

PREDMET

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

Semestar: VI
Fond časova: 2+2
Kredita: 5

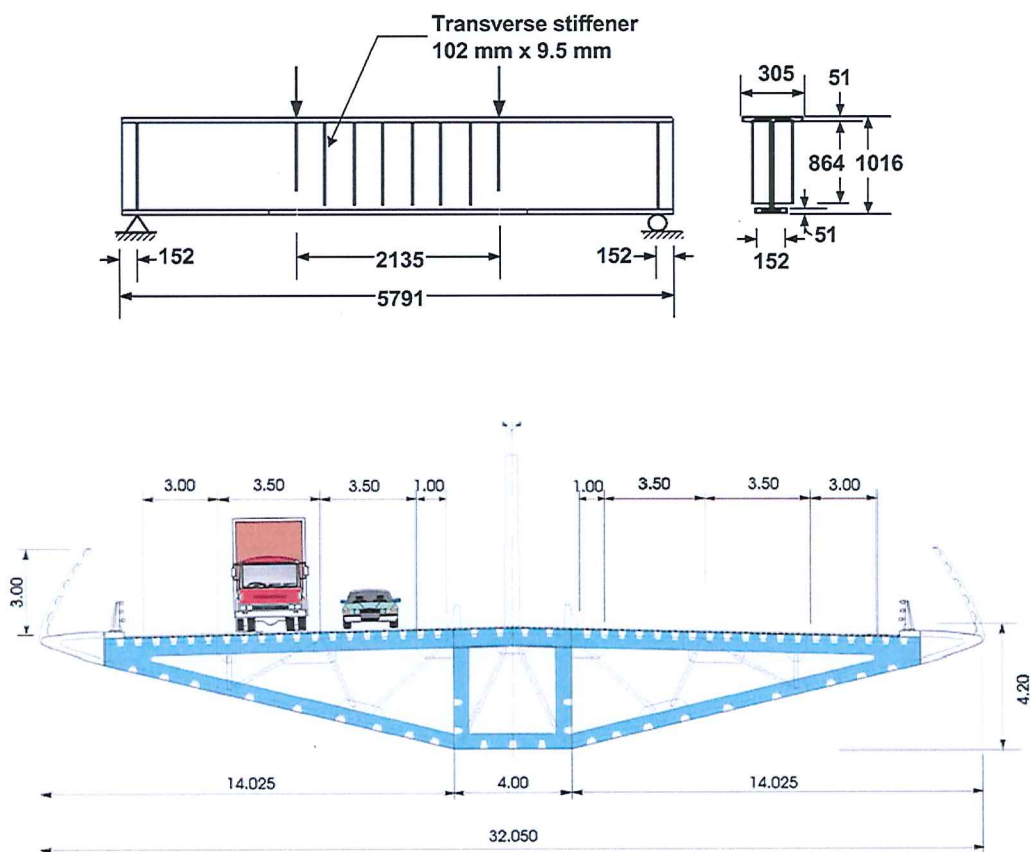
Nastavnik: Prof.dr Duško Lučić
Saradnici: Mr Mladen Muhadinović
Mr Petar Subotić

Informacija za studente - KOMENTAR
(Pogledati Informaciju za studente koja se daje u prilogu)

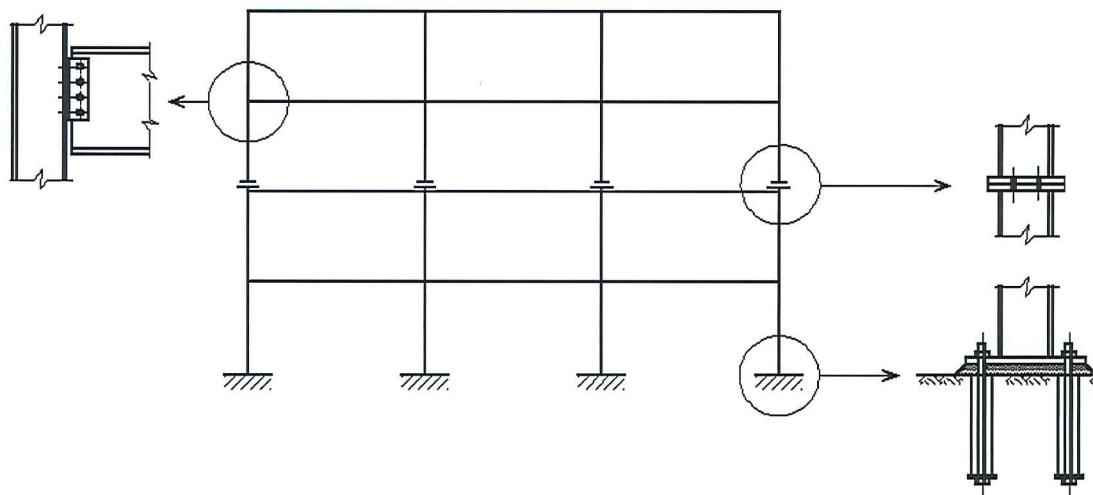
UVOD

- U ovom predmetu obradiće se dvije oblasti projektovanja čeličnih konstrukcija:
 - Projektovanje punih limenih elemenata i
 - Projektovanje veza.

Puni limeni elementi



Veze



- U prva tri predavanja obradiće se projektovanje punih limenih elemenata. Analiziraće se, pored ostalog, klasa presjeka 4, koja je namjerno preskočena u prethodnom predmetu. U preostalom dijelu semestra govoriće se o projektovanju i konstruisanju veza i nastavaka elemenata čeličnih konstrukcija. Takođe u ovom dijelu će se obraditi spojna sredstva i zavarivanje.
- Pored pravila struke, teorije elastičnosti i plastičnosti, teorije stabilnosti, koje koristimo u proračunu konstrukcija, metodi proračuna vezani su i obavezujućim standardima koji se moraju poštovati. U ovom predmetu koristiće se:

EN 1993-1-5: Plated structural elements (in-plane loaded)

Eurokod 3 - Dio 1-5: Puni limeni elementi (opterećeni u svojoj ravni)

MEST EN 1993-1-5

EN 1993-1-8: Design of joints

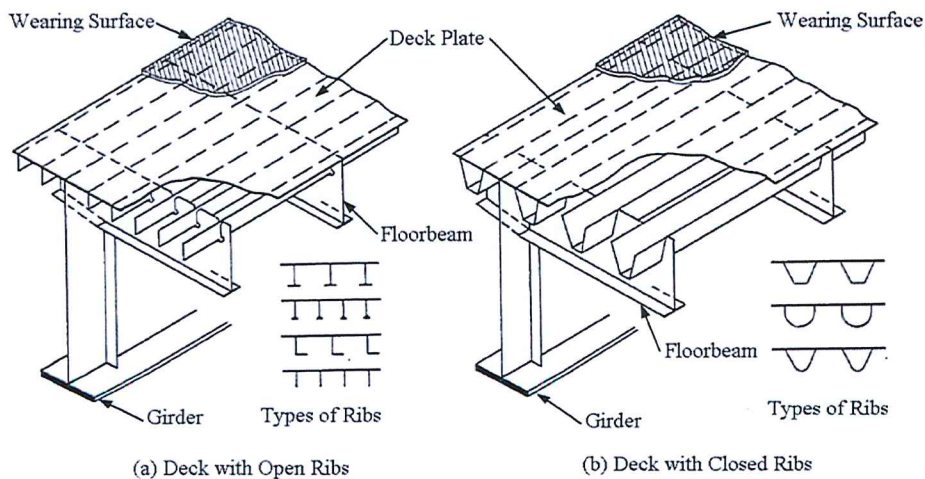
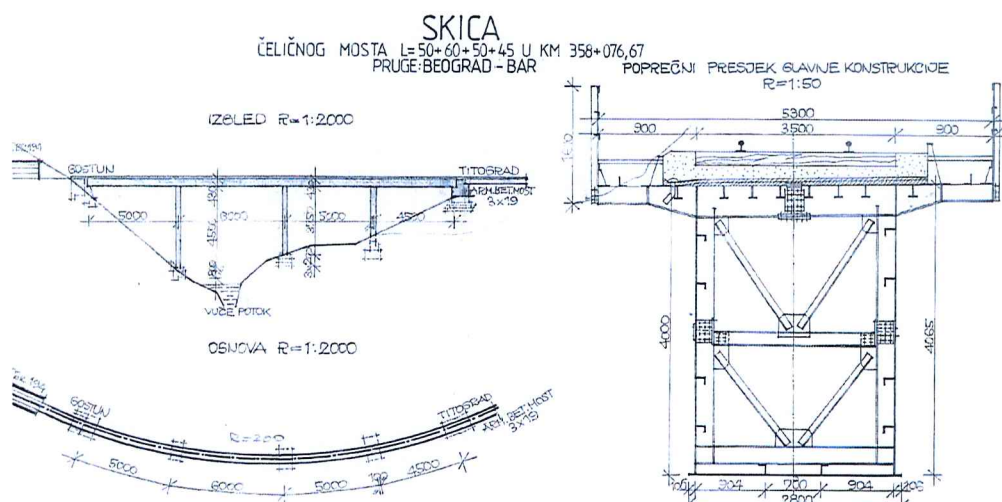
Eurokod 3 - Dio 1-8: Projektovanje veza

MEST EN 1993-1-8

PROJEKTOVANJE PUNIH LIMENIH NOSAČA

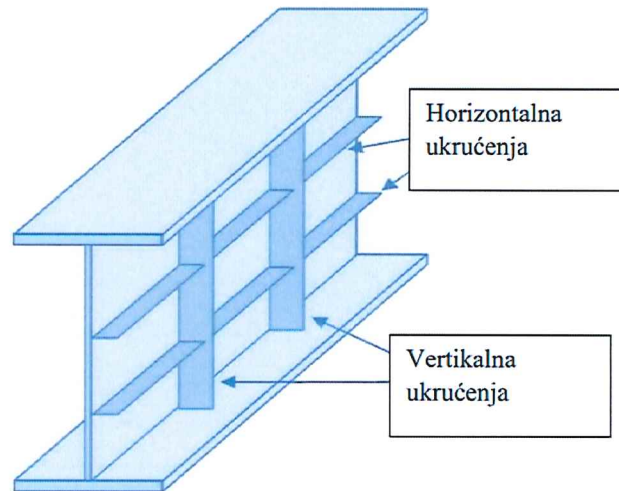
- prvi dio

- Puni limeni nosači su konstruktivni elementi, obično velikih dimenzija, napravljeni međusobnim spajanjem ravnih ili savijenih limova. Spojeni limovi mogu formirati proizvoljan poprečni presjek. Puni limeni nosači se najčešće koriste u mostogradnji i kod nosača kranova - elementa preko kojih se kreću mostne dizalice.





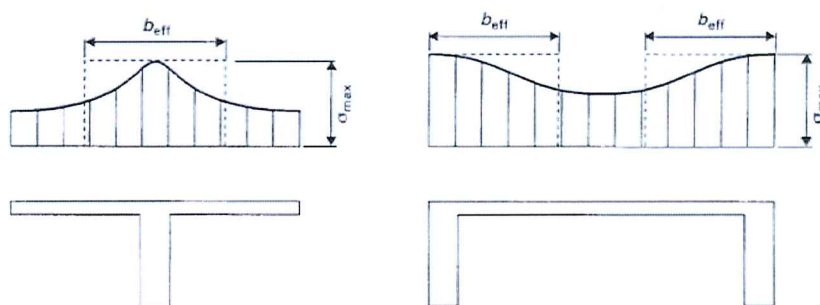
- Puni limeni nosači mogu biti neukrućeni ili ukrućeni sa poprečnim ili podužnim ukrućenjima ili i jednima i drugima.



- Osnovne pojave koje karakterišu ponašanje punih limenih nosača su **shear-lag** i **izbočavanje limova**.
- Uticaji shear lag-a i izbočavanja moraju biti uzeti u obzir pri graničnim stanjima nosivosti, upotrebljivosti ili zamora.
- U standardu MEST EN 1993-1-5: Puni limeni elementi, daju se proračunski zahtjevi za ukrućene i neukrućene nosače, koji su izloženi silama u ravni.
- Uticaji shear lag-a u nožicama, u globalnoj analizi, mogu da se uzmu u obzir korišćenjem efektivne širine. Uticaji izbočavanja, u elastičnoj globalnoj analizi, mogu biti uzeti u obzir putem efektivnih površina poprečnih presjeka pritisnutih elemenata.

SHEAR LAG

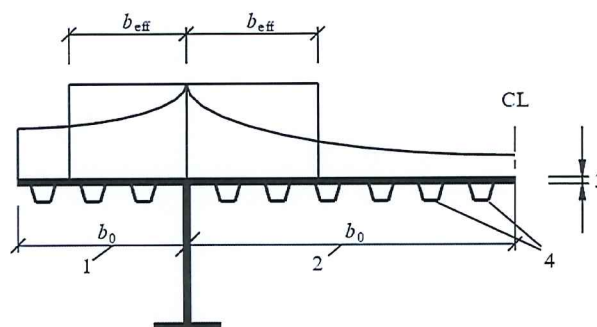
- Shear lag je pojava karakteristična za širokopojasne elemente i ogleda se u različitom intenzitetu normalnih napona po širini poprečnog presjeka.



- U slučaju pojave shear lag-a proračun se, takođe svodi na proračun odgovarajućeg efektivnog presjeka.
- Efektivna širina b_{eff} za shear lag u elastičnoj oblasti treba da se odredi iz:

$$b_{eff} = \beta b_0$$

gdje je b_0 širina prepusta nožice, ili polovina širine unutrašnjeg dijela nožice (vidjeti sljedeću sliku), dok je β faktor efektivne širine i daje se u sljedećoj tabeli.

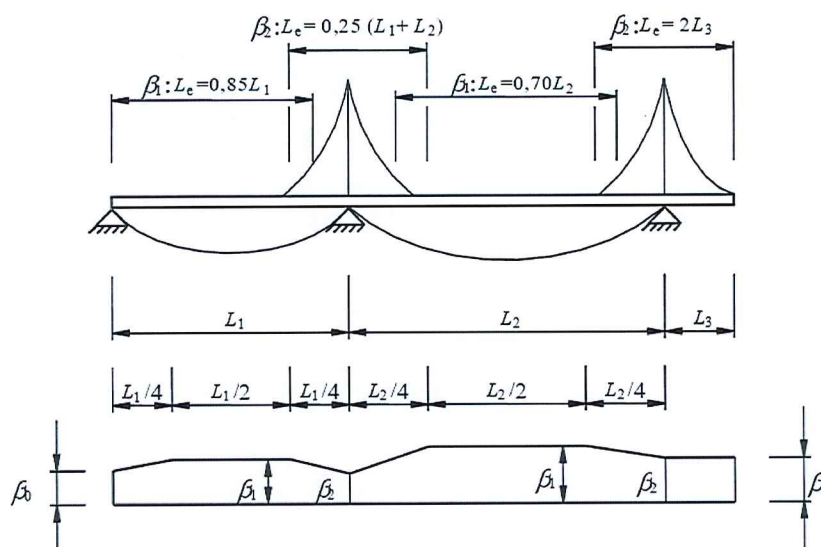


- 1 za konzolni dio nožice
- 2 za unutrašnji dio nožice
- 3 debljina lima t
- 4 ukrućenja, gdje je $A_{st} = \sum A_{stfi}$

κ	Provjera	β - vrijednosti
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	za pozitivan moment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$
	za negativan moment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right) + 1,6 \kappa^2}$
$> 0,70$	za pozitivan moment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	za negativan moment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$
za sve vrijednosti κ	krajnji oslonac	$\beta_0 = (0,55 + 0,025 / \kappa) \beta_1$, ali $\beta_0 < \beta_1$
za sve vrijednosti κ	konzola	$\beta = \beta_2$ na osloncu i kraju
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$ gdje je $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{st}}{b_0 t}}$ gdje je A_{st} površina svih podužnih ukrčenja unutar širine b_0 , a ostali simboli su definisani na slici 3.1 i slici 3.2.		

gdje je L_e dužina između nulnih tačaka momenta savijanja.

- Kada se susjedni rasponi ne razlikuju za više od 50% i kada raspon bilo kog konzolnog prepusta nije veći od polovine susjednog raspona, efektivne dužine L_e mogu da se odrede prema sljedećoj slici. Za sve ostale slučajeve L_e treba uzeti kao rastojanje između susjednih nulnih tačaka momenta savijanja.

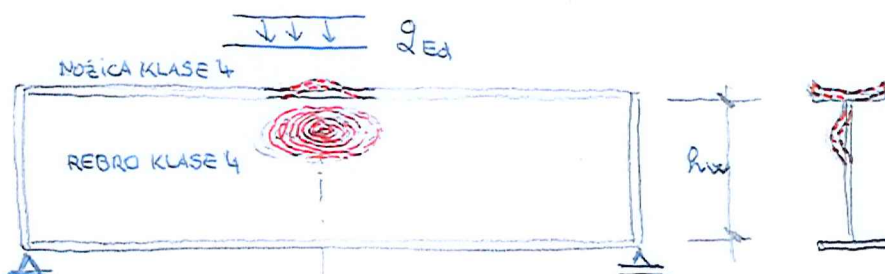


Slika 3.1: Efektivna dužina L_e za kontinualnu gredu i raspodjela efektivne širine

IZBOČAVANJE USLJED NORMALNIH NAPONA

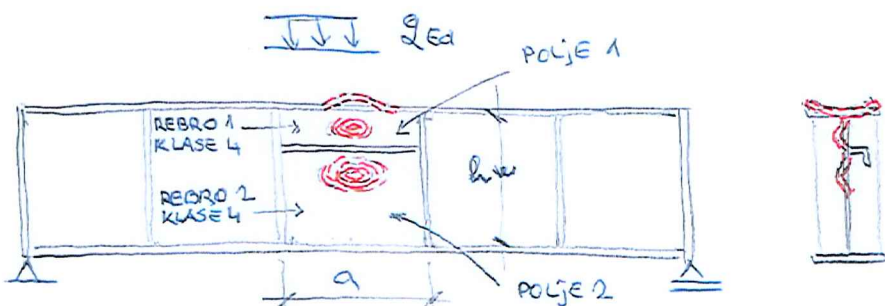
- Izbočavanje usljed normalnih napona je fenomen lokalne nestabilnosti koji se javlja kad je tanka ploča (ravna ili zakrivljena) opterećena aksijalnim pritiskom u svojoj ravni. Pri nekom kritičnom opterećenju, ploča će se deformisati upravno na svoju ravan. Pritisak prepoznavamo, osim kod aksijalne kompresije i u slučaju savijanja ili lokalno ispod koncentrisane sile.

Izbočenja na rebru i nožici neukrućenog nosača

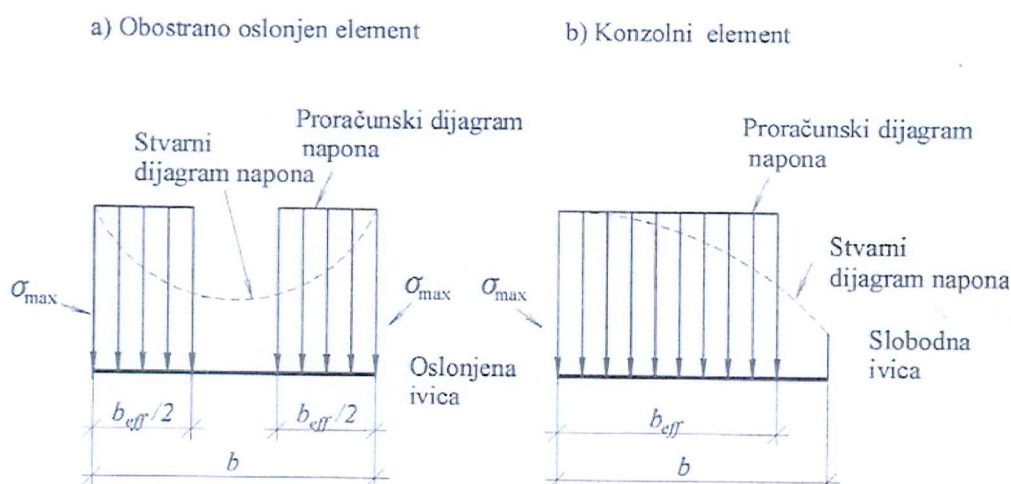


- Nakon dostizanja kritičnog napona izbočavanja u nosačima ima još post kritične rezerve u nosivosti, što se uzima u obzir prilikom određivanja nosivosti na izbočavanje.
- Povećanje nosivosti tankozidnih ploča na izbočavanje je moguće pomoću ukrućenja. Ukrućenja formiraju neukrućena polja manjih dimenzija koja imaju veću otpornost na izbočavanje. Ukrućenja je moguće postaviti u poprečnom i podužnom pravcu. Pretpostavljajući da su ukrućenja dovoljno čvrsta, rizik izbočavanja se svodi na površinu ploče između ukrućenja. Takođe, mora se sprovesti kontrola stabilnosti ukrućenja.

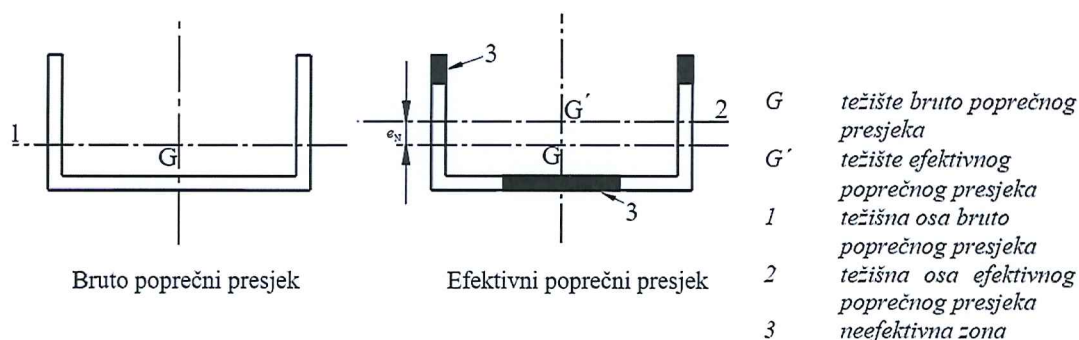
Izbočenja na rebru i nožici ukrućenog nosača



- Nosivost limenih elemenata može da se odredi korišćenjem efektivnih površina pritisnutih djelova presjeka, upotrebom geometrijskih karakteristika za klasu 4 poprečnih presjeka (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}), prema EN 1993-1-1.
- Efektivna površina pritisnutih djelova presjeka je dio presjeka za koji se usvaja da se nakon dostizanja elastičnog kritičnog napona izbočavanja nije deformisao i usvaja se da je raspodjela napona ista kao i prije pojave izbočine. U ne efektivnom dijelu presjeka dešava se izbočavanje i usvaja se da taj dio presjeka više ne prihvata napone pritiska.

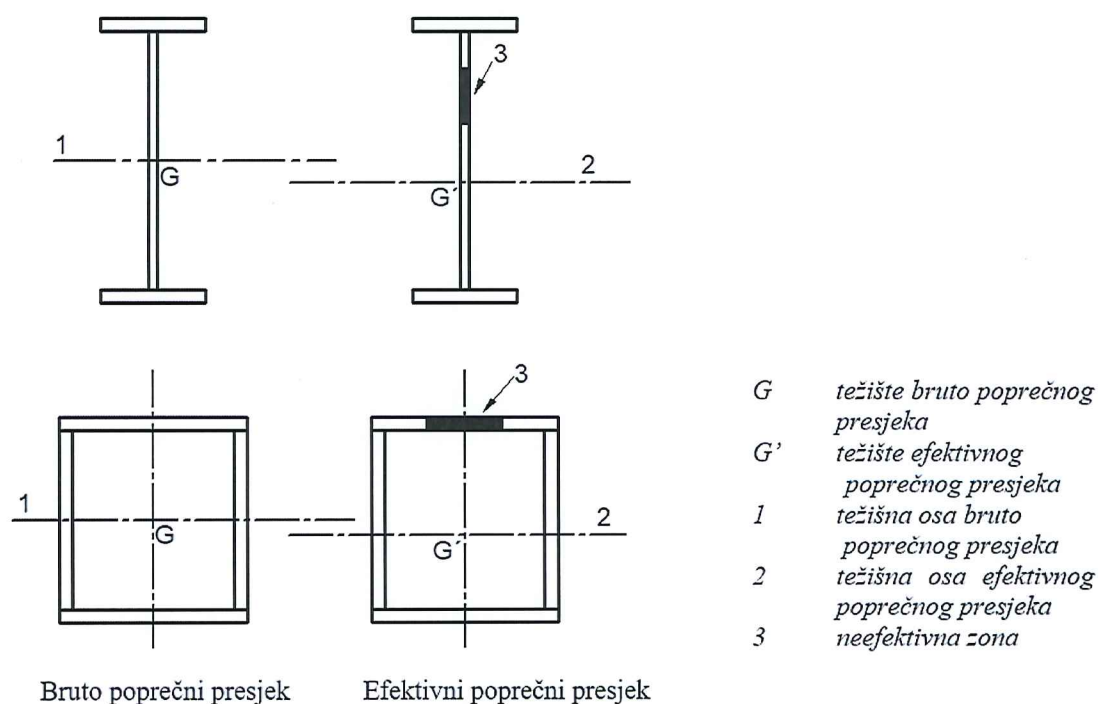


- U slučajevima kada normalna sila pritiska i moment savijanja djeluju simultano, efektivne površine se mogu odrediti uzimajući u razmatranje realnu distribuciju napona u elementima presjeka. Kao pojednostavljenje u MEST EN 1993-1-5, dozvoljava se da se efektivni presjeci odrede odvojeno za pritisak i savijanje.
- Prema tome, efektivna površina A_{eff} treba da se odredi pretpostavljajući da je poprečni presjek izložen samo naponima usljed konstantnog aksijalnog pritiska.
- Kod nesimetričnih poprečnih presjeka moguće pomjeranje e_N težišta efektivne površine A_{eff} u odnosu na težište bruto poprečnog presjeka uzrokuje dodatni moment koji treba da se uzme u obzir pri provjeri nosivosti. Ovaj slučaj, prikazan je na sljedeća dva crteža.



Slika 4.1: Poprečni presjek klase 4 – aksijalna sila

- Takođe, efektivni otporni moment W_{eff} treba da se odredi pretpostavljajući da je poprečni presjek izložen samo naponima usljed savijanja. Za koso savijanje efektivni otporni moment treba da se odredi za obje glavne ose.



Slika 4.2: Poprečni presjek klase 4 – moment savijanja

- Za odnos dimenzija $a/b < 1$ može se pojaviti izbočavanje slično izvijanju štapa (sljedeći crtež). U ovim slučajevima faktor redukcije ρ_c (vidjeti značenje u nastavku), jednak je faktoru redukcije χ_c za izvijanje štapa. Za limove sa podužnim ukrućenjima, izbočavanje slično izvijanju štapa može da se pojavi i kada je $a/b \geq 1$.

- U MEST EN 1993-1-5, za analizu slučaja izbočavanja sličnog izvijanju, limovi se tretiraju kao da podužno nisu pridržani u toku izvijanja. S toga je kritični napon izbočavanja ploče uvijek veći od kritičnog napona izbočavanja sličnog izvijanju. Granična nosivost kratkih ploča zavisi i od jednog i od drugog tipa izbočavanja i potrebno je primjeniti odgovarajuću interakciju između ove dvije pojave.

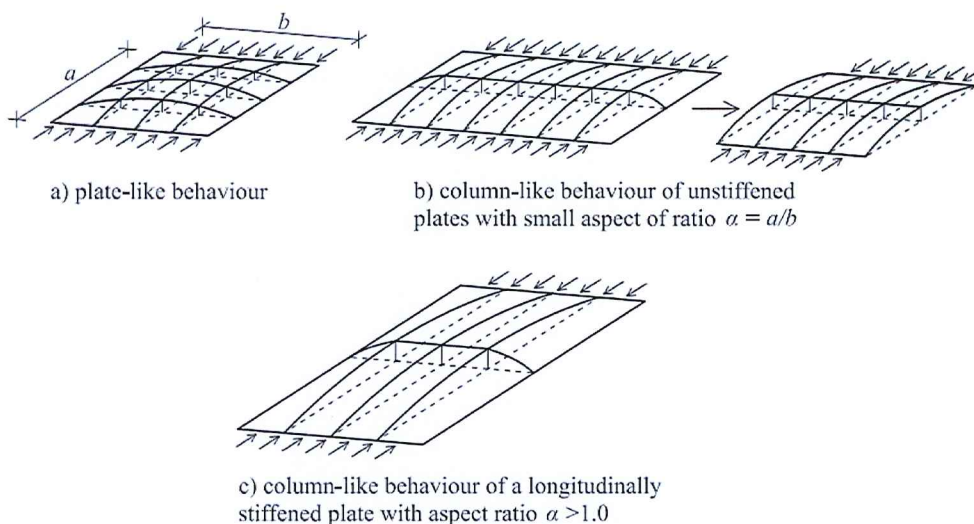


Fig. 2.19: Plate-like and column-like behaviour of plates in compression

Provjera nosivosti

- Provjera elementa na pritisak i savijanje oko jedne ose treba da se sprovede kako slijedi:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M0} f_y A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{\gamma_{M0} f_y W_{eff}} \leq 1,0$$

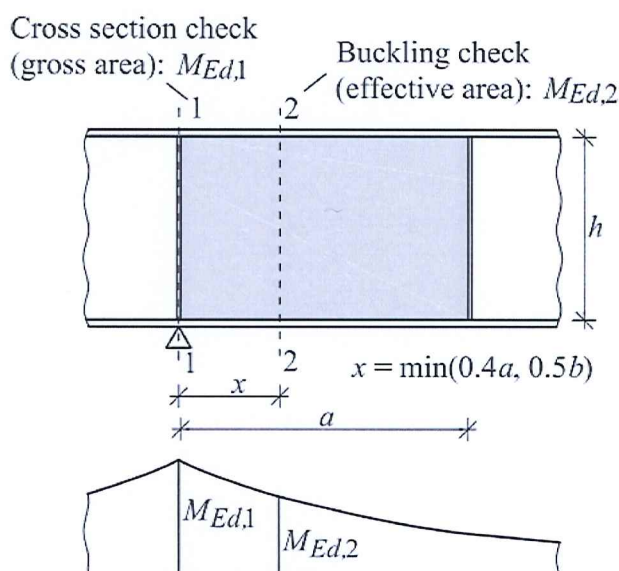
gdje je:

N_{Ed}	proračunska aksijalna sila;
M_{Ed}	proračunski moment savijanja;
e_N	pomjeranje položaja neutralne ose;
A_{eff}	efektivna površina poprečnog presjeka;
W_{eff}	efektivni elastični otporni moment;
γ_{M0}	parcijalni faktor.

- Za elemente izložene pritisku i kosom savijanju gornja jednačina se modifikuje u:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff}} \leq 1,0$$

- Provjera izbočavanja se odnosi na jedno polje ovičeno poprečnim ukrućenjima (bez obzira da li ima ili nema podužnih ukrućenja). U opštem slučaju proračunske sile nisu konstantne duž polja. Provjera se konzervativno može sprovesti na veću proračunsku silu (momenat), međutim, po pravilu provjera izbočavanja polja treba da se sprovede za proračunske presječne sile na rastojanju $0,4a$ ili $0,5b$, u zavisnosti od toga šta je manje, mjereno od kraja polja na kom su naponi veći.



- Kada je razlika između presječnih sila, sa jedne strane poprečnog ukrućenja u odnosu na drugu staranu, znatna, potrebno je provjeriti bruto poprečni presjek na najveće uticaje.
- Dobijanje efektivnih karakteristika poprečnog presjeka je definisano u Eurokodu EN 1993-1-5, po principu koji će biti predstavljen u nastavku. U prvom dijelu će se prikazati dobijanje efektivnih karakteristika kod limova koji nijesu ojačani ukrućenjima (EN1993-1-5: 4.4), a zatim i kod ploča koje imaju poprečna i podužna ukrućenja (EN1993-1-5: 4.5).

Efektivne karakteristike kod elemenata bez podužnih ukrućenja

- Efektivna površina pritisnute zone lima sa bruto površinom poprečnog presjeka A_c treba da se odredi kao:

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (\text{efektivna širina je } b_{eff} = \rho \bar{b} \text{ - objašnjenje u nastavku)}$$

gdje je $\rho \leq 1.0$, faktor redukcije za izbočavanje.

- Faktor redukcije ρ se može sračunati na sljedeći način:

Za unutrašnje pritisnute djelove poprečnog presjeka

$$\rho = 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

Za konzolne pritisnute djelove poprečnog presjeka

$$\rho = 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

gdje je $\bar{\lambda}_p$ vitkost ploče:

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

U prethodnim izrazima koriste se sljedeća obilježavanja:

ψ odnos napona na ivicama razmatranog dijela poprečnog presjeka (prikazano u sljedećim tabelama),

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = \text{manji napon} / \text{veći napon (zatezanje je negativno!);}$$

\bar{b} odgovarajuća širina koja se uzima na sljedeći način:

- b_w za rebra;
- b za unutrašnje djelove nožica (izuzev za RHS);
- $b - 3t$ za nožice šupljih profila pravougaonog presjeka (RHS);
- c za konzolne djelove nožica;
- h za ugaonike istih ili različitih dužina krakova;

k_σ faktor izbočavanja koji odgovara odnosu napona ψ i graničnim uslovima oslanjanja (faktor izbočavanja se daje u sljedećim tabelama);

t debljina ploče;

σ_{cr} elastični kritični napon izbočavanja;

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N/mm^2]}}$$

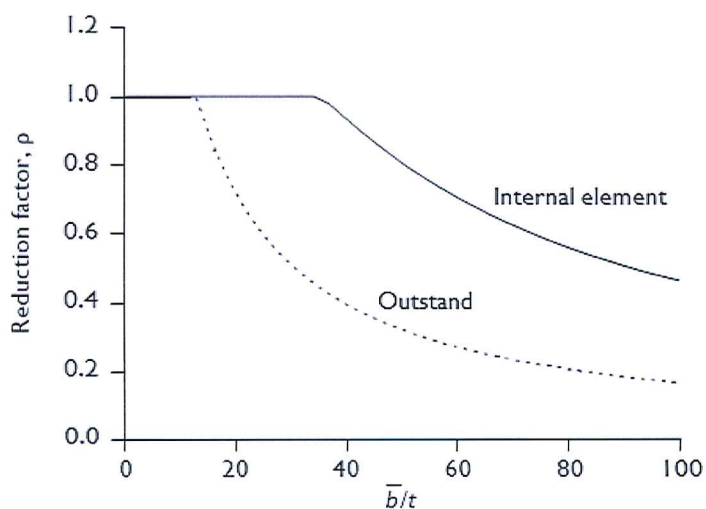
Unutrašnji pritisnuti djelovi presjeka

Raspodjela napona (pritisak je pozitivan)				Efektivna širina b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1-\psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\frac{AC}{-1} > \psi \geq -3 \frac{AC}{AC}$
Faktor izbočavanja k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1-\psi)^2$

Konzolni pritisnuti djelovi presjeka

Raspodjela napona (pritisak je pozitivan)		Efektivna ^ρ širina b_{eff}			
		$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Faktor izbočavanja k_a	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi > 0$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_1 / \sigma_2$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Faktor izbočavanja k_c	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	
				23,8	

- Dijagram na kojem se vidi ponašanje redukcionog faktora ρ u odnosu na odnos \bar{b} / t za unutrašnje elemente i za konzolne elemente izložene dejstvu sile pritiska (i za $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$) vidi se na sljedećoj slici.



- Prema tome, opšta definicija vitkosti ploče $\bar{\lambda}_p$ uključuje faktor izbočavanja k_σ , kojim se uzimaju u obzir različite raspodjele napona pritiska i različiti granični uslovi elementa (*Teorija površinskih nosača*).
- Intenzitet faktora izbočavanja k_σ zavisi od odnosa napona ψ dijela presjeka koji se analizira. Najčešći slučajevi su čisti pritisak, kada je $\psi = 1$ i čisto savijanje kada je $\psi = -1$.

VAŽNO!

- Za nožice, odnos napona ψ treba da se zasniva na bruto poprečnom presjeku. Za rebro, odnos napona ψ treba da se sračuna koristeći raspodjelu napona sa efektivnom površinom pritisnute nožice i bruto površinom rebra.

PREDAVANJE 01

Pitanja:

1. Kako se naziva pojava, karakteristična za široko pojasne nosače, koja se ogleda u različitim intenzitetima normalnih napona po širini presjeka?
2. Da li je efektivna površina poprečnog presjeka uvijek manja od bruto presjeka?
3. Da li poprečni presjek izložen zatezanju može biti klasifikovan kao presjek klase 4?
4. Povećava li se nosivost na izbočavanje postavljanjem vertikalnih i horizontalnih ukrućenja na rebro tankozidnih nosača?
5. Da li je efektivna površina pritisnutih djelova presjeka dio presjeka za koji se usvaja da se nakon dostizanja elastičnog kritičnog napona izbočavanja nije deformisao ili jeste deformisao?
6. Da li se prema MEST EN 1993-1-5, može desiti da isti presjek bude klase 3 na pritisak, a klase 4 na savijanje?
7. Da li se kod aksijalno pritisnutog presjeka klase 4 može pojaviti i savijanje?