedené pod číslom 406 až 410.

Posúdime detail 406, to znamená styčnickový plech privarený tupým zvarom s polomerom zaoblenia $r > b/3$.



Maximálne a minimálne napätie v hornej pásnici

Maximálne napätie vyplýva z príkladu 4.6 pre prierez s pôvodnou hrúbkou steny $t_w = 8 \text{ mm}$. Pri posúdení medzného stavu mnohokmitovej únavy sa uvažuje s prevádzkovým zaťažením. Parciálny súčiniteľ prevádzkového zaťaženia $\gamma_{Ff} = 1,0$.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= M_{Sd} \gamma_{Ff} / (\gamma_F W_{\text{eff},c}) = \\ &= 1957,5 \cdot 10^6 \cdot 1,0 / (1,2 \cdot 1,2146 \cdot 10^7) = 134,3 \text{ MPa} , \\ \sigma_{\min} &= 0 \text{ (pre prostý nosník)}.\end{aligned}$$

Rozkmit napätia

$$\Delta\sigma_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = (134,3 - 0) = 134,3 \text{ MPa} .$$

Pozn.: Pri výpočte napätia sme použili návrhový moment, preto sme ho predelili parciálnym súčiniteľom spoľahlivosti zaťaženia $\gamma_F = 1,2$. Dynamický súčiniteľ je už obsiahnutý v hodnote ohybového momentu.

Maximálne napätie nesmie prekročiť medzu klzu a maximálny rozkmit hornú hladinu rozkmitu. Obe podmienky sú splnené, pretože

$$\sigma_{max} = 134,3 \text{ MPa} < f_y = 235 \text{ MPa} ,$$

$$\Delta\sigma_{max} = 134,3 \text{ MPa} < 1,5 f_y = 352,5 \text{ MPa} .$$

Posúdenie pri namáhaní s premenným rozkmitom napätí

V konštrukčnom detaile sa vyskytuje zvar, preto $\varphi_r = 1,0$. Hrúbka pásnice a pripojeného plechu je menšia ako 25 mm, takže $\varphi_t = 1,0$. Predpokladáme dobrú prístupnosť kontroly, periodicú údržbu a závažné dôsledky, preto súčiniteľ spoľahlivosti únavovej pevnosti $\gamma_{mf} = 1,15$ (tab. 27, STN 73 1401)

$$\varphi = \varphi_t \varphi_r / \gamma_{mf} = 1,0 \cdot 1,0 / 1,15 = 0,869 .$$

Parciálna únavová životnosť

$$\text{ak } \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} > \Delta\sigma_M \varphi \rightarrow N_i = 2 \cdot 10^6 [160 \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff})]^5 ,$$

$$\text{ak } \Delta\sigma_M \varphi > \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_D \varphi \rightarrow N_i = 5 \cdot 10^6 [\Delta\sigma_D \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff})]^3 ,$$

$$\text{ak } \Delta\sigma_D \varphi > \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_L \varphi \rightarrow N_i = 5 \cdot 10^6 [\Delta\sigma_D \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff})]^5 ,$$

kde pre daný detail (ČD 406, KD 90, tab. K4, Príloha K) sú nasledovné rozkmity napätia (tab. 28, STN 73 1401)

$$\Delta\sigma_M = 379 \text{ MPa}, \Delta\sigma_D = 66 \text{ MPa}, \Delta\sigma_L = 36 \text{ MPa}, \Delta\sigma_C = 90 \text{ MPa} .$$

$$\Delta\sigma_M \varphi = 379 \cdot 0,869 = 329,3 \text{ MPa},$$

$$\Delta\sigma_D \varphi = 66 \cdot 0,869 = 57,4 \text{ MPa},$$

$$\Delta\sigma_L \varphi = 36 \cdot 0,869 = 31,3 \text{ MPa}.$$

Výpočet je vykonaný v tab. 4.1.

Tab. 4.1

$\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_i$	$\Delta\sigma_D \varphi$	$\Delta\sigma_L \varphi$	n_i	N_i	n_i / N_i
1,0	134,3	>57,4	-	120 000	390 000	0,307
0,75	100,7	>57,4	-	200 000	926 000	0,216
0,5	67,2	>57,4	-	600 000	3 116 000	0,192
0,25	33,6	-	>31,3	3 080 000	72 750 000	0,042
						$\Sigma = 0,757$

Posúdenie celkového poškodenia podľa Palmgren – Minerovej hypotézy

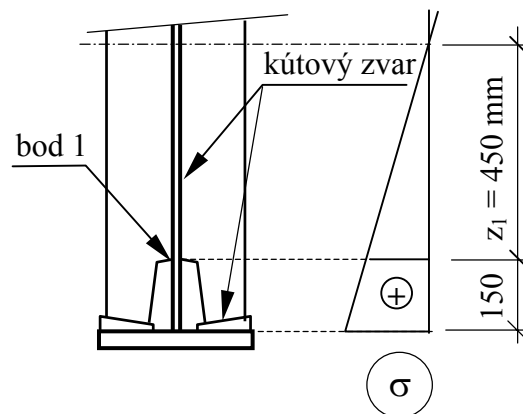
$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 0,757 < 1,0 .$$

Detail vyhovuje.

Pozn.: Detail je síce vyhovujúci, ale je potrebné brať do úvahy, že v prevádzke žeriavovej dráhy výrazne prevláda počet kmitov zaťaženia s malým rozkmitom napätia. Zväčšenie počtu kmitov zaťaženia s väčším rozkmitom napätia môže spôsobiť, že detail nevyhoví. V takom prípade sa použije buď detail vyššej kategórie (napr. detail 110 – tvarový styčnik rezaný plameňom strojovo, KD = 125), alebo sa zníži úroveň napätia zmenou prierezu nosníka žeriavovej dráhy.

Detail – pripojenie priečnej výstuhy

Priečna výstuha má výrez a v styku so stenou je obvarená po celom obvode. Hrúbka výstuhy $t = 14 \text{ mm} > 12 \text{ mm}$, ide teda o detail 423, KD = 80 (tab. K4). Na únavu posúdime len stenu v mieste privarenia výstuhy, kde začína výrez (bod 1).



Pozn.: Výrez vo výstuhe sa robí preto, aby prípojný zvar k stene bol v oblasti menších ťahových napätí. Výrez by nemal opodstatnenie, keby výstuha bola privarená k ťahanej pásnici. Preto medzi spodný okraj výstuhy a pásnicu sa zatlačí ocelový klin, ktorý sa privarí len k výstuhe.

Normálové napätie v bode 1

$$\begin{aligned} \sigma_{x(1)} &= M_{y,Sd} \gamma_{Ff} z_1 / (\gamma_F I_y) = \\ &= 1957,5 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot 450 / 1,2 / 7,7181 \cdot 10^9 = 95,1 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Pozn. : Pri výpočte napätia sme použili moment zotrvačnosti plného prierezu.

Podľa tab. K4 pri posúdení detailu 423 je potrebné uvažovať s rozkmitom hlavných napätí.

Šmykové napätie (prierez pod aritmeticky stredným bremenom)

$$\tau = V_{Sd} \gamma_{Ff} / \gamma_f A_V = 286,7 \cdot 10^3 \cdot 1,0 / 1,2 / 9\,600 = 24,9 \text{ MPa}.$$

Hlavné napätie v bode 1

$$\sigma_l = \sigma_x / 2 \pm \sqrt{(\sigma_x / 2)^2 + \tau^2} = 95,1 / 2 \pm \sqrt{(95,1 / 2)^2 + 24,9^2} = 101,2 \text{ MPa} .$$

Rozkmity normálového napätia (KD = 80, tab. 18, STN 73 1401)

$$\Delta\sigma_M = 452 \text{ MPa}, \Delta\sigma_D = 59 \text{ MPa}, \Delta\sigma_L = 32 \text{ MPa}, \Delta\sigma_C = 80 \text{ MPa} \quad \varphi = 0,869,$$

$$\Delta\sigma_D \varphi = 56.0,869 = 51,3 \text{ MPa}, \quad \Delta\sigma_L \varphi = 32.0,869 = 27,8 \text{ MPa}.$$

Výpočet je vykonaný v tab. 4.2 .

Tab. 4.2

$\Delta\sigma_s / \Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_s$	$\Delta\sigma_D \varphi$	$\Delta\sigma_L \varphi$	n_i	N_i	n_i / N_i
1,0	101,2	>51,3	-	120 000	651 000	0,180
0,75	75,9	>51,3	-	200 000	1 600 000	0,124
0,5	50,6	<51,3	> 27,8	600 000	$5,3 \cdot 10^6$	0,113
0,25	25,3	-	< 27,8	3 080 000	-	-
						$\Sigma = 0,418$

Posúdenie celkového poškodenia pomocou kumulatívnej hypotézy Palmgren – Minera

Podmienka spoľahlivosti

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 0,418 < 1,0 .$$

Navrhnutý detail vyhovuje.

Pozn.: Ak by detail nevyhovoval, výrez v priečnej výstuhe by sa navrhol vo väčšej vzdialenosti od spodnej pásnice a znovu posúdil.

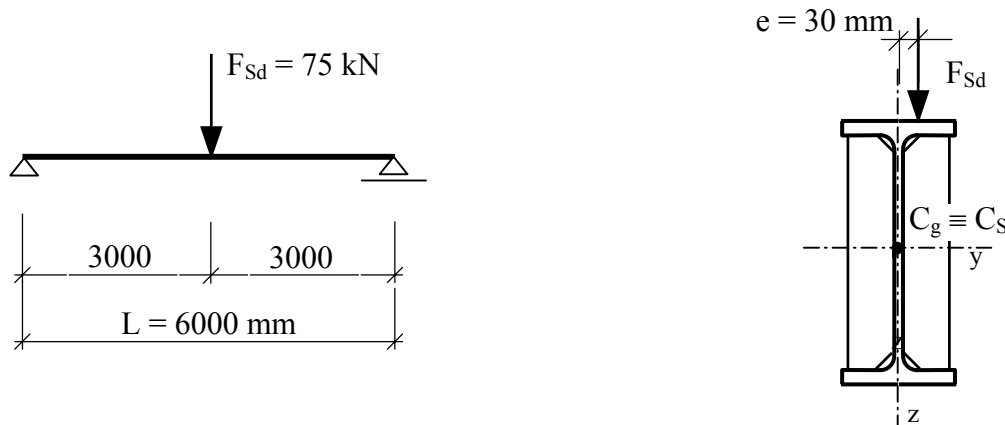
V prípade, keď pri type detailu nie je uvedené, že na únavu sa posudzuje hlavné napätie, ale vo vyšetrovanom mieste je súčasné pôsobenie normálového a šmykového napätia, ktoré prispievajú k vzniku a šíreniu jednej trhliny, podmienka spoľahlivosti má tvar

$$D_d = D_\sigma + D_\tau \leq 1,0 ,$$

kde D_τ sa vypočíta zo spektra rozkmitov šmykového napätia rovnakým postupom ako pri rozkmitoch normálového napätia.

4.8 Namáhanie ohybovým a krútiacim momentom – prút s otvoreným prierezom

Navrhňte prostý nosník valcovaného I-prierezu z ocele S 235, ktorý je zaťažený v strede rozpätia návrhovou silou $F_{Sd} = 75$ kN s excentricitou $e = 30$ mm. Vlastnú tiaž nosníka zanedbajte. Nosník je zabezpečený proti klopeniu iba v podperách. Deplanácia všetkých prierezov nie je konštrukčne obmedzená.



Nosník je namáhaný ohybovým momentom, priečnou silou a krútiacim momentom, pretože sila F_{Sd} neprechádza stredom šmyku C_s . Pri návrhu prierezu nosníka budeme uvažovať len namáhanie ohybovým momentom bez vplyvu klopenia s tým, že prierez zvolíme s rezervou, ktorou zohľadníme zväčšenie namáhania od klopenia a krútenia.

Návrhový ohybový moment

$$M_{Sd} = F_{Sd} L/4 = 75 \cdot 6 / 4 = 112,5 \text{ kNm},$$

$$M_{Sd} < M_{c,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1},$$

$$W_{pl,y} > M_{Sd} \gamma_{M1} / f_y = 112,5 \cdot 1,1 / 235 = 526,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3.$$

Navrhujeme IPE 400

$$W_{pl,y} = 1\,308 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, \quad i_{z1} = 46,3 \text{ mm},$$

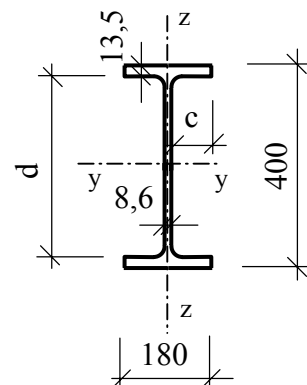
$$W_{el,y} = 1\,160 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, \quad b_f = 180 \text{ mm},$$

$$I_y = 231 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \quad t_f = 13,5 \text{ mm},$$

$$I_z = 13,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, \quad t_w = 8,6 \text{ mm}.$$

$$I_t = 514 \cdot 10^3 \text{ mm}^4,$$

$$I_\omega = 490 \cdot 10^9 \text{ mm}^6.$$



Klasifikácia prierezu

$$\text{stena } d/t_w = (400 - 2 \cdot 13,5) / 8,6 = 43,4 < 70 \varepsilon_m = 70 \rightarrow \text{trieda 1},$$

$$\text{pásnica } c/t_f = (180 - 8,6) / 2 / 13,5 = 6,3 < 9 \varepsilon_m = 9 \rightarrow \text{trieda 1}.$$

Prierez IPE 400 je triedy 1, preto pri posúdení na ohyb by sme mohli použiť plasticitný výpočet. Pri výpočte napätia od krútiaceho momentu podľa Prílohy G, STN 73 1401 [1] sa však uvažuje pružné pôsobenie prierezu, preto aj pri namáhaní ohybovým momentom použijeme pružnostný výpočet.

Namáhanie ohybovým momentom

Pri namáhaní ohybovým momentom nosníka otvoreného prierezu musíme uvažovať so stratou stability klopením, pretože

$$40 i_{z1} = 40 \cdot 46,3 = 1852 \text{ mm} < L_z = 6000 \text{ mm}.$$

Parameter krútenia

$$\alpha_t = 0,62 \frac{L_z}{h} \sqrt{\frac{I_t}{I_z}} = 0,62 \frac{6000}{400} \sqrt{\frac{514 \cdot 10^3}{13,2 \cdot 10^6}} = 1,84 \rightarrow \gamma = 0,95$$

(tab.H3, STN 73 1401).

Štíhlosti a súčiniteľ klopenia

$$\beta_W = W_{el,y} / W_{pl,y} = 1160 \cdot 10^3 / 1308 \cdot 10^3 = 0,89,$$

$$\lambda = \gamma \kappa_M L_{z1} / i_{z1} = 0,95 \cdot 0,86 \cdot 6000 / 46,3 = 105,9,$$

$$\lambda_{LT} = \lambda / \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}} = 105,9 / \sqrt{\frac{1160 \cdot 10^3}{1308 \cdot 10^3}} = 112,$$

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9 \sqrt{\frac{235}{235}} = 93,9,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = (\lambda_{LT} / \lambda_1) \sqrt{\beta_W} = (112 / 93,9) \sqrt{0,89} = 1,13 \rightarrow \chi_{LT} = 0,647$$

(tab. E.1, $\alpha_{LT} = 0,13$).

Návrhový ohybový moment únosnosti

$$\begin{aligned} M_{el,y,Rd} &= \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} = 0,647 \cdot 0,89 \cdot 1308 \cdot 10^3 \cdot 235 / 1,1 = \\ &= 161 \text{ kNm} > M_{Sd} = 112,5 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Prút na ohyb vyhovuje.

Namáhanie priečnou silou

$$V_{pl,Rd} = A_V f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = (400 - 2 \cdot 13,5) \cdot 8,6 \cdot 235 / (1,1 \cdot \sqrt{3}) = 395,7 \text{ kN},$$

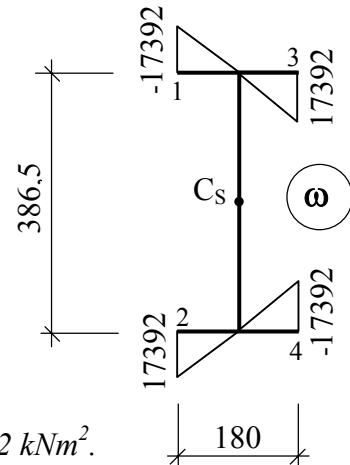
$$V_{Sd} = 75/2 = 37,5 \text{ kN} < 0,3 V_{pl,Rd} = 0,3 \cdot 395,7 = 118,7 \text{ kN}.$$

Návrhový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.

Namáhanie krútiacim momentom

$$\psi L = 0,62L \sqrt{\frac{I_t}{I_\omega}} = 0,62 \cdot 6000 \sqrt{\frac{514 \cdot 10^3}{490 \cdot 10^9}} = 3,8,$$

$$\chi_t = \frac{1}{\beta + \left(\frac{\alpha}{\psi L}\right)} = \frac{1}{1,08 + \left(\frac{3,7}{3,8}\right)^2} = 0,49.$$



Návrhový bimoment

$$B_{Sd} = M_{Sd} e (1 - \chi_t) = 112,5 \cdot 0,03 (1 - 0,49) = 1,72 \text{ kNm}^2.$$

Návrhový moment v prostom (voľnom) krútení

$$T_{t,Sd} = V_{Sd} e \chi_t = 75 / 2 \cdot 0,03 \cdot 0,49 = 0,55 \text{ kNm}.$$

Návrhový moment vo viazanom krútení

$$T_{\omega,Sd} = V_{Sd} e (1 - \chi_t) = 75 / 2 \cdot 0,03 (1 - 0,49) = 0,58 \text{ kNm}.$$

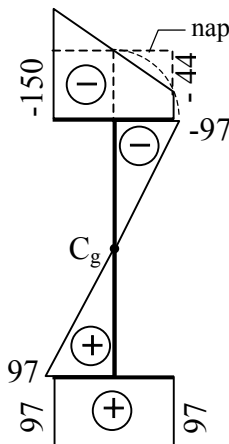
Výsekové súradnice

$$\omega_2 = \omega_3 = -\omega_1 = -\omega_4 = b_f(h - t_f) / 4 = 180 (400 - 13,5) / 4 = 17392,5 \text{ mm}^2.$$

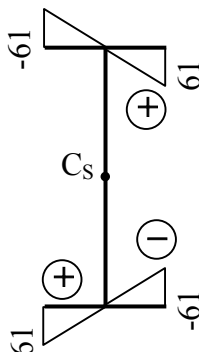
Normálové napätie od ohybu a krútenia – bod 1

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M_{Sd}}{\chi_{LT} W_{el,y}} + \frac{B_{Sd}}{I_\omega} \omega = \frac{112,5 \cdot 10^6}{0,647 \cdot 1160 \cdot 10^3} + \frac{1,72 \cdot 10^9}{490 \cdot 10^9} 17392,5 = \\ &= 150 + 61 = 211 \text{ MPa} < f_y / \gamma_{M1} = 235 / 1,1 = 213,6 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

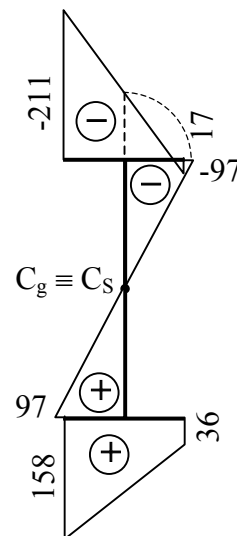
Vyhovuje.



ohyb (s klopením)



krútenie



ohyb + krútenie

σ

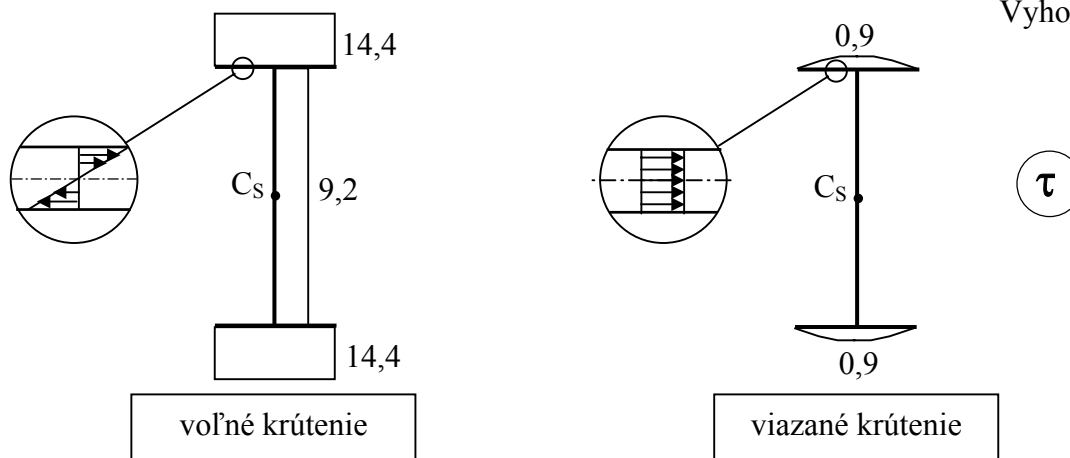
Statický výsekový moment

$$S_{\omega} = t_f \int_s \omega \, d_s = 13,5 \cdot 17 \, 392,5 \cdot 180 / 2 / 2 = 10,56 \cdot 10^6 \, \text{mm}^4.$$

Šmykové napätie od ohybu a krútenia – v pásnici

$$\begin{aligned} \tau_f &= \frac{T_{t,Sd}}{I_t} t_f + \frac{T_{\omega,Sd} S_{\omega}}{I_{\omega} t_f} = \frac{0,55 \cdot 10^6}{514 \cdot 10^3} 13,5 + \frac{0,58 \cdot 10^6 \cdot 10,56 \cdot 10^6}{490 \cdot 10^9 \cdot 13,5} = \\ &= 14,4 + 0,9 = 15,3 \, \text{MPa} < f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = 235 / (1,1 \sqrt{3}) = 123,3 \, \text{MPa}. \end{aligned}$$

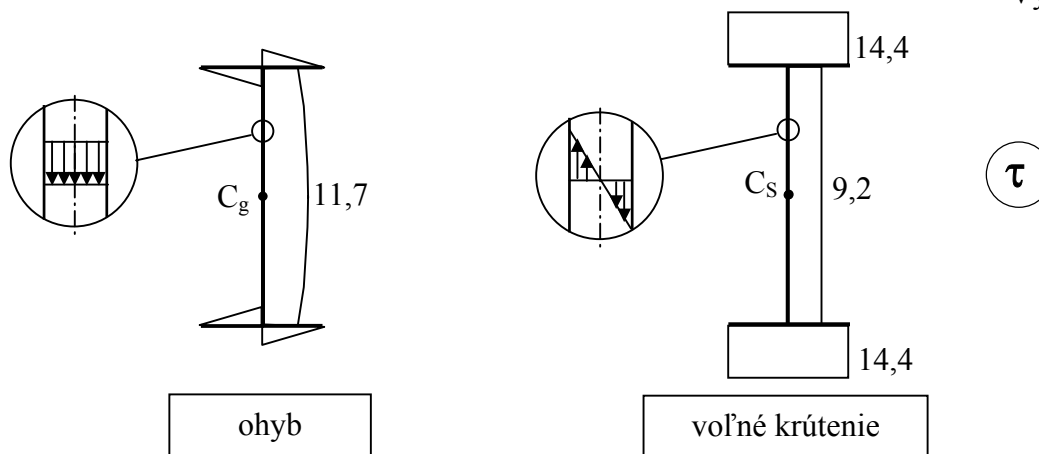
Vyhovuje.



Šmykové napätie od ohybu a krútenia – v stene

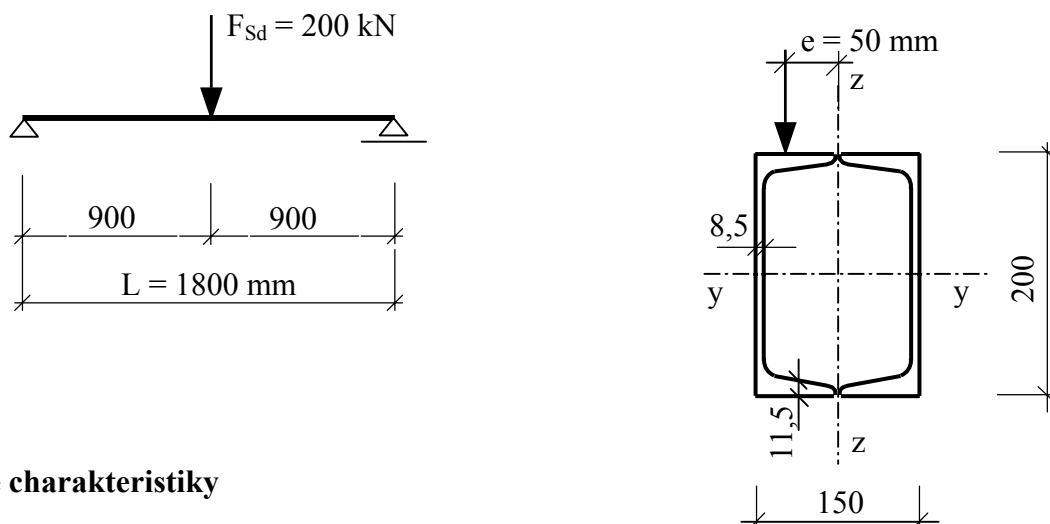
$$\begin{aligned} S_y &= b_f t_f h' / 2 + (h / 2 - t_f)^2 t_w / 2 = \\ &= 180 \cdot 13,5 (400 - 13,5) / 2 + (400 / 2 - 13,5)^2 8,6 / 2 = 0,62 \cdot 10^6 \, \text{mm}^3, \\ \tau_w &= \frac{T_{t,Sd}}{I_t} t_w + \frac{V_{Sd} S_y}{I_y t_w} = \frac{0,55 \cdot 10^6}{514 \cdot 10^3} 8,6 + \frac{75 \cdot 10^3 / 2 \cdot 0,62 \cdot 10^6}{231 \cdot 10^6 \cdot 8,6} = \\ &= 9,2 + 11,7 = 20,9 \, \text{MPa} < 123,3 \, \text{MPa}. \end{aligned}$$

Vyhovuje.



4.9 Namáhanie ohybovým a krútiacim momentom – prút s uzavretým prierezom

Posúďte nosník dĺžky 1800 mm z ocele S 235 uzavretého prierezu pozostávajúceho z dvojice valcovaných prierezov U 200. Nosník je zaťažený v strede rozpätia silou $F_{Sd} = 200$ kN na excentricite $e = 50$ mm. Deplánácia prierezov nosníka nie je konštrukčne obmedzená.



Prierezové charakteristiky

$$\begin{aligned}
 W_{pl,y} &= 456 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, & i_z &= 58,9 \text{ mm}, \\
 W_{el,y} &= 382 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, & b_f &= 150 \text{ mm}, \\
 I_y &= 38,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, & t_f &= 11,5 \text{ mm}, \\
 I_z &= 22,37 \cdot 10^6 \text{ mm}^4, & t_w &= 8,5 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

Klasifikácia prierezu

$$\begin{aligned}
 b / t_f &= (150 - 2 \cdot 8,5) / 11,5 = 11,5 < 30 \varepsilon = 30, \\
 d / t_w &= (200 - 2 \cdot 11,5) / 8,5 = 20,8 < 70 \varepsilon = 70.
 \end{aligned}$$

Prierez je triedy 1.

Návrhový ohybový moment a návrhová priečna sila

$$\begin{aligned}
 M_{Sd} &= F_{Sd} L / 4 = 200 \cdot 1,8 / 4 = 90,0 \text{ kNm}, \\
 V_{Sd} &= F_{Sd} / 2 = 200 / 2 = 100 \text{ kN}.
 \end{aligned}$$

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{pl, Rd} = A_V f_y / (\gamma_{M0} 3^{0,5}) = 200 \cdot 8,5 \cdot 2 \cdot 235 / (1,1 \cdot 3^{0,5}) = 419,4 \text{ kN} > V_{Sd} = 100 \text{ kN}.$$

Overenie vplyvu šmyku

$$V_{Sd} = 100 \text{ kN} < V_{pl, Rd} / 2 = 419,4 / 2 = 209,7 \text{ kN}.$$

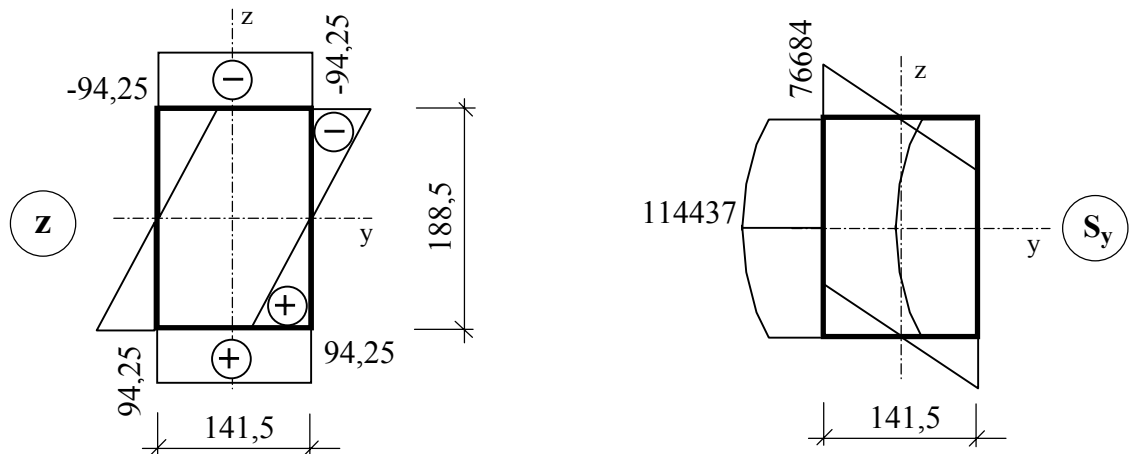
Návrhový ohybový moment únosnosti nie je potrebné redukovať vplyvom šmyku.

Návrhový ohybový moment únosnosti a podmienka spoľahlivosti

Klopenie pri uzavretých prierezoch nie je potrebné posudzovať, je teda možné uvažovať súčiniteľ vzperu pri klopení $\chi_{LT} = 1,0$.

$$M_{pl, Rd} = 2 W_{pl, y} f_y / \gamma_{M0} = 456 \cdot 10^3 \cdot 235 / 1,1 = 97,4 \text{ kNm} > M_{Sd} = 90,0 \text{ kNm}.$$

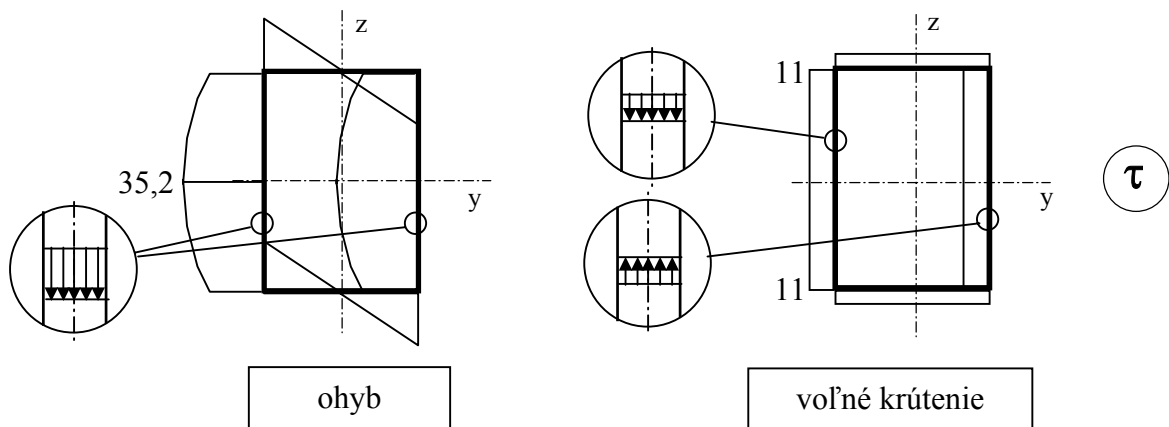
Nosník vyhovuje z hľadiska namáhania ohybom.



Šmykové napätia od namáhania priečnou silou a krútiacim momentom

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{V_{Sd} S_y}{I_y t_w} + \frac{V_{Sd} e}{2 A_{ef} t_w} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 114437}{38,2 \cdot 10^6 \cdot 8,5} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 50}{2(200 - 11,5) \cdot (150 - 8,5) \cdot 8,5} = \\ &= 35,2 + 11,0 = 46,2 \text{ MPa} < f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = 235 / (1,1 \sqrt{3}) = 123,3 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Prierez vyhovuje.



Poznámka: Pri uzavretých prierezoch sú normálové a šmykové napätia od viazaného krútenia zvyčajne zanedbateľné. V našom prípade je $\sigma_{\omega, \max} = 0,4 \text{ MPa}$ a $\tau_{\omega, \max} = 0,2 \text{ MPa}$ (výpočet neuvádzame). Zanedbateľnou zložkou je len tzv. Bredtovo šmykové napätie s max. veľkosťou 11 MPa od voľného krútenia.

5

SPOJE



5 SPOJE

Normatívne ustanovenia a postupy na navrhovanie spojov vychádzajú predovšetkým z výsledkov rozsiahlych experimentálnych prác, vykonaných najmä koncom 80. rokov v súvislosti s prípravou spoločných európskych predpisov.

Pretože vo väčšine prípadov spoj predstavuje v konštrukcii miesto so značne koncentrovaným a nehomogénnym silovým tokom, nie je prakticky možné jeho únosnosť posúdiť na základe výpočtu skutočnej napätosti. Naviac, v mnohých prípadoch, najmä pri zvarových spojoch, technologické procesy spôsobujú nielen štrukturálne zmeny a s tým súvisiace zmeny pevnostných vlastností, ale aj vznik zvyškových napätí, ktoré neumožňujú spoľahlivé pevnostné posúdenie napätosti teoretickou cestou.

V prípadoch, keď kritickým z hľadiska únosnosti je lom spoja, vo vzorcoch na stanovenie únosnosti spoja sa vychádza z medze pevnosti materiálu. Výnimku predstavujú tupé zvary, v ktorých napätosť je takmer rovnaká ako v materiáli spojených prvkov, teda v tzv. základnom materiáli, a preto pri nich uvažujeme s medzou klzu ako s pevnostnou materiálovou charakteristikou zvaru.

Pri návrhu spojov je potrebné splniť požiadavky STN 73 1401. Treba pritom brať do úvahy, že porušenie homogenity materiálu a silového toku v mieste spojov ovplyvňuje únosnosť nielen príslušnej časti, ale aj celej konštrukcie, čo sa nepriaznivo prejavuje najmä pri namáhaní na únavu.

Základnou konštrukčnou požiadavkou je navrhnuť spoj tak, aby silový tok ním prenášaných síl bol čo najplynulejší. To si vyžaduje nielen správne rozmiestnenie jednotlivých častí spoja, ale aj ich vhodnú tuhosť.

Časť spoja s vyššou tuhosťou preberá v pružnom stave väčší podiel síl a skôr sa dostáva do plastického stavu. Preto sa vyžaduje, aby všetky časti mali rovnaké deformačné charakteristiky, a to až po štádium porušenia. Túto požiadavku síce nie je možné dôsledne splniť, ale je potrebné k nej prihliadať. Jedným z dôsledkov tejto požiadavky je zásada, že spájacie prostriedky s rozdielnymi deformačnými charakteristikami nemožno kombinovať, napr. obyčajné skrutky a zvary.

Na výpočet vnútorných síl v spoji možno použiť pružnostné alebo plasticitné modely. Pri pružnostnom výpočte sa dôsledne počíta s relatívnou tuhosťou príslušnej časti spoja, pri plasticitnom výpočte sa vychádza z predpokladu, že tuhosť časti spoja je úmerná jeho návrhovej únosnosti [19], [20].

Na spájanie ocelových nosných prvkov sa v súčasnosti najčastejšie používajú skrutkové a zvarové spoje.

Pri návrhu spojov nie je potrebné zohľadňovať reziduálne sily od zvarovania, uťahovania skrutiek alebo montáže, pokiaľ je dodržaná obvyklá presnosť, pretože v návrhových únosnostiach, odvodených z výsledkov skúšok, sú uvedené faktory zahrnuté.

Podľa tuhosti rozoznávame :

- nominálne kĺbové spoje, ktoré musia byť navrhnuté tak, aby umožňovali pootočenie bez vzniku takých momentov, ktoré by mali podstatný vplyv na rozdelenie vnútorných síl a momentov v konštrukcii,
- tuhé spoje, ktoré sú navrhované tak, aby ich deformácia nemala podstatný vplyv na rozdelenie vnútorných síl a momentov v konštrukcii,
- polotuhé spoje, ktoré nespĺňajú kritériá pre kĺbové alebo tuhé spoje.

Podľa únosnosti rozoznávame:

- spoje s plnou únosnosťou, ktorá sa rovná aspoň minimálnej návrhovej únosnosti spojených prvkov,
- spoje s čiastočnou únosnosťou, ktoré prenášajú všetky návrhové sily a momenty, ale ich únosnosť môže byť menšia ako je minimálna z únosností spojených prvkov.

Skrutkové spoje

Môžu byť namáhané šmykom a ťahom. Pri namáhaní šmykom sa rozlišujú tri kategórie:

- Kategória A : Spoje so skrutkami všetkých pevnostných tried, ktoré sa posudzujú na strih a otláčenie.
- Kategória B: Trecie spoje so skrutkami vysokej pevnosti triedy 8.8 a 10.9 s kontrolovaným utiahnutím skrutiek. Šmykové namáhanie nesmie spôsobiť preklz spoja v medznom stave použiteľnosti. V medznom stave únosnosti sa skrutky posudzujú na strih a otláčenie.
- Kategória C: Trecie spoje so skrutkami vysokej pevnosti triedy 8.8 a 10.9 s kontrolovaným utiahnutím skrutiek. Posudzujú sa na poklznutie a otláčenie v medznom stave únosnosti. Súčasne sa musí posúdiť otvormi oslabený prierez spojených prvkov v ťahu.

Pri namáhaní ťahom sú dve kategórie spojov :

- Kategória D : Spoje so skrutkami všetkých pevnostných tried bez kontrolovaného utiahnutia.
- Kategória E : Spoje so skrutkami vysokej pevnosti tried 8.8 a 10.9 s kontrolovaným utiahnutím skrutiek

Návrhová únosnosť skrutky v strihu (na jednu strihovú plochu) alebo v ťahu je vyjadrená pomocou troch parametrov

$$N = f(f_{ub}, A, \text{resp. } A_s, \gamma_{Mb})$$

a návrhová únosnosť v otláčení pomocou šiestich parametrov

$$N = f(f_u, A, \gamma_{Mb}, \alpha, d, t),$$

kde f_{ub} je pevnosť v ťahu materiálu skrutiek, f_u je pevnosť v ťahu materiálu spojených prvkov, A_s je plocha jadra skrutky, A je prierezová plocha plného drieku skrutky, d je priemer skrutky, t je minimálny súčet hrúbok spojených prvkov otláčaných tým istým smerom a γ_{Mb} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti skrutkového spoja. Súčiniteľ α závisí od piatich parametrov

$$\alpha = f(d_0, e_l, p_l, f_u, f_{ub}),$$

kde d_0 je priemer diery, e_l je vzdialenosť dier od okrajov prvku v smere pôsobiacej sily, p_l je vzdialenosť medzi dierami v smere sily.

Návrhová únosnosť jednej skrutky trecieho spoja je vyjadrená pomocou piatich parametrov

$$F_{s,Rd} = f(F_{p,Cd}, k_s, n, \mu, \gamma_{Ms}),$$

kde $F_{p,Cd} = f(f_u, A_s)$ je návrhová predpínacia sila, k_s je súčiniteľ závisiaci od typu diery, n je počet trecích plôch, μ je súčiniteľ trenia v závislosti od úpravy trecích plôch, γ_{Ms} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti. Ak trecí spoj je namáhaný šmykovou a ťahovou silou, únosnosť trecieho spoja sa redukuje.

V spojoch, kde vzdialenosť medzi stredmi krajných spájacích prvkov v smere prenášanej sily je väčšia ako $15d$, je potrebné návrhovú únosnosť v strihu všetkých spájacích prvkov redukovať súčiniteľom β_{Lf} .

S oslabením spojených prvkov dierami pre spájacie prostriedky sa nemusí počítať, ak pomer veľkosti plnej a oslabenej prierezovej plochy prvku $A/A_{net} < 1,2$.

Ak skrutkový spoj s čelnými doskami (alebo čelnou doskou a pásnicou stĺpa) je namáhaný ťahom a dôjde k deformácii čelnej dosky (alebo pásnice stĺpa), nastáva jav, ktorý sa nazýva páčenie. V takom prípade podľa STN 73 1401 hrúbka čelnej dosky alebo pásnice stĺpa nespĺňa požadovanú veľkosť t_e . Čelná doska (pásnica stĺpa) sa v dôsledku priehybu svojimi okrajmi dotkne podkladu a vyvodí reakciu - silu od páčenia. Z dôvodu rovnováhy, po vzniku tejto reakcie pod pozdĺžnymi hranami čelnej dosky (pásnice stĺpa), nastáva zväčšenie ťahovej sily v skrutkách. V STN 73 1401 je tento jav zohľadnený súčiniteľom γ_p .

Pri rozmiestňovaní skrutiek musia byť dodržané prípustné vzdialenosti medzi dierami a vzdialenosti dier od koncov a okrajov spojených prvkov. Odporúčané vzdialenosti sú najmenšie vzdialenosti, ktoré už výrazne neovplyvňujú únosnosť spoja a súčasne zabezpečujú jeho potrebnú tesnosť.

Minimálne vzdialenosti sa určujú z pevnostného dôvodu, aby nenastalo porušenie spojených prvkov ušmyknutím v smere pôsobiacej sily, resp. aby nevzniklo ich príliš veľké oslabenie v smere kolmom na smer sily.

Maximálne vzdialenosti sa určujú z dôvodu zabezpečenia dostatočného zovretia spoja proti vníkaní vlhkosti do škár, a tým predchádzaniu korózie v mieste kontaktu prvkov.

Zvarové spoje

Kútové zvary sa zvyčajne zhotovujú medzi prvkami, ktoré zvierajú uhol v rozmedzí 60° až 120°, takže nie je potrebné vytvárať návarové plochy. Pri posúdení kútového zvaru sa vychádza buď z návrhovej únosnosti kútového zvaru na základe únosnosti jednotkovej dĺžky zvaru, alebo z veľkosti porovnávacieho napätia, čo vedie na vzorec formálne zhodný so vzorcom podľa Huber-Mises-Henckyho (H-M-H), ktorý sa používa pri posudzovaní rovinatej napätosti. Porovnávacie napätie nesmie prekročiť modifikovanú pevnosť spojených prvkov (pevnosť základného materiálu).

Únosnosť jednotkovej dĺžky zvaru je vyjadrená pomocou štyroch parametrov

$$F_{w,Rd} = f(a, f_u, \beta_w, \gamma_{Mw}),$$

kde a je hrúbka zvaru, f_u je pevnosť materiálu spojených prvkov, β_w je súčiniteľ, ktorým sa zohľadňuje pevnostná trieda ocele a γ_{Mw} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti zvarových spojov.

Tupé zvary sa môžu vo všeobecnosti zhotoviť pri ľubovoľnej vzájomnej polohe spojených prvkov po primeranej úprave návarových plôch.

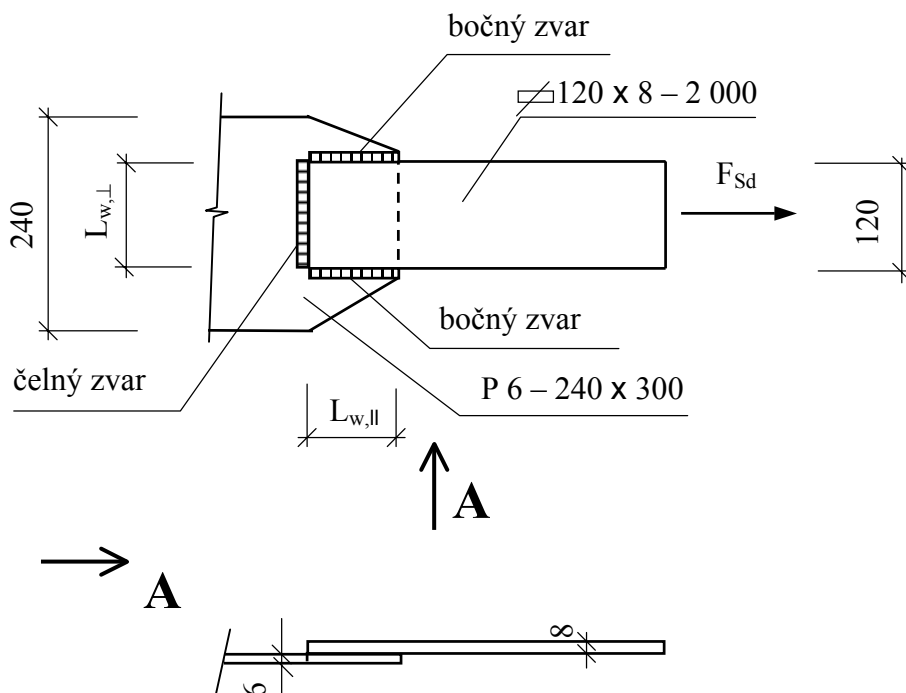
O tupých zvaroch s plným prevarením hovoríme vtedy, keď materiál spojených prvkov (základný materiál) je pretavený a zvarový kov je nanosený v celej hrúbke spojených prvkov. Návrhová pevnosť tupého zvaru s plným prevarením je návrhová pevnosť slabšieho zo spojených prvkov upravená prevodovým súčiniteľom, ak sa medza klzu a medza pevnosti zvarového kovu rovná aspoň charakteristikám základného materiálu.

Tupé zvary s čiastočným prevarením majú nanosený zvarový kov len na časti hrúbky spojených prvkov. Návrhová únosnosť tupých zvarov s čiastočným prevarením sa určí podobne ako pre tupé zvary s plným prevarením, pričom nosný rozmer tupého zvaru s čiastočným závarom sa rovná hrúbke spoľahlivo dosiahnutého závaru, ktorý sa preukazuje skúškami.

Účinná dĺžka kútového zvaru je dĺžka, na ktorej má zvar plný prierez. Minimálna dĺžka nosného zvaru má byť aspoň 6-násobok jeho účinnej hrúbky a , najmenej však 40 mm. Návrhová únosnosť kútových zvarov dlhších ako $150a$ v smere pôsobiacej sily sa redukuje súčiniteľom β_{Lw} .

5.1 Spoj čelným a bočnými kútovými zvarmi namáhaný osovou silou

Navrhňte a posúďte spoj ťahadla a styčnickového plechu z ocele S 235 pomocou kútových zvarov. Návrhová sila F_{Sd} sa rovná únosnosti ťahadla.



Únosnosť ťahadla

$$F_{Sd} = N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 120 \cdot 8 \cdot 235 / 1,1 = 205,1 \text{ kN}.$$

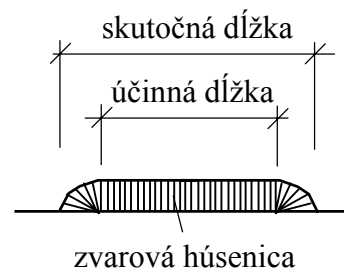
Návrh zvarov

Spoj bude vytvorený tromi kútovými zvarmi hrúbky $a = 3 \text{ mm}$ (hrúbka spájaných prvkov je do 10 mm).

Pozn.: Používame pojem „hrúbka“ zvaru v súlade s STN EN 1792 [21]. Pojem „výška“ zvaru použitý v STN 73 1401 [1] je nevhodný [23].

Vzhľadom na smer namáhania sú navrhnuté dva bočné zvary (rovnobežné so smerom sily) účinnej dĺžky $L_{w,||} = 150 \text{ mm}$ a jeden čelný zvar (kolmý na smer sily) účinnej dĺžky $L_{w,\perp} = 120 \text{ mm}$.

Pozn.: Účinná dĺžka zvaru je dĺžka, na ktorej má zvar plný prierez (plnú hrúbku „a“). Skutočná dĺžka zvaru je dĺžka tzv. zvarovej húsenice.



Overenie účinnej dĺžky zvarov

Pred výpočtom únosnosti zvarového spoja je účelné najprv overiť, či je dodržaná prípustná minimálna a pri bočných zvaroch aj maximálna dĺžka nosného kútového zvaru.

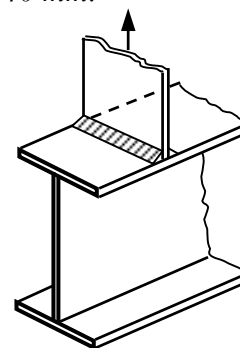
Účinná dĺžka bočných kútových zvarov vyhovuje, pretože

$$6a = 6 \cdot 3 = 18 \text{ mm} < L_{w,\parallel} = 150 \text{ mm}, \quad 40 \text{ mm} < L_{w,\parallel} = 150 \text{ mm}, \\ L_{w,\parallel} = 150 \text{ mm} < 150 a = 150 \cdot 3 = 450 \text{ mm}$$

Čelný kútový zvar je nosný, pretože

$$L_{w,\perp} = 120 \text{ mm} > 6a = 6 \cdot 3 = 18 \text{ mm} \quad \text{a} \quad L_{w,\perp} = 120 \text{ mm} > 40 \text{ mm}.$$

Pozn.: Účinná dĺžka čelného zvaru sa redukuje v prípade rozdielnej tuhosti jeho podkladu, napr. pri privarení plechu na pásnicu nosníka zvaraného I-prierezu v mieste bez priečnej výstuhy (podklad zvaru, teda pásnica, má v blízkosti steny relatívne väčšiu ohybovú tuhosť).



Pri dostatočnej ťažnosti materiálu sa únosnosť spoja pozostávajúceho z čelného a bočných zvarov stanoví ako súčet únosností jednotlivých zvarov v smere pôsobiacej sily. Postupne stanovíme únosnosť bočných zvarov a únosnosť čelného zvaru.

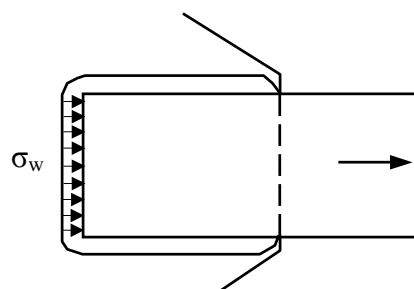
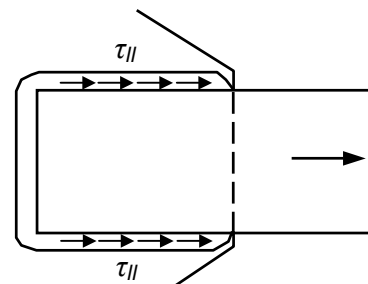
Návrhová únosnosť bočných kútových zvarov

V bočných zvaroch $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 0$.

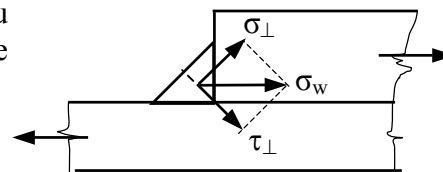
$$F_{w,Rd,\parallel} = 2F_{w,Rd} \text{ a } L_{w,\parallel} = \frac{2f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} \text{ a } L_{w,\parallel} = \\ = \frac{2 \cdot 360}{0,8 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 3 \cdot 150 = 155,8 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť čelného kútového zvaru

V čelnom zvare je iba rovnobežné šmykové napätie rovné nule ($\tau_{\parallel} = 0$), preto pri výpočte únosnosti musíme použiť porovnávacie napätie.



Z rovnosti porovnávacieho napätia a pevnosti zvaru vypočítame napätie σ_w , pomocou ktorého stanovíme únosnosť čelného zvaru



$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_w / \sqrt{2},$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2 + 3\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}},$$

z čoho vyjadríme napätie σ_w v smere pôsobiacej sily

$$\sigma_{w,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,5 \sqrt{2}} = 212 \text{ MPa}.$$

Únosnosť čelného zvaru

$$F_{w,Rd,\perp} = \sigma_{w,Rd} a L_{w\perp} = 212 \cdot 3 \cdot 120 = 76,4 \text{ kN}.$$

Únosnosť zvarového spoja a podmienka spoľahlivosti

$$F_{w,Rd} = F_{w,Rd,II} + F_{w,Rd,\perp} = 155,8 + 76,4 = 232 \text{ kN} > F_{Sd} = 205 \text{ kN}.$$

Zvarový spoj vyhovuje.

Pozn.: Vo výkrese spoja sa popisuje skutočná dĺžka zvaru, ktorá sa získa zväčšením účinnej dĺžky o 2 alebo 1 hrúbku zvaru (podľa toho, či na privarenej hrane prvku sa nachádzajú oba alebo len jeden koniec zvarovej húsenice) a zaokrúhli sa smerom hore na celé centimetre. Keď je zvar obvodový, skutočná dĺžka zvaru môže byť rovná účinnej dĺžke.

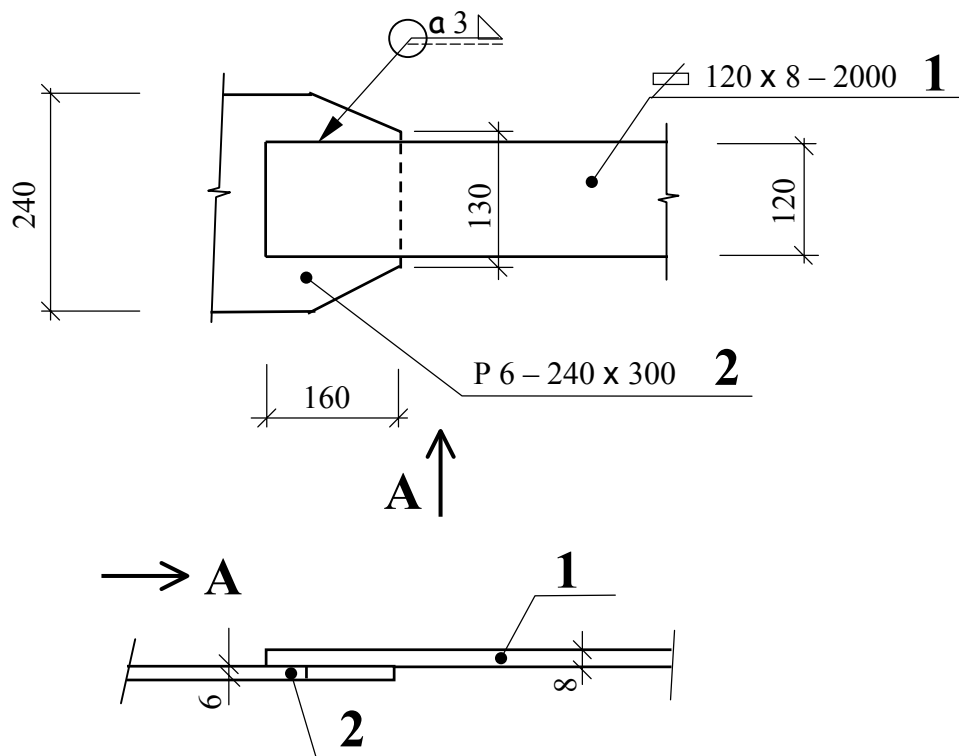
V našom prípade, skutočná dĺžka čelného zvaru sa rovná účinnej, pretože naň bez prerušenia nadväzujú bočné zvary.

Skutočná dĺžka bočných zvarov vznikne zväčšením o 1 hrúbku, pretože na bočnej hrane pripojeného prvku sa nachádza len jeden koniec zvaru.

Skutočná dĺžka bočného zvaru (po zaokrúhlení na celých 10 mm)

$$L = 150 + 3 = 153 \approx 160 \text{ mm}.$$

Znázornenie zvarového spoja na výkrese

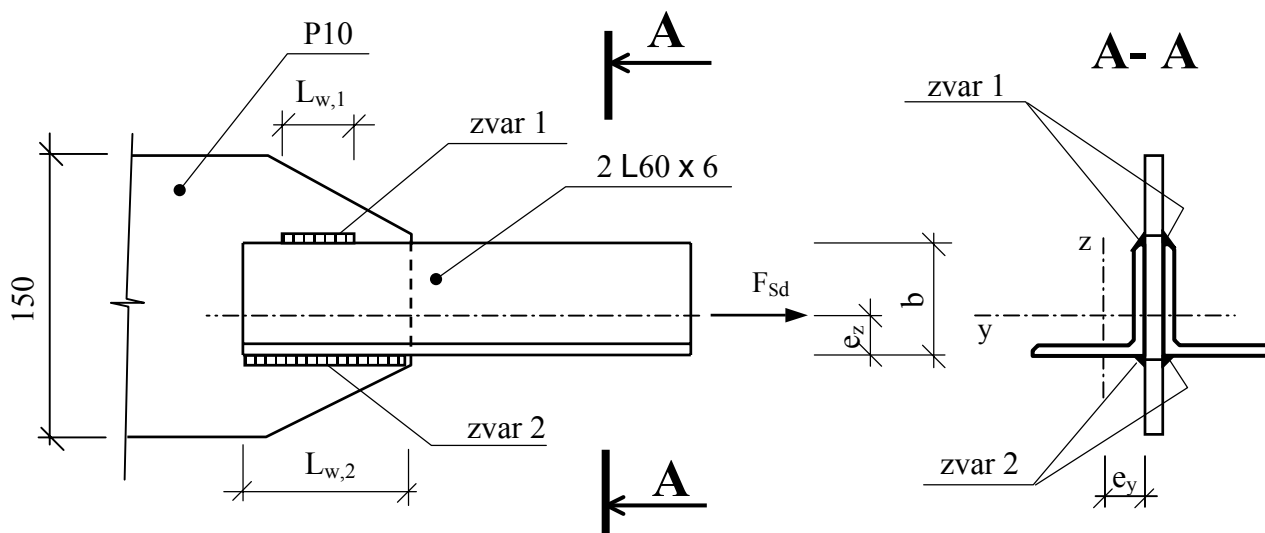


Pozn.: Rozmer kútového zvaru sa môže označiť veľkosťou hrúbky a alebo veľkosťou odvesny z kútového zvaru. Preto sa pred rozmer zvaru píše príslušné písmená.

Značka zvaru je na strane plnej čiary zástavky odkazovej čiary, ak je povrch zvaru na strane odkazovej čiary [26].

5.2 Spoj bočným kútoým zvarom namáhaný osovou silou a ohybovým momentom

Navrhňte spoj ťahadla z dvojice uholníkov L 60 x 6 a styčnickového plechu hrúbky 10 mm pomocou kútoých zvarov. V ťahadle pôsobí sila $F_{Sd} = 250$ kN. Ťahadlo a styčnickový plech sú z ocele S 235.



Najprv overíme, či ťahadlo prenesie silu F_{Sd} .

Návrhová ťahová sila únosnosti ťahadla

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2.691.235}{1,1} = 295,2 \text{ kN} > F_{Sd} = 250 \text{ kN} .$$

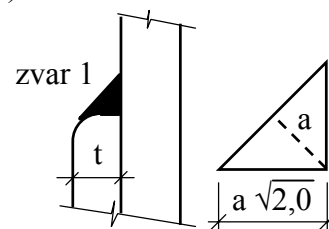
Vyhovuje.

Navrhujeme zvary hrúbky $a = 3$ mm (hrúbka spájaných prvkov je do 10 mm). Dĺžku zvarov navrhujeme pre každý zvar zvlášť.

Zvar 1 (pri ramene uholníka priliehajúcom k styčnickovému plechu)

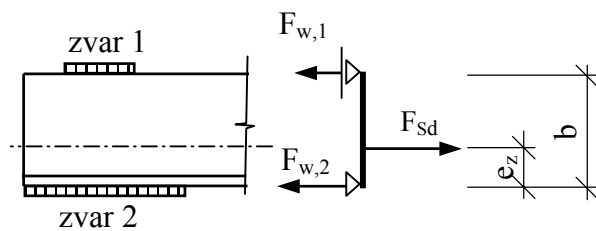
Odvesna zvarového trojuholníka nemôže byť väčšia ako je hrúbka ramena uholníka $t = 6$ mm

$$a\sqrt{2} = 3\sqrt{2} = 4,2 \text{ mm} < t = 6 \text{ mm} .$$



Hrúbka zvaru vyhovuje.

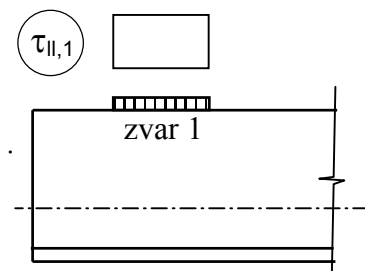
Sila $F_{w,1}$ pripadajúca na zvar 1 sa určí ako reakcia prostého nosníka, ktorého dĺžka sa rovná dĺžke priliehajúceho ramena uholníka

$$F_{w,1} = \frac{F_{Sd} e_z}{2 b} = \frac{250 \cdot 16,8}{2 \cdot 60} = 35 \text{ kN} .$$


Vzhľadom na jednoduché namáhanie zvaru (iba ťahovou silou), je možné vypočítať potrebnú dĺžku zvaru priamo zo vzťahu na posúdenie. Únosnosť zvaru sa potom už nemusí overovať.

$$\tau_{w,1} = \frac{F_{w,1}}{a L_{w,1}} \leq \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} ,$$

$$L_{w,1} \geq \frac{F_{w,1} \beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}{a f_u} = \frac{35 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 1,5 \sqrt{3}}{3 \cdot 360} = 67,4 \text{ mm} .$$



Účinná dĺžka je $L_{w,1} = 70 \text{ mm} .$

Overenie prípustnosti navrhutej dĺžky zvaru

$$6 a = 6 \cdot 3 = 18 \text{ mm} < L_{w,1} = 70 \text{ mm} < 150 a = 150 \cdot 3 = 450 \text{ mm}$$

$$40 \text{ mm} < L_{w,1} = 70 \text{ mm} .$$

Dĺžka zvaru 1 vyhovuje.

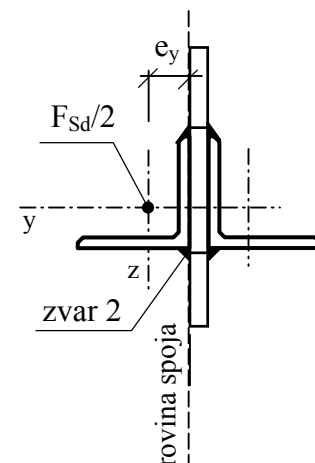
Zvar 2 (pri odstávajúcom ramene uholníka)

Namáhanie zvaru pri odstávajúcej prírubie je zložitejšie, pretože okrem ťahovej sily prenáša aj ohybový moment v dôsledku jej excentricity e_y k rovine spoja.

Pozn: Moment sa prisudzuje len zvaru pri odstávajúcom ramene uholníka. Zanedbáva sa jeho čiastočný prenos aj zvarom pri druhom ramene.

Sila $F_{w,2}$ na zvar 2 je druhá reakcia prostého nosníka

$$F_{w,2} = F_{Sd} / 2 - F_{w,1} = 250 / 2 - 35 = 90 \text{ kN} .$$



Vzhľadom na to, že zvar je namáhaný silou a momentom, dĺžku zvaru len odhadneme a zvar posúdime.

Návrh dĺžky zvaru

$$L_{w,2} \approx 3 L_{w,1} = 3 \cdot 70,0 = 210 \text{ mm} .$$

Overenie účinnej dĺžky zvaru

$$L_{w,2} = 210 \text{ mm} < 150 a = 150 \cdot 3 = 450 \text{ mm}.$$

$$40 \text{ mm} < L_{w,2} = 210 \text{ mm}.$$

Dĺžka zvaru 2 vyhovuje.

Ohybový moment v dôsledku excentricity ťahovej sily vzhľadom na rovinu spoja

$$M_{w,2} = F_{Sd} e_y / 2 = 250 \cdot 0,0168 / 2 = 2,1 \text{ kNm}.$$

Pozn.: Moment $M_{w,2}$ môžeme vypočítať aj postupom uvedeným napr. v [16], podľa ktorého pre rovnoramenný uholník (dĺžka odstavajúceho ramena $b = 60 \text{ mm}$)

$$M_{w,2} = \frac{F_{Sd} b}{4} \frac{b}{2} = \frac{250}{4} \frac{60 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,875 \text{ kNm}.$$

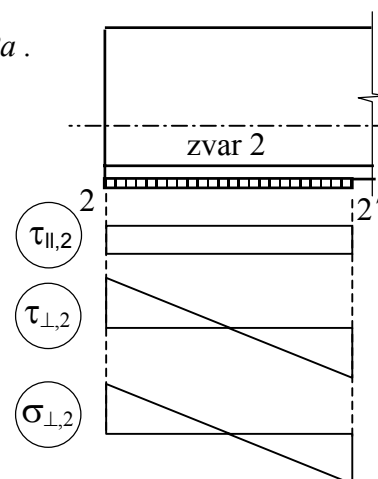
Napätie od momentu

$$\sigma_{w,2} = \frac{M_{w,2}}{W_{el,w}} = \frac{M_{w,2}}{a L_{w,2}^2 / 6} = \frac{6 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{3 \cdot 210^2} = 95,2 \text{ MPa}.$$

$$\tau_{\perp,2} = \sigma_{\perp,2} = \sigma_{w,2} / \sqrt{2} = 95,2 / \sqrt{2} = 67,3 \text{ MPa}.$$

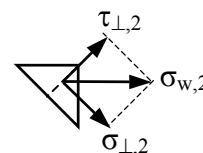
Šmykové napätie od sily

$$\tau_{\parallel,2} = \frac{F_{w,2}}{a L_{w,2}} = \frac{90 \cdot 10^3}{3 \cdot 210} = 143 \text{ MPa}.$$



Posúdenie zvaru 2 pomocou porovnávacieho napätia v bodoch 2 a 2'

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp,2}^2 + 3 \tau_{\perp,2}^2 + 3 \tau_{\parallel,2}^2} &= \sqrt{67,3^2 + 3 \cdot 67,3^2 + 3 \cdot 143^2} = \\ &= 282 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,5} = 300 \text{ MPa}. \end{aligned}$$



$$\sigma_{\perp,2} = 67,3 \text{ MPa} < \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} = \frac{360}{1,5} = 240 \text{ MPa}.$$

Zvar 2 vyhovuje.

Pozn.: Pri namáhaní zvarov sa zanedbáva prípadný moment v rovine spoja, ktorý vyplýva z odlišnej polohy ťažiska uholníka (pôsobiska osovej sily) a ťažiska zvarov.

Pozn.: Spoje sa zvyknú navrhovať na minimálnu z únosností spájaných prvkov. V takom prípade by sme zvary museli dimenzovať na silu

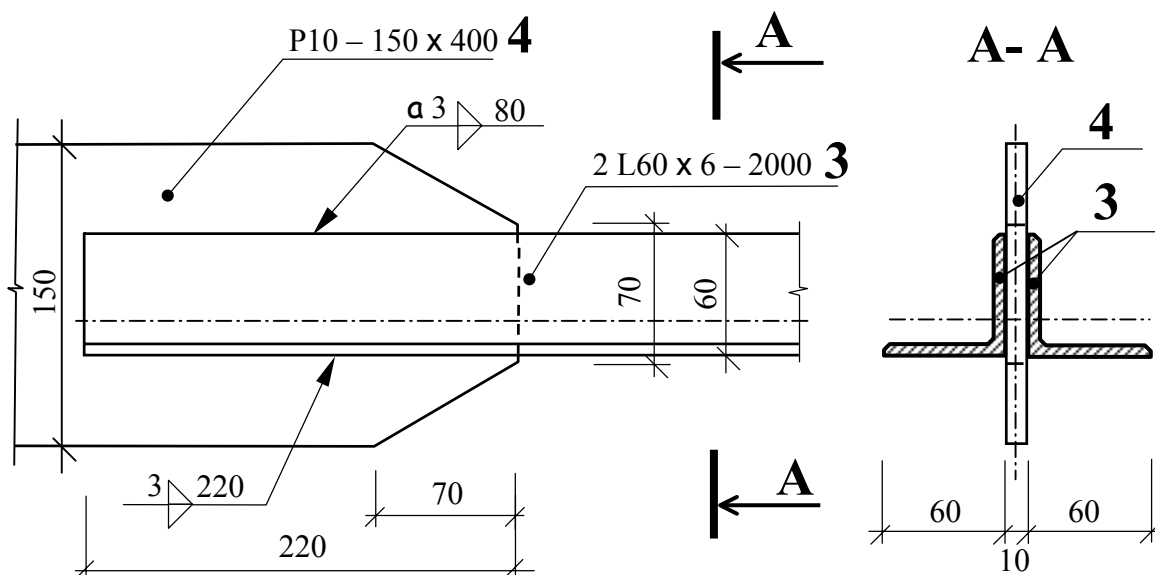
$$F_{Sd} = 295,2 \text{ kN}$$

Skutočnú dĺžku zvarov (zaokrúhlenú na celé cm) získame zväčšením účinnej dĺžky o 2 hrúbky zvaru, pretože na privarenej hrane prvku sú obidva konce zvarovej húsenice

$$\text{Zvar 1 : } 70 + 2 \cdot 3 \cong 80 \text{ mm .}$$

$$\text{Zvar 2 : } 210 + 2 \cdot 3 \cong 220 \text{ mm .}$$

Znázornenie zvarového spoja na výkrese



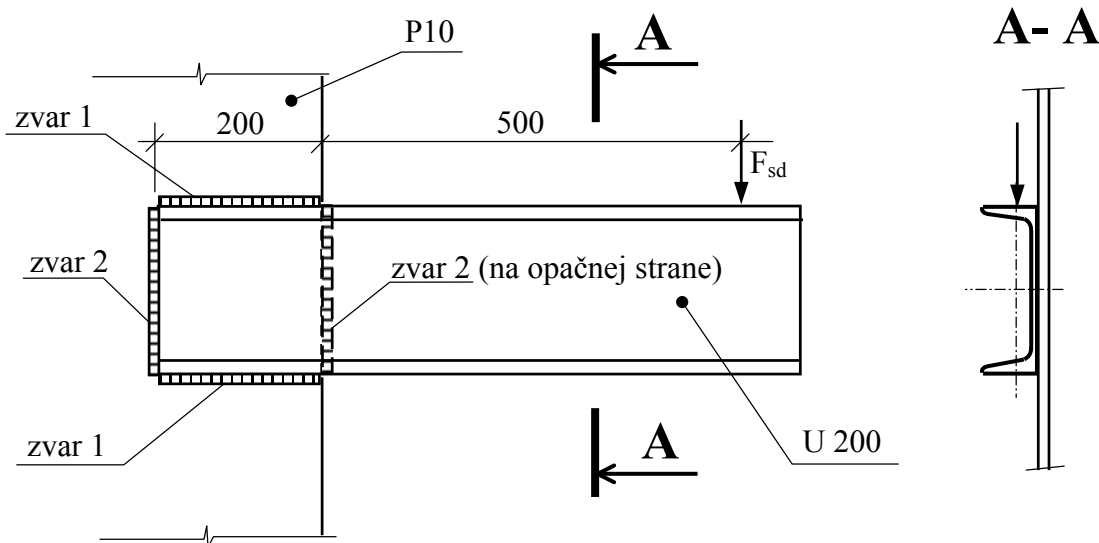
Pozn.: Veľké číslice označujú čísla jednotlivých konštrukčných prvkov, tzv. položiek. Rozmery prvku (položky) sa zvyčajne uvádzajú v takom pohľade na prvok, v ktorom je zobrazený jeho najväčší rozmer. V tomto pohľade sa popisuje aj spoj prvku, ktorý je súčasťou položky. V ostatných pohľadoch, resp. rezoch sa popisuje len číslo položky, spoj sa popisuje len v prípade, že by mohlo dôjsť k nesprávnej interpretácii zobrazenia.

Viacere konštrukčné prvky môžu byť tou istou položkou, ak majú rovnaký materiál, tvar, rozmery a spôsob pripojenia.

Rozmery symetrického zvaru sa uvádzajú len raz.

5.3 Spoj kútovým zvarom namáhaný priečnou silou a momentom v rovine spoja

Posúďte pripojenie konzoly na styčkový plech pomocou kútových zvarov rovnakej hrúbky. Konzola z ocele S 235 valcovaného prierezu U200 je zaťažená silou $F_{sd} = 100 \text{ kN}$ vo vzdialenosti 500 mm od hrany styčkového plechu. Pri výpočte zanedbáme vplyv krútenia konzoly.



Veľkosť presahu styčkového plechu a konzoly navrhne rovnú výške prierezu, to znamená 200 mm.

Skutočná dĺžka zvarov je vymedzená konštrukčným usporiadaním spojených prvkov. Na pohľadovej strane bude vytvorený súvislý zvar na troch stranách (ako v príklade 5.1), na zadnej strane bude vytvorený samostatný zvislý zvar. Vodorovné zvary, zvislý zvar na pohľadovej strane a zvislý zvar na zadnej strane by teda mali mať rôznu účinnú dĺžku.

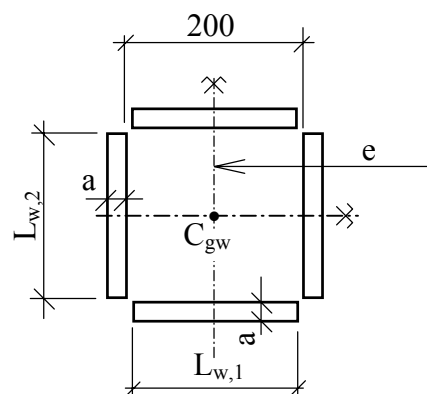
Hrúbku všetkých zvarov volíme 4 mm.

Z výpočtových dôvodov, aby bolo možné využiť dvojosovú symetriu, budeme považovať (na bezpečnej strane) všetky zvary za samostatné s rovnakou účinnou dĺžkou

$$L_{w,1} = L_{w,2} = 200 - 2 \cdot 4 = 192 \text{ mm.}$$

Zvarový spoj je namáhaný silou a momentom v rovine spoja. Rameno sily e sa určuje k ťažisku tzv. zvarového obrazca C_{gw} , ktorý pozostáva z úzkych obdĺžnikov s rozmermi a , $L_{w,1}$, resp. $L_{w,2}$.

Zvislé zvary spájajú plech a stenu valcovaného prúta U 200, takže odvesna zvarového trojuholníka nemôže byť väčšia ako je hrúbka steny prúta $t_w = 8,5 \text{ mm}$, resp.



hrúbka plechu 10 mm (pre zvislý zvar na zadnej strane). Overíme menšiu hrúbku spojených prvkov

$$a \cdot 2^{0,5} = 1,414 \cdot 4 = 5,7 < t_w = 8,5 \text{ mm}.$$

Hrúbka vyhovuje.

Moment v rovine spoja

$$M_{Sd} = F_{Sd} e = 100 \cdot 10^3 (500 + 200/2) = 60 \cdot 10^6 \text{ Nmm}.$$

Sila F_{Sd} sa rozdelí na jednotlivé zvary v pomere ich tuhostí. V našom prípade sú všetky zvary rovnaké, preto sila na jednotkovú dĺžku zvaru

$$F_F = \frac{F_{Sd}}{2(L_{w,1} + L_{w,2})} = \frac{100 \cdot 10^3}{2(192 + 192)} = 131 \text{ N/mm}.$$

Namáhanie od momentu, ktoré sa vypočíta pomocou polárneho momentu zotrvačnosti zvarového obrazca, dosahuje maximálnu hodnotu v bode zvarového obrazca najviac vzdialenom od jeho ťažiska (vzdialenosť ťažiska a vyšetřovaného bodu zvaru je označená r).

V záujme ďalšieho zjednodušenia výpočtu budeme uvažovať (opäť na bezpečnej strane), že zvarové obdĺžniky sa dotýkajú rohmi.

Polárny moment zotrvačnosti zvarového obrazca

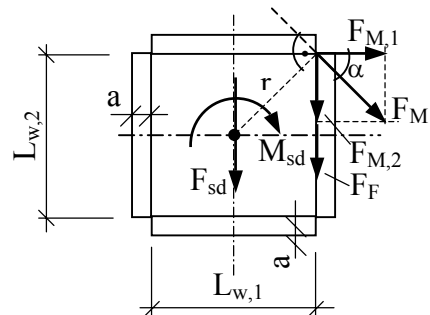
$$\begin{aligned} I_{pw} &= I_{yw} + I_{zw} = 2 \left[\frac{2}{12} a L_{w,2}^3 + 2a L_{w,1} (L_{w,2}/2)^2 \right] = \\ &= 2 \left[\frac{2}{12} 4 \cdot 192^3 + 2 \cdot 4 \cdot 192 \left(\frac{192}{2} \right)^2 \right] = 37,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Maximálna sila na jednotku dĺžky zvaru

$$F_M = M_{Sd} \frac{r a}{I_{pw}} = 60 \cdot 10^6 \frac{4 \sqrt{96^2 + 96^2}}{37,7 \cdot 10^6} = 864 \text{ N/mm},$$

$$F_{M1} = F_M \cos \alpha = 864 \cos 45^\circ = 611 \text{ N/mm},$$

$$F_{M2} = F_M \sin \alpha = 864 \sin 45^\circ = 611 \text{ N/mm}.$$



Pozn.: Zjednodušený spôsob výpočtu silových účinkov pri rôznych konfiguráciách kútových zvarov namáhaných silou a momentom v rovine spoja je napr. v [16] a [20].

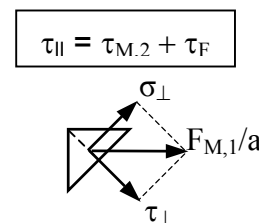
Posúdenie zvislého zvaru 2

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{M,1}}{a\sqrt{2}} = \frac{611}{4\sqrt{2}} = 108 \text{ MPa},$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{M,2} + F_F}{a} = \frac{611 + 131}{4} = 185,5 \text{ MPa},$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{108^2 + 3(108^2 + 185,5^2)} = 387 \text{ MPa},$$

$$387 \text{ MPa} > \frac{f_u}{\gamma_{Mw} \beta_{Mw}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,5} = 300 \text{ MPa}.$$



Nevyhovuje.

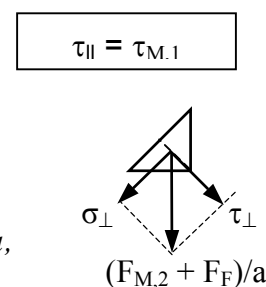
Posúdenie vodorovného zvaru 1

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{M,2} + F_F}{a\sqrt{2}} = \frac{611 + 131}{4\sqrt{2}} = 131 \text{ MPa},$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{M,1}}{a} = \frac{611}{4} = 153 \text{ MPa},$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{131^2 + 3(131^2 + 153^2)} = 373 \text{ MPa},$$

$$373 \text{ MPa} > \frac{f_u}{\gamma_{Mw} \beta_{Mw}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,5} = 300 \text{ MPa}.$$



Nevyhovuje.

Zvary hrúbky 4 mm nevyhovujú, navrhujeme preto novú hrúbku zvarov $a = 6 \text{ mm}$.

Ako sa ukázalo pri predchádzajúcom posúdení, viac namáhaný je zvislý zvar 2, preto porovnávacie napätie s novou hrúbkou posúdime len v tomto zvare.

Overenie hrúbky zvaru

$$a \cdot 2^{0,5} = 6 \cdot 1,414 = 8,48 \approx t_w = 8,5 \text{ mm}.$$

Vyhovuje.

Napätie od momentu a sily

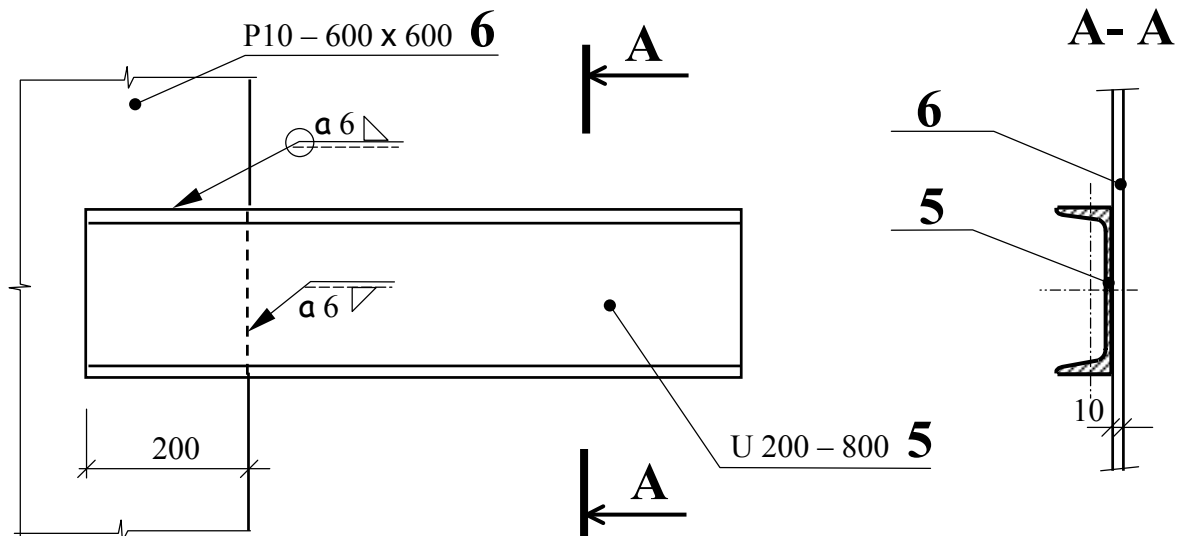
$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 108,4 / 6 = 72 \text{ MPa}, \quad \tau_{\parallel} = 185,5 \cdot 4 / 6 = 124 \text{ MPa}.$$

Porovnávacie napätie vo zvislom zvare 2

$$\sqrt{72^2 + 3(72^2 + 124^2)} = 258 \text{ MPa} < 300 \text{ MPa}.$$

Zvar vyhovuje.

Zobrazenie spoja na výkrese



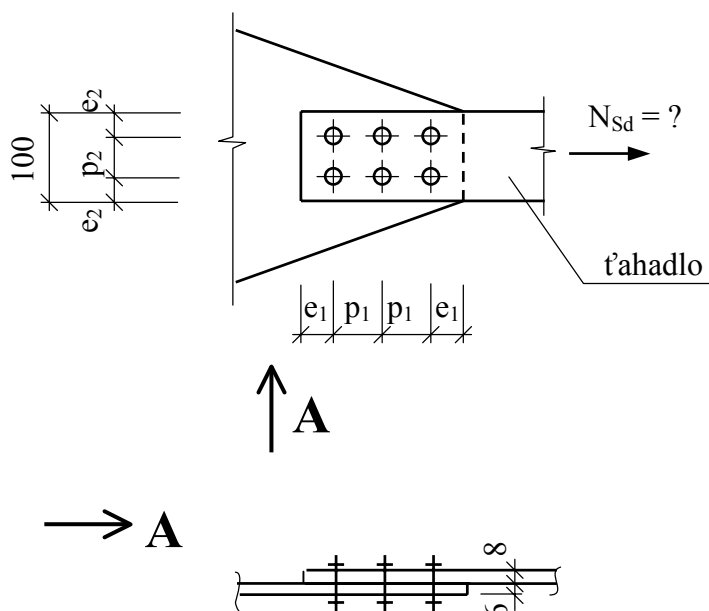
Pozn.: Krúžok v mieste spojenia odkazovej čiary a zástavky odkazovej čiary zvaru označuje zvar na celom obvode kontaktnej plochy spojených prvkov.

Značka zvaru na strane čiarkovanej čiary označuje zvar na opačnej strane prvku.

Odkazové čiary zvaru majú zvyčajne smer a orientáciu, ktoré symbolicky naznačujú polohu zváracej elektródy.

5.4 Skrutkový spoj namáhaný osovou silou

Navrhňte montážne pripojenie ťahadla na styčkový plech z ocele S 235 skrutkovým spojom. Spoj nadimenzujte na návrhovú silu únosnosti ťahadla.



Navrhujeme pripojenie hrubými skrutkami pevnostnej triedy 4.6 so závitom, ktorý nie je po celej dĺžke drieku skrutky.

Návrh priemeru skrutiek d a priemeru štandardnej diery d_0

$$d \approx 2t = 2 \cdot 8 = 16 \text{ mm}, \quad d_0 = d + 2 = 16 + 2 = 18 \text{ mm}.$$

Spoj namáhaný šmykom patrí do kategórie A. Pri symetrickom usporiadaní skrutiek (vzhľadom na pôsobisko sily v ťahadle) bude spoj namáhaný len šmykovou silou, takže potrebný počet skrutiek nemusíme odhadovať, ale ho môžeme priamo vypočítať pomocou minimálnej hodnoty únosnosti v strihu a otláčení.

Návrhovú normálovú silu únosnosti určíme pre ťahadlo s oslabeným a neoslabeným prierezom. Oslabenie prierezu predpokladáme dvoma otvormi.

$$\frac{A}{A_{net}} = \frac{100 \cdot 8}{(100 - 2 \cdot 18) \cdot 8} = 1,56 > 1,2 \rightarrow \text{s oslabením sa musí počítať.}$$

Návrhovú normálovú silu únosnosti oslabeného prierezu

$$N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0,9(100 - 2 \cdot 18) \cdot 8 \cdot 360 / 1,3 = 127,6 \text{ kN}.$$

Návrhová normálová sila únosnosti neoslabeného prierezu

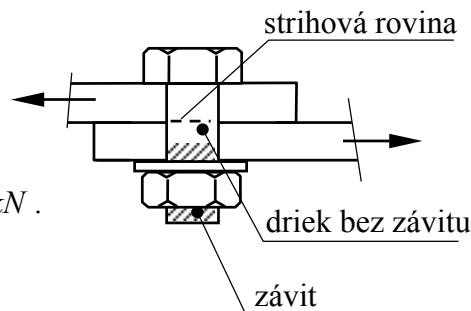
$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} = 100.8.235 / 1,1 = 170,9 \text{ kN} .$$

Návrhová ťahová sila únosnosti ťahadla

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}) = \min(170,9; 127,6) = 127,6 \text{ kN} = N_{Sd} .$$

Návrhová únosnosť v strihu (pre jednu strihovú plochu), ak rovina strihu prechádza cez plný driek skrutky

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6.400\pi 16^2 / 4}{1,45} = 33,1 \text{ kN} .$$

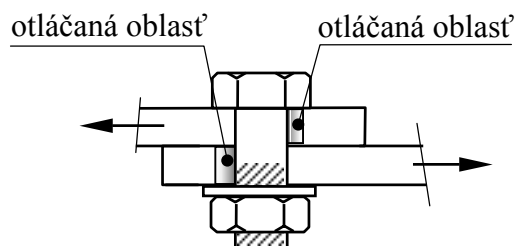


Návrhová únosnosť spoja v otláčení je daná vzťahom

$$F_{b,Rd} = 2,5 \alpha f_u d t / \gamma_{Mb} ,$$

kde d je priemer skrutky, t je minimálna hodnota súčtu hrúbok spájaných prvkov otláčaných rovnakým smerom, v našom prípade

$$t = \min(6; 8) = 6 \text{ mm} .$$



Pozn. : V obrázku sú vyznačené otláčané oblasti len v spojených prvkoch, pretože ich pevnosť (pevnosť základného materiálu) zvyčajne je menšia ako pevnosť materiálu skrutiek. V prípade, že by rozhodovalo $\alpha = f_{ub} / f_u$, otláčaný by bol driek skrutky v miestach oproti vyznačeným oblastiam.

Na výpočet súčiniteľa α je potrebné navrhnuť vzdialenosti dier od okrajov spojených prvkov a vzdialenosti medzi dierami v smere sily

$$e_1 = 2 d_0 = 2.18 = 36 \text{ mm} ,$$

$$e_1 = 12t = 12.6 = 72 \text{ mm} , \text{ resp. } e_{1,max} = 150 \text{ mm} ,$$

$$e_{1,min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 1,8 = 21,6 \text{ mm} .$$

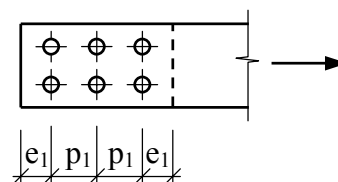
Navrhujeme $e_1 = 40 \text{ mm}$.

$$p_1 = 3,5d_0 = 3,5.18 = 63 \text{ mm} , p_{1,max} = 6 d_0 = 6 \cdot 18 = 108 \text{ mm} ,$$

$$\text{resp. } p_{1,max} = 14 t = 14 \cdot 6 = 84 \text{ mm} , p_{1,max} = 200 \text{ mm} ,$$

$$p_{1,min} = 2,2d_0 = 2,2.18 = 39,6 \text{ mm} .$$

Navrhujeme $p_1 = 65 \text{ mm}$.



Výpočet súčiniteľa α

$$\frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74, \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{65}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,95, \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{400}{360} = 1,11,$$

$$\alpha = \min(0,74; 0,95; 1,11; 1,0) = 0,74.$$

Návrhová únosnosť spoja v otláčení

$$F_{b,Rd} = 2,5\alpha f_u d t / \gamma_{Mb} = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 6 / 1,45 = 44,1 \text{ kN}.$$

Počet skrutiek vyplýva z minimálnej únosnosti skrutky

$$n = \frac{N_{Sd}}{\min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})} = \frac{127,6}{33,1} = 3,8 \rightarrow \text{Navrhujeme 4 skrutky M 16}.$$

Návrh vzdialeností medzi dierami a vzdialeností dier od okrajov v smere kolmom na smer sily

$$e_2 = 1,5d_0 = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ mm},$$

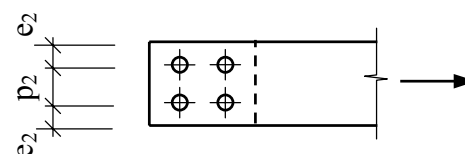
$$e_{2,max} = e_{1,max} = 72 \text{ mm},$$

$$e_{2,min} = 21,6 \text{ mm},$$

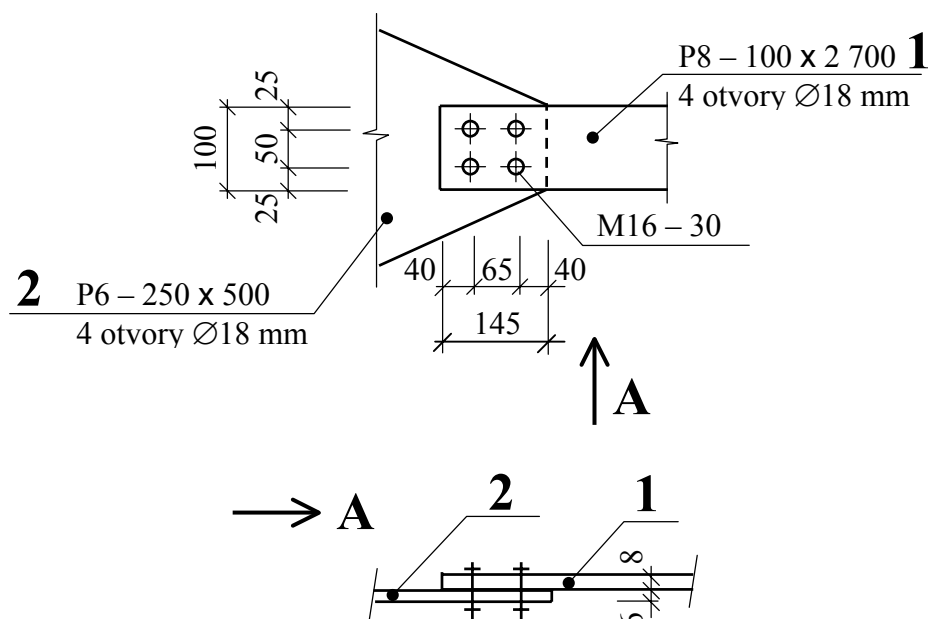
$$p_2 = 3,0d_0 = 3,0 \cdot 18 = 54 \text{ mm}, \quad p_{2,max} = p_{1,max} = 84 \text{ mm},$$

$$p_{2,min} = 2,4d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2 \text{ mm}.$$

Navrhujeme $e_2 = 25 \text{ mm}$, $p_2 = 50 \text{ mm}$.

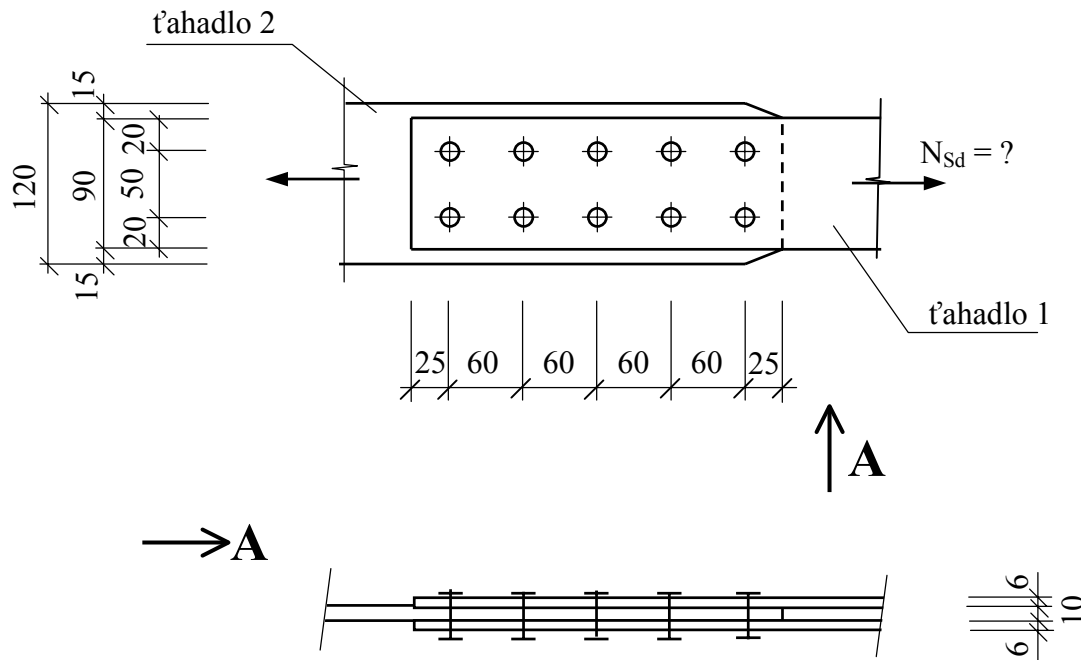


Zobrazenie spoja na výkrese



5.5 Dlhý skrutkový spoj namáhaný osovou silou

Vypočítajte prípustnú návrhovú silu na spoj ťahadiel pomocou presných skrutiek M 12 pevnostnej triedy 4.6. Ťahadlá sú z ocele S 235, diery majú priemer 12 mm.



Overenie dĺžky spoja

$$L_j = 4 \cdot 60 = 240 \text{ mm} > 15d = 15 \cdot 12 = 180 \text{ mm}.$$

Ide o tzv. dlhý spoj, v ktorom sa únosnosť v strihu všetkých skrutiek redukuje súčiniteľom β_{Lf}

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} = 1 - \frac{240 - 15 \cdot 12}{200 \cdot 12} = 0,975 > 0,75.$$

Návrhová únosnosť skrutky v strihu pre dve strihové plochy (rovina strihu prechádza závitom srutky)

$$F_{v,Rd} = \beta_{Lf} 2 \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} = 0,975 \cdot 2 \frac{0,6 \cdot 400 \cdot 84}{1,45} = 27,1 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť spoja v otláčení

$$\frac{e_l}{3d_0} = \frac{25}{3 \cdot 12} = 0,69; \quad \frac{p_l}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 12} - \frac{1}{4} = 1,42; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,39;$$

$$\alpha = \min(0,69; 1,42; 1,39; 1,0) = 0,69,$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,69 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 10}{1,45} = 51,4 \text{ kN} > F_{v,Rd} = 27,1 \text{ kN}.$$

Rozhoduje únosnosť skrutky v strihu, teda únosnosť spoja vzhľadom na skrutky je

$$10 F_{v,Rd} = 10 \cdot 27,0 = 270,0 \text{ kN}.$$

Pri hodnotení únosnosti spoja ako celku sa popri únosnosti spájacích prostriedkov berie do úvahy aj únosnosť spojených prvkov. Prierezy oboch ťahadiel sú oslabené dvoma dierami priemeru 12 mm.

Oslabenie prierezu ťahadla 1

$$\frac{A}{A_{net}} = \frac{90 \cdot 2,6}{(90 - 2 \cdot 12) \cdot 2,6} = 1,36 > 1,2 \rightarrow \text{s oslabením musíme počítať.}$$

Návrhová sila únosnosti ťahadla 1

$$N_{u,Rd,1} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0,9 (90 - 2 \cdot 12) \cdot 2,6 \cdot 360 / 1,3 = 219,3 \text{ kN}.$$

Oslabenie prierezu ťahadla 2

$$\frac{A}{A_{net}} = \frac{120 \cdot 10}{(120 - 2 \cdot 12) \cdot 10} = 1,25 > 1,2 \rightarrow \text{s oslabením musíme počítať.}$$

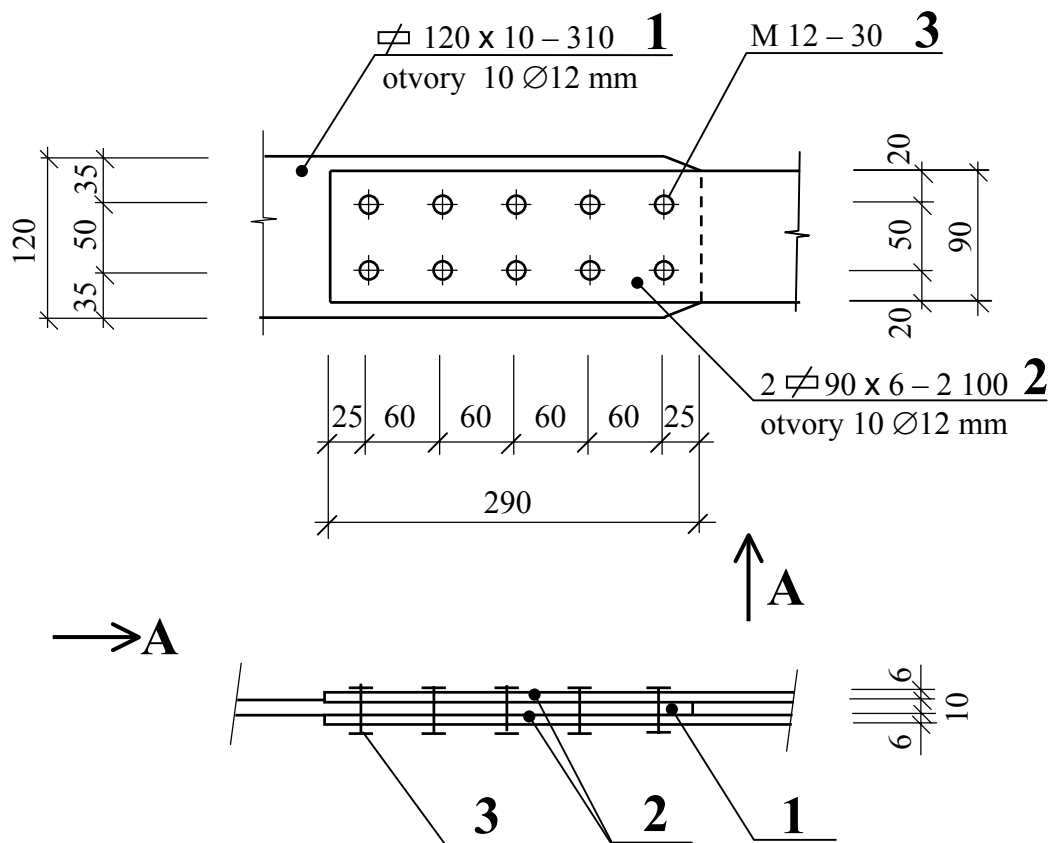
Návrhová sila únosnosti ťahadla 2

$$N_{u,Rd,2} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0,9 (120 - 2 \cdot 12) \cdot 10 \cdot 360 / 1,3 = 239,3 \text{ kN}.$$

Únosnosť spoja ako celku sa rovná hodnote najmenej z čiastkových únosností, preto prípustná návrhová sila na spoj ako celok je

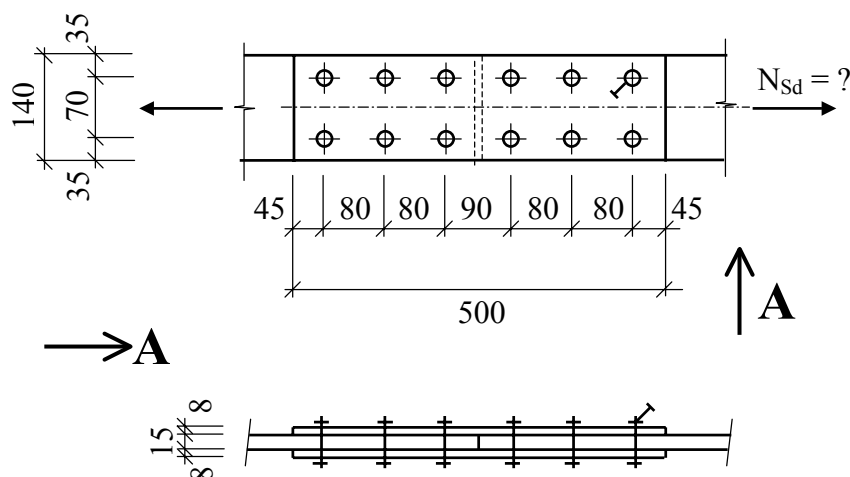
$$N_{Sd} = \min (10F_{v,Rd}; N_{u,Rd,1}; N_{u,Rd,2}) = \min (270; 219,3; 239,3) = 219,3 \text{ kN}$$

Zobrazenie spoja na výkrese



5.6 Skrutkový trecí spoj namáhaný osovou silou

Vypočítajte prípustnú silu v oceľovom ťahadle z plochej ocele spojenom trecím spojom kategórie C. Použité sú skrutky M 16 pevnostnej triedy 8.8, trecie plochy sú otryskané, s dokonale odstránenou hrdzou. Ťahadlo a príložky sú z ocele S 355 so štandardnými otvormi priemeru 18 mm.



Spoj kategórie C sa posudzuje na preklz a otláčeniu v medznom stave únosnosti. Súčasne sa posudzuje únosnosť oslabeného prierezu spojeného prvku v ťahu. Prípustnú silu v ťahadle určíme ako minimálnu hodnotu z jednotlivých únosností.

Posúdenie skrutiek

Návrhová predpínacia sila VP skrutky M16 triedy 8.8 (STN 73 1401, tab. 23)

$$F_{p,Cd} = 88 \text{ kN} .$$

Návrhová odolnosť VP skrutky proti preklzu (dve trecie plochy, súčiniteľ trenia $\mu = 0,5$ – trieda povrchu A)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,Cd} = \frac{1,0 \cdot 2 \cdot 0,5}{1,3} 88 = 67,7 \text{ kN} .$$

Návrhová únosnosť VP skrutky v otláčení

$$\frac{e_1}{3d_0} = \frac{45}{3 \cdot 18} = 0,83, \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{80}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 1,23, \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,57 ,$$

$$\alpha = \min(0,83; 1,23; 1,57; 1,0) = 0,83,$$

$$t = \min(2,8; 15) = 15 \text{ mm},$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,83 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 15}{1,45} = 175,2 \text{ kN}.$$

Posúdenie spojených prvkov

Oslabenie prierezu

$$\frac{A}{A_{net}} = \frac{140 \cdot 15}{(140 - 2 \cdot 18) \cdot 15} = 1,35 > 1,2 \rightarrow \text{uvažujeme s oslabením.}$$

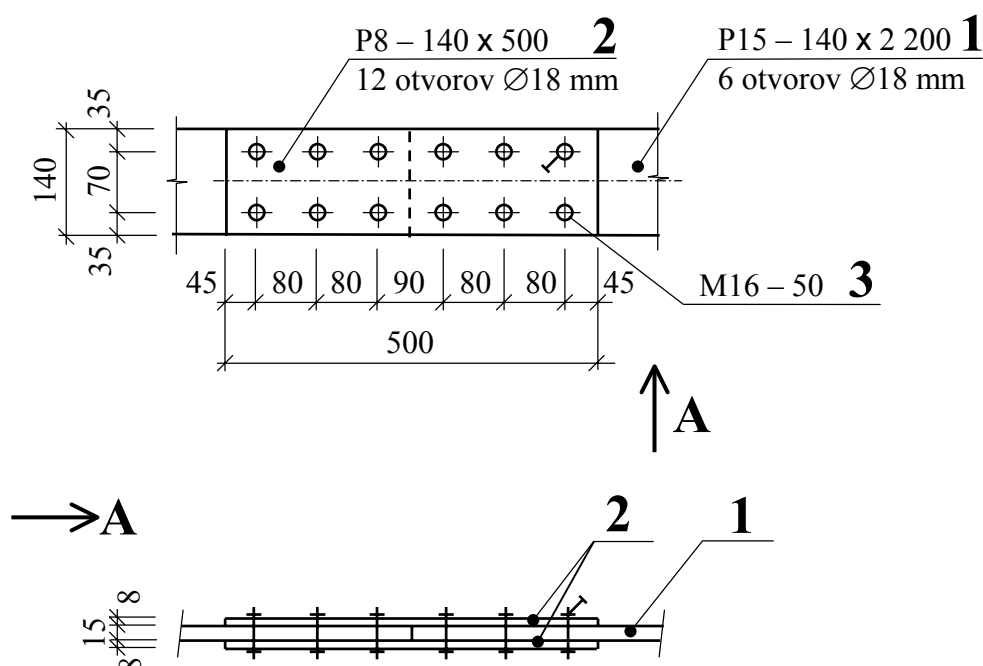
Návrhová plastická únosnosť oslabeného prierezu

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(140 - 2 \cdot 18) \cdot 15 \cdot 355}{1,1} = 503,5 \text{ kN}.$$

Prípustná sila v ťahadle

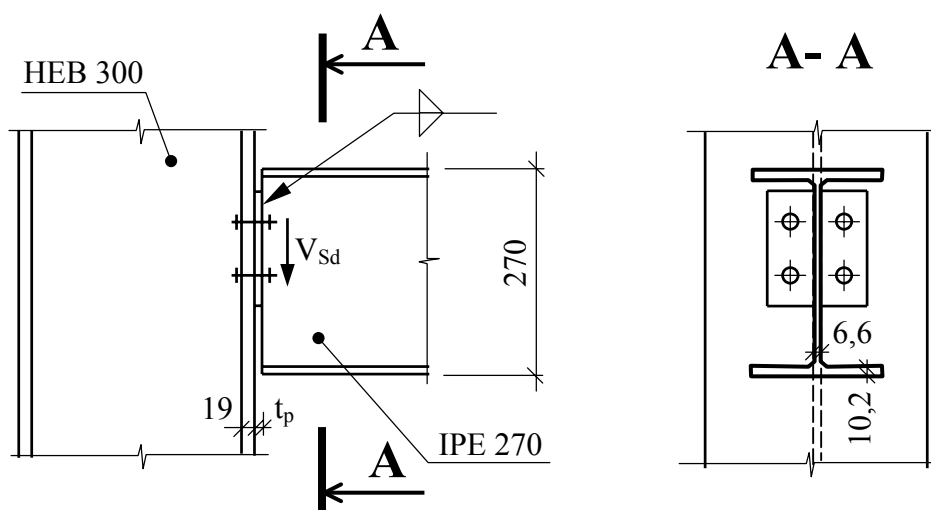
$$N_{Rd} = \min(6 F_{s,Rd}; 6 F_{b,Rd}; N_{net,Rd}) = \min(406,2; 1051,2; 503,5) = 406,2 \text{ kN}.$$

Zobrazenie spoja na výkrese



5.7 Skrutkový spoj namáhaný priečnou silou

Navrhňte kĺbové pripojenie nosníka IPE 270 na stĺp prierezu HEB 300 pomocou čelnej dosky z ocele S 235 privarenej len na stenu nosníka.



Postupne navrhujeme a posúdime zvarový spoj medzi čelnou doskou a stenou nosníka a skrutkový spoj medzi čelnou doskou a pásnicou stĺpa. Oba spoje nadimenzujeme na návrhovú šmykovú silu únosnosti nosníka.

Overenie štíhlosti steny vzhľadom na šmyk

$$f_y = f_{yw} = 235 \text{ MPa}, \gamma_{M0} = 1,1 ,$$

$$\beta_w = d/t_w = (270 - 2 \cdot 10,2) / 6,6 = 38 < 70 \sqrt{235 / f_{yw}} = 70.$$

Stena je kompaktná.

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{Sd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{(270 - 2 \cdot 10,2) 6,6 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 203 \text{ kN} .$$

Spoj čelnej dosky a steny nosníka

Navrhujeme obojstranný kútový zvar hrúbky $a = 5 \text{ mm}$. Potrebnú dĺžku zvaru vypočítame z podmienky spoľahlivosti

$$\tau_{II} = \frac{V_{pl,Rd}}{2 L_w a} \leq \frac{f_u / \sqrt{3}}{\gamma_{Mw} \beta_w} ,$$

$$L_w \geq \frac{V_{pl,Rd} \gamma_{Mw} \beta_w}{2a f_u / \sqrt{3}} = \frac{203,19 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 0,8}{2 \cdot 5 \cdot 360 / \sqrt{3}} = 117,3 \text{ mm}.$$

Navrhujeme dĺžku zvaru min. 120 mm.

Spoj čelnej dosky a pásnice stĺpa

Navrhujeme skrutky M 20 pevnostnej triedy 5.6, hrúbku čelnej dosky $t_p = 10 \text{ mm}$.

Návrhová únosnosť skrutky v strihu (rovina strihu prechádza závitom skrutky)

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 245}{1,45} = 50,7 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť spoja v otláčení

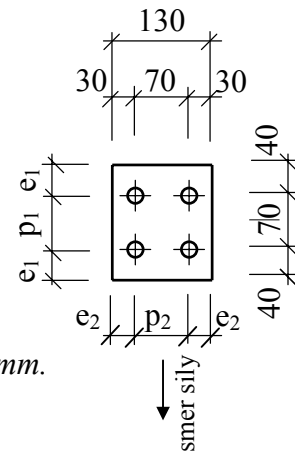
$$\frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61, \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 0,81, \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,4,$$

$$\alpha = \min(0,61; 0,81; 1,4; 1,0) = 0,61, \quad t = \min(10; 19) = 10 \text{ mm},$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,45} = 75,7 \text{ kN}.$$

Počet skrutiek

$$n = \frac{V_{pl,Rd}}{\min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})} = \frac{203,19}{50,7} = 4,0.$$



Navrhujeme 4 skrutky a čelnú dosku s rozmermi 130x150x10 mm.

Overenie oslabenia čelnej dosky

$$A_{v,net} / A_v = (150 - 2 \cdot 20) \cdot 10 / (150 \cdot 10) = 0,73 > f_y / f_u = 235 / 360 = 0,65.$$

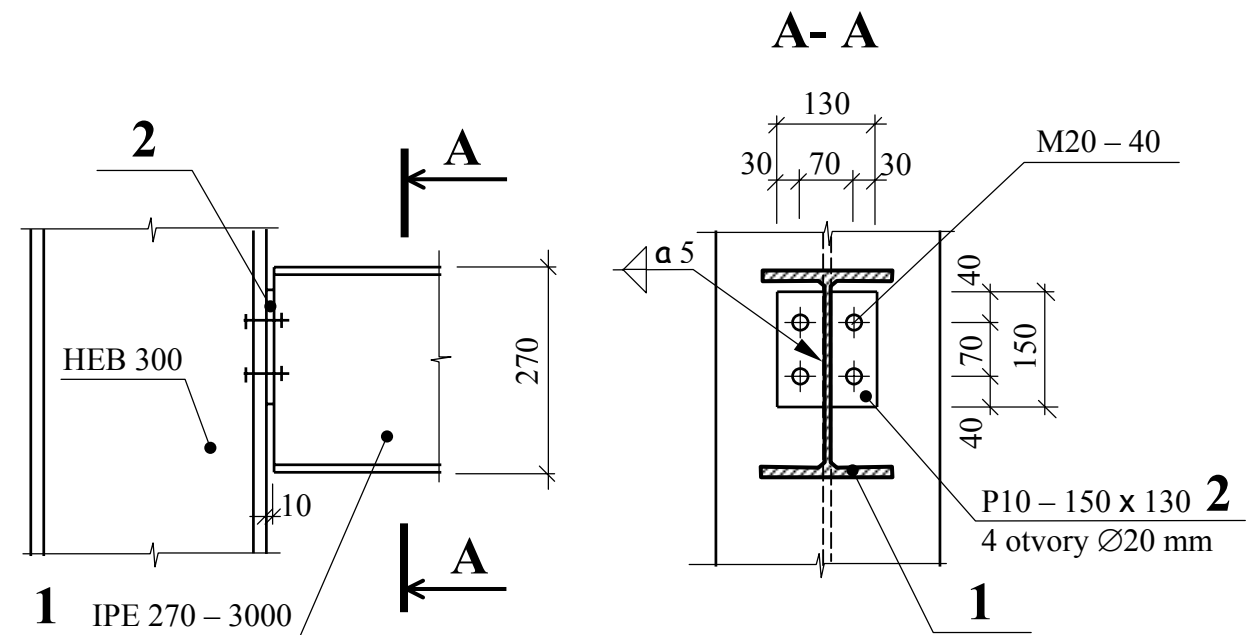
Oslabenie čelnej dosky v šmyku neuvažujeme.

Únosnosť čelnej dosky v šmyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 150 \cdot 235}{1,1 \sqrt{3}} = 370,0 \text{ kN} > V_{pl,Rd} = 203 \text{ kN}.$$

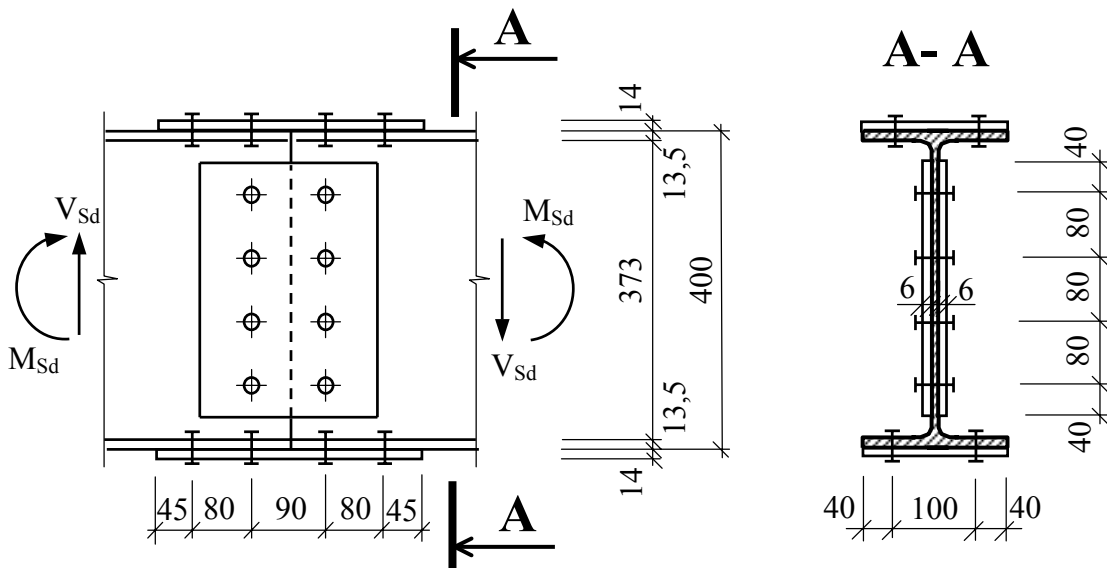
Čelná doska vyhovuje.

Zobrazenie spoja na výkrese



5.8 Skrutkový spoj namáhaný priečnou silou a momentom v rovine spoja

Posúďte skrutkový spoj ohýbaného nosníka prierezu IPE 400 z ocele S 235. Skrutky M 20 sú pevnostnej triedy 5.6, štandardné otvory $\varnothing 22$ mm. V mieste styku pôsobí návrhový ohybový moment $M_{Sd} = 120$ kNm a návrhová priečna sila $V_{Sd} = 180$ kN. Ak spoj nevyhovuje, navrhnite jeho úpravu.



Prierezové charakteristiky a klasifikácia prierezu

$$A = 8450 \text{ mm}^2, \quad b_f = 180 \text{ mm}, \quad t_w = 8,6 \text{ mm}, \quad t_f = 13,5 \text{ mm}.$$

$$\varepsilon_m = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 235} = 1,0,$$

$$\text{pásnica: } c/t_f = (90 - 4,3) / 13,5 = 6,4 < 9 \rightarrow \text{trieda 1},$$

$$\text{stena: } d/t_w = (400 - 2 \cdot 13,5) / 8,6 = 43,4 < 70 \rightarrow \text{trieda 1}.$$

Posúdenie prierezu nosníka

Oslabenie prierezu na šmyk

$$\frac{A_{V,net}}{A_V} = \frac{8,6(400 - 2 \cdot 13,5 - 4,22)}{8,6(400 - 2 \cdot 13,5)} = 0,76 > \frac{f_y}{f_u} = \frac{235}{360} = 0,65.$$

S oslabením prierezu v šmyku sa neuvažuje.

Návrhová šmyková sila únosnosti

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{8,6(400 - 2 \cdot 13,5) 235}{1,1 \sqrt{3}} = 395,6 \text{ kN} > V_{Sd} = 180 \text{ kN}.$$

Prút vyhovuje.

Oslabenie prierezu na ohyb

Oslabenie ťahanej pásnice

$$\frac{A_{ft,net}}{A_f} = \frac{(180 - 2 \cdot 22)13,5}{180 \cdot 13,5} = 0,76 < \frac{f_y}{0,9 f_u} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} = \frac{235}{0,9 \cdot 360} \frac{1,3}{1,1} = 0,86.$$

S oslabením ťahanej pásnice sa uvažuje.

Oslabenie celej ťahanej časti prierezu

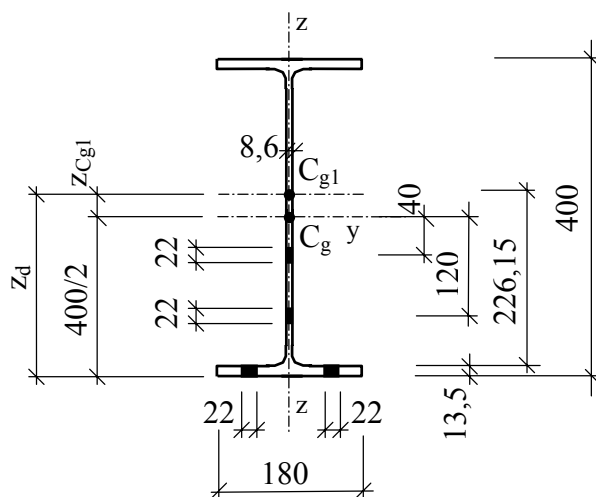
$$\frac{A_{t,net}}{A_t} = \frac{(180 - 2 \cdot 22)13,5 + (400/2 - 13,5 - 2 \cdot 22)8,6}{180 \cdot 13,5 + (400/2 - 13,5)8,6} = 0,76 <$$

$$< \frac{f_y}{0,9 f_u} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} = \frac{235}{0,9 \cdot 360} \frac{1,3}{1,1} = 0,86,$$

S oslabením celej ťahanej časti prierezu sa uvažuje.

Poloha ťažiska oslabeného prierezu

$$z_{CgI} = \frac{-2 \cdot 22 \cdot 13,5(400 - 13,5)/2 - 22 \cdot 8,6 \cdot 40 - 22 \cdot 8,6 \cdot 120}{8450 - 2 \cdot 22 \cdot 13,5 - 2 \cdot 22 \cdot 8,6} = -19,4 \text{ mm.}$$



Moment zotrvačnosti oslabeného prierezu

$$I_{y,net} = 180 \cdot 13,5 (400/2 - 13,5/2 - 19,4)^2 +$$

$$+ (180 \cdot 13,5 - 2 \cdot 22 \cdot 13,5)(400/2 - 13,5/2 + 19,4)^2 +$$

$$+ 8,6 (400/2 - 13,5 - 19,4)^3 / 12 + 8,6 (400/2 - 13,5 - 19,4)^3 / 4 +$$

$$+ 8,6 (400/2 - 13,5 + 19,4)^3 / 12 + 8,6 (400/2 - 13,5 + 19,4)^3 / 4 -$$

$$\begin{aligned}
 & -2 \cdot 8,6 \cdot 22^3 / 12 - 8,6 \cdot 22 (40 + 19,4)^2 - 8,6 \cdot 22 (120 + 19,4)^2 = \\
 & = 73,4 \cdot 10^6 + 83,0 \cdot 10^6 + 3,33 \cdot 10^6 + 10,0 \cdot 10^6 + 6,3 \cdot 10^6 + 18,8 \cdot 10^6 - \\
 & -15,3 \cdot 10^3 - 0,67 \cdot 10^6 - 3,7 \cdot 10^6 = 190,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.
 \end{aligned}$$

Návrhový ohybový moment únosnosti oslabeného prierezu v pružnej oblasti namáhania

$$M_{el,Rd} = \frac{I_{net}}{z_d} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{190,4 \cdot 10^6 \cdot 235}{(400/2 + 19,4)1,1} = 185,4 \text{ kN} > M_{Sd} = 120 \text{ kNm}.$$

Prierez vyhovuje.

Pozn.: Pre prierez triedy 1 by sme mohli vypočítať plastickú ohybovú únosnosť. Vyhli sme sa však výpočtu plastického prierezového modulu a využili sme moment zotrvačnosti, ktorý budeme potrebovať pri pružnostnom výpočte spoja steny, na výpočet pružnej ohybovej únosnosti.

Redukcia momentu únosnosti vplyvom šmyku sa neuvažuje, pretože

$$V_{Sd} / V_{pl,Rd} = 180,0 / 395,6 = 0,46 < 0,5.$$

Spoj steny

Moment zotrvačnosti oslabenej steny

$$I_{w,net} = (3,33 + 10,0 + 6,3 + 18,8 - 0,0153 - 0,67 - 3,7)10^6 = 34,04 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

Ohybový moment pripadajúci na stenu

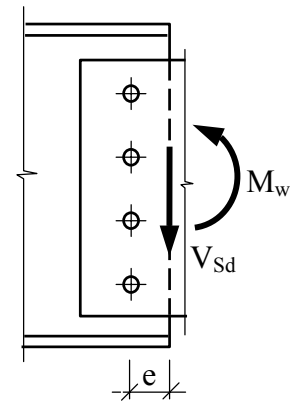
$$M_w = (M_{Sd} + V_{Sd} e) \frac{I_{w,net}}{I_{net}} = (120 + 180 \cdot 0,045) \frac{34,04 \cdot 10^6}{190,4 \cdot 10^6} = 23 \text{ kNm}.$$

Návrhová únosnosť skrutky v strihu (rovina strihu prechádza cez plný driek skrutky)

$$F_{v,Rd} = 2 \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} = 2 \frac{0,6 \cdot 500 \pi 20^2 / 4}{1,45} = 130,0 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť v otláčení

$$\frac{e_l}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61, \quad \frac{p_l}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{80}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 0,96, \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,39,$$



$$\alpha = \min(0,61; 0,96; 1,39; 1,0) = 0,61,$$

$$\text{hrúbka príložiek } 2.6 = 12 \text{ mm}, \quad t = \min(8,6; 12) = 8,6 \text{ mm},$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 8,6}{1,45} = 65,1 \text{ kN}.$$

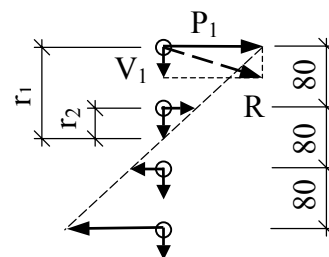
Sila v najviac namáhanej skrutke

$$P_1 = M_w \frac{r_1}{\sum r_i^2} = 23 \cdot 10^6 \frac{120}{2(120^2 + 40^2)} = 86 \text{ kN},$$

$$V_1 = V_{sd} / 4 = 180 / 4 = 45,0 \text{ kN},$$

$$R = \sqrt{P_1^2 + V_1^2} = \sqrt{86,0^2 + 45,0^2} = 97,3 \text{ kN} > F_{b,Rd} = 65,1 \text{ kN}.$$

Spoj nevyhovuje.



Nový návrh - dva rady skrutiek

$$M_w = (120 + 180 \cdot 0,085) 34,04 \cdot 10^6 / 190,4 \cdot 10^6 = 24,2 \text{ kNm},$$

$$r_1 = \sqrt{120^2 + 40^2} = 126,5 \text{ mm}, \quad r_2 = \sqrt{40^2 + 40^2} = 56,6 \text{ mm},$$

$$P_1 = M_w \frac{r_1}{\sum r_i^2} = 24,2 \cdot 10^6 \frac{126,5}{4(126,5^2 + 56,6^2)} = 40 \text{ kN},$$

$$V_1 = V_{sd} / 8 = 180 / 8 = 22,5 \text{ kN}, \quad \alpha = \arctg\left(\frac{120}{40}\right) = 71,56^\circ.$$

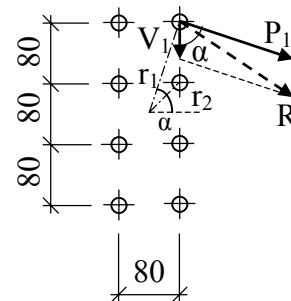
Výslednica síl v hornej skrutke a podmienka spoľahlivosti

$$R = \sqrt{[P_1 \cos(90 - \alpha)]^2 + [R \sin(90 - \alpha) + V_1]^2} =$$

$$= \sqrt{[40 \cos(90 - 71,56)]^2 + [40 \sin(90 - 71,56) + 22,5]^2} = 52 \text{ kN},$$

$$R = 52 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 65,1 \text{ kN}.$$

Spoj steny vyhovuje.



Príložky na stene

Oslabenie prierezu príložiek na šmyk

$$\frac{A_{V,net}}{A_V} = \frac{(320 - 4 \cdot 22)6}{320 \cdot 6} = 0,73 > \frac{f_y}{f_u} = \frac{235}{360} = 0,65.$$

S oslabením prierezu príložiek na šmyk sa neuvažuje.

Oslabenie prierezu príložiek na ohyb

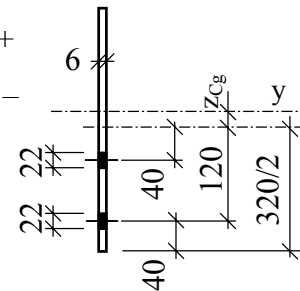
$$\frac{A_{l,net}}{A_l} = \frac{(320/2 - 2 \cdot 22)6}{2 \cdot 320 \cdot 6} = 0,73 < \frac{f_y}{0,9 f_u} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} = \frac{235}{0,9 \cdot 360} \frac{1,3}{1,1} = 0,86.$$

S oslabením príložiek na ohyb sa uvažuje .

Poloha ťažiska a moment zotrvačnosti oslabenej príložky

$$z_{Cg} = \frac{-22 \cdot 6 \cdot 40 - 22 \cdot 6 \cdot 120}{320 \cdot 6 - 2 \cdot 22 \cdot 6} = -12,8 \text{ mm},$$

$$\begin{aligned} I_{y,net,c} &= 6 (320/2 - 12,8)^3 / 12 + 6 (320/2 - 12,8)^3 / 4 + \\ &+ 6 (320/2 + 12,8)^3 / 12 + 6 (320/2 + 12,8)^3 / 4 - \\ &- 2 \cdot 6 \cdot 22^3 / 12 - 6 \cdot 22 (40 + 12,8)^2 - \\ &- 6 \cdot 22 (120 + 12,8)^2 = 13,992 \cdot 10^6 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$



Návrhový ohybový moment únosnosti príložiek v pružnej oblasti

$$M_{el,Rd} = \frac{2I_{y,net,c}}{z_d} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \cdot 13,992 \cdot 10^6}{(320/2 + 12,8)} \frac{235}{1,1} = 34,6 \text{ kNm} > M_w = 24,2 \text{ kNm}.$$

Príložky na stene vyhovujú.

Spoj pásnice

Moment prenášaný pásmicami M_f a sila v pásmici N_f

$$M_f = M_{sd} - M_w = 120 - 24,2 = 95,8 \text{ kNm}, \quad N_f = \frac{M_f}{h - t_f} = \frac{95,8}{0,4 - 0,0135} = 247,8 \text{ kN},$$

Návrhová únosnosť skrutky v otláčení

$$\frac{e_1}{3d_0} = \frac{45}{3 \cdot 22} = 0,68, \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{80}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 0,96, \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,4$$

$$\alpha = \min(0,68; 0,96; 1,4; 1,0) = 0,68, \quad t = \min(13,5; 14) = 13,5 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,68 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 13,5}{1,45} = 113,9 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť skrutky v strihu cez plný driek

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 \cdot 500 \pi 20^2 / 4}{1,45} = 65,0 \text{ kN}.$$

Sila na jednu skrutku

$$N_f / 4 = 247,8 / 4 = 61,9 \text{ kN} < \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd}) = \min(113,9; 65,0) = 65,0 \text{ kN} .$$

Spoj pásnice vyhovuje.

Príložka na ťahanej pásnici

Oslabenie dolnej ťahanej príložky

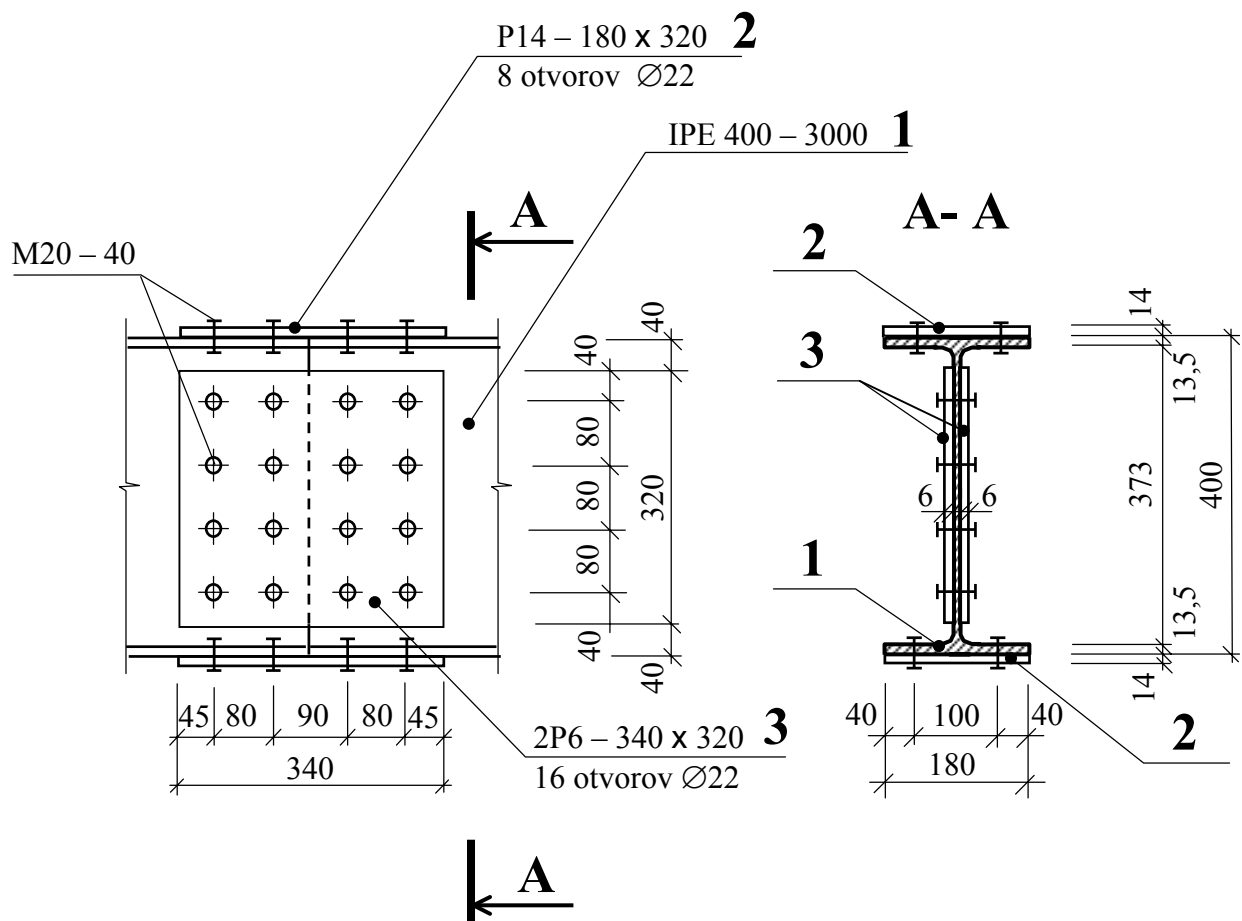
$$\frac{A}{A_{net}} = \frac{180 \cdot 14}{(180 - 2 \cdot 22) \cdot 14} = 1,32 > 1,2 \rightarrow \text{s oslabením musíme počítať.}$$

Návrhová osová sila únosnosti príložky a posúdenie

$$N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0,9 (180 - 2 \cdot 22) \cdot 14 \cdot 360 / 1,3 = 474,5 > N_f = 255,1 \text{ kN} .$$

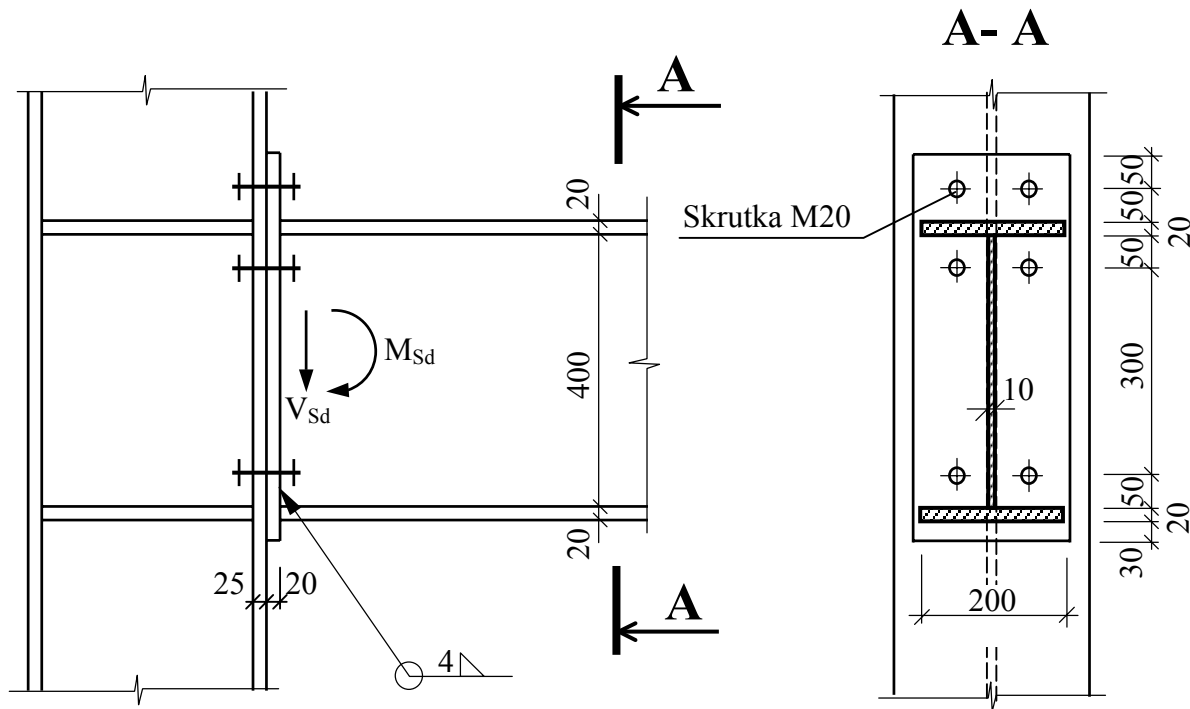
Príložka na pásnici vyhovuje.

Zobrazenie spoja na výkrese



5.9 Skrutkový a zvarový spoj namáhaný priečnou silou a momentom kolmo na rovinu spoja

Posúďte spoj prievlaku a stĺpa z ocele triedy S 235. Skrutky M 20 sú pevnostnej triedy 8.8, otvory sú štandardné $\varnothing 22$ mm. Čelná doska je k prievlaku pripojená obvodovým kútovým zvarom hrúbky 4 mm. Spoj je namáhaný momentom $M_{Sd} = 100$ kNm a priečnou silou $V_{Sd} = 180$ kN.



Skrutkový spoj

Návrhová sila v strihu (priečna sila V_{Sd} sa rozdelí rovnomerne na všetky skrutky – pozri nasledujúci obrázok)

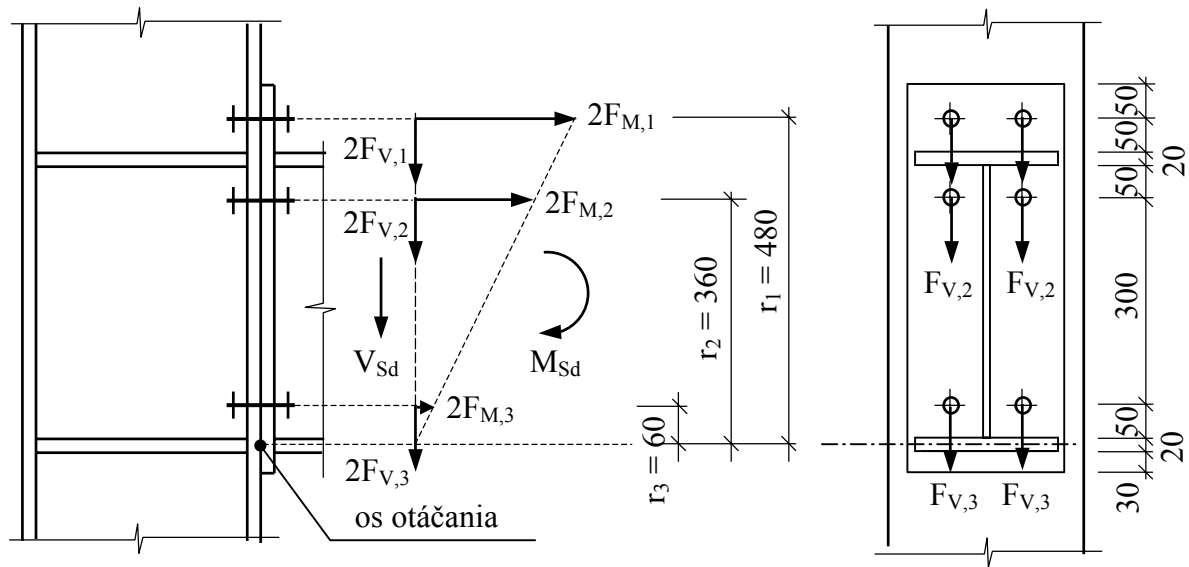
$$F_{v,Sd} = F_{v,1} = F_{v,2} = F_{v,3} = V_{Sd}/6 = 180/6 = 30,0 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť skrutky v strihu (rovina strihu prechádza cez plný dierik skrutky)

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 \cdot 800 \pi 20^2 / 4}{1,45} = 104,0 \text{ kN} > F_{v,Sd} = 30,0 \text{ kN}.$$

Návrhová únosnosť skrutky v otláčení

$$\frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,76; \quad \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{120}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 1,57; \quad \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22,$$



$$\alpha = \min(0,76; 1,57; 2,12; 1,0) = 0,76,$$

$$t = \min(20; 25) = 20 \text{ mm},$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 0,76 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 20}{1,45} = 188,7 \text{ kN} > F_{v,Sd} = 30,0 \text{ kN}.$$

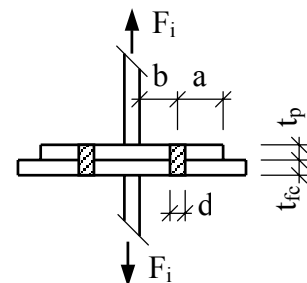
Maximálnu návrhovú ťahovú silu určíme za predpokladu pružného rozdelenia síl v skrutkách. Ďalej predpokladáme, že čelná doska sa otáča ako tuhý celok, pričom os otáčania sa uvažuje v strede hrúbky tlačenej (spodnej) pásnice prievlaku.

$$F_{t,Sd} = F_{M,1} = M_{Sd} \frac{r_1}{\sum r_i^2} = 100 \cdot 10^6 \frac{480}{2(480^2 + 360^2 + 60^2)} = 66,0 \text{ kN}.$$

Spájacie prvky, ktoré prenášajú ťahovú silu, musia byť nadimenzované tak, aby preniesli aj prídavné namáhanie od páčenia, ktoré závisí od tuhosti čelnej dosky, resp tuhosti pásnice stĺpa. S vplyvom páčenia sa nepočíta, ak hrúbka čelnej dosky, resp. pripájanej pásnice, vyhovuje podmienke (overuje sa menšia hrúbka)

$$t \geq t_e = 4,3 \sqrt[3]{\frac{bd^2}{a}} = 4,3 \sqrt[3]{\frac{50 \cdot 20^2}{55}} = 30,7 \text{ mm},$$

$$t = 20 \text{ mm} < t_e = 30,7 \text{ mm}.$$



Hrúbka nevyhovuje.

Podmienka nie je splnená, preto sa návrhovú ťahovú silu v skrutke zväčší súčiniteľom γ_p .

$$\gamma_p = 1 + 0,005 \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \frac{30,7^3 - 20^3}{20^2} = 1,26.$$

Návrhová únosnosť skrutky v ťahu

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 245}{1,45} = 121,6 > \gamma_p F_{t,Sd} = 1,26 \cdot 66,0 = 83,2 \text{ kN}.$$

Skrutky namáhané súčasne na strih a ťah silou $F_{v,Sd}$ a silou $F_{t,Sd}$ musia, okrem predchádzajúcich podmienok, spĺňať aj nasledovnú podmienku, v ktorej je zohľadnený vplyv páčenia

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{\gamma_p F_{t,Sd}}{1,4 F_{t,Rd}} = \frac{30,0}{104,0} + \frac{1,26 \cdot 66,0}{1,4 \cdot 121,6} = 0,78 \leq 1,0.$$

Spoj vyhovuje.

Skrutkový spoj namáhaný ťahovou silou treba zároveň posúdiť na pretlačenie hlavy skrutky alebo matice cez čelnú dosku.

Návrhová sila únosnosti pri pretlačení

$$d_m = (s + e)/2 = (30 + 34,6)/2 = 32,3 \text{ mm}.$$

$$B_{p,Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{Mb} = 0,6\pi \cdot 32,3 \cdot 20 \cdot 360 / 1,45 = 302,3 \text{ kN} >$$

$$> \gamma_p F_{t,Sd} = 1,26 \cdot 66,0 \text{ kN} = 83,2 \text{ kN}.$$

Spoj vyhovuje.

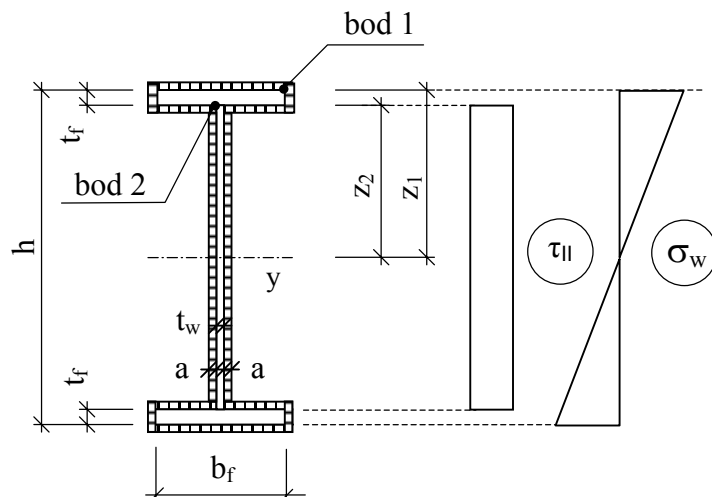
Pozn.: Rozmer hlavy skrutky s , resp. e možno nájsť napr. v [23] na str. 154.

Pripojenie čelnej dosky kútoým zvarom hrúbky 4 mm

Namáhanie ohybovým momentom sa prisudzuje všetkým zvarom, namáhanie silou len zvislým zvarom pri stene.

Kútoým zvar je na celom obvode prierezu prievlaku (obvodový zvar), preto účinná dĺžka zvaru sa rovná skutočnej dĺžke.

Pri výpočte momentu zotrvačnosti I_w zvarového obrazca zanedbáme krátke úseky zvaru pri zvislých (bočných) stranách pásnic.



Moment zotrvačnosti zvarového obrazca

$$\begin{aligned} I_w &= \frac{2}{12} a(h - 2t_f)^3 + 2a b_f (h/2)^2 + 2a(b_f - t_w)(h/2 - t_f)^2 = \\ &= \frac{2.4}{12} (440 - 2.20)^3 + 2.4.200(440/2)^2 + 2.4(200 - 10)(440/2 - 20)^2 \\ I_w &= 180,9.10^6 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Posúdenie zvaru

Napäťosť vo zvare pri pásnici – bod 1

$$\begin{aligned} \sigma_{w,1} &= \frac{M_{Sd}}{I_w} z_1 = \frac{100.10^6}{180,9.10^6} \frac{440}{2} = 121,6 \text{ MPa} , \\ \tau_{\perp,1} &= \sigma_{\perp,1} = \sigma_{w,1} / \sqrt{2} = 121,6 / \sqrt{2} = 86,0 \text{ MPa} . \end{aligned}$$

Podmienka spoľahlivosti

$$\sqrt{\sigma_{\perp,1}^2 + 3\tau_{\perp,1}^2} = \sqrt{86,0^2 + 3.86,0^2} = 172,0 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{360}{0,8.1,5} = 300 \text{ MPa} .$$

Spoj vyhovuje.

$$\sigma_{\perp,1} = 86,0 \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} = \frac{360}{1,5} = 240 \text{ MPa} .$$

Spoj vyhovuje.

Napäťosť vo zvare pri stene – bod 2

$$\begin{aligned} \sigma_{w,2} &= \frac{M_{Sd}}{I_w} z_2 = \frac{100.10^6}{180,9.10^6} 200 = 110,6 \text{ MPa} , \\ \tau_{\parallel,2} &= \frac{V_{Sd}}{2a(h - 2t_f)} = \frac{180.10^3}{2.4(440 - 2.20)} = 56,25 \text{ MPa} , \\ \tau_{\perp,2} &= \sigma_{\perp,2} = \sigma_{w,2} / \sqrt{2} = 110,6 / \sqrt{2} = 78,2 \text{ MPa} . \end{aligned}$$

Podmienka spoľahlivosti

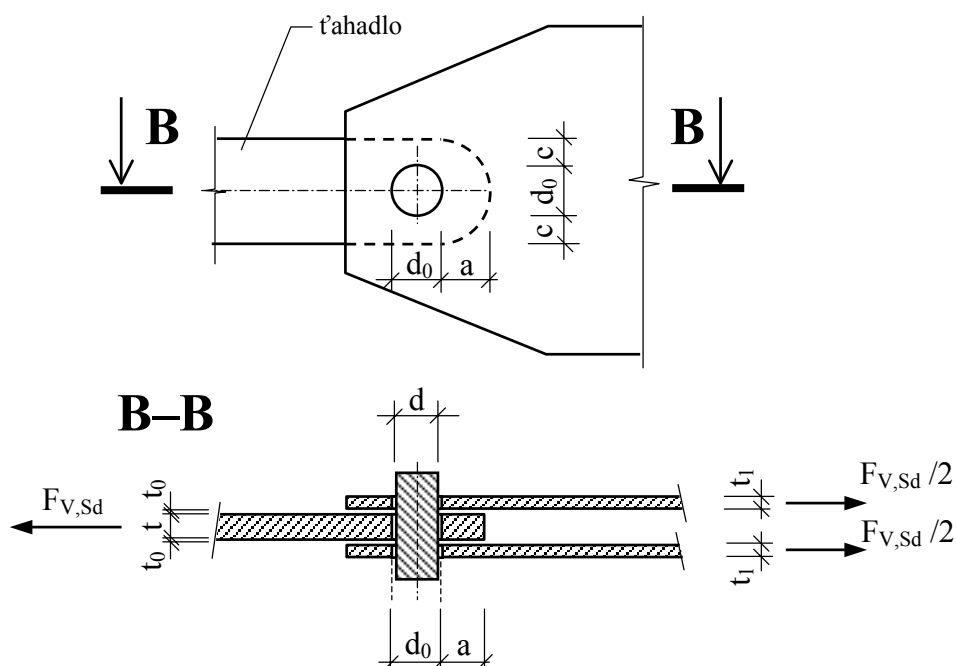
$$\sqrt{\sigma_{\perp,2}^2 + 3\tau_{\perp,2}^2 + 3\tau_{\parallel,2}^2} = \sqrt{78,2^2 + 3.78,2^2 + 3.56,25^2} = 184,3 \text{ MPa} \leq 300 \text{ MPa} .$$

Spoj vyhovuje.

Skrutkový spoj prievlaku a stĺpa a prípojný zvar čelnej dosky vyhovujú.

5.10 Čapový spoj

Navrhnite a posúďte čapový spoj namáhaný návrhovou silou $F_{V,Sd} = 80 \text{ kN}$, pri ktorom sa vyžaduje voľné pootáčanie. Spojené prvky sú z ocele S 235. Priemer čapu je $\varnothing 30 \text{ mm}$. Čap je z materiálu 5.6 .



Volíme si ďalšie geometrické parametre:

hrúbka ťahadla	$t = 18 \text{ mm}$,
hrúbka styčkových plechov	$t_1 = 10 \text{ mm}$,
priemer otvoru	$d_0 = d + 1 = 31 \text{ mm}$,
medzera medzi prvkami	$t_0 = 1 \text{ mm}$.

Návrh dosky čapového spoja – typ A (s danou hrúbkou t)

$$a \geq \frac{F_{V,Sd} \gamma_{Mp}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 1,45}{2 \cdot 18 \cdot 235} + \frac{2 \cdot 31}{3} = 34,4 \text{ mm} .$$

Rozmer a sa nemusí zaokrúhľovať, pretože pre výrobu nie je rozhodujúca vzdialenosť okraja otvoru od konca ťahadla (meraná v osi symetrie), ale poloha stredu otvoru prvku. Zvolíme teda rozmer $d_0/2 + a = 31/2 + 34,4 \approx 50 \text{ mm}$,

$$c \geq \frac{F_{V,Sd} \gamma_{Mp}}{2t f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 1,45}{2 \cdot 18 \cdot 235} + \frac{31}{3} = 24,0 \text{ mm} ,$$

Volíme $c = 24,5 \text{ mm}$, aby celková šírka bola $b = 24,5 + 31 + 24,5 = 80 \text{ mm}$.

Návrhová únosnosť čapu v šmyku

$$F_{V,Rd} = 2,0,6 A f_{up} / \gamma_{Mp} = 2,0,6 \pi 30^2 / 4.500 / 1,45 = 292,5 \text{ kN} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$F_{V,Sd} = 80 \text{ kN} < F_{V,Rd} = 292,5 \text{ kN} .$$

Čapový spoj v šmyku vyhovuje.

Návrhová únosnosť čapu v ohybe

$$M_{Rd} = 0,8 W_{el} f_{yp} / \gamma_{Mp} = 0,8 \pi d^3 / 12.300 / 1,45 = 0,44 \text{ kNm} .$$

Návrhový ohybový moment

$$M_{Sd} = \frac{F_{V,Sd}}{8} (t + 4t_0 + 2t_1) = \frac{80 \cdot 10^3}{8} (18 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 9) = 0,4 \text{ kNm} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$M_{Sd} = 0,4 \text{ kNm} < M_{Rd} = 0,44 \text{ kNm} .$$

Čapový spoj v ohybe vyhovuje.

Namáhanie čapu ohybom s šmykom

$$\left[\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{V,Sd}}{F_{V,Rd}} \right]^2 = \left[\frac{0,4}{0,44} \right]^2 + \left[\frac{80}{292,5} \right]^2 = 0,9 < 1,0 .$$

Čapový spoj vyhovuje pri kombinovanom namáhaní.

Otlačenie dosky a čapu

$$\begin{aligned} \text{ak} \quad & 2t_1 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ mm} > t = 18 \text{ mm} \\ \text{a} \quad & f_{yp} = 300 \text{ MPa} > f_y = 235 \text{ MPa} . \end{aligned}$$

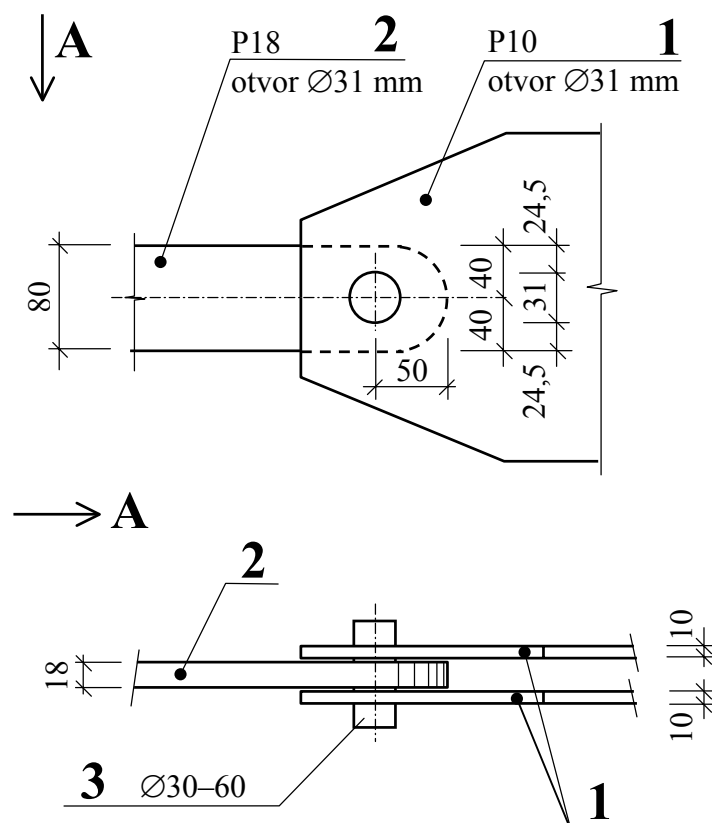
$$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_y / \gamma_{Mp} = 1,5 \cdot 18 \cdot 30 \cdot 235 / 1,45 = 131,3 \text{ kN} .$$

Podmienka spoľahlivosti

$$F_{V,Sd} = 80 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 131,3 \text{ kN} .$$

Čapový spoj vyhovuje v otlačení.

Zobrazenie spoja na výkrese



Pozn. : Výraz $\frac{F_{V,Sd} \gamma_{Mp}}{2t f_y}$ vyjadruje veľkosť polovičnej šírky ťahadla hrúbky t , potrebnej na prenesenie sily F_{Sd} . V tomto prípade by celá šírka ťahadla mimo čapového spoja mohla byť $\frac{F_{V,Sd} \gamma_{Mp}}{2t f_y} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 1,45}{2 \cdot 18 \cdot 235} \approx 30 \text{ mm}$.

Ťahadlo, vzhľadom na to, že STN 73 1401 neuvádza konštrukčnú úpravu zmeny šírky pri vytvorení koncového oka, má na celej dĺžke šírku 80 mm, aká je v mieste oka, to znamená, že jeho prierez mimo spoja je predimenzovaný $80/30 = 2,7$ -krát.

LITERATÚRA

- [1] STN 73 1401: 1998 Navrhovanie oceľových konštrukcií.
- [2] JUHÁS, P. Stabilita a pružnoplastická ohybová únosnosť oceľových konštrukcií. *Stavebnícky časopis*, roč. 32, 11/1984, 833-863.
- [3] JUHÁS, P. Plastická únosnosť oceľových nosníkov namáhaných ohybom a šmykom. *Stavebnícky časopis*, roč. 23,10/1975, 761-781.
- [4] JUHÁS, P. Klasifikácia prierezov a požiadavky na prierezy. In Zb. prednášok z postgraduálneho kurzu *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401: 1997*, Bratislava 1997, 49-60.
- [5] JUHÁS, P. Únosnosť kompaktných prierezov a plastická únosnosť nosníkov. In Zb. prednášok z postgraduálneho kurzu *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401:1997*. Bratislava 1997, 61-82.
- [6] ŠKALOUD, M. *Navrhování pásů a stěn ocelových konstrukcí z hlediska stability*. Academia, Praha 1988.
- [7] CHLADNÝ, E., BALÁŽ, I. Stabilitné problémy kovových konštrukcií. Košice 1987
- [8] SERVÍT, R., DOLEŽALOVÁ, E., CRHA, M. *Teorie pružnosti a plasticity I*. SNTL, Praha, Alfa, Bratislava 1981.
- [9] MRÁZIK, A., ŠKALOUD, M., TOCHÁČEK, M. *Navrhování ocelových konstrukcí podle teorie plasticity*. SNTL, Praha 980.
- [10] MRÁZIK, A. Kombinované namáhanie prierezov oceľových konštrukcií. *Inžinierske stavby*. Apríl 2000, roč. 48, 122-128.
- [11] JUHÁS, P. Únosnosť štíhlych prierezov a vystužených polí. In Zb. prednášok z postgraduálneho kurzu *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401 : 97*. Bratislava 1997, 83-113.
- [12] CHLADNÝ, E. Vzperná únosnosť celistvých centricky tlačených prútov. In Zb. prednášok z postgraduálneho kurzu *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401 :97*. Bratislava 1997, 113-131.
- [13] CHLADNÝ, E. Vzperná únosnosť členených prútov. In Zb. Prednášok z postgraduálneho kurzu *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401 :1997*. Bratislava 1997, 163-175.
- [14] VLASOV, V. Z. *Tonkostennyje uprugije steržni*. GISL, Moskva, Leningrad 1940,
- [15] VOŘÍŠEK, V., CHLADNÝ, E., MELCHER, J. *Prvky kovových konštrukcií*. SNTL, Praha, Alfa, Bratislava 1988.
- [16] BALÁŽ, I., AGÓCS, Z. *Kovové konštrukcie I. Príručka pre navrhovanie prvkov oceľových konštrukcií, 1. časť*. STU Bratislava 1994.
- [17] BALÁŽ, I. Ohýbané nosníky. In Zb. prednášok z postgraduálneho kurzu, *Navrhovanie oceľových konštrukcií podľa STN 73 1401: 1997*. Bratislava 1997, 131-151.
- [18] MACHÁČEK, J., ROTTER, T. *Výběrový předmět I*. ES - ČVUT, Praha 1991.

-
- [19] JUHÁS, P., a i. *Navrhovanie ocelových konštrukcií. Komentár k STN 73 1401:1998.* SÚTN, Bratislava 2001.
- [20] PECHAR, J., BUREŠ, J., STUDNIČKA, J., ŠAFKA, J. *Prvky kovových konštrukcií.* SNTL, Praha, Alfa, Bratislava 1984.
- [21] HOŘEJŠÍ, J., ŠAFKA, J. a i. *Statické tabulky. Technický průvodce 51.* SNTL, Praha 1987.
- [22] STN EN 1792: 2000 Zváranie. Viacjazyčný zoznam termínov zo zvarovania a príbuzných procesov
- [23] BALÁŽ, I. Navrhovanie zvarových spojov kovových konštrukcií. In Zb. zo seminára *Rozvojové tendencie v odbore ocelových konštrukcií.* Košice 2001, 31-39.
- [24] PECHAR, J., STUDNIČKA, J., VRBA, K. *Prvky kovových konštrukcií. Technický průvodce 64.* SNTL, Praha 1985.
- [25] BALÁŽ, I. *Výberový predmet III. Vybrané state z kovových konštrukcií III. Mostné a technologické stavby.* ES SVŠT, Bratislava 1984.
- [26] STN EN 22553: 1996 Zvárané a spájkované spoje. Označovanie vo výkresoch



**VYRÁBA A MONTUJE
OCEĽOVÉ KONŠTRUKCIE**



IK STEEL, spol. s r. o.

Jesenná 20

080 01 PREŠOV

telefón

0905 621 900

0905 666 870

0905 666 871

inžinierske stavby

Slovenská 86, 080 01 Prešov

Tel.: 051/74 636 95, fax: 74 636 99

e-mail: roman@ispo-presov.sk

Naša firma vykonáva projekčné práce v týchto oblastiach:

dopravné stavby

- výstavba a rekonštrukcie rýchlostných komunikácií a diaľničných privádzačov
- výstavba a rekonštrukcie štátnych ciest I – III. triedy,
- výstavba a rekonštrukcie miestnych a mestských komunikácií,
- výstavba a rekonštrukcie poľných a lesných ciest,
- sanácie zosuvov, poklesov a ostatných porúch na štátnych cestách,
- dopravné riešenie a kompletne inžinierske siete pre IBV
- parkoviská a spevnené plochy,

mostné konštrukcie

- betónové mosty
- oceleové mosty
- lávky pre peších
- rekonštrukcie mostov
- úprava vodných tokov

inžinierske siete

- splašková kanalizácia
- dažďová kanalizácia
- plynovody
- vodovody
- slaboprúdové rozvody
- silnoprúdové rozvody

vegetačné úpravy

- inventarizácia drevín
- náhradná výsadba

inžinierske konštrukcie

- priemyselné haly
- prístrešky

geodetické práce

- tachymetrické zameranie
- vytyčovací siete
- porealizačné zameranie
- geometrické plány
- dokumentácia záberov PPF a LPF
- dokumentácia pre majetkoprávne vysporiadanie

Oceleové konštrukcie projektujeme programom Xsteel.

doc. Ing. Antónia Ďuricová, PhD.
doc. Ing. Marián Rovňák, PhD.
Ing. Oto Roth, PhD.

DIMENZOVANIE PRVKOV OCEĽOVÝCH KONŠTRUKCIÍ

3. vydanie
Náklad: 45 výtlačkov
Počet strán: 201
Vydala: Technická univerzita v Košiciach – Stavebná fakulta
Tlač: Tulip reklama, Košice
Rok vydania: 2004

ISBN 80-8073-086-5

ISBN 80-8073-086-5