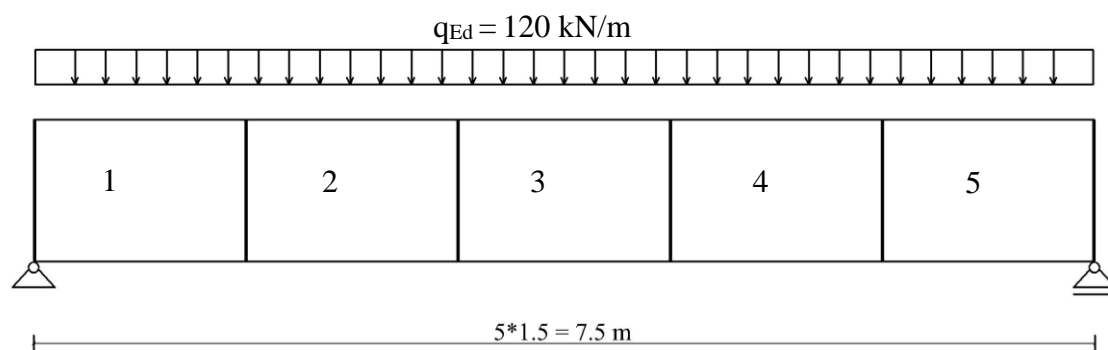


Primjer 1

Provjeriti nosivost zavarenog I nosača prikazanog na sljedećoj skici. Nosač je statičkog sistema proste grede raspona 7,5 m i opterećen je proračunskim opterećenjem $q_{Ed} = 120$ kN/m. Na svakih 1,5 m postavljena su vertikalna ukrućenja. Nosač je izrađen od klase čelika S355.

Reference

U ovom primjeru, pozivanje u referencama podrazumjeva standard MEST EN-1993-1-5



Poprečni presjek

Geometrijske karakteristike

$$h_w = 1000 \text{ mm}$$

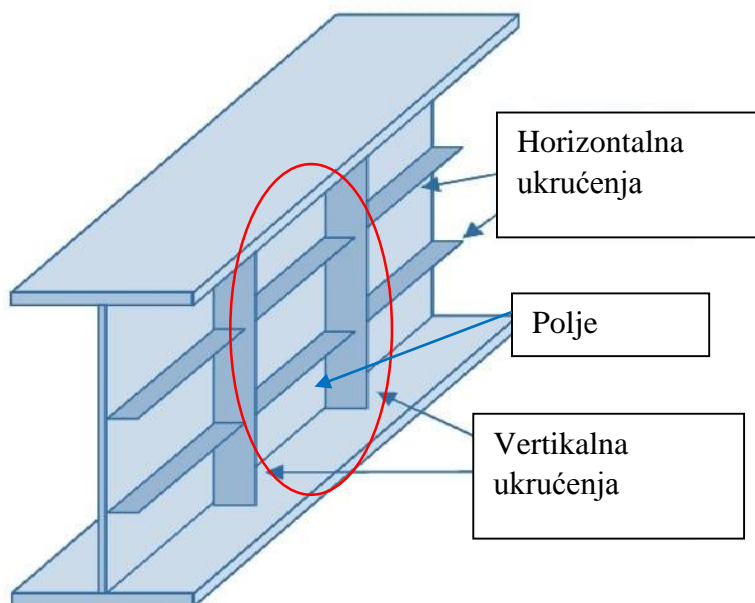
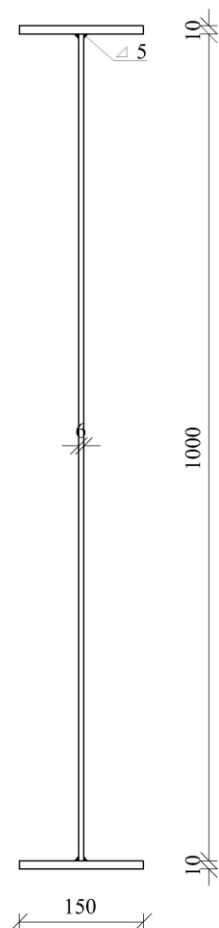
$$t_w = 6 \text{ mm}$$

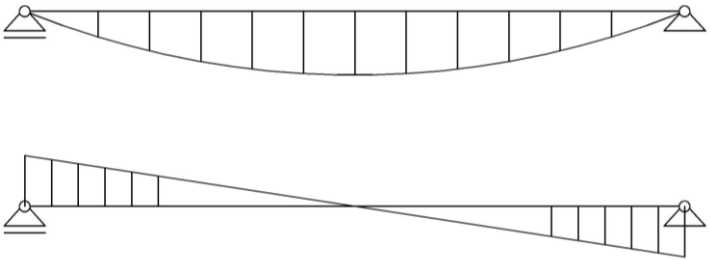
$$b_f = 150 \text{ mm}$$

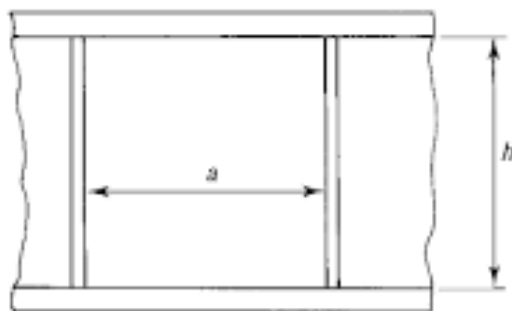
$$t_f = 10 \text{ mm}$$

$$A = 90 \text{ cm}^2$$

Pojam vertikalnih i horizontalnih ukrućenja



<p>Statički uticaji</p>  <p>M_{Ed}</p> <p>$M_{Ed,max} = 843,8 \text{ kNm}$</p> <p>$V_{Ed,max} = 450 \text{ kN}$</p> <p>$V_{Ed}$</p>	
<p>Klasifikacija poprečnog presjeka</p> <p><i>Nožica</i></p> $c = \frac{150 - 6 - 2 \cdot 5\sqrt{2}}{2} = 64,92 \text{ mm}$ $c/t = 64,92/10 = 6,49$ <p>klasa čelika S355 $\rightarrow \epsilon = 0,81$</p> <p>Provjera kriterijuma za klasu 1</p> <p>klasa 1 $c/t < 9\epsilon$ $c/t < 9 \cdot 0,81 \rightarrow c/t < 7,29$</p> <p>kako je nama $c/t = 6,49 \rightarrow$ nožica je klase 1</p> <p><i>Rebro</i></p> $c = 1000 - 2 \cdot 5\sqrt{2} = 985,86 \text{ mm}$ $c/t = 985,86/6 = 164,3$ <p>klasa čelika S355 $\rightarrow \epsilon = 0,81$</p> <p>Provjera kriterijuma za klasu 3</p> <p>klasa 3 $c/t < 124\epsilon$ $c/t < 124 \cdot 0,81 \rightarrow c/t < 100,44$</p> <p>kako je nama $c/t = 164,3 \rightarrow$ rebro je klase 4</p> <p><i>Poprečni presjek je klase 4</i></p>	<p>MEST EN 1993-1-1</p> <p>Tabela 5.2</p>
<p>Izbočavanje rebra smicanjem</p> <p>Izbočavanje ukrućenog rebra smicanjem nije potrebno razmatrati ako je ispunjen sljedeći uslov:</p> $\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{31\epsilon\sqrt{k_\tau}}{\eta}$ <p>Pri čemu je $\eta = 1,2$</p> <p>$k_\tau \rightarrow$ koeficijent izbočavanja za smicanje</p> <p>Koeficijent izbočavanja za smicanje u slučaju postojanja samo vertikalnih ukrućenja se određuje prema sljedećem izrazu:</p> $k_\tau = 5,34 + 4,00 (h_w/a)^2 \text{ ako je } a/h_w \geq 1$ $k_\tau = 4,00 + 5,34 (h_w/a)^2 \text{ ako je } a/h_w < 1$ <p>a predstavlja dužinu ukrućene odnosno neukrućene ploče. U analiziranom slučaju a predstavlja rastojanje između vertikalnih ukrućenja.</p>	<p>Tačka 5.1 (2)</p>



U našem slučaju $a/h_w = 1500/1000 = 1,5$ pa se k_τ određuje kao

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 (0,67)^2 = 7,12$$

U našem slučaju

$$1000/6 = 166,67 \geq 31 \cdot 0,81 \cdot 7,12/1,2 = 148,986$$

→ potrebno je razmatrati izbočavanje rebra smicanjem

Nosivost rebra na izbočavanje smicanjem

Izbočavanje rebra smicanjem provjera se u mjerodavnom polju odnosno tamo gdje je transversalna sila najveća. U našem slučaju to su polja 1 i 5. U ovim poljima, kao pojednostavljenje, koje je na strani sigurnosti, može se pretpostaviti da je transversalna sila konstantana i iznosi $V_{Ed,max}$.

$$\eta_3 = V_{Ed}/V_{b,Rd} \leq 1,0$$

Nosivost rebra na izbočavanje smicanjem određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Pri čemu je:

$V_{bw,Rd}$ → doprinos rebra smičućoj nosivosti

$V_{bf,Rd}$ → doprinos nožica smičućoj nosivosti

f_{yw} → granica tečenja rebra

Doprinos rebra

Doprinos rebra određuje se prema sljedećem izrazu:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Faktor redukcije χ_w zavisi od načina postavljanja vertikalnih ukrućenja i relativne vitkosti $\bar{\lambda}_w$. Vidjeti sliku 5.1 iz EN 1993-1-5.

U našem slučaju postoje oslonačka i međuukrućenja pa se $\bar{\lambda}_w$ određuje na sljedeći način:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{1000}{37,4 \cdot 0,81 \cdot 6 \sqrt{7,12}} = 2,062$$

U zoni oslonca predviđeno je kruto oslonačko ukrućenje.

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 2,062} = 0,496$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{0,496 \cdot 35,5 \cdot 100 \cdot 0,6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 609,96 \text{ kN}$$

Tačka 5.2 (1)

Izraz 5.1

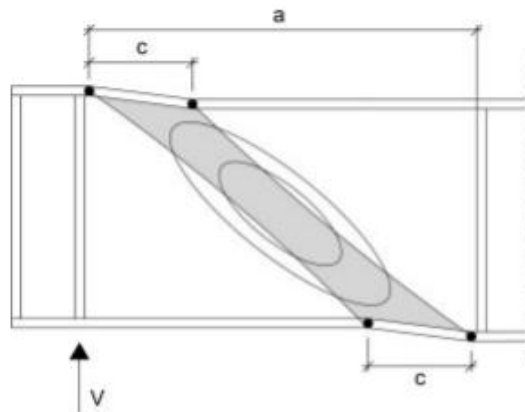
Izraz 5.2

Izraz 5.6

Izraz A.5

Može se primjetiti da i bez uzimanja doprinosa nožica rebro ima zadovoljavajuću nosivost.

Doprinos nožica



Mehanizam loma u
graničnom stanju

Doprinos nožica određuje se prema sljedećem izrazu:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right)$$

$M_{f,Rd}$ → moment nosivosti presjeka kojeg čine samo nožice

Kako u analiziranom polju M_{Ed} je praktično jednako nuli izraz u zagradi biće jednak jedinici.

$$c = 150 \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot 15 \cdot 1^2 \cdot 35,5}{0,6 \cdot 100^2 \cdot 35,5} \right) = 38,1 \text{ cm}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{15 \cdot 1^2 \cdot 35,5}{38,1 \cdot 1,0} = 13,98 \text{ kN}$$

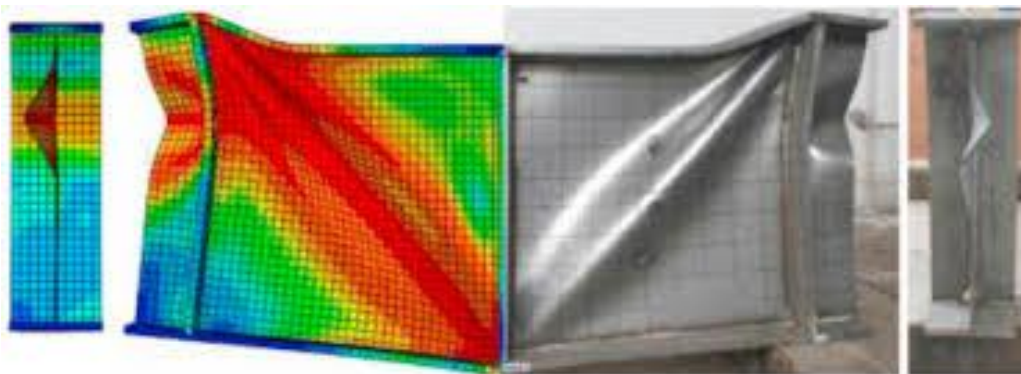
Provjera nosivosti

$$\eta_3 = V_{Ed}/V_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$V_{b,Rd} = 609,96 + 13,98 = 623,94 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}/V_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$450/623,94 = 0,72 \leq 1,0 \rightarrow \text{kontrola zadovoljena}$$



Izbočavanje rebra smicanjem

U slučaju da provjera nije prošla, mjere za spriječavanje izbočavanja rebra smicanjem su postavljanje vertikalnih ukrućenja na manjem razmaku ili usvajanje veće debljine rebra.

Tabela 5.1

Izraz 5.8

Provjera nosivosti presjeka

$$\eta_I = M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1,0$$

Efektivna visina rebra

$$h_{eff} = \rho \cdot h_c$$

Kako bismo odredili faktor redukcije ρ potrebno je prvo odrediti relativnu vitkost ploče $\bar{\lambda}_p$

Relativna vitkost ploče

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{b} = \bar{h} = c = 985,86 \text{ mm}$$

Rebro \rightarrow zglobno oslonjeno na sve 4 strane

naponsko stanje čisto savijanje

$$\rightarrow k_\sigma = 23,9$$

$$\psi = -1$$

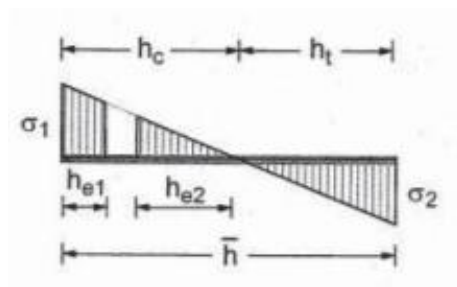
$$\bar{\lambda}_p = \frac{985,86/6}{28,4 \cdot 0,81 \sqrt{23,9}} = 1,46 > 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1}$$
$$> 0,874$$

Faktor redukcije ρ

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$\rho = \frac{1,46 - 0,055 (3 - 1)}{1,46^2} = 0,633$$

$$h_{eff} = 0,633 \cdot 985,86/2 = 312 \text{ mm}$$



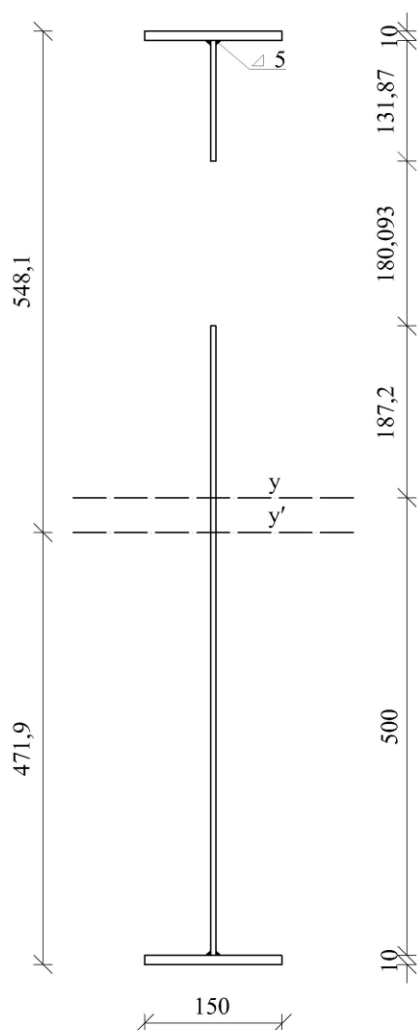
$$h_{e1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 124,8 \text{ mm}$$

$$h_{e2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 187,2 \text{ mm}$$

Izraz 4.2

Tabela 4.1

Efektivan poprečni presjek



Geometrijske karakteristike

$$A_{\text{eff}} = 79,1442 \text{ cm}^2$$

$$z' = 47,19 \text{ cm}$$

$$I_{y,\text{eff}} = 116696 \text{ cm}^4$$

$$W_{\text{eff,min}} = 116696/54,81 = 2129,1 \text{ cm}^3$$

Nosivost presjeka

$$\eta_I = M_{\text{Ed}}/M_{\text{Rd}} \leq 1,0$$

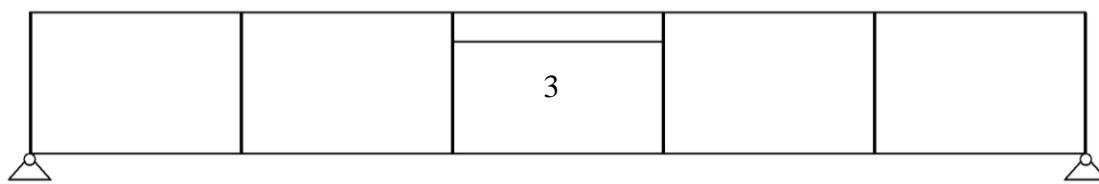
$$M_{\text{Rd}} = \frac{W_{\text{eff,min}} f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{\text{Rd}} = \frac{2129,1 \cdot 35,5}{1,0} = 755,83 \text{ kNm}$$

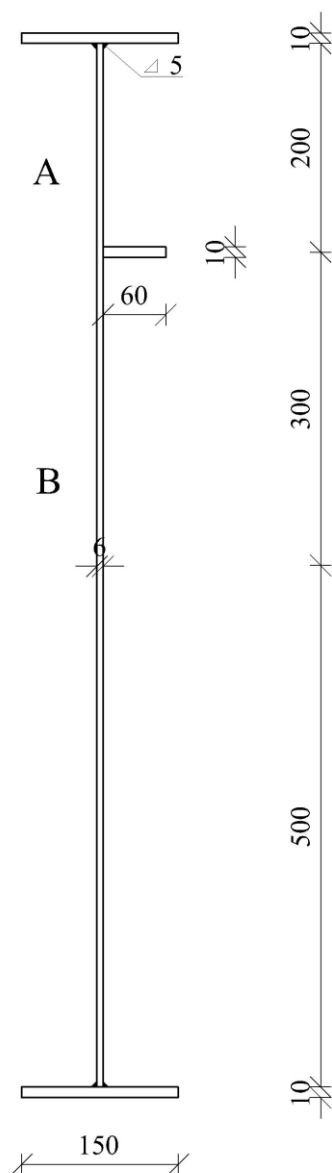
$$M_{\text{Ed}}/M_{\text{Rd}} \leq 1,0$$

$$843,8/755,83 = 1,12 \geq 1,0 \rightarrow \text{kontrola nije zadovoljena}$$

Kako provjera nosivosti nije prošla, u cilju ojačanja presjeka, dodaje se horizontalno ukrućenje u polju 3. Horizontalno ukrućenje postavlja se u sredini neefektivnog dijela (izbočine) odnosno na 0,2 d (200 mm).



Novi poprečni presjek



Geometrijske karakteristike bruto presjeka

$$I_y = 131500 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,\min} = 2487 \text{ cm}^3$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Nožica

$$c = \frac{150 - 6 - 2 \cdot 5\sqrt{2}}{2} = 64,92 \text{ mm}$$

$$c/t = 64,92/10 = 6,49$$

klasa čelika S355 $\rightarrow \epsilon = 0,81$

Provjera kriterijuma za klasu 1

$$\text{klasa 1} \quad c/t < 9\epsilon \quad c/t < 9 \cdot 0,81 \rightarrow c/t < 7,29$$

kako je nama $c/t = 6,49 \rightarrow$ nožica je klase 1

Ukrućenje

$$c = 60 - 5\sqrt{2} = 52,93 \text{ mm}$$

$$c/t = 52,93/10 = 5,29$$

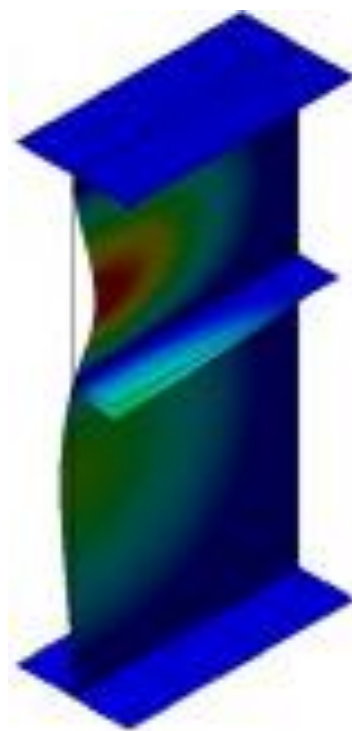
<p>klasa čelika S355 $\rightarrow \varepsilon = 0,81$</p> <p>Provjera kriterijuma za klasu 1</p> <p>klasa 1 $c/t < 9\varepsilon \quad c/t < 9 \cdot 0,81 \rightarrow c/t < 7,29$</p> <p>kako je nama $c/t = 5,29 \rightarrow$ ukrućenje je klase 1</p> <p><i>Rebro (dio A)</i></p> $c = 200 - 5 - 2 \cdot 5\sqrt{2} = 180,86 \text{ mm}$ $c/t = 180,86/6 = 30,14$ <p>klasa čelika S355 $\rightarrow \varepsilon = 0,81$</p> <p>Za dio A konzervativno ćemo usvojiti da je naponsko stanje čist pritisak.</p> <p>Provjera kriterijuma za klasu 2</p> <p>klasa 2 $c/t < 38\varepsilon \quad c/t < 38 \cdot 0,81 \rightarrow c/t < 30,78$</p> <p>kako je nama $c/t = 30,14 \rightarrow$ rebro (dio A) je klase 2</p> <p><i>Rebro (dio B)</i></p> $c = 800 - 5 - 2 \cdot 5\sqrt{2} = 780,86 \text{ mm}$ $c/t = 780,86/6 = 130,14$ <p>klasa čelika S355 $\rightarrow \varepsilon = 0,81$</p> <p>Za dio B naponsko stanje je ekscentrično savijanje.</p> <p>Kao pojednostavljenje (na strani je sigurnosti a i razlika je zanemarljiva pretpostavićemo da neutralna osa polovi rebro).</p> <p>iz proporcije dobija se:</p> $\psi = -500/300 = -1,67$ <p>Provjera kriterijuma za klasu 3</p> <p>klasa 3 $c/t < 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)} \rightarrow c/t < 173,28$</p> <p>kako je nama $c/t = 130,14 \rightarrow$ rebro (dio B) je klase 3</p> <p><i>Poprečni presjek je klase 3</i></p> <p>Kako je poprečni presjek klase 3 nijedan dio poprečnog presjeka se ne izbočava pa se provjera nosivosti vrši korišćenjem geometrijskih karakteristika bruto presjeka.</p> <p><i>Nosivost presjeka</i></p> $\eta_I = M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1,0$ $M_{Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}}$ $M_{Rd} = \frac{2487 \cdot 35,5}{1,0} = 882,88 \text{ kNm}$ $M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1,0$ $843,8/882,88 = 0,96 \leq 1,0 \rightarrow \text{kontrola zadovoljena}$ <p>U slučaju da kontrola nije prošla može se pokušati sa dodavanjem još jednog horizontalnog ukrućenja.</p>	<p>MEST EN 1993-1-1 Tabela 5.2</p>
--	------------------------------------

Interakcija savijanja i smicanja

Kako je statički sistem nosača prosta greda interakciju savijanja i smicanja nije potrebno kontrolisati. U slučaju statičkih sistema gdje se istovremeno javljaju značajne vrijednosti momenta savijanja i transverzalne sile (oslonci kontinualnih nosača) interakciju savijanja i smicanja potrebno je provjeriti. Ova provjera vrši se korišćenjem izraza 7.1 iz MEST EN 1993-1-5.

Provjera globalnog izbočavanja cijelog polja

Potrebno je provjeriti da li će se desiti izbočavanje rebra zajedno sa ukrućenjem.



Provjera se sprovodi određivanjem efektivne površine presjeka.

Efektivna površina pritisnute zone ukrućene ploče određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t$$

Izraz 4.5

Pri čemu je:

$\rho_c \rightarrow$ faktor redukcije kojim se uzima u obzir uticaj globalnog izbočavanja ukrućene ploče

$t \rightarrow$ debljina ukrućene ploče

$b_{edge,eff} \rightarrow$ širine ivičnih pritisnutih djelova lima uz rebro limenog nosača koji ne učestvuju u globalnom izbočavanju ukrućene ploče

$A_{c,eff,loc} \rightarrow$ efektivna površina presjeka svih ukrućenja i pojedinačnih polja koja su potpuno ili djelimično pritisnuti izuzev ivičnih djelova $b_{edge,eff}$

Efektivna površina $A_{c,eff,loc}$ određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + t \sum \rho_{loc,i} b_i$$

Izraz 4.6

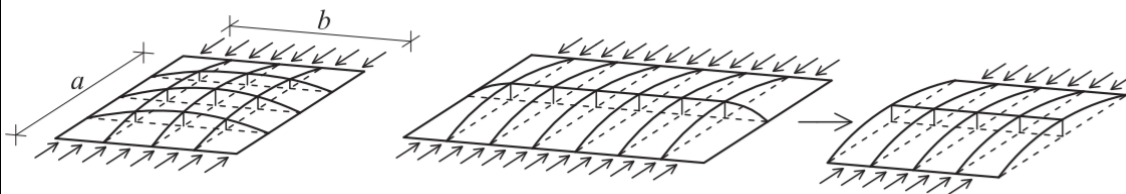
Pri čemu je:

$A_{sl,eff} \rightarrow$ suma efektivnih presjeka svih podužnih ukrućenja koja se nalaze u pritisnutoj zoni

$\rho_{loc,i} \rightarrow$ faktor redukcije uslijed lokalnog izbočavanja i -tog pojedinačnog polja

$b_{i,eff} \rightarrow$ efektivna širina i -tog pojedinačnog polja

Faktor redukcije ρ_c određuje se na osnovu interakcije linijskog i površinskog oblika izbočavanja ukručene ploče.



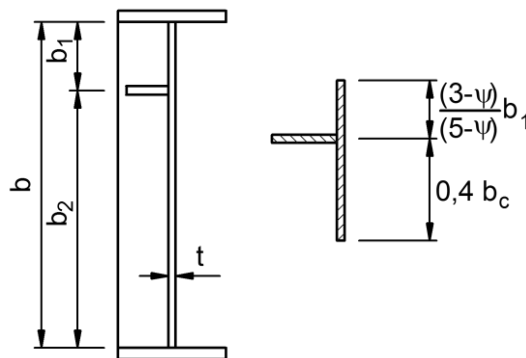
Površinsko ponašanje (izbočavanje)

Linijsko ponašanje (izvijanje)

Površinsko ponašanje (izbočavanje)

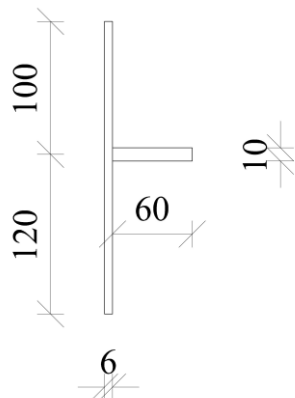
Potrebno je odrediti kritičan napon izbočavanja ploče. On se određuje na osnovu kritičnog napona izvijanja ukrućenja. Nakon toga određuje se relativna vitkost ploče i odgovarajući faktor redukcije ρ .

Efektivna površina ukrućenja određuje se na način na koji je to prikazano na sljedećoj skici.



Slika A.2

Efektivna površina ukrućenja



Na dijelu b_1 kao i ranije pretpostavićemo čist pritisak pa je $\psi = 1,0$

$$b_1 = 200 \text{ mm}$$

$$b_2 = 800 \text{ mm}$$

Geometrijske karakteristike ukrućenja

$$A_{sl} = 19,2 \text{ cm}^2$$

$$I_{sl} = 63,317 \text{ cm}^4$$

$$i = 1,816 \text{ cm}$$

Kritični napon izvijanja ukrućenja određuje se prema izrazima:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05 E}{A_{sl}} \frac{\sqrt{I_{sl} t^3 b}}{b_1 b_2} \quad \text{ako je } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl}}{A_{sl} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) A_{sl} b_1^2 b_2^2} \quad \text{ako je } a < a_c$$

Pri čemu je

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}}$$

Izraz A.4

Dakle, prvo treba odrediti a_c

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{63,317 \cdot 80^2 \cdot 20^2}{0,6^3 \cdot 100}} = 226,63 \text{ cm}$$

Nama je $a \leq a_c$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 63,317}{19,2 \cdot 150^2} + \frac{21000 \cdot 0,6^3 \cdot 100 \cdot 150^2}{4\pi^2 (1-0,3^2) 19,2 \cdot 20^2 80^2} = 36,157 \text{ kN/cm}^2$$

Kritičan napon izbočavanja ukrućene ploče $\sigma_{cr,p}$ određuje se koristeći proporciju.

U našem slučaju $\sigma_{cr,p}$ iznosi

$$\sigma_{cr,p} = \frac{500}{400} \sigma_{cr,sl}$$

$$\sigma_{cr,p} = \frac{500}{400} \cdot 36,157 = 45,196 \text{ kN/cm}^2$$

Relativna vitkost ploče određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}}$$

Izraz 4.7

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

Kako nema lokalnog izbočavanja $\rightarrow \beta_{A,c} = 1,0$

$$\psi = -1$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{35,5}{45,196}} = 0,886 > 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1}$$

$$> 0,874$$

Faktor redukcije ρ

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

Izraz 4.2

$$\rho = \frac{0,866 - 0,055 (3 - 1)}{0,866^2} = 0,988$$

Linijsko ponašanje (izvijanje)

Potrebno je odrediti kritičan napon izvijanja. On se određuje na osnovu kritičnog napona izvijanja ukrućenja koje je najbliže pritisnutoj ivici. Nakon toga određuje se relativna vitkost stuba i odgovarajući faktor redukcije χ_c .

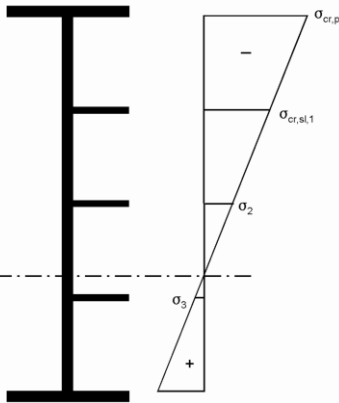
Kritični napon izvijanja ukrućenja određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl}}{A_{sl} a^2}$$

Izraz 4.8

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 63,317}{19,2 \cdot 150^2} = 30,37 \text{ kN/cm}^2$$

Kritičan napon izvijanja ukrućene ploče $\sigma_{cr,c}$ može se odrediti koristeći proporciju.



U našem slučaju $\sigma_{cr,c}$ iznosi

$$\sigma_{cr,c} = \frac{500}{400} \sigma_{cr,sl}$$

$$\sigma_{cr,c} = \frac{500}{400} \cdot 30,37 = 37,972 \text{ kN/cm}^2$$

Relativna vitkost stuba određuje se na osnovu sljedećeg izraza:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}}$$

Izraz 4.11

pri čemu je

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}}$$

$A_{sl,1} \rightarrow$ bruto površina poprečnog presjeka ukrućenja i susjednih sadejstvjućih djelova lima

$A_{sl,1,eff} \rightarrow$ efektivna površina poprečnog presjeka ukrućenja i susjednih sadejstvjućih djelova lima

Kako nama nijedan dio poprečnog presjeka nije klase 4 $A_{sl,1} = A_{sl,1,eff}$ odnosno $\beta_{A,c} = 1,0$.

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 35,5}{37,972}} = 0,967$$

Faktor redukcije χ_c treba da se odredi prema MEST EN 1993-1-1 na osnovu relativne vitkosti $\bar{\lambda}_c$ i odgovarajuće krive izvijanja.

Za ukružene ploče faktor imperfekcije treba da se odredi na osnovu sljedećeg izraza:

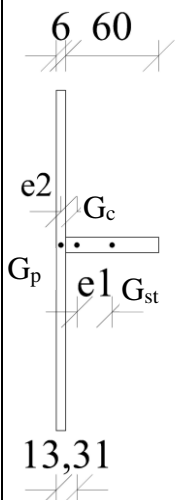
Izraz 4.12

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e}$$

$\alpha = 0,34$ (kriva izvijanja b) za ukrućenja zatvorenog poprečnog presjeka

$\alpha = 0,49$ (kriva izvijanja c) za ukrućenja otvorenog poprečnog presjeka

Definicija rastojanja e prikazana je na sljedećoj slici.



$G_p \rightarrow$ težište lima bez ukrućenja

$G_{st} \rightarrow$ težište samog ukrućenja

$G_c \rightarrow$ težište fiktivnog stuba kojeg čine ukrućenje i pripadajuća površina lima

$$e_2 = 13,31 - 3 = 10,31 \text{ mm}$$

$$e_1 = 36 - 13,31 = 22,69 \text{ mm}$$

$$e = \max(e_1, e_2) = 22,69 \text{ mm}$$

$$\alpha_e = 0,49 + \frac{0,09}{1,816/2,269} = 0,6$$

$$\Phi = 0,5(1 + \alpha_e(\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2)$$

$$\Phi = 0,5(1 + 0,6(0,967 - 0,2) + 0,967^2) = 1,12$$

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}$$

$$\chi_c = \frac{1}{1,12 + \sqrt{1,12^2 - 0,967^2}} = 0,59$$

Interakcija izvijanja i izbočavanja

Interakcija izvijanja i izbočavanja uzima se u obzir preko faktora redukcije ρ_c koji se određuje na sljedeći način:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c$$

Pri čemu je

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$$

U našem slučaju

$$\xi = \frac{45,196}{37,972} - 1 = 0,19$$

$$\rightarrow \rho_c = (0,988 - 0,59) \cdot 0,19(2 - 0,19) + 0,59 = 0,7268$$

Prema tački A.2.1 (4) ne treba vršiti redukciju poprečnog presjeka ako vrijednost $\rho_c f_y / \gamma_{M1}$ nije veća od odgovarajućeg napona pritiska u ukrućenju.

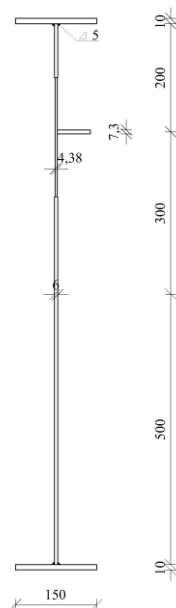
Odgovarajući napon pritiska u ukrućenju

$$\sigma_{Ed} = \frac{843,8 \cdot 100 \cdot 30}{131500} = 19,2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\rho_c f_y / \gamma_{M1} = 0,7268 \cdot 35,5 / 1,0 = 25,8 \text{ kN/cm}^2$$

U našem slučaju je ovaj uslov ispunjen, te možemo zaključiti da nam je zadovoljena provjera globalnog izbočavanja polja.

U slučaju da gore pomenuti uslov nije ispunjen, faktor redukcije trebalo bi primjeniti na površinu ukrućenja.



To se sprovodi tako što se redukuje debljina ukrućenja i pripadajućeg dijela rebra faktorom ρ_c . Zatim za takav poprečni presjek (prikazan na slici) trebalo bi ponovo sračunati geometrijske karakteristike i izvršiti provjeru nosivosti.

MEST EN 1993-1-1 Izraz 6.49

Izraz 4.13

Tačka A.2.1 (4)

Provjera nosivosti polja 2 i 4

U poljima 2 i 4 potrebno je provjeriti, kako se istovremeno javlja transversalna sila i moment savijanja, nosivost rebra na izbočavanje smicanjem, nosivost presjeka na moment savijanja kao i interakciju između savijanja i smicanja.

U ovim poljima proračunske presječne sile nisu konstantne duž polja. Presječne sile za koje treba sprovesti provjeru treba odrediti na rastojanju $0,4a$ ili $0,5b$ (mjerodavna je manja vrijednost) mjereno od kraja polja na kom su naponi veći.

Odgovarajuće presječne sile

$$a = 1,5 \text{ m}$$

$$b = 1 \text{ m}$$

$$0,4a = 0,6 \text{ m}$$

→ Mjerodavna vrijednost je $0,5b$

$$0,5b = 0,5 \text{ m}$$

$$x = 3 - 0,5 = 2,5$$

Proračunska transversalna sila

$$V_{Ed} = 450 - 2,5 \cdot 120 = 150 \text{ kN}$$

Proračunski moment savijanja

$$M_{Ed} = 450 \cdot 2,5 - 120 \cdot 2,5 \cdot 1,25 = 750 \text{ kNm}$$

Nosivost rebra na izbočavanje smicanjem

$$\eta_3 = V_{Ed}/V_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Doprinos rebra

Ovaj dio već je sračunat kad smo provjeravali polje 1.

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{1000}{37,4 \cdot 0,81 \cdot 6 \sqrt{7,12}} = 2,062$$

U zoni oslonca predviđeno je kruto oslonačko ukrućenje.

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 2,062} = 0,496$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{0,496 \cdot 35,5 \cdot 100 \cdot 0,6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 609,96 \text{ kN}$$

Doprinos nožica

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right)$$

$$c = 150 \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot 15 \cdot 1^2 \cdot 35,5}{0,6 \cdot 100^2 \cdot 35,5} \right) = 38,1 \text{ cm}$$

$$M_{Ed} = 750 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = A_f f_y z / \gamma_{M0}$$

$z \rightarrow$ rastojanje između težišta nožica

$$M_{f,Rd} = 15 \cdot 1 \cdot 35,5 \cdot 101 / 100 = 537,8 \text{ kNm}$$

Kako je $M_{Ed} > M_{f,Rd}$ nosivost nožica je u potpunosti iskorišćena pa ne možemo računati sa doprinosom nožica smičućoj nosivosti.

$$\rightarrow V_{bf,Rd} = 0$$

Provjera nosivosti

$$\eta_3 = V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$V_{b,Rd} = 609,96 + 0 = 609,96 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1,0$$

$$150 / 609,96 = 0,246 \leq 1,0 \rightarrow \text{kontrola zadovoljena}$$

Provjera nosivosti presjeka

$$\eta_1 = M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$$

Efektivan poprečni presjek nam je isti kao u polju 3.

Nosivost presjeka

$$\eta_3 = M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$$

$$M_{Rd} = \frac{2129,1 \cdot 35,5}{1,0} = 755,83 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$$

$$750 / 755,83 = 0,992 \leq 1,0 \rightarrow \text{kontrola zadovoljena}$$

U slučaju da ova kontrola nije zadovoljena, kao i u polju 3, potrebno bi bilo predvidjeti horizontalno ukrućenje.

Interakcija savijanja i smicanja

Ako $\overline{\eta}_3$ nije veće od 0,5 interakciju savijanja i smicanja ne treba razmatrati. U slučaju da ovaj uslov nije ispunjan provjeru treba sprovesti koristeći sljedeći izraz:

$$\overline{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\overline{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0$$

Izraz 7.1

$$\overline{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\overline{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

Kako je nama $\overline{\eta}_3 < 0,5$ (0,246) interakciju savijanja i smicanja ne moramo razmatrati.