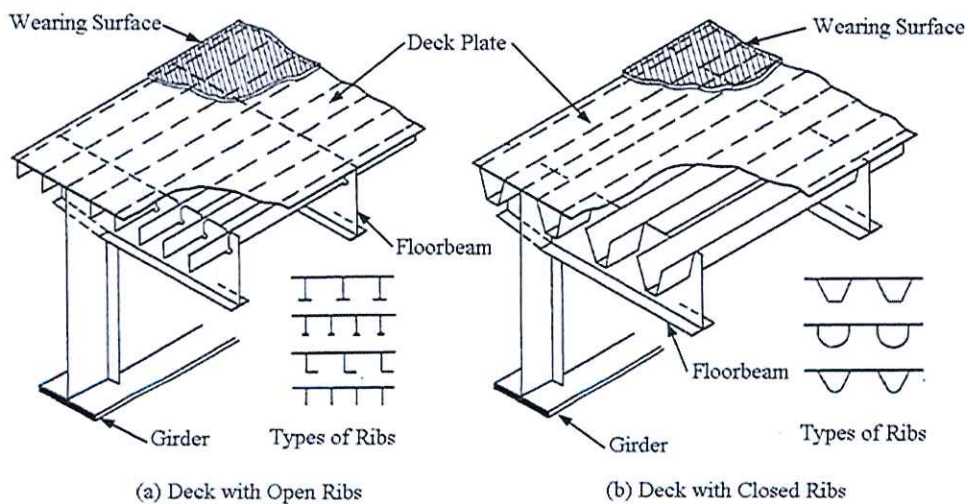
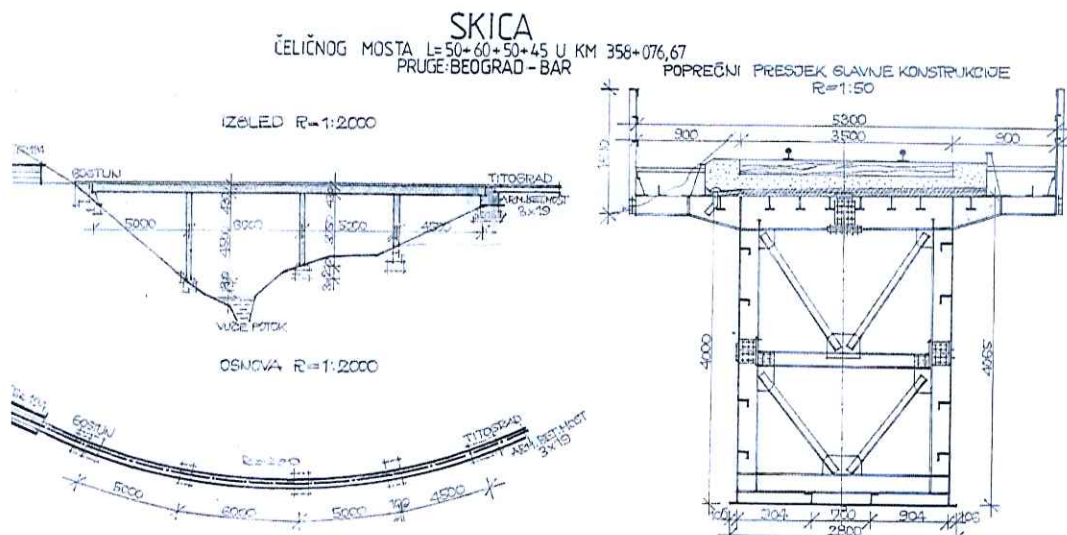


PROJEKTOVANJE PUNIH LIMENIH NOSAČA

- prvi dio

- Puni limeni nosači su konstruktivni elementi, obično velikih dimenzija, napravljeni međusobnim zavarivanjem ravnih ili savijenih limova u proizvoljan poprečni presjek. Najčešće se koriste u mostogradnji i kod nosača kranova - elementata preko kojih se kreću mostne dizalice.



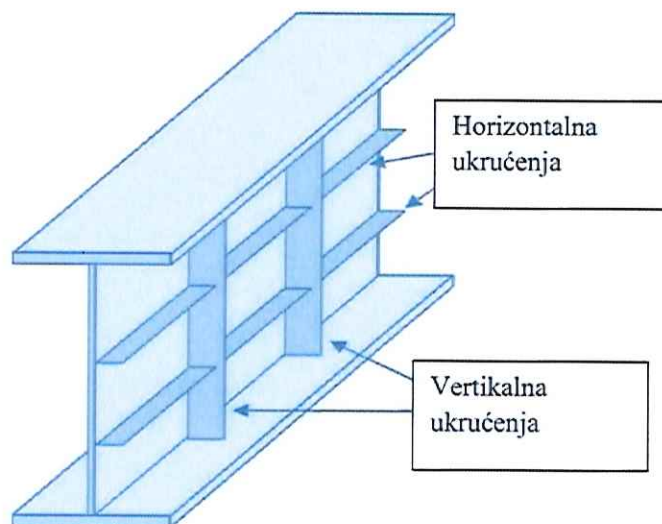
ČELIČNE KONSTRUKCIJE II
PREDAVANJE 03



ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 03

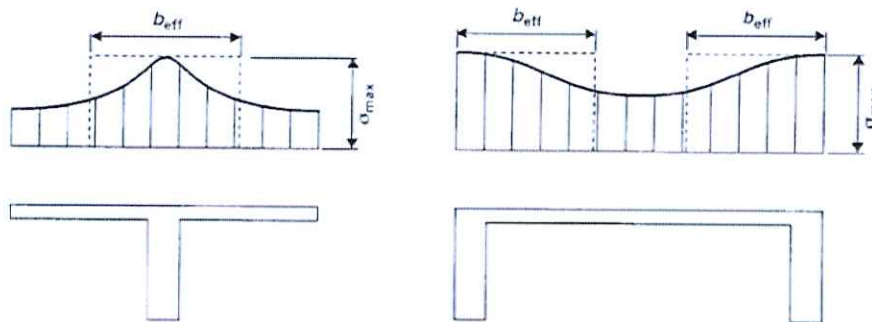
- Puni limeni nosači mogu biti neukrućeni ili ukrućeni sa poprečnim ili podužnim ukrućenjima ili i jednima i drugima.



- 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 zahtijevi 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. O pojmu i proračunu efektivnih površina je već bilo riječi kada smo govorili o projektovanju hladno oblikovanih elemenata u kojima se takođe primjenjuju efektivne površine, koje se modeliraju upravo po postupku koji je definisan u ovom MEST EN 1993-1-5. Ovdje će se, kada se bude govorilo o izbočavanju limova i proračunu efektivnih površina, radi cjelovitosti, ponoviti ono što je već jednom rečeno u prethodnim predavanjima.

SHEAR LAG

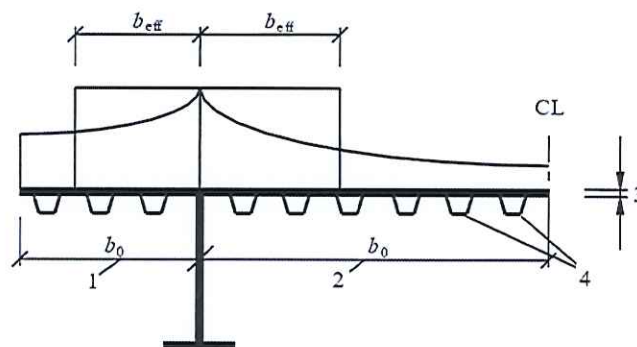
- Shear lag je pojava karakteristična za širokopojasne elemente i ogleda se u različitom intenzitetu normalnih napona po širini poprečnog presjeka.



- 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 $A_{scl} = \sum A_{sli}$

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 03

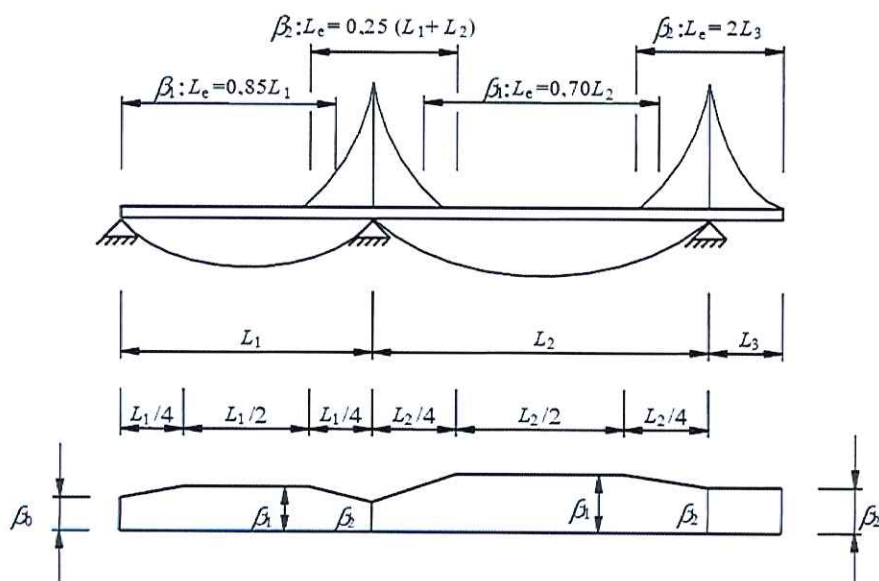
κ	Provjera	β - vrijednosti
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	za pozitivan moment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$
	za negativan moment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right) + 1,6 \kappa^2}$
$> 0,70$	za pozitivan moment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	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 $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sc}}{b_0 t}}$

gdje je A_{sc} 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.

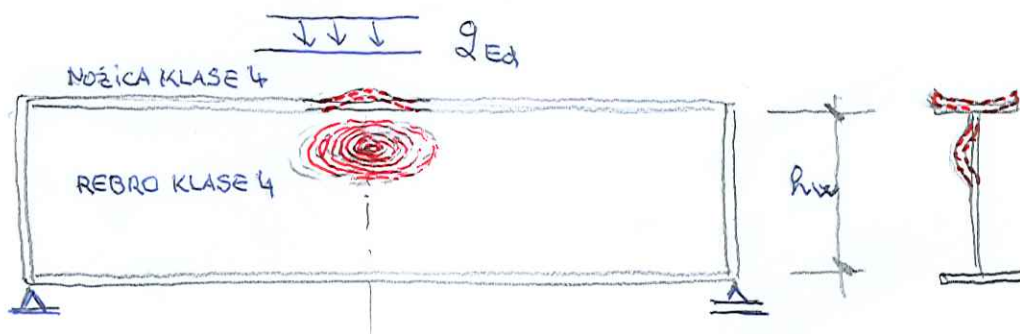


Slika 3.1: Efektivna dužina L_e za kontinualnu gredu i raspodjela efektivne širine

IZBOČAVANJE USLJED NORMALNIH NAPONA

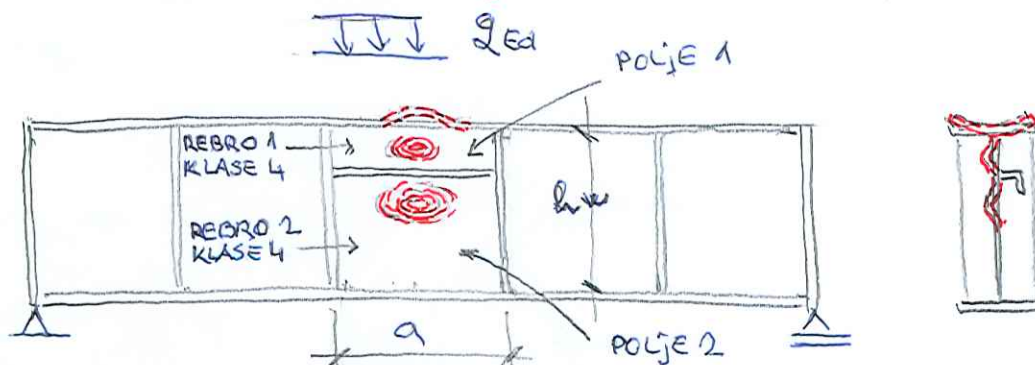
- Izbočavanje usljed normalnih napona je fenomen lokalne nestabilnosti koji se javlja kad je tanka ploča (ravna ili zakrivljena) opterećena aksijalnim pritiskom u svojoj ravni. Pri nekom kritičnom opterećenju ploča će se deformisati upravno na svoju ravan. Pritisak prepoznavamo, osim kod aksijalne kompresije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

Nacrtati izbočenja na rebri 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.
- Jedan od načina daljeg povećanja nosivosti tankozidnih ploča je pomoću ukrućenja, koja formiraju neukrućena polja manjih dimenzija, a koja imaju veću otpornost na izbočavanje. Ukrućenja je moguće postaviti u poprečnom i podužnom pravcu. Pretpostavljajući da su ukrućenja dovoljno čvrsta, rizik izbočavanja svodimo na površinu ploče između ukrućenja. Takođe, mora se sprovesti kontrola stabilnosti ukrućenja.

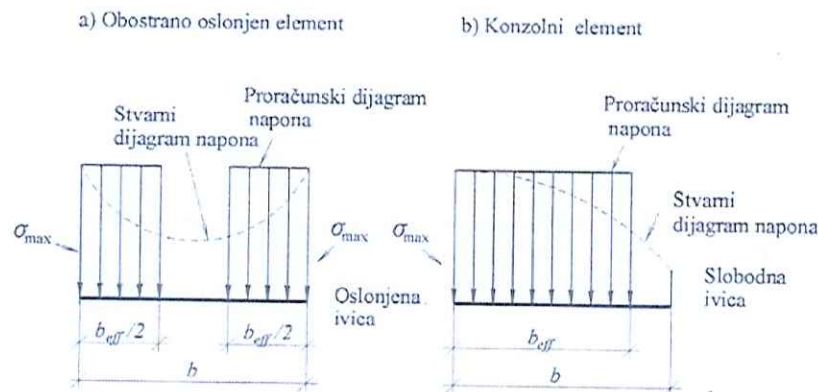
Nacrtati izbočenja na rebri i nožici ukrućenog nosača



ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

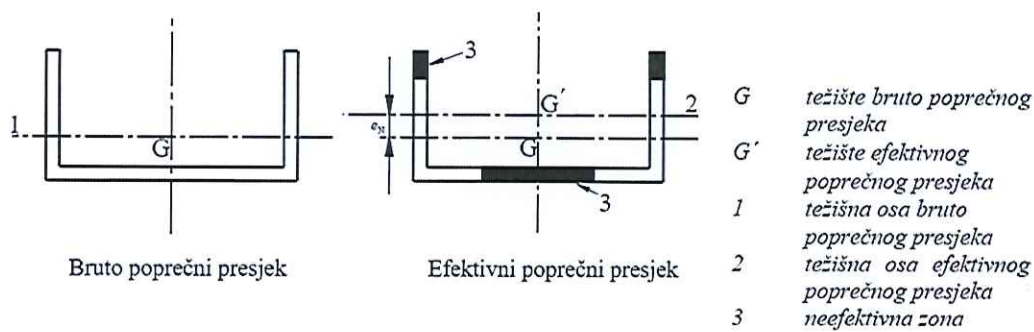
PREDAVANJE 03

- Kao što je rečeno, ovaj dio je jednim dijelom izložen kada se govori o projektovanju hladno oblikovanih elemenata, ali ćemo ga ponoviti zbog cjelovitosti postupka proračuna.
- Nosivost limenih elemenata može da se odredi korišćenjem efektivnih površina pritisnutih djelova presjeka upotrebom karakteristika za klasu 4 poprečnih presjeka (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) za provjere nosivosti poprečnih presjeka i provjere nosivosti elemenata na izvijanje i bočno-torziono izvijanje 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.



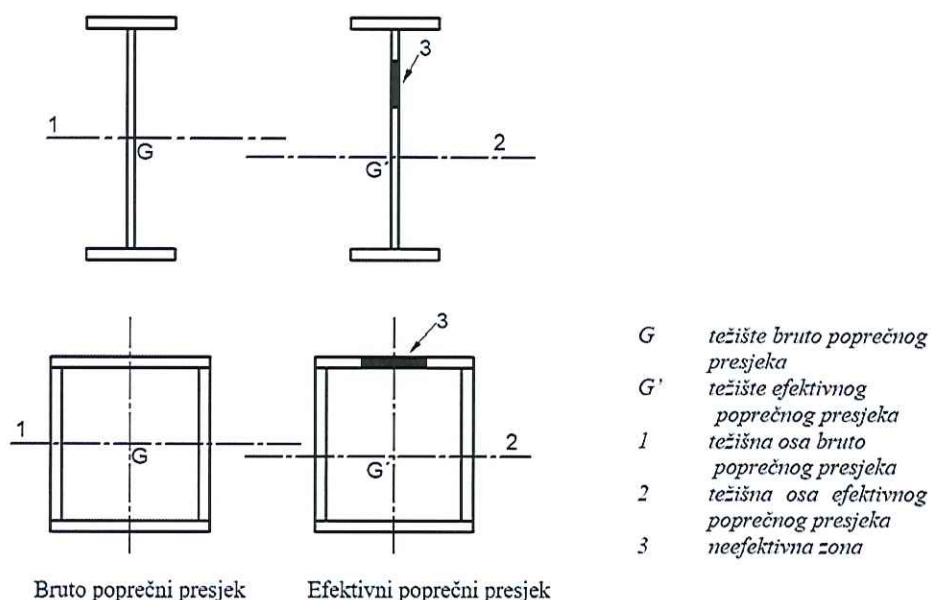
- U slučajevima kada normalna sila pritiska i momenat savijanja djeluju simultano, efektivne površine se mogu odrediti uzimajući u razmatranje realnu distribuciju napona u elementima presjeka. Kao pojednostavljenje u MEST EN 1993-1-5 se dozvoljava da se efektivni presjeci odrede odvojeno za pritisak 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 poprečnog presjeka.

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II PREDAVANJE 03



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. 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 takođe da se pojavi 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.

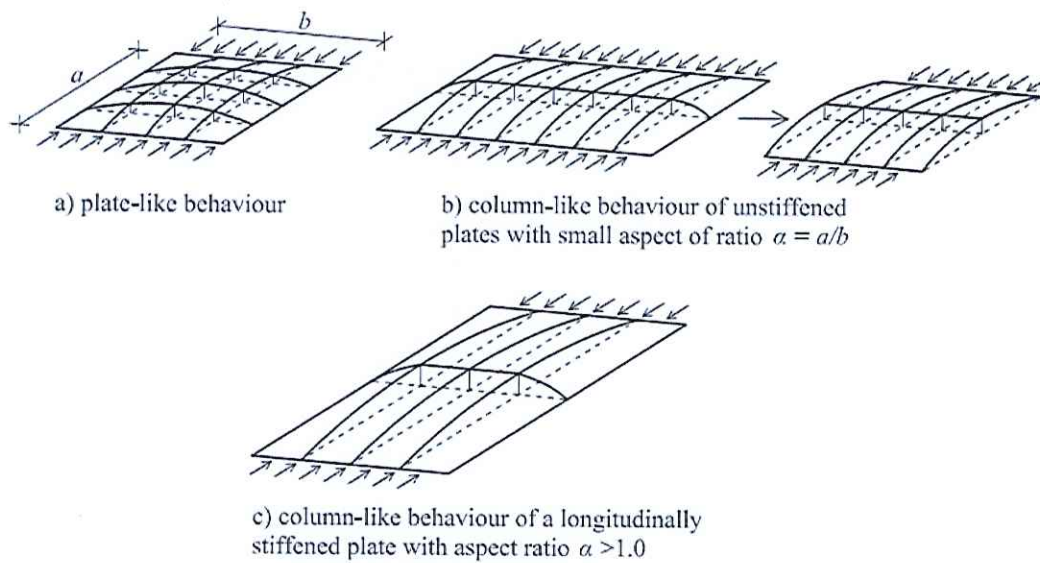


Fig. 2.19: Plate-like and column-like behaviour of plates in compression

Provjera nosivosti

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

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

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.

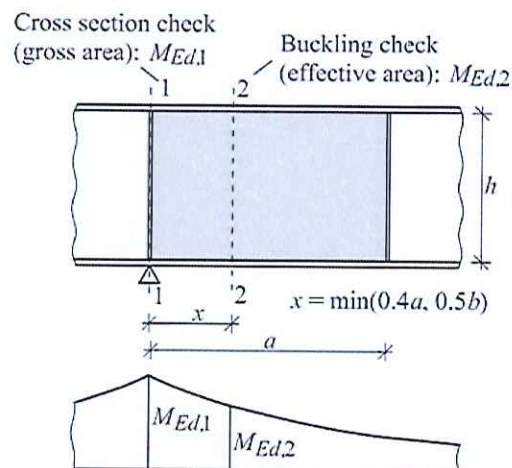
- Za elemente izložene pritisku i kosom savijanju gornja jednačina se modifikuje u:

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

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 03

- Provjera izbočavanja se odnosi na jedno polje oivičeno 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 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 stranu, 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 koji 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:

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

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:

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

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II PREDAVANJE 03

U prethodnim izrazima koriste se sljedeća obilježavanja:

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

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = \text{manji napon} / \text{veći napon};$$

\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 ^o 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	$\frac{\sqrt{AC}-1}{\sqrt{AC}} > \psi \geq -3 \frac{\sqrt{AC}}{AC}$
Faktor izbočavanja k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1-\psi)^2$

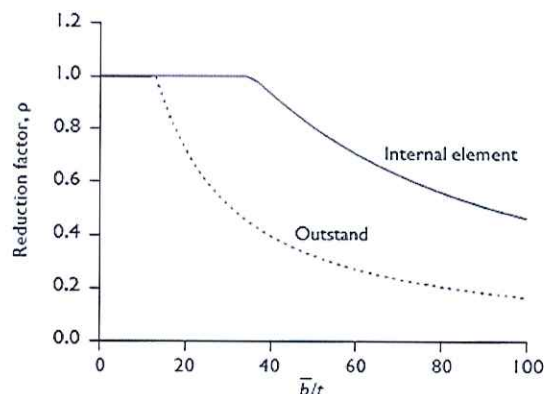
ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 03

Konzolni pritisnuti djelovi presjeka

Raspodjela napona (pritisak je pozitivan)		Efektivna 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_α	0.43	0.57	0.85	$0.57 - 0.21 \psi + 0.07 \psi^2$	
		$1 > \psi > 0$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Faktor izbočavanja k_α	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).

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 03

- 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 rebra, odnos napona ψ treba da se sračuna koristeći raspodjelu napona sa efektivnom površinom pritisnute nožice i bruto površinom rebra.