

DIMENZIONIRANJE ČELIČNIH MOSTOVA (DIN-Fachbericht 103)

1. PREGLED	3
2. GRADIVA	4
3. GRANIČNA STANJA UPORABE (GSU).....	8
3.1. Uvod	8
3.2. Elastično ograničenje naprezanja	8
3.3. Ograničenja za slobodni profil	8
3.4. Deformacije i vibracije	8
4. GRANIČNA STANJA NOSIVOSTI (GSN)	10
4.1. Osnove	10
4.2. Klasifikacija presjeka	11
4.3. Izvijanje	17
4.4. Bočno izvijanje	20
4.4.1. Otpornost	20
4.4.2. Nepromjenjivi presjek	21
4.4.3. Promjenjivi presjek	21
4.4.4. Dokaz tlačnog pojasa kao tlačni štap	22
4.5. Dokazi za savijanje i tlak	24
4.5.1. Izvijanje	24
4.5.2. Bočno izvijanje	26
4.6. Rešetke	26
4.7. Lukovi	26
5. IZBOČAVANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA SASTAVLJENIH OD LIMOVA	28
5.1. Uvod	28
5.2. Osnovni zahtjevi i postupci	32
5.3. Uzimanje u obzir posmičnih deformacija kod dimenzioniranja konstrukcijskih dijelova (sudjelujuće širine)	33
5.3.1. Općenito	33
5.3.2. Sudjelujuće širine za uzimanje u obzir posmičnih deformacija za granično stanje uporabljivosti i zamora	33
5.3.2.1. Koeficijent redukcije za sudjelujuću širinu	33
5.3.2.2. Raspodjela naprezanja uz uzimanje u obzir posmičnih deformacija hrpta	35
5.3.2.3. Unos opterećenja u ravnini lima	36
5.3.3. Sudjelujuće širine za uzimanje u obzir posmičnih deformacija za granično stanje nosivosti (ULS)	37
5.4. Izbočavanje limova	37
5.4.1. Normalna naprezanja	37
5.4.1.1. Neukružena ploča	37
5.4.1.2. Ukružena ploča	38
5.4.1.3. Ponašanje slično izvijanju	39
5.4.1.3.1. Idealno naprezanje izvijanja	39

5.4.1.3.2.	Interakcija između izbočavanja lima i izbočavanja sličnog izvijanju tlačnog štapa	40
5.4.1.4.	Dokaz	40
5.4.2.	Posmična naprezanja	43
5.4.2.1.	Elastično kritično naprezanje izbočavanja	43
5.4.2.2.	Izbočavanje uslijed posmika	43
5.4.3.	Nosivost za poprečno opterećenje	46
5.4.4.	Interakcija	48
5.4.4.1.	Interakcija posmika, savijanja i normalne sile	48
5.4.4.2.	Interakcija poprečnog opterećenja na rubovima, momenta savijanja i normalne sile	49
5.4.5.	Izbočavanje hrpta uslijed popuštanja pojaseva	49
5.4.6.	Zahtjevi na konstrukcijske elemente ukrućenih polja limova	49
5.4.6.1.	Općenito	49
5.4.6.2.	Djelovanje uzdužnih naprezanja	50
5.4.6.2.1.	Zahtjevi na poprečne ukrute	50
5.4.6.2.2.	Zahtjevi na uzdužne ukrute	51
5.4.6.3.	Djelovanje posmičnih naprezanja	51
5.4.6.3.1.	Krute ležajne ukrute	51
5.4.6.3.2.	Deformabilne ležajne ukrute	52
5.4.6.3.3.	Poprečne ukrute u polju	52
5.4.6.3.4.	Uzdužne ukrute	53
5.4.6.3.5.	Varovi	53
5.4.6.3.6.	Djelovanje poprečnih opterećenja u ravini hrpta	53
6.	OGRANIČENJE NAPREZANJA ZA ISPUNJENJE UVJETA KLASSE 3 POPREČNOG PRESJEKA	54

1. PREGLED

Temelji se na EC 1993-1-1 „Dimenzioniranje i konstruiranje čeličnih konstrukcija“.

Sadržava i bitne dijelove sljedećih normi:

- EC 1993-2, Čelični mostovi
- EC 1993-1-5, Dodatna pravila za ravne limove bez poprečnog djelovanja
- Preporuke BMVBW „Konstruiranje ortotropnih ploča cestovnih mostova sigurnih na zamor, 2000
- Pravila njemačkih željeznica Deutsche Bahn AG za ortotropne ploče željezničkih mostova

U pravilu je predpostavljen **vijek trajanja** mosta od 100 godina.

Za osiguranje **trajnosti** mostovi moraju biti dimenzionirani uzimajući u obzir trošenje, zamor i izvanredna djelovanja.

Konstruktivski dijelovi s manjim vijekom trajanja moraju biti zamjenjivi (AKZ; ležajevi; zatege, kabeli, vješaljke; prijelazne naprave, zastori kolnika itd.)

2. GRADIVA

Za toplo valjane konstrukcijske čelike koriste se norme *DIN EN 10025* i *DIN EN 10113*.

Standard i kvaliteta čelika	Debljina t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
DIN EN 10025				
S 235	235	360	215	340
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	490
DIN EN 10113				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	540	390	520
S 460 N/NL	460	570	430	550
S 275 M/ML	275	380	255 ¹⁾	360 ¹⁾
S 355 M/ML	355	470	335 ¹⁾	450 ¹⁾
S 420 M/ML	420	520	390 ¹⁾	500 ¹⁾
S 460 M/ML	460	550	430 ¹⁾	530 ¹⁾
DIN EN 10137				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
DIN EN 10155				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
1) Za plosnate čelike: $40 \text{ mm} < t \leq 63 \text{ mm}$ isključivo				

Tablica 2.1: Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_y i čvrstoće f_u za vruće valjane konstrukcijske čelike

Standard i kvaliteta čelika	Debljina t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 65$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
DIN EN 10210				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	380	255	370
S 355 NH/NLH	355	480	335	470
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Tablica 2.2: Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_y i čvrstoće f_u za šuplje profile

a) Za limove prema DIN EN 10025, DIN EN 10113, DIN EN 10137, DIN EN 10155:

Kvaliteta čelika prema DIN EN				0° C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C	-50 °C
10025	10113 ¹⁾	10137 ²⁾	10155 ¹⁾	[mm]					
S235JR	S275-N/M S275NL/ML		S235J0W S235J2W	75	65	55	20	-	-
S235J0				100	85	75	60	55	45
S235J2				140	120	100	85	75	60
S275J0			S355J0W S355J2W S355K2W	90	80	65	55	50	40
S275J2				130	110	90	80	65	55
				150	130	110	90	80	65
				200	170	150	130	110	90
S355J0				80	65	55	45	40	30
S355J2				110	90	80	65	55	45
S355K2				130	110	90	80	65	55
				130	110	90	80	65	55
				175	150	130	110	90	80
				115	95	80	70	55	45
				155	135	115	95	80	70
	S420N/M S420NL/ML		S460Q S460QL S460QL1	105	90	75	60	50	40
				150	125	105	90	75	60
				90	75	60	50	40	35
				125	105	90	75	60	50
				170	150	125	105	90	75

1) Za čelike prema DIN EN 10155 maksimalna debljina ograničena je na 100 mm

b) Za šuplje profile prema DIN EN 10210:

Kvaliteta čelika prema DIN EN:	0° C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C	-50 °C
10210 ¹⁾	Debljina δ (mm)					
S275J0H	90	80	65	55	50	40
S275J2H	130	110	90	80	65	55
S275NH	150	130	110	90	80	65
S275NLH	200	170	150	130	110	90
S355J0H	80	65	55	45	40	30
S355J2H	110	90	80	65	55	45
S355NH	130	110	90	80	65	55
S355NLH	175	150	130	110	90	80
S460NH	105	90	75	60	50	40
S460NLH	150	125	105	90	75	60

1) Za čelične dijelove prema DIN EN 10210 maksimalna debljina ograničena je na 65 mm

Napomena: Debljine limova proračunate su prema DAST Ri 009

Tablica 2.3: Maksimalne debljine za vlačno opterećene čelične dijelove cestovnih mostova

Standard	Kvaliteta	Dopuštene debljine materijala [mm]	
		Nezavareni čelični dijelovi ili zavareni u tlaku	Zavareni elementi u vlaku
DIN EN 10025	S235JRG2 / S275JRG2	35	20
	S235J0 / S275J0	50	35
	S235J2G3 / S275J2G3	80	60
	S355JR	20	---
	S355J0	40	10
DIN EN 10113	S355J2G3	60	35
	S355K2G3	80	60
	S275N/M	100 ⁽²⁾	70
	S275NL/ML	100 ⁽²⁾	100 ⁽²⁾
	S355N/M	80	60
	S355NL/ML	100 ⁽²⁾	100 ⁽²⁾
(1) Forderung des Aufschweißbiegeversuches von Nenndicken ≥ 30 mm (siehe BN 918 002)			
(2) Dicken > 100 mm sind nur mit Zustimmung im Einzelfall erlaubt.			

Tablica 2.4: Maksimalne debljine čeličnih dijelova željezničkih mostova

Za stalne i prolazne kombinacije djelovanja rezne sile se u pravilu izračunavaju prema teoriji elastičnosti. Samo za izvanredne kombinacije npr. udar vozila dopušta se primjena teorije plastičnosti. Konstrukcijski čelik zbog toga mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

- čvrstoća/granica popuštanja $f_u/f_y \geq 1,20$
- granično izduženje ϵ_u (A_5) ≥ 15 %
- granično izduženje $\epsilon_u \geq 15 \epsilon_y$

Odabir konstrukcijskog čelika sigurnog protiv krhkog loma provodi se prema Tab.2.3 za cestovne mostove i Tab.2.4 za željezničke mostove uz pretpostavku temperature od -30°C .

Koriste se samo vijci prema Tab.2.5.

Klasa vijaka	4.6	5.6	8.8	10.9
f_{yb} [N/mm ²]	240	300	640	900
f_{ub} [N/mm ²]	400	500	800	1000

Napomena: Dopuštaju se samo vijci čvrstoće 4.6, 5.6, 8.8 i 10.9.

Tablica 2.5: Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_{yb} i vlačne čvrstoće f_{ub} za vijke

3. GRANIČNA STANJA UPORABE (GSU)

3.1. Uvod

Mostovi moraju ispuniti i zahtjeve relevantnih granična stanja uporabe (GSU).

Zahtjevi:

- samo elastične deformacije (za izbjegavanje trajnih deformacija)
- ograničenje progiba (osiguranje slobodnog profila, ograničenje dinamičkih djelovanja, izbjegavanje pukotina u kolničkom zastoru)
- Abstimmung vlastitih frekvencija (za izbjegavanje vibracija pod prometom ili uslijed djelovanja vjetra, koje mogu inducirati zamor materijala, buku i smanjenje udobnosti prometa)
- ograničenje vitkosti limova (izbjegavanje deformiranja limova, disanja hrpta (zamor) i gubitka krutosti uslijed izbočavanja)
- osiguranje dovoljne trajnosti primjenom odgovarajućih detalja da se smanji korozija i trošenje
- omogućenje provedbe radova održavanja i popravaka (pristup za preglede i radove na održavanju i popravcima, zamjena ležajeva, zamjena prijelaznih naprava itd.)

3.2. Elastično ograničenje naprezanja

U mostogradnji se poglavito zbog problematike zamora rezne sile za granično stanje nosivosti (GSN) proračunavaju temeljem teorije elastičnosti bez uporabe plastičnih rezervi na razini presjeka i razini statičkog sustava (i za klase presjeka 1 i 2).

Slijedi da su naprezanja za uporabna djelovanja (bez parcijalnog faktora sigurnosti za djelovanja) u elastičnom području, pa nije potrebno provoditi dokaz naprezanja na razini uporabe ($\gamma_{M,ser}=1,0$).

3.3. Ograničenja za slobodni profil

Progibi za osiguranje slobodnog profila ispod mosta proračunavaju se za *karakterističnu (rijetku)* kombinaciju djelovanja.

Kod projektiranih nadvišenja po potrebi treba uzeti u obzir klizanje u vijčanim spojevima.

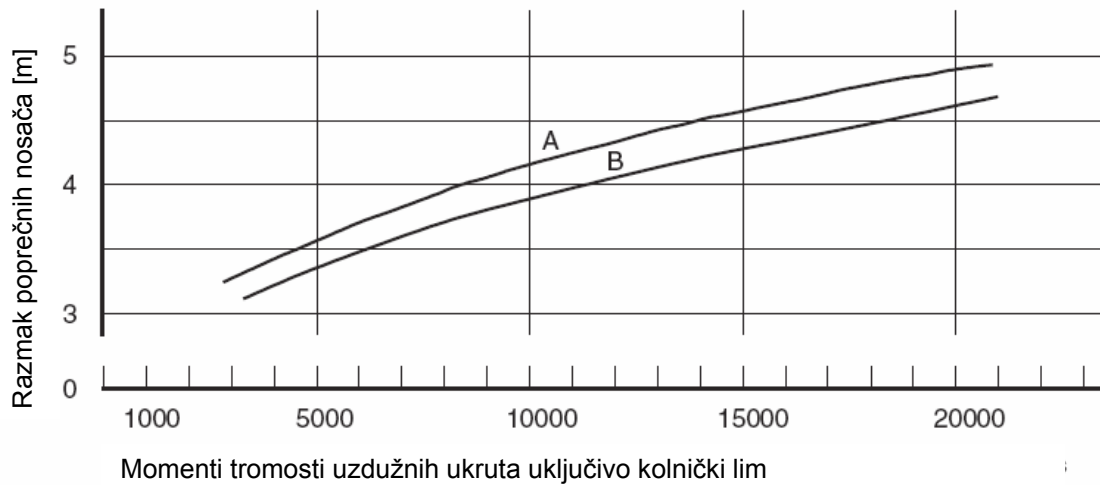
3.4. Deformacije i vibracije

Ograničenje deformacija i vibracija željezničkih mostova definirano je u Prilogu G *DIN-Fachbericht 101* (djelovanja).

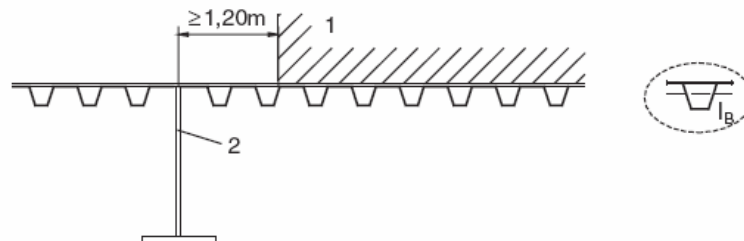
Konkretno ograničenje deformacija cestovnih mostova nije propisano. Po potrebi trebalo bi se definirati u natječajnim podlogama, ako prevelike deformacije nepovoljno utječu na dinamičko ponašanje mosta ili na udobnost korisnika.

Deformacije se tada proračunavaju za *čestu* kombinaciju djelovanja.

Za izbjegavanje pukotina u kolničkim zastorima na čeličnim kolničkim pločama propisuje se minimalna krutost uzdužnih ukruta.



Uvjeti za krivulju A



- 1 Trak za teška vozila
 2 Hrbat glavnog nosača

- Napomena: a) Krivulja A vrijedi za sve ukrute koje ne spadaju pod b)
 b) Krivulja B vrijedi za sve uzdužne ukrute koje se u području traka za teška vozila nalaze na udaljenosti od najviše 1,20 m od glavnog nosača
 c) Slika vrijedi zasve vrste ukruta

Slika 3.1: Minimalne krutosti uzdužnih ukruta

4. GRANIČNA STANJA NOSIVOSTI (GSN)

4.1. Osnove

Za čelične mostove moraju biti provedeni sljedeći dokazi za granična stanja nosivosti (GSN):

- nosivost presjeka (na vlak, tlak, savijanje, poprečnu silu, opterećenje u ravnini hrpta i interakcije tih djelovanja, po potrebi za netto-presjeke)
- nosivost konstrukcijskog elementa (izvijanje, bočno izvijanje, izbočavanje)
- nosivost spojeva
- stabilnost
- statička ravnoteža

Granično stanje zamora razmatra se zasebno.

Parcijalni faktori sigurnosti γ_M definiraju se kako slijedi:

$\gamma_{M0} = 1,0$ kod dokaza sigurnosti prema granici popuštanja (nema problema stabilnosti)

$\gamma_{M1} = 1,1$ kod problema stabilnosti i dokaza sigurnosti prema granici popuštanja za klasu presjeka 4

$\gamma_{M2} = 1,25$ kod dokaza sigurnosti prema čvrstoći

Kod **ortotropnih ploča** naprezanja od lokalnog djelovanja kolničke ploče i globalnog djelovanja sustava (membranska naprezanja) imaju se superponirati. Naprezanja poprečnih nosača moraju se proračunati uz uzimanje u obzir izreza za prolaz uzdužnih ukruta, npr. na modelu Vierendeel-nosača.

Naprezanja od lokalnog savijanja kolničkog lima u pravilu se ne uzimaju u obzir, ako su ispunjeni propisani geometrijski uvjeti.

Imperfekcije se imaju uzeti u obzir kod

- proračuna reznih sila
- dokaza stabilizacijskih elemenata (ukrućenja)
- dimenzioniranja konstrukcijskih dijelova

Kod **proračuna reznih sila** prema teoriji II.reda imperfekcije se uvijek uzimaju u obzir. Oblik imperfekcija uzima se afino vlastitoj formi sustava, koji daje najmanju silu razgraničenja.

Ako je γ_u / γ_{crit} odnos opterećenja, koja dovodi do iscrpljenja granične nosivosti presjeka (bez stabilnosti) prema kritičnoj sili izvijanja, što je za jednostavni tlačni štup N_{pl} / N_{crit} , onda vrijedi

Izraz za relativnu vitkost sustava $\lambda = \sqrt{\gamma_u / \gamma_{crit}}$.

Maksimalna amplituda određena je izrazom:

$$e_{0d} = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{W_{el}}{A} \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2}, \quad \text{za } \bar{\lambda} > 0,2 \quad (1)$$

- α koeficijent imperfekcije za mjerodavnu krivulju izvijanja (vidi Tab. 4.6)

- χ koeficijent redukcije za mjerodavnu krivulju izvijanja, ovisno o presjeku

- W_{el} i A statičke vrijednosti poprečnog presjeka na mjestu mjerodavnom za γ_u

Za $\lambda \leq 0,2$ dokaz stabilnosti nije potrebno provoditi.

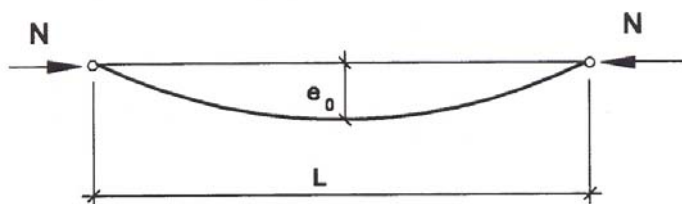
Kod proračuna **stabilizacijskih sustava** za osiguranje postranog stabiliteta nosača ili tlačnih štapova ima se uzeti početna imperfekcija e_0 u obliku luka:

$$e_0 = k_n L / 500$$

$$k_n = 1 / \sqrt{n}$$

L raspon stabiliziranog konstrukcijskog dijela

n broj stabilizirajućih elemenata

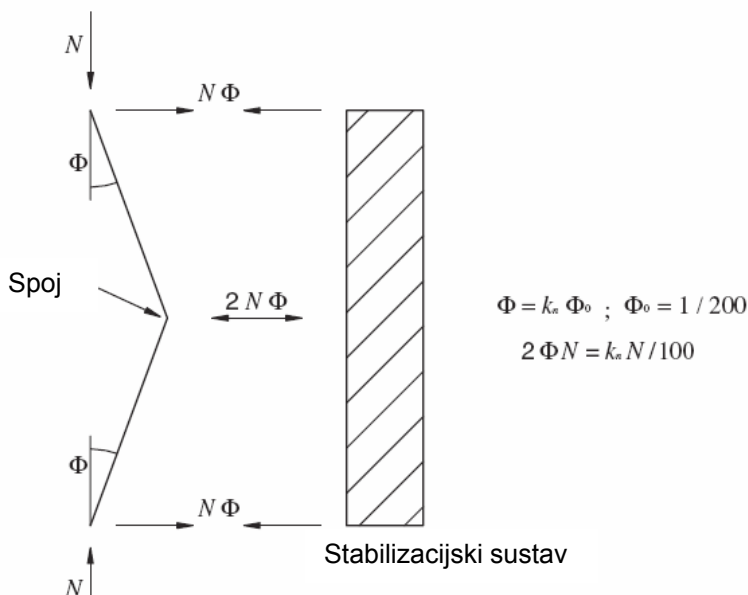


Slika 4.1: Početna imperfekcija lučnog oblika

Uz pretpostavku parabole zakrivljenost iznosi $8e_0/L^2$, a opterećenje samo od imperfekcije $N \times 8e_0/L^2$ (kN/m).

Na spojevima nosača ili tlačno napregnutih konstrukcijskih elemenata stabilizacijski sustav ima preuzeti lokalnu silu veličine $k_n N / 100$ po spoju i prenijeti ju na mjesta oslanjanja.

Kod dokaza imaju se uzeti u obzir i sva vanjska djelovanja na stabilizacijski sustav (npr. vjetar na vjetrovni spreg).



Slika 4.2: Sile na stabilizacijski sustav kod spojeva tlačnih konstrukcijskih dijelova

4.2. Klasifikacija presjeka

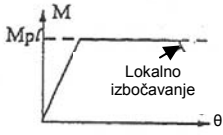
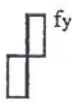
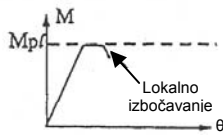
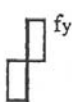
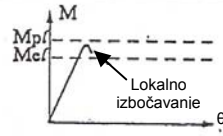
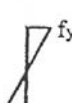
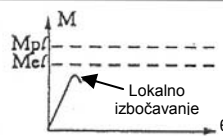
Klasa 1: „Plastični presjeci“ mogu bez pojave nestabilnosti preuzeti potpunu plastifikaciju presjeka uz dovoljni rotacijski kapacitet za plastičnu preraspodjelu reznih sila

Klasa 2: „Kompaktni presjeci“ iskazuju plastične otpornosti presjeka, ali s ograničenim rotacijskim kapacitetom, u pravilu presjeci u polju.

Klasa 3: „Polu-kompaktni presjeci“ dosežu granicu popuštanja kod tlačnih djelovanja u najnepovoljnijim vlaknima presjeka, ali se zbog lokalnog izbočavanja ne mogu iskoristiti plastične rezerve.

Klasa 4: „Vitki presjeci“ su presjeci kod kojih se otpornosti na momente savijanja ili tlak moraju odrediti uz uzimanje u obzir lokalnog izbočavanja, u pravilu u području oslonaca.

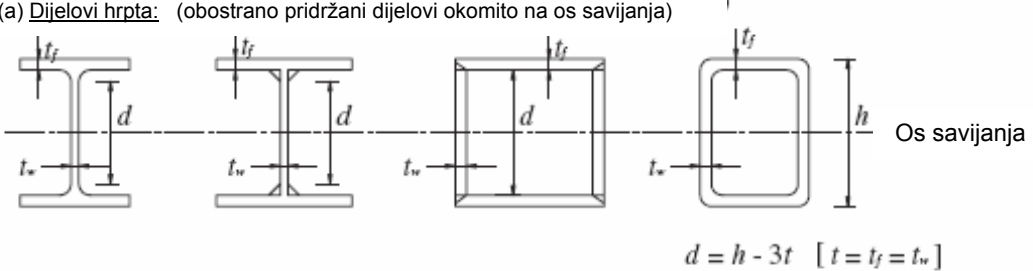
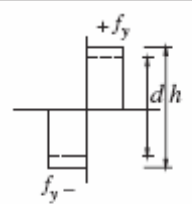
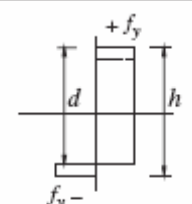
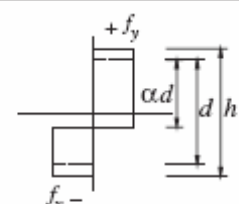
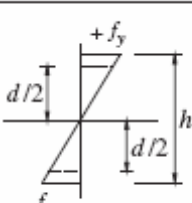
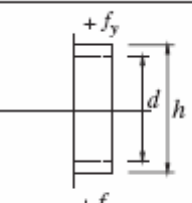
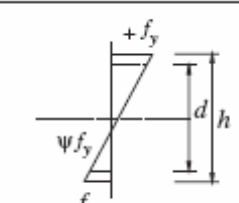
Značajke moment/rotacija – ($M-\Theta$) i raspodjele naprezanja za pojedine klase presjeka prikazana su na sl. 4.

Klasa presjeka	Dijagram $M - \theta$	Raspodjela graničnih naprezanja
1		
2		
3		
4		

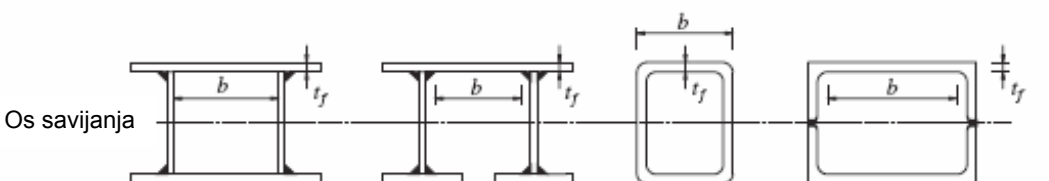
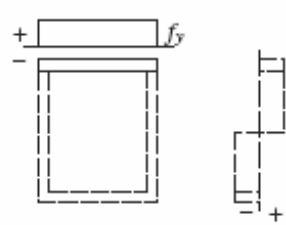
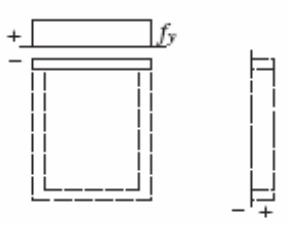
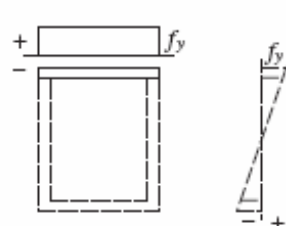
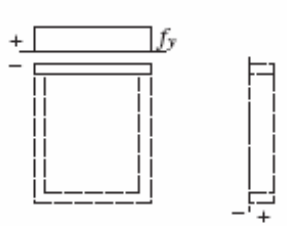
Slika 4.3: Dijagrami moment – rotacija ($M - \theta$) i granična raspodjela naprezanja za presjeke klase 1-4

Klasa pojedinog presjeka u pravilu se odabire prema najnepovoljnijoj klasi tlačno napregnutih dijelova.

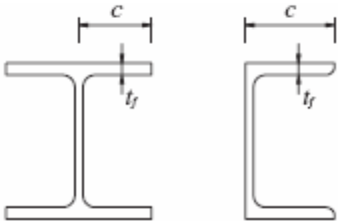
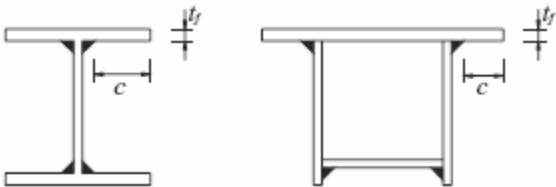
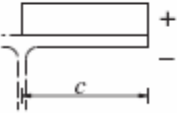
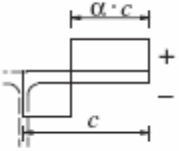
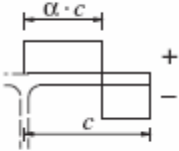
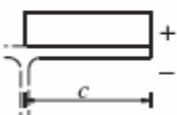
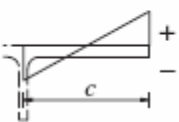
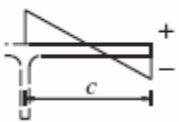
Granični odnosi za klasifikaciju presjeka u klase 1,2 i 3 iskazani su u tab. Tlačno napregnuti dijelovi presjeka koji ne udovoljavaju uvjetima klase 3 pripadaju klasi 4.

(a) <u>Dijelovi hrpta:</u> (obostrano pridržani dijelovi okomito na os savijanja)				
				
Klasa	Hrbat opterećen na savijanje	Hrbat opterećen na tlak	Hrbat opterećen na savijanje i tlak	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
1	$d/t_w \leq 72 \varepsilon$	$d/t_w \leq 33 \varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 396 \varepsilon / (13\alpha - 1)$ für $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 36 \varepsilon / \alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \varepsilon$	$d/t_w \leq 38 \varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 456 \varepsilon / (13\alpha - 1)$ für $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 41,5 \varepsilon / \alpha$	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	$d/t_w \leq 124 \varepsilon$	$d/t_w \leq 42 \varepsilon$	für $\psi > -1$: $d/t_w \leq 42 \varepsilon / (0,67 + 0,33\psi)$ für $\psi < -1$: $d/t_w \leq 62 \varepsilon (1 - \psi)(-\psi)^{0,5}$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355
	ε	1	0,92	0.81

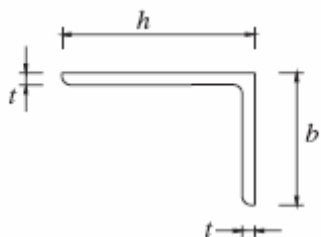
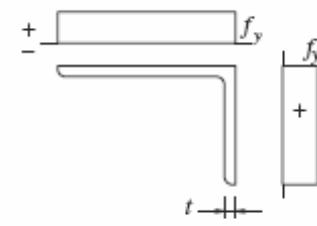
Tablica 4.1: Maksimalne vrijednosti odnosa b/t za tlačne dijelove presjeka

(b) <u>Dijelovi pojasa:</u> (obostrano oslonjeni dijelovi usporedno s osi savijanja)				
				
Klasa	Oblik poprečnog presjeka	Poprečni presjek opterećen na savijanje	Poprečni presjek opterećen na tlak	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
1	Valjani šuplji profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 33 \varepsilon$ $b/t_f \leq 33 \varepsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \varepsilon$ $b/t_f \leq 42 \varepsilon$	
2	Valjani šuplji profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 38 \varepsilon$ $b/t_f \leq 38 \varepsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \varepsilon$ $b/t_f \leq 42 \varepsilon$	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	Valjani šuplji profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \varepsilon$ $b/t_f \leq 42 \varepsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \varepsilon$ $b/t_f \leq 42 \varepsilon$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275
		ε	1	0,92
				355
				0.81

Tablica 4.2: Maksimalne vrijednosti odnosa b/t za tlačne dijelove presjeka

(c) <u>Dijelovi pojasa:</u> (jednostrano oslonjeni dijelovi)				
				
Valjani presjeci		Zavareni presjeci		
Klas	Oblik poprečnog presjeka	Pojas opterećen na tlak	Pojas opterećen na savijanje i tlak	
			Kraj pojasa u tlaku	Kraj pojasa u vlaku
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
1	Valjani Zavareni	$c/t_f \leq 10 \varepsilon$ $c/t_f \leq 9 \varepsilon$	$c/t_f \leq 10 \varepsilon/\alpha$ $c/t_f \leq 9 \varepsilon/\alpha$	$c/t_f \leq 10 \varepsilon/(\alpha^{1,5})$ $c/t_f \leq 9 \varepsilon/(\alpha^{1,5})$
2	Valjani Zavareni	$c/t_f \leq 11 \varepsilon$ $c/t_f \leq 10 \varepsilon$	$c/t_f \leq 11 \varepsilon/\alpha$ $c/t_f \leq 10 \varepsilon/\alpha$	$c/t_f \leq 11 \varepsilon/(\alpha^{1,5})$ $c/t_f \leq 10 \varepsilon/(\alpha^{1,5})$
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	Valjani Zavareni	$c/t_f \leq 15 \varepsilon$ $c/t_f \leq 14 \varepsilon$	$c/t_f \leq 23 \varepsilon k_\sigma^{0,5}$ $c/t_f \leq 21 \varepsilon k_\sigma^{0,5}$ k_σ siehe Kapitel III Tabelle 4.2	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275
		ε	1	0,92
				355
				0,81

Tablica 4.3: Maksimalne vrijednosti odnosa b/t za tlačne dijelove presjeka

(d) <u>Kutnici</u> Vidi i (c) Jednostrano oslonjeni dijelovi pojasa (tabl. 8)				(ne vrijedi za kutnike s kontinuiranom vezom na druge konstrukcijske dijelove)	
Klasa	Presjek opterećen na tlak				
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)					
3	$h/t \leq 15 \varepsilon : (b + h)/(2t) \leq 11,5 \varepsilon$				

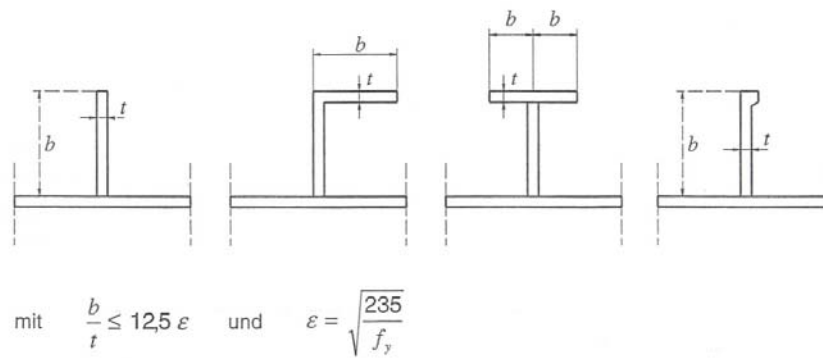
(e) <u>Cijevasti profili</u>					
					
Klasa	Presjek opterećen na savijanje ili/i na tlak				
1	$d/t \leq 50 \varepsilon^2$				
2	$d/t \leq 70 \varepsilon^2$				
3	$d/t \leq 90 \varepsilon^2$				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	
	ε	1	0,92	0,81	
	ε^2	1	0,85	66	

Tablica 4.4: Maksimalne vrijednosti odnosa b/t za tlačne dijelove presjeka

Tlačno napregnuti dijelovi s uzdužnim ukrutama promatraju se kao klasa 4, osim ako se koristi postupak ograničenja naprezanja, što se kod mostova u pravilu provodi.

Pojas povezan s betonskom pločom (spregnuti presjek) pripada klasi 1.

Ukrute moraju zadovoljiti odnos $b/t \leq 12,5 \varepsilon$ $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$



Slika 4.4: b/t odnos za uzdužne ukrute

4.3. Izvijanje

Mjerodavna krivulja izvijanja uzima se prema Tab. 4.5.

Vitkost λ određena je izrazom $\lambda = L/i$, gdje je i radijus tromosti brutto-presjeka, a L duljina izvijanja zamjenskog štapa za odgovarajući smjer izvijanja.

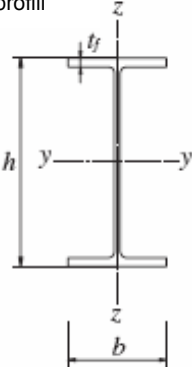
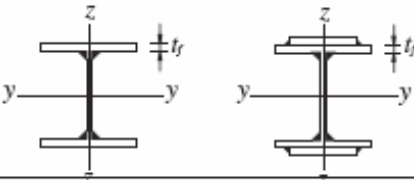
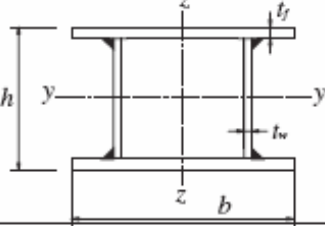
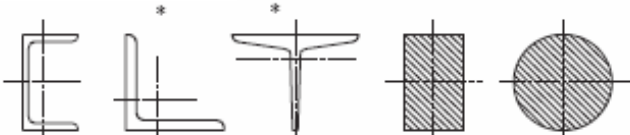
Za čisti tlak računska otpornost tlačno napregnutih konstrukcijskih dijelova na izvijanje iznosi:

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A f_y / \gamma_{M1} \quad (2)$$

$\beta_A = 1$ za presjeke klase 1, 2 i 3

$\beta_A = A_{eff} / A$ za presjeke klase 4

χ koeficijent redukcije za mjerodavni slučaj stabilnosti

Poprečni presjek	Ograničenje	Defo- rmacije okomito na os	Krivulja izvijanja	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Valjani I - profili 	$h/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	a b	a _e a _e
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	b c	a a
	$t_f > 100 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	d d	c c
Zavareni I - profili 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	b c	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	$y - y$ $z - z$	c d	c d
Šuplji profili 	Vruće valjani	sve	a	a
	Hladno oblikovani	sve	b	b
Zavareni sandučasti presjeci 	Općenito, osim za navedeno u slijedećem redu	sve	b	b
	Debeli zavari i: $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	$y - y$ $z - z$	c c	c c
U, L, T i puni presjeci 		sve	c	c

* für Winkel siehe 5.8.3

Napomena: Podrazumijeva se deblina zavara $\geq t$

Tablica 4.5: Krivulje izvijanja ovisno o presjeku

Za konstrukcijske dijelove nepromjenjivog poprečnog presjeka i konstantne tlačne sile vrijedi slijedeći izraz za faktor redukcije χ u ovisnosti od relativnog stupnja vitkosti λ :

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \lambda^2]^{0,5}} \quad (3)$$

Sa $\varphi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$

α = koeficijent imperfekcije

$$\bar{\lambda} = \left[\beta_A A f_y / N_{cr} \right]^{0,5} = (\lambda / \lambda_1) [\beta_A]^{0,5}$$

λ = vitkost za odgovarajući slučaj izvijanja

$$\lambda_1 = \pi \left[E / f_y \right]^{0,5} = 93,9 \varepsilon$$

$$\varepsilon = \left[235 / f_y \right]^{0,5} \text{ gdje je } f_y \text{ u } [N/mm^2]$$

N_{cr} = granična sila (sila razgraničenja) prema teoriji elastičnosti za odgovarajući slučaj izvijanja

Koeficijent imperfekcije α ovisan o krivulji izvijanja uzima se prema tab.

Linija izvijanja	a	b	c	d
Koeficijent imperfekcije α	0,21	0,34	0,49	0,76

Koeficijent imperfekcije α za krivulju izvijanja a_0 iznosi 0,13.

Tablica 4.6: Koeficijenti imperfekcije α

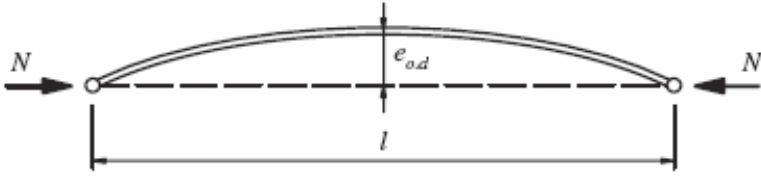
Numeričke vrijednosti faktora redukcije χ iskazane su u Tab. 4.7.

$\bar{\lambda}$	Linija izvijanja			
	a	b	c	d
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
2,0	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

Tablica 4.7: Koeficijent smanjenja χ

Alternativno ovom dokazu stabilnosti na izvijanje dokaz se može provesti po naponskoj teoriji II.reda.

Kod dokaza po teoriji II.reda ima se uzeti zamjenska imperfekcija prema sl. 4.5.

	
Primjenjeni postupak proračuna	Strelica e_{0d}
Elastično	$e_{0d} = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) \frac{W_{el}}{A} \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2}$
Elastično – plastično s linearnom interakcijom	$e_{0d} = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) \frac{W_{pl}}{A} \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2}$

Slika 4.5: Proračun zamjenske imperfekcije e_{0d}

Za duljinu izvijanja L tlačnog konstrukcijskog dijela s postrano pridržanim krajevima smije se uzeti sistemska duljina, što je na strani sigurnosti.

4.4. Bočno izvijanje

4.4.1. Otpornost

Otpornost na bočno izvijanje određuje se uzimajući u obzir mjerodavne kombinacije djelovanja, uvjete oslanjanja i ponašanje materijala ovisno o mjerodavnim imperfekcijama, kao što su početna zakrivljenost, početno krivljenje (sekundarna torzija) i vlastita naprezanja.

Krivljenje presjeka smije se uzeti u obzir.

Ako je tlačni pojas bočno pridržan nije potrebno provesti ovaj dokaz.

Otpornost na bočno izvijanje može se alternativno odrediti preko opterećenja, kod kojeg dolazi do prvog tečenja presjeka pri proračunu po teoriji II.reda s zamjenskom inicijalnom imperfekcijom. Djelomične upetosti odnosno popuštanja oslonaca i deformabilnost presjeka imaju se uzeti u obzir ako djeluju nepovoljno.

Računska otpornost na bočno izvijanje definirana je izrazom:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_W W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} \quad (4)$$

$$\beta_W = 1 \quad \text{za presjeke klase 1 i 2}$$

$$\beta_W = W_{el,y} / W_{pl,y} \quad \text{za presjeke klase 3}$$

$$\beta_W = W_{eff,y} / W_{pl,y} \quad \text{za presjeke klase 4}$$

$W_{eff,y}$ manji efektivni moment otpora oko osi y-y obzirom na težište pojasa

$W_{el,y}$ manji elastični moment otpora oko osi y-y obzirom na težište pojasa

$W_{pl,y}$ plastični moment otpora

χ_{LT} koeficijent redukcije za bočno izvijanje ovisan o relativnom stupnju vitkosti $\bar{\lambda}_{LT}$

Ako je relativan stupanj vitkosti $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ nije potrebno provesti dokaz na bočno izvijanje i smije se koristiti γ_{M0} .

4.4.2. Nepromjenjivi presjek

Za konstrukcijske elemente nepromjenjivog presjeka vrijednost χ_{LT} ovisna o relativnoj vitkosti $\bar{\lambda}_{LT}$, određena je sljedećim izrazima:

$$\chi_{LT} = 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \quad (5)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_{LT} > 0,4 \quad (6)$$

sa

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Vrijednosti za koeficijent imperfekcije α_{LT} za bočno izvijanje iznosi:

$\alpha_{LT} = 0,21$ za valjane profile (krivulja izvijanja *a*)

$\alpha_{LT} = 0,49$ za zavarene profile (krivulja izvijanja *c*)

Relativna vitkost $\bar{\lambda}_{LT}$ definirana je izrazom:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\beta_W W_{pl,y} f_y}{M_{cr}} \right]^{0,5} \quad (7)$$

M_{cr} kritični elastični moment za bočno izvijanje za vrijednosti brutto-presjeka.

4.4.3. Promjenjivi presjek

Kod izračuna M_{cr} ima se uzeti u obzir promjenjivost presjeka. Alternativno se dopušta primjena najmanjeg poprečnog presjeka.

Ovaj postupak smije se koristiti umjesto proračuna po teoriji II.reda, ako se proračun provodi na mjestu najvećeg tlačnog naprezanja.

Ako je najveća vrijednost momenta savijanja M_y na mjestu viljuškastog oslanjanja proračun se smije provesti za presjeka na razmaku $0,2 L$ od tog mjesta. L je razmak između dva susjedna viljuškasta oslanjanja ili razmak od mjesta maksimalnog momenta savijanja i nul-točke. Ako se moment savijanja linearno smanjuje između dva susjedna viljuškasta oslanjanja od M_1 na M_2 , dimenzionira se na moment $0,8 M_1 + 0,2 M_2$, ali ne manji od $0,8 M_1$.

4.4.4. Dokaz tlačnog pojasa kao tlačni štap

Tlačni štapovi rešetki i tlačni pojasi dokazuju se kao tlačnom silom N_{Ed} opterećeni tlačni štapovi na elastičnoj podlozi ili pridržani elastičnim oprugama.

Dokaz se provodi prema 4.4.2 sa:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\frac{\beta_A A_f f_y}{N_{crit}} \right]^{0,5} \quad (8)$$

A_f ... brutto presjek pojasa

$A_{eff,f}$... efektivni presjek pojasa

$$\beta_A = \frac{A_{eff,f}}{A_f}$$

Kod tlačnih pojasa ili donjih pojasa kontinuiranih nosača između nepomičnih oslonaca utjecaji imperfekcija prema teoriji II.redda na pridržavajuće opruge mogu se ujeti u obzir dodatnom bočnom silom F_{Ed} na priključku opruge na pojas, kako slijedi:

$$F_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{100} \quad \text{za } l_k \leq 1,2l \quad (9)$$

$$F_{Ed} = \frac{l}{l_k} \frac{N_{Ed}}{80} \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \quad \text{za } l_k > 1,2l \quad (10)$$

sa

$$l_k = \pi \sqrt{\frac{EI}{N_{cr}}}$$

l razmak između opruga

Ako je tlačna sila N_{Ed} konstantna uzduž pojasa, kritična normalna sila N_{cr} može se procijeniti prema izrazu:

$$N_{cr} = m N_E \quad (11)$$

sa

$$N_E = \pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

$$m = \frac{2}{\pi^2} \sqrt{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{cL^4}{EI}$$

$$c = \frac{C_d}{l}$$

L raspon između nepomičnih oslonaca

l razmak između opruga
 C_d krutost opruge

Ako N_{Ed} nije konstantna uzduž pojasa, koristi se postupak prema 4.4.3 s time da se l zamijeni s l_k .

Ovaj postupak može se rabiti i za tlačne pojase nosača, s time da se A_f zamijeni s $A_f + A_{wc}/3$, gdje je A_{wc} tlačna površina hrpta.

Za donje pojase kontinuiranih nosača sa viljuškastim oslanjanjem na razmaku L prije spominjani koeficijent m može se odrediti kao manja vrijednost sljedećih izraza:

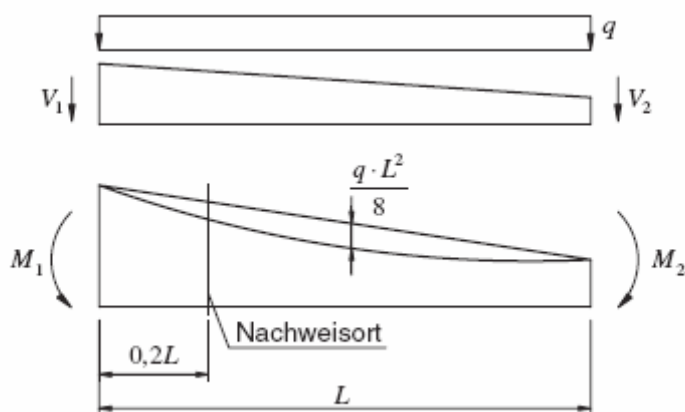
$$m = 1 + 0,44(1 + \mu)\Phi^{1,5} + (3 + 2\Phi)\gamma / (350 - 50\mu) \quad (12)$$

$$m = 1 + 0,44(1 + \mu)\phi^{1,5} + (0,195 + (0,05 + \mu/100)\phi)\gamma^{0,5} \quad (13)$$

gdje je $\mu = V_2 / V_1$ (sl. 4.6)

$\Phi = 2(1 - M_2/M_1) / (1 + \mu)$ za $M_2 > 0$

Izraz vrijedi za dijelove mosta duljine L sa krutim poprečnim ukрутama npr. u području oslonaca, gdje se predznak momenta savijanja ne mijenja. Promjena momenta savijanja između M_1 i M_2 uzima se po paraboli (sl. 4.6)



Slika 4.6: Dio nosača s viljuškastim oslanjanjem i promjenjivim momentom savijanja

Za donji pojas širine b relativna vitkost računa se prema izrazu:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1,1L / b(f_y / (Em))^{0,5} (1 + A_{wc} / (3A_f))^{0,5} \quad (14)$$

Faktor smanjenja χ_{LT} za bočno izvijanje uzima se prema 4.4.2, a dokaz provodi prema 4.4.1.

4.5. Dokazi za savijanje i tlak

Postupak vrijedi ako nema planske torzije.

4.5.1. Izvijanje

Klase 1 i 2

$$\frac{N_{ED}}{\chi_{\min} A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y M_{y,Ed}}{W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Ed}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (15)$$

Gdje je:

$$\begin{aligned} k_y &= 1 - \frac{\mu_y N_{Ed}}{\chi_y A f_y} & k_y &\leq 1,5 \\ \mu_y &= \bar{\lambda}_y (2\beta_{My} - 4) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] & \mu_y &\leq 0,9 \\ k_z &= 1 - \frac{\mu_z N_{Ed}}{\chi_z A f_y} & k_z &\leq 1,5 \\ \mu_z &= \bar{\lambda}_z (2\beta_{Mz} - 4) + \left[\frac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \right] & \mu_z &\leq 0,9 \end{aligned}$$

$\chi_{\min}$ je manja vrijednost od χ_y i χ_z .

Klasa 3

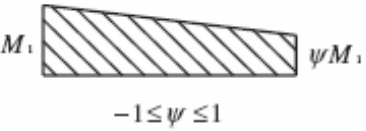
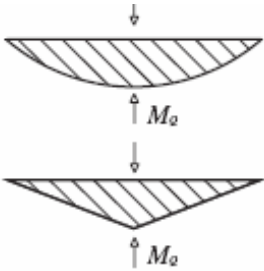
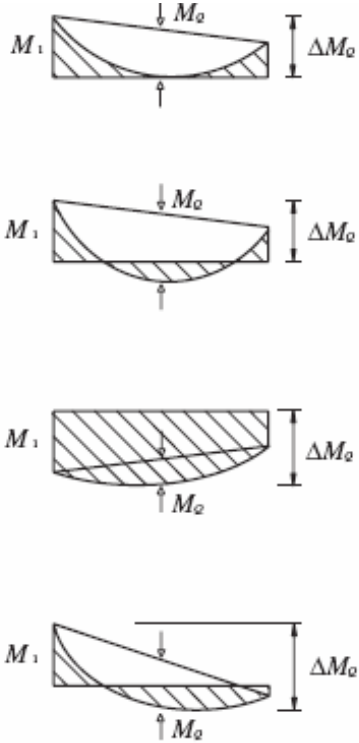
$$\frac{N_{ED}}{\chi_{\min} A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y M_{y,Ed}}{W_{el,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Ed}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (16)$$

Gdje je:

k_y, k_z i $\chi_{\min}$ isto kao u prethodnoj formuli

$$\begin{aligned} \mu_y &= \bar{\lambda}_y (2\beta_{My} - 4) & \mu_y &\leq 0,9 \\ \mu_z &= \bar{\lambda}_z (2\beta_{Mz} - 4) & \mu_z &\leq 0,9 \end{aligned}$$

Koeficijenti momenata β_{My} , β_{Mz} i $\beta_{M,Lt}$ ovise o promjeni momenata savijanja između postranih oslonaca i uzimaju se prema sl.

Oblik momentnog dijagrama	Koeficijenti momenata β_M
Djelovanje koncentriranih momenata na krajevima elementa  $-1 \leq \psi \leq 1$	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Djelovanje kontinuiranog opterećenja ili koncentrirane sile 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Kombinacija momenata na krajevima i kontinuiranog opterećenja ili koncentrirane sile 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi}) M_Q / \Delta M$ $M_Q = \left \max M \right$ Moment samo uslijed poprečnog djelovanja $\left \max M \right$ Momentni dijagram bez promjene predznaka $\Delta M =$ $\left \max M \right + \left \min M \right$ Momentni dijagram sa promjenom predznaka

Slika 4.7: Koeficijenti momenata β_M

4.5.2. Bočno izvijanje

Klase 1 i 2

$$\frac{N_{ED}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Ed}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (17)$$

Gdje je:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{Ed}}{\chi_z A f_y} \quad k_{LT} \leq 1$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0,15 \quad \mu_{LT} \leq 0,9$$

Klasa 3

$$\frac{N_{ED}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_{el,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Ed}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (18)$$

4.6. Rešetke

Otpornost na izvijanje tlačnih štapova određuje se prema 4.3 za čisti tlak i prema 4.5 za tlak i savijanje.

Čvorni limovi imaju se tako dimenzionirati, da se izbjegne lokalno izbočavanje.

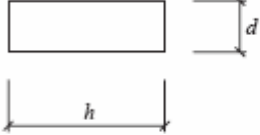
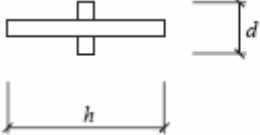
4.7. Lukovi

Vješaljke lukova (lukovi s kolnikom dolje) se kod dokaza granične nosivosti (GSN) uzimaju kao zglobno priključeni na krajevima.

Stupovi lukova (pravi lukovi s kolnikom gore) proračunavaju se na kombinirano naprezanje od tlaka, momenata savijanja u ravnini okomito na ravninu luka i sekundarne momente savijanja u ravnini luka uslijed deformacija mosta.

Ispitivanja u vjetrovnom tunelu pokazuju da se kod određenih izmjera vješaljki lukova s kolnikom dolje ne mogu izbjeći vibracije inducirane djelovanjem vjetra.

Povoljni poprečni presjeci vješaljki prikazani su u Tab. 4.8.

Poprečni presjek vješaljke		Izmjere i odnosi izmjera
Pravokutni presjek		$h/d \geq 4$ und $L/d \leq 600$
Križni presjek		$h/d = 4$
Kružni presjek		$L/d \leq 200$

Tablica 4.8: Izmjere vješaljki

Kod profila s oštrim kutovima stabilnost na vjetar može se poboljšati, ako se stranice zaoble u radiusu $r=0,15 t$, gdje je t debljina lima.

Vijčani priključci imaju veće konstrukcijsko prigušenje od zavarenih priključaka.

Uvijek treba dokazati aerodinamičku stabilnost vješaljke na vibracije uslijed vrtloženja, galopiranja i inducirane kišom i vjetrom.

Kod zavarenih priključaka ima se usvojiti logaritamski dekrement prigušenja 0,0015.

Vješaljke kružnog presjeka, jednako kao i zatege zavješanih mostova mogu titrati uslijed pobude od djelovanja kiše i vjetra.

Protumjere nisu potrebne ako su vlastite frekvencije veće od 7 Hz.

Za vlastite frekvencije vješaljki jednake ili manje od 7 Hz potrebno je dokazati da je prigušenje vješaljki veće od graničnog prigušenja kod kojeg dolazi do oštećenja. Dokaz se provodi eksperimentalno. Ako prigušenje nije dovoljno potrebna je ugradba dinamičkih prigušivača.

5. IZBOČAVANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA SASTAVLJENIH OD LIMOVA

5.1. Uvod

Kod čeličnih mostova vrlo često se koriste tankostijeni pločasti elementi za pojase i hrptove poprečnih presjeka. Za tlačna naprezanja ovakvih konstrukcijskih elemenata postoji opasnost od gubitka stabilnosti uslijed izbočavanja.

Proračun stabilnosti limova protiv izbočavanja provodi se na dva načina:

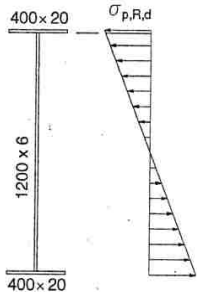
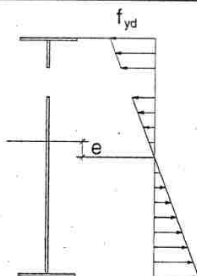
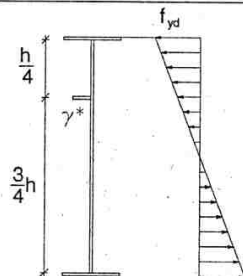
(a) prema *DIN FB-103* sukladno *EN 1993*

- dokaz se provodi na bazi reduciranih presjeka, a ne usporedbom s reduciranim dopuštenim naprezanjima
- uzima se u obzir postkritična rezerva
- potrebno je dodatno provesti dokaze uporabljivosti i sigurnosti na zamor

(b) prema *DIN 18800* (1990)

Iskorištenje postkritične rezerve omogućuje vrlo ekonomično dimenzioniranje za granično stanje nosivosti.

Sljedeća tablica ilustrira gornje na primjeru vitkog punostijenog nosača:

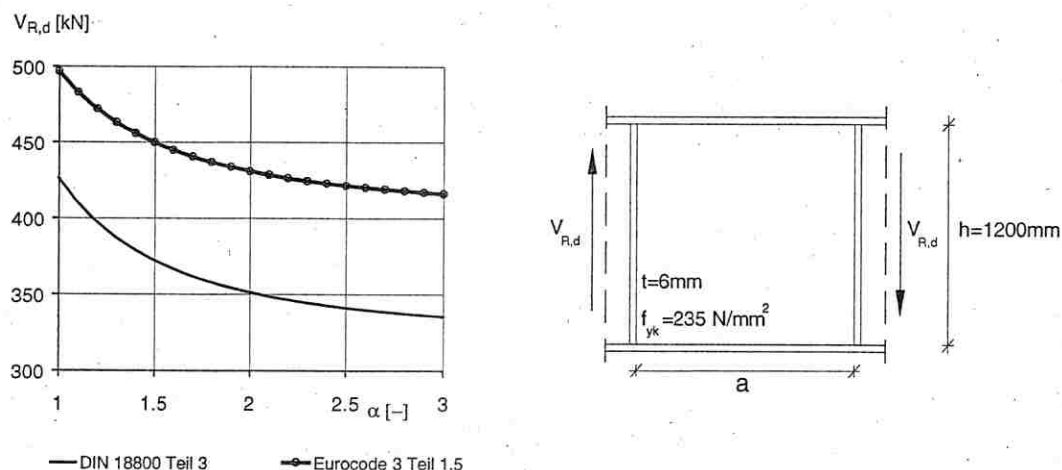
1	2	3
Neukrućen nosač prema Din 18800 Teil 3	Neukrućen nosač prema Din-Fachbericht 103	Ukrućen nosač prema Din 18800 Teil 3
		
$M_{R,d} = 1727 \text{ kNm}$	$M_{R,d} = 2206 \text{ kNm}$	$M_{R,d} = 2348 \text{ kNm}$
78 %	100 %	106 %

Slika 5.1: Nosivost na moment savijanja punostijenog nosača prema *DIN 18800 Teil 3* i prema *DIN-FB 103*

Zbog promjenjivih djelovanja u mostogradnji taj način proračuna ima problem: velike deformacije izbočavanja (preduvjet za realizaciju velikog iskorištenja postkritičnih rezervi) mogu za stanje uporabljivosti izazvati oštećenja uslijed zamora. Za česte promjene opterećenja dolazi do cikličkog ponavljanja izbočavanja hrpta, koje se naziva **disanje hrpta**. Uslijed toga na mjestima upetosti hrptova u poprečna ukrućenja i pojase nastaju sekundarna naprezanja savijanja koja kod određenog broja promjena dovode do pukotina od zamora u priključnim zavarima i prouzrokuju prerano odkazivanje nosača.

Kod primjene postkritičnih rezervi kod mostova i drugih konstrukcija podvrgnutim ne pretežito mirnim djelovanjima, mora se osim statičke granične nosivosti provesti dokaz zamora uslijed disanja hrpta.

Usporedba dimenzioniranja prema *DIN 18800 T.3* (klasični postupak) i *EC 1998-3 T.1-5*, koji je osnova za *DIN FB-103* pokazuje ne samo veću nosivost na savijanje nego i nosivost na posmik, kao što je pokazano na sljedećoj slici:

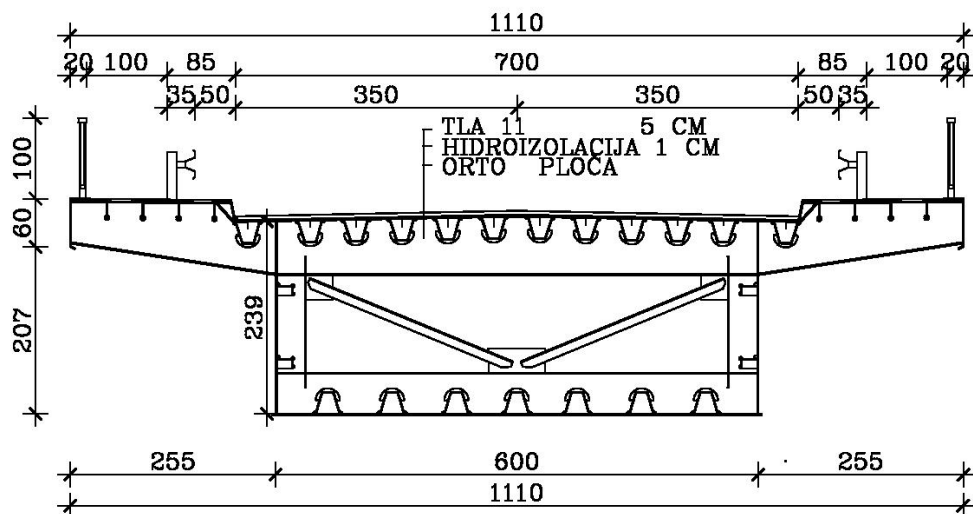


Slika 5.2: Usporedba nosivosti na posmik sukladno DIN 18800 Teil 3 i EC3 T.1.5

UKRUTE

Smanjenje opasnosti od izbočavanja može se ostvariti npr. povećanjem debljine lima ili daleko učinkovitije primjenom ukruta.

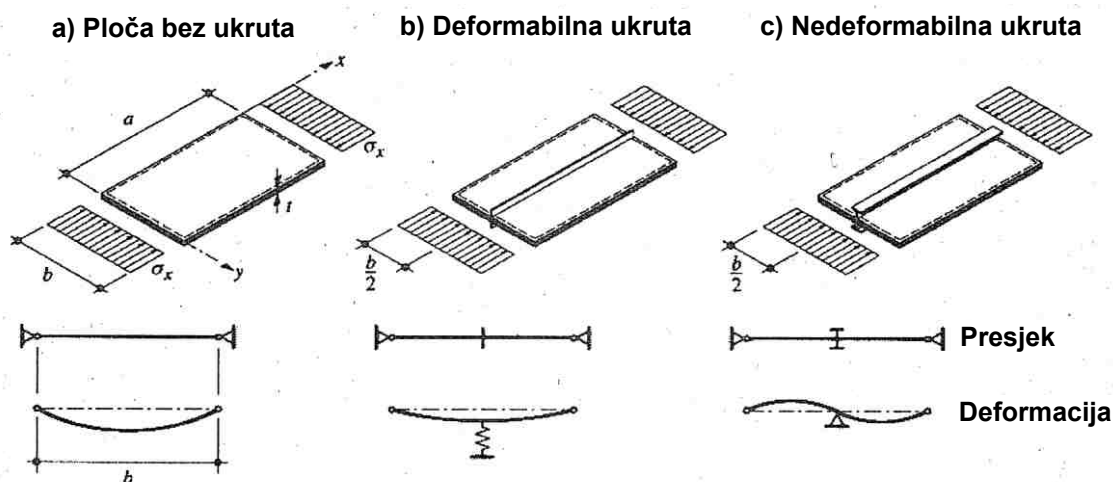
Na sljedećoj slici pokazan je tipični primjer poprečnog presjeka mosta, kod kojeg je donji pojas ukrućen uzdužnim zatvorenim trapeznim rebrima, a hrptovi otvorenim rebrima od kutnika.



Slika 5.3: Poprečni presjek mosta Jasenovac

Nosivost ukrućene ploče najviše ovisi od razmještaja i krutosti ukruta.

Ako ukruta nije dovoljno kruta, deformira se zajedno s pločom. Ukruta u tom slučaju djeluje kao elastični oslonac ploče. Kod dovoljne krutosti ukrute (*minimalna krutost*) ukruta djeluje kao nepomični oslonac; vidi sl. 5.4.



Slika 5.4 Utjecaj jedne ukrute na ponašanje ploče kod izbočavanja

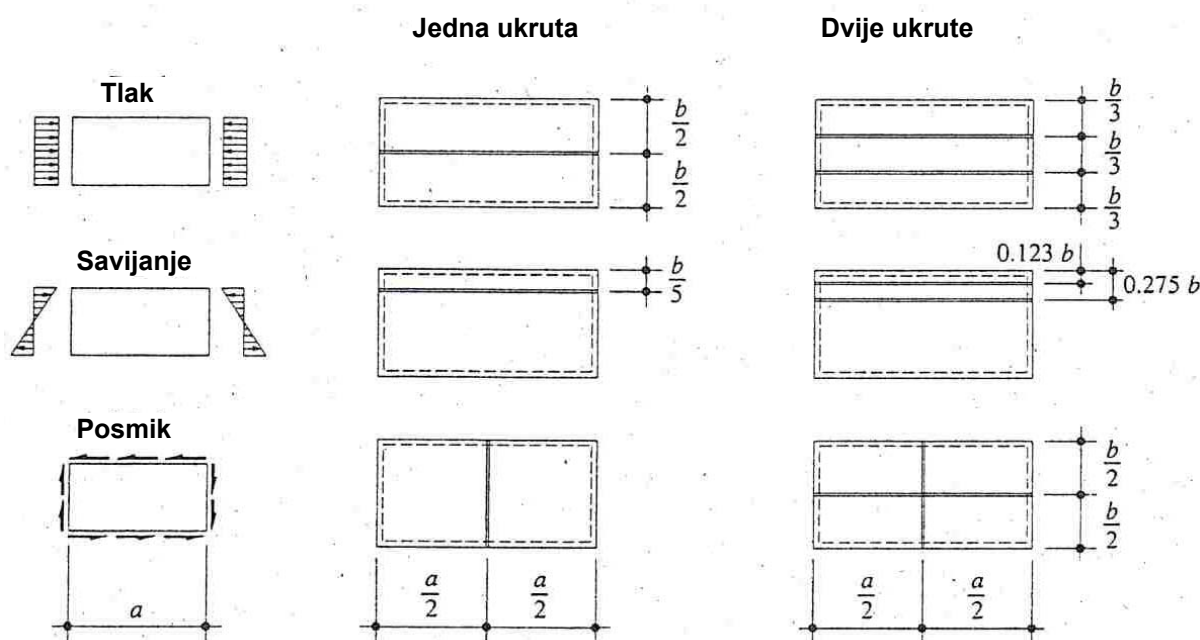
OPTIMALNI RASPORED UKRUTA I MINIMALNA KRUTOST

Minimalna krutost ukrute γ^* (DIN 18800) definira se kao krutost uzdužne ukrute γ_L kod koje se upravo ostvaruje oblik izbočavanja prema sl. 5.5c (čvor na mjestu ukrute), odnosno minimalno potrebna krutost uzdužne ukrute za ostvarenje izbočavanja pojedinačnog polja.

U tom slučaju je nosivost izbočavanja ukrućenog polja jednaka nosivosti izbočavanja pojedinačnog polja. Oblik izbočavanja c) vezan je na veću vrijednost nego oblici a) i b). Maksimalna nosivost jednog polja izbočavanja dobiva se uvijek kada je krutost uzdužne ukrute barem jednaka γ^* i kada je mjerodavno izbočavanje pojedinačnog polja.

Za najbolju učinkovitost uzdužne ukrute treba je postaviti u područje maksimalne deformacije neukrućene ploče u izbočenom stanju.

Optimalni položaj ukruta za tri osnovna slučaja naprezanja ploče slobodno oslonjene na sva četiri ruba prikazan je na sl. 5.5.



Slika 5.5 Optimalni raspored ukruta ovisno o vrsti naprezanja

Sadržana su pravila za projektiranje i proračun konstrukcijskih dijelova, sastavljenih od limova sa ili bez ukruta, kod kojih dolazi do izbočavanja i/ili do nejednake raspodjele naprezanja uslijed posmičnih deformacija (shear-lag).

Ova pravila vrijede za presjeke klasa 3 i 4, naprezane normalnim naprezanjima, kao i punostijene nosače I-presjeka ili sanduke, koji su naprezani normalnim naprezanjima, posmičnim naprezanjima i poprečnim djelovanjima u ravnini lima.

Osnovne definicije:

- **Idealno naprezanje izvijanja (izbočavanja):** Naprezanje u konstrukcijskom dijelu ili polju izbočavanja, kod kojeg je ravnoteža u konstrukcijskom dijelu ili polju izbočavanja prema elastičnoj teoriji za idealne strukture i male deformacije nestabilna
- **Membranska naprezanja:** Naprezanja u srednjoj ravnini ploče ili lima
- **Disanje hrpta:** Više puta ponavljane deformacije izvan ravnine ukrućenog ili neukrućenog polja izbočavanja uslijed promjenjivih naprezanja u ravnini lima
- **Bruto-presjek:** Ukupni presjek konstrukcijskog dijela, ali bez kontinuiranih uzdužnih ukruta, veznih limova ili limova za sastave
- **Djelotvorni presjek (djelotvorna širina):** Bruto-presjek (-širina) reducirana uslijed izbočavanja ploče
- **Sudjelujući presjek (sudjelujuća širina):** Bruto-presjek (-širina) reducirana uslijed neravnomjerne raspodjele naprezanja od posmičnih deformacija (shear-lag)
- **Efektivni presjek (efektivna širina):** Bruto-presjek (-širina) reducirana uslijed zajedničkog djelovanja izbočavanja i posmičnih deformacija, dakle kombinacija djelotvornog presjeka i sudjelujućeg presjeka
- **Punostijeni nosači:** Strukture sastavljene od ravninskih elemenata (ravnih limova) koji mogu biti ukrućeni ili neukrućeni
- **Ukrute:** Ravni limovi ili profili, priključeni na lim, da se spriječi izbočavanje ili da se ukruti unos koncentriranih opterećenja; ukrute se označavaju kao uzdužne ako su paralelne s osi konstrukcijskog dijela, odnosno kao poprečne ako su postavljene poprečno na os konstrukcijskog elementa
- **Ukrućeno polje izbočavanja (ukupno polje, lim):** polje izbočavanja (ukupno polje, lim) s poprečnim i/ili uzdužnim ukrutama
- **Pojedinačno polje:** neukrućeni lim ograničen poprečnim i/ili uzdužnim ukrutama ili pojasevima
- **Sudjelujući dijelovi jednog lima:** sudjelujući dijelovi jednog lima, koji doprinose krutosti ili nosivosti jednog konstrukcijskog dijela (npr. jedne ukrute) povezanog s limom

Simboli:

A	- površina presjeka
I_y	- moment tromosti oko y -osi
I_z	- moment tromosti oko z -osi
W_y	- moment otpornosti oko y -osi
W_z	- moment otpornosti oko z -osi
N	- normalna sila
V	- poprečna sila
M_y	- moment savijanja oko y -osi
M_z	- moment savijanja oko z -osi
E	- modul elastičnosti
G	- modul posmika
F	- sila
f_y	- granica popuštanja (umjesto f_{yk})
f_u	- vlačna čvrstoća (umjesto f_{uk})

- A_{st} - ukupna površina svih ukruta u jednom polju izbočavanja
 A_{st} - bruto-površina jedne poprečne ukrute
 A_{eff} - efektivna (djelotvorna) površina presjeka

 A - duljina ukrućenog ili neukrućenog polja izbočavanja
 B - širina ukrućenog ili neukrućenog polja izbočavanja
 b_w - čisti razmak između varova
 b_{eff} - sudjelujuća širina za uzimanje u obzir elastične posmične deformacije

 F_{Ed} - proračunska vrijednost poprečnog opterećenja u ravnini lima
 f_{yd} - proračunska vrijednost granice popuštanja f_y/γ_{M1} ili f_y/γ_{M0} . Dodatni indeks f odnosno w označava pojas odnosno hrbat
 h_w - čista visina hrpta između pojaseva
 L_{eff} - djelotvorna širina rasprostiranja poprečnog opterećenja u ravnini lima, uz uzimanje u obzir izbočavanja
 $M_{pl,Rd}$ - proračunska vrijednost nosivosti za moment savijanja po teoriji plastičnosti, ako se računa samo s nosivosti pojaseva
 $M_{f,Rd}$ - proračunska vrijednost nosivosti za moment savijanja po teoriji plastičnosti
 M_{Ed} - proračunska vrijednost momenta savijanja
 N_{Ed} - proračunska vrijednost normalne sile
 t - debljina lima
 V_{Ed} - proračunska vrijednost posmične sile od poprečne sile i torzije
 W_{eff} - efektivni (djelotvorni) elastični moment otpornosti
 β - koeficijent redukcije za sudjelujuću širinu uslijed elastične posmične deformacije
 ε $\varepsilon = \sqrt{235 / f_{yk}}$

5.2. Osnovni zahtjevi i postupci

Sudjelujuće širine i djelovanja od izbočavanja ploča imaju se uzeti u obzir ako bitno utječu na granična stanja nosivosti (ULS), uporabivosti (SLS) ili zamora.

Napomena 1: Sudjelujuće širine i izbočavanje ploča utječu na:

- krutost konstrukcijskih elemenata kod statičkog proračuna nosivog sustava
- nosivost presjeka kod dokaza nosivosti, stabilnosti i uporabivosti

Utjecaji ovise o razmatranom graničnom stanju i pripadnoj razini naprezanja i deformacija.

Napomena 2: Dokazi za ispunjenje postavljenih uvjeta mogu se provesti sljedećim postupcima:

- Postupak sa djelotvornim širinama za uzimanje u obzir sudjelujuće širine i izbočavanja ploča uslijed normalnih naprezanja kod provedbe statičkog proračuna štapnih sustava
- Postupak sa djelotvornim širinama za uzimanje u obzir sudjelujuće širine i/ili izbočavanja ploča uslijed normalnih naprezanja kod provedbe dimenzioniranja konstrukcijskih dijelova i to:
 - sudjelujuće širine sa ili bez izbočavanja ploča od normalnih naprezanja
 - izbočavanje neukrućenih polja ili pojedinačnih polja ukrućenih limova uslijed normalnih naprezanja
 - izbočavanje ukrućenih polja uslijed normalnih naprezanja
- Postupak proračuna nosivosti:
 - izbočavanje uslijed posmika
 - lokalno izbočavanje uslijed unosa opterećenja na poprečnom rubu (u ravnini lima)
- Izrazi interakcije za proračun nosivosti konstrukcijskih dijelova kod kombinacije:

- izbočavanja uslijed normalnih naprezanja
 - izbočavanja uslijed posmičnih naprezanja
 - lokalnog izbočavanja uslijed unosa opterećenja na poprečnom rubu
- e) Uvjeti za izbjegavanje izbočavanja hrpta od sudjelovanja pojasa
- f) Zahtjevi na pojedine konstrukcijske dijelove ukrućenih polja
- g) Postupak sa ograničenjem naprezanja (granična naprezanja) za ispunjenje uvjeta klase 3

Za proračun čeličnih mostova u pravilu se koristi postupak sa ograničenjem naprezanja pod g). Kod tog postupka proračun naprezanja se provodi sa cjelovitim djelotvornim presjecima (bez redukcije uslijed djelotvorne širine), ali uzimajući u obzir sudjelujuće širine pod b).

Napomena 1: Postupak s ograničenjem naprezanja pod g) temelji se na von Mises-ovom kriteriju za ograničenje naprezanja na granicu popuštanja. Taj kriterij primjenjuje se na sva polja izbočavanja jednog poprečnog presjeka. Sukladno gornjem postupak implicitno sadrži interakciju reznih sila poprečnog presjeka (npr. N_{ed} , M_{ed} , V_{ed}), čime otpada potreba za posebnim dokazima interakcije prema d).

Napomena 2: Postupak sa ograničenjem naprezanja je u odnosu na postupak s djelotvornim širinama na strani sigurnosti, jer je nosivost jednog poprečnog presjeka ograničena na nosivost „najslabijeg” polja izbočavanja. Za razliku od toga, postupak sa djelotvornim presjecima dopušta da se različite granične nosivosti pojedinih polja izbočavanja jednog poprečnog presjeka zbroje u ukupnu graničnu nosivost tog poprečnog presjeka. Time se dopušta iskorištenje rezervi u presjeku, koje se dobivaju „plastičnom” preraspodjelom unutar tog poprečnog presjeka.

Zbog iskorištenja tih rezervi u presjeku kod postupka s efektivnim presjecima mora se provesti dokaz disanja hrpta, što kod postupka s s graničnim napreznjima nije potrebno.

5.3. Uzimanje u obzir posmičnih deformacija kod dimenzioniranja konstrukcijskih dijelova (sudjelujuće širine)

5.3.1. Općenito

Utjecaj posmičnih u pojasevima smije se zanemariti, ako je ispunjen uvjet $b_0 < L_e/20$. Za jednostrano oslonjene dijelove pojaseva širina pojasa b_0 jednaka je postojećoj širini pojasa, a za dvostrano oslonjene dijelove pojasa b_0 iznosi pola postojeće širine. Duljina L_e dobiva se sa Sl.3.1.

Ako gornji uvjet nije ispunjen, potrebno je za dokaze na razini uporabe (SLS) i zamora uzeti u obzir utjecaj posmičnih deformacija pojaseva, uvođenjem sudjelujuće širine prema toč. 5.3.2.1 i raspodjele naprezanja prema toč. 5.3.2.2. Za dokaze za granično stanje nosivosti (ULS) smiju se koristiti efektivne širine prema toč. 5.3.3.

Elastična naprezanja, koja nastaju uslijed lokalnog unosa opterećenja u ravnini hrpta, kod čega unos u hrbat dolazi preko pojasa, određuju se prema toč. 5.3.2.3.

5.3.2. Sudjelujuće širine za uzimanje u obzir posmičnih deformacija za granično stanje uporabljivosti i zamora

5.3.2.1. Koeficijent redukcije za sudjelujuću širinu

Sudjelujuća širina definira se sljedećim izrazom:

$$b_{eff} = \beta b_0 \quad (19)$$

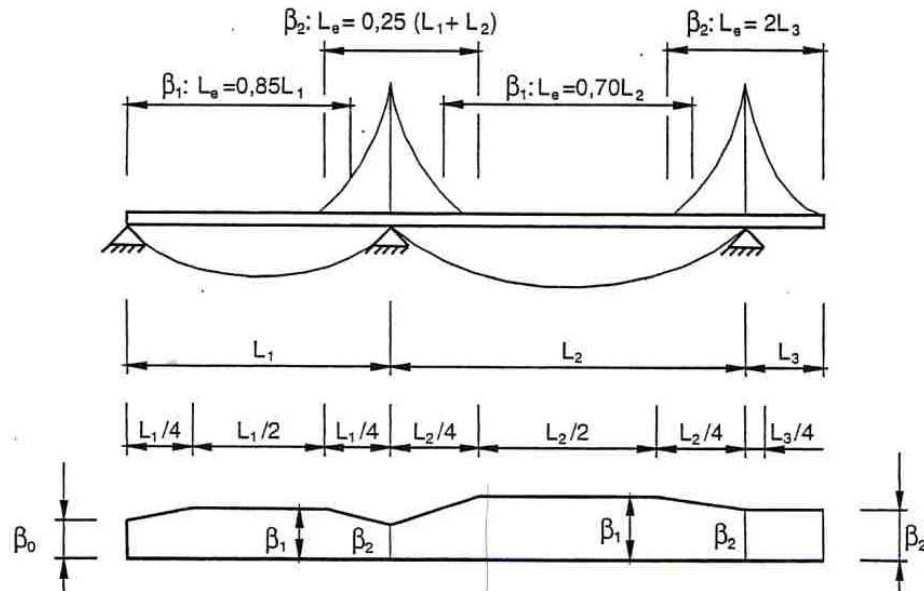
Koeficijent redukcije β definiran je u Tabl. 5.1 sa sljedećim ulaznim vrijednostima za κ :

$$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e, \text{ sa } \alpha_0 = \sqrt{1 + A_{sl}/b_0 t} \quad (20)$$

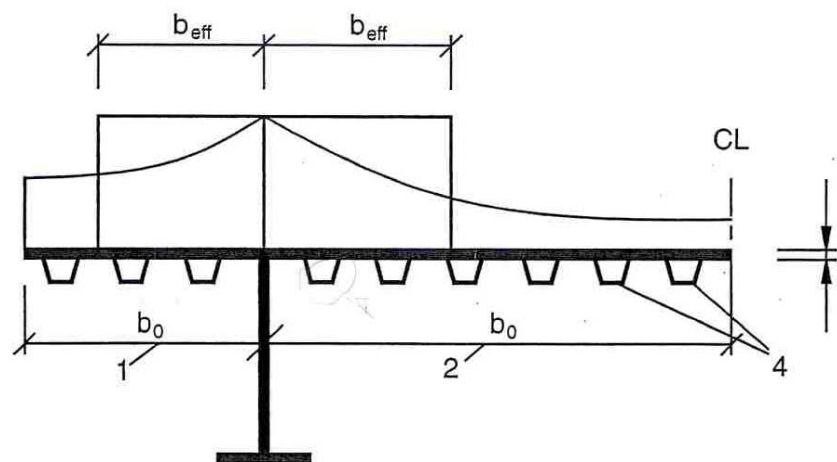
A_{sl} = površina svih ukruta na širini b_0

Ostali simboli iskazani su na sl. 5.6 i sl. 5..

Ako su svi rasponi manji od 1,5-erstrukog susjednog raspona i ako se konzole kraće od polovine susjednog polja, efektivna duljina L_e može se usvojiti prema sl. 5.6. Za ostale slučajeve L_e se izračunava kao udaljenost između nul-točaka momentnog dijagrama.



Slika 5.6: Efektivna duljina L_e za kontinuirane nosače i raspodjela sudjelujuće širine



Slika 5.7: Definicije i oznake za sudjelujuću širinu

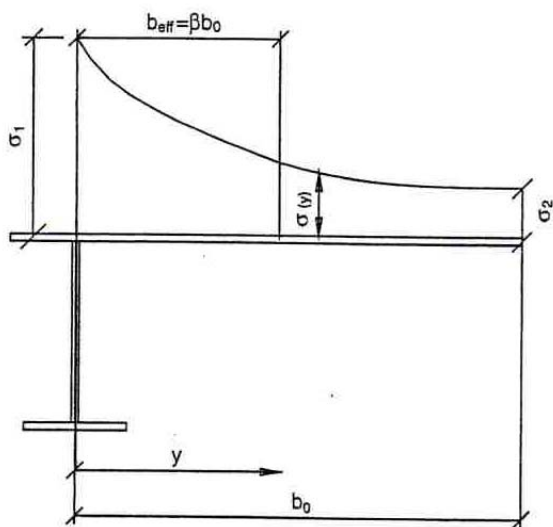
- 1 za jednostrano pridržane pojaseve
- 2 za dvostrano pridržane pojaseve
- 3 debljina hrpta t
- 4 ukrute s $A_{sl} = \sum A_{sli}$

κ	Mjesto dokaza	Vrijednost β
$\leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 - 0,70$	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	Moment na ležaju	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0\left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa}\right) + 1,6\kappa^2}$
$> 0,7$	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	Moment na ležaju	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6\kappa}$
svi κ	Krajnji ležaj	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa)\beta_1$, ali $\beta_0 < \beta_1$
svi κ	Konzola	$\beta = \beta_2$ na ležaju, β_2 na kraju

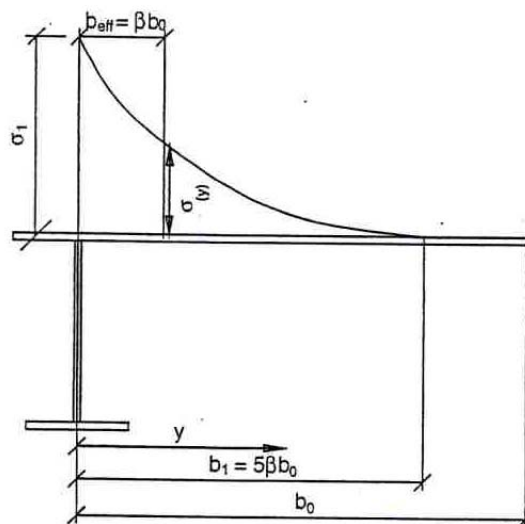
Tablica 5.1: Koeficijent redukcije β za sudjelujuću širinu

5.3.2.2. Raspodjela naprezanja uz uzimanje u obzir posmičnih deformacija hrpta

Raspodjela normalnih naprezanja po širini ploče uz uzimanje u obzir posmičnih deformacija definirana je sl. 5.8.



$$\begin{aligned}
 \beta &> 0,20 \\
 \sigma_2 &= 1,25 (\beta - 0,20) \sigma_1 \\
 \sigma(y) &= \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)(1 - y/b_0)^4
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \beta &< 0,20 \\
 \sigma_2 &= 0 \\
 \sigma(y) &= \sigma_1 (1 - y/b_1)^4
 \end{aligned}$$

Slika 5.8: Raspodjela normalnih naprezanja po širini gornjeg pojasa

5.3.2.3. Unos opterećenja u ravnini lima

Elastična raspodjela naprezanja u neukrućenoj ili ukrućenoj ploči uslijed lokalnog unosa opterećenja u ravnini lima proračunava se, kako slijedi:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Sd}}{b_{eff}(t + a_{st,l})} \quad (21)$$

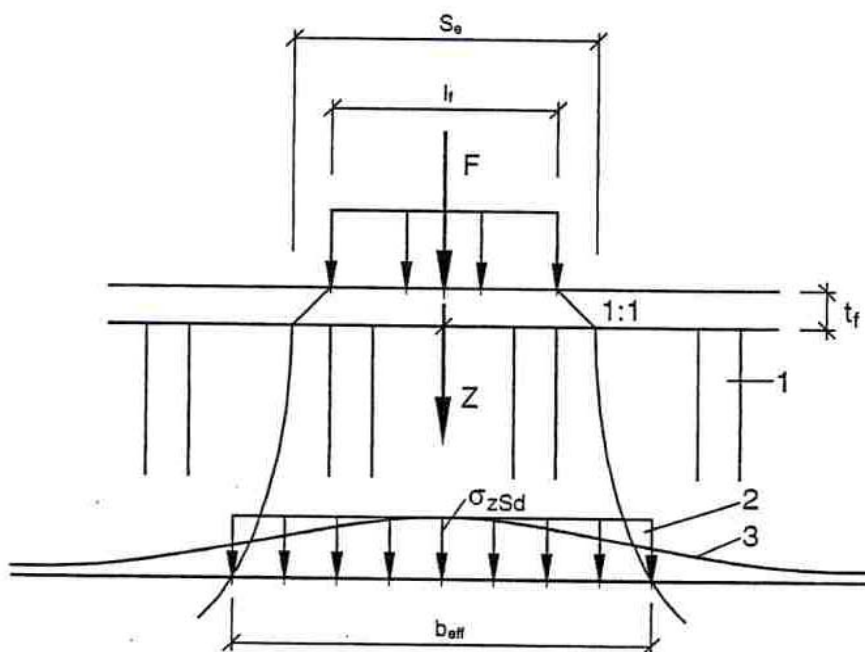
Gdje je

$$b_{eff} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n} \right)^2}$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878 a_{st,l}}{t}}$$

$$s_e = l_f + 2t_f$$

U gornjim izrazima je $a_{st,l}$ bruto-površina ukruta na jedinicu duljine širine, znači ukupna površina ukruta podijeljena s razmakom njihovih težišta.



- 1 ukrute
- 2 pojednostavnjena raspodjela naprezanja
- 3 postojeća raspodjela naprezanja

Slika 5.9: Unos opterećenja u ravnini lima

5.3.3. Sudjelujuće širine za uzimanje u obzir posmičnih deformacija za granično stanje nosivosti (ULS)

Kod dimenzioniranja čeličnih mostova se za granično stanje nosivosti (ULS) u načelu koriste jednake vrijednosti kao za granično stanje uporabljivosti (SLS) i zamora.

5.4. Izbočavanje limova

5.4.1. Normalna naprezanja

5.4.1.1. Neukružena ploča

Elastično kritično naprezanje izbočavanja uslijed *normalnih naprezanja* definirano je izrazom:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} \sigma_E \quad (22)$$

$$\sigma_E = \pi^2 E t^2 / 12 (1 - \nu^2) b^2 = 189800 (t/b)^2 \text{ u [N/mm}^2\text{]} \quad (23)$$

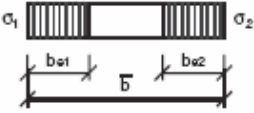
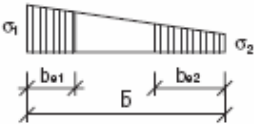
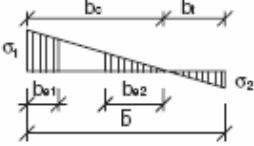
Koeficijent izbočavanja k_{σ} ovisi o rubnim uvjetima lima i odnosu rubnih naprezanja σ_1 i σ_2 .

σ_1 ... najveće tlačno naprezanje

σ_2 ... naprezanje na drugom rubu

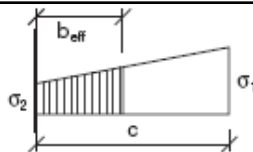
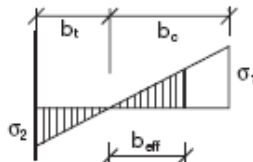
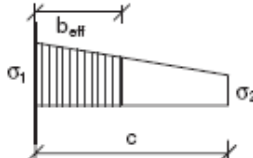
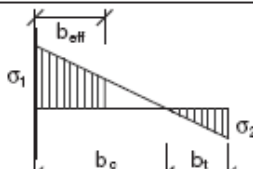
$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$$

Za obostrano slobodno oslonjeni lim koeficijent izbočavanja definiran je sljedećom tablicom;

Raspodjela naprezanja (tlak pozitivan)				Efektivna širina b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,8	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$
Alternativ für $1 \geq \psi \geq -1$:				$k_{\sigma} = \frac{16}{\sqrt{(1 + \psi)^2 + 0,112 (1 - \psi)^2 + (1 + \psi)}}$		

Tablica 5.2: Koeficijent izbočavanja za obostrano slobodno oslonjeni lim

Za jednostrano oslonjeni lim koeficijent izbočavanja definiran je sljedećom tablicom;

Raspodjela naprezanja (tlak pozitivan)		Efektivna širina b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Tablica 5.3: Koeficijent izbočavanja za jednostrano oslonjeni lim

5.4.1.2. Ukručena ploča

Polja limova sa više od 2 uzdužne ukrute, čija se krutost smije razmazati po širini lima, smiju se dokazati kao ekvivalentne ortotropne ploče.

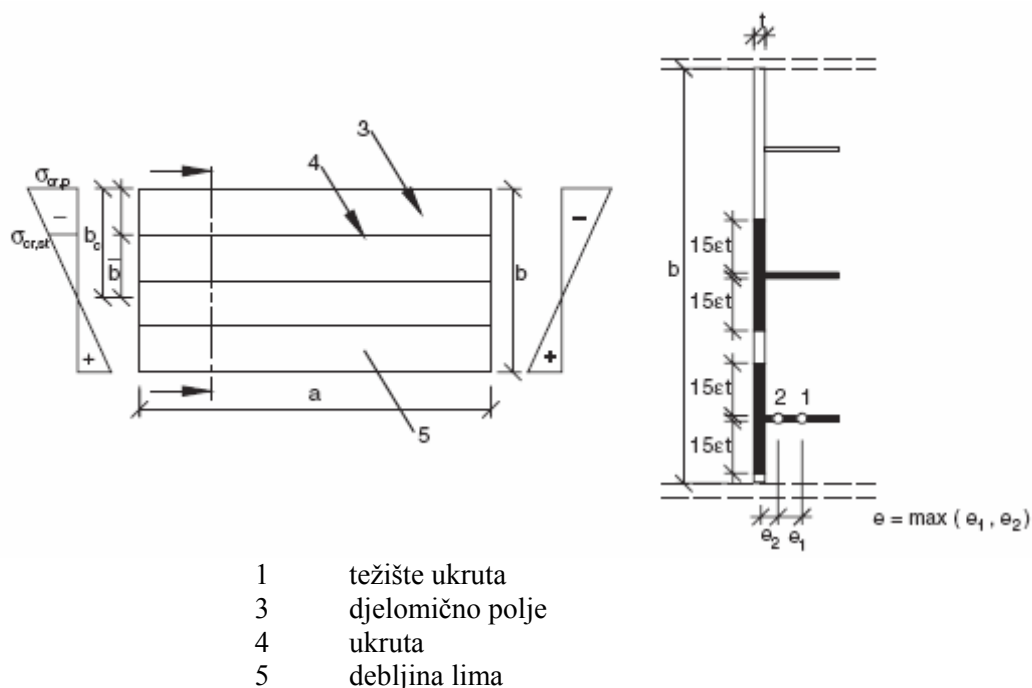
Elastično kritično naprezanje izbočavanja ekvivalentne ortotropne ploče definirano je izrazom:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E \quad (24)$$

$$\sigma_E = \pi^2 E t^2 / 12 (1 - \nu^2) b^2 = 189800 (t/b)^2 \text{ u [N/mm}^2\text{]} \quad (25)$$

k_{σ} koeficijent izbočavanja za ortotropnu ploču s razmazanim ukrutama i bez promatranja izbočavanja pojedinog polja

b, t izmjere prema sljedećoj skici



Slika 5.10: Oznake za uzdužno ukrućene ploče

Napomena 1: Koeficijent izbočavanja $k_{\sigma,p}$ može se ili uzeti iz odgovarajućih tabela ili tablica za razmazane ukrute (npr. Klöppel/Möller) ili proračunati numerički; alternativno se mogu koristiti tabele ili tablice za polja izbočavanja sa diskretnim ukrutama, ako se isključi izbočavanje pojedinačnog polja. To ovisi o odnosu izmjera polja izbočavanja a/b , gdje je a duljina polja izbočavanja između dvije kruto pretpostavljene poprečne ukrute.

Napomena 2: $\sigma_{cr,p}$ je uvijek elastično naprezanje izbočavanja na rubu polja izbočavanja s najvećim tlačnim naprezanjem

Napomena 3: Kod dokaza hrpta kao širina b uzima se visina hrpta h_w .

5.4.1.3. Ponašanje slično izvijanju

5.4.1.3.1. Idealno naprezanje izvijanja

Idealno naprezanje izvijanja $\sigma_{cr,c}$ neukrućene ploče ili ukrućene ploče je naprezanje izvijanja dobijeno za slobodne rubove.

Idealno naprezanje izvijanja neukrućene ploče definirano je izrazom:

$$\sigma_{cr,c} = \pi^2 E t^2 / 12 (1 - \nu^2) a^2 \quad (26)$$

a duljina polja izbočavanja u smjeru uzdužnih naprezanja

Idealno naprezanje izvijanja ukrućene ploče $\sigma_{cr,c}$ dobiva se pomoću naprezanja izvijanja $\sigma_{cr,st}$, koje se određuje na mjestu ukrute na najviše opterećenom tlačnom rubu:

$$\sigma_{cr,st} = \pi^2 E I_{x,st} / A_{st} a^2 \quad (27)$$

$I_{x,st}$ moment tromosti ukrute kao zamjenskog štapa na izvijanog okomito na ravninu lima

A_{st} bruto površina zamjenskog štapa

Kod toga se presjek zamjenskog štapa od ukrute i efektivne širine lima.

Alternativno se vrijednost $\sigma_{cr,c}$ može dobiti izrazom $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,st} b_c / b$, pri čemu $\sigma_{cr,c}$ vrijedi za tlačni rub ploče (npr. korištenjem Klöppel-ovih tabela), b je širina lima a b_c širina tlačno napreznog dijela lima.

Relativna vitkost λ_c izvijanog štapa je:

$$\lambda_c = \sqrt{(f_Y / \sigma_{cr,c})} \quad \text{kod neukrućenih limova} \quad (28)$$

$$\lambda_c = \sqrt{(\beta_{A,C} f_Y / \sigma_{cr,c})} \quad \text{kod ukrućenih limova} \quad (29)$$

$$\beta_{A,C} = A_{eff,c} / A_c \quad (30)$$

A_c brutto-površina tlačne zone polja lima

$A_{eff,c}$ djelotvorna površina jednake brutto-površine uzimajući u obzir izbočavanje pojedinačnog polja lima i ukruta

Faktor smanjenja χ_c određuje se prema poglavlju o izvijanju.

Koeficijent imperfekcije α_0 za neukrućena polja limova ima odgovarati krivulji izvijanja a .

Koeficijent imperfekcije α_0 za ukrućena polja limova zbog uzimanja u obzir većih imperfekcija zavarenih ploča zamjenjuje se s povećanom vrijednosti:

$$\alpha_e = \alpha_0 + 0,09 / (i/e) \quad (31)$$

$$i = \sqrt{I_{x,st} / A_{st}} \quad (32)$$

$e = \max(e_1, e_2)$ veći od oba razmaka prema Sl. III-A.1 (ili razmak težišta jedne ukrute do težišta ukrućenog polja lima ili razmak težišta ukrućenog polja lima do srednje ravnine lima)

$\alpha_0 = 0,34$ (krivulja b) za šuplje (zatvorene) presjeke ukruta
0,49 (krivulja c) za otvorene presjeke ukruta

5.4.1.3.2. Interakcija između izbočavanja lima i izbočavanja sličnog izvijanju tlačnog štapa

Konačni koeficijent redukcije ρ_c dobija se kao funkcija ρ i χ_c interakcijskim izrazom:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (33)$$

$$\xi = (\sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c}) - 1 \quad (34)$$

$\sigma_{cr,c}$ idealno napreznje izbočavanja ploče

$\sigma_{cr,c}$ idealno napreznje izvijanja

Parametar ξ kreće se u rasponu $0 \leq \xi \leq 1$.

5.4.1.4. Dokaz

Dokaz konstrukcijskog dijela za uzdužna napreznja pomoću djelotvornih širina glasi:

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff}} \leq 1,0 \quad (35)$$

$\gamma_{M1} \quad \gamma_{M1} \quad \gamma_{M1}$

A_{eff} djelotvorna površina presjeka

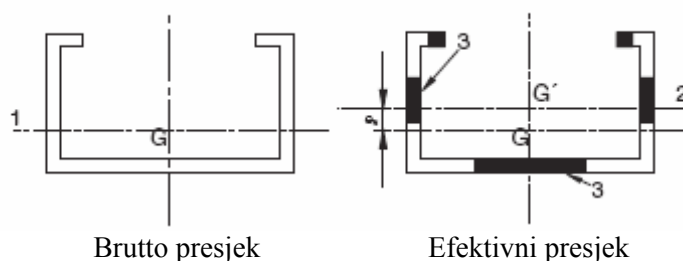
e_N pomak neutralne osi

M_{Ed} proračunska vrijednost momenta savijanja

N_{Ed} proračunska vrijednost normalne sile

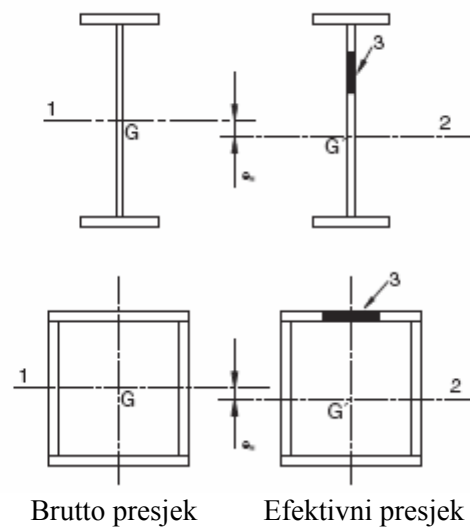
W_{eff} djelotvorni moment otpora

Djelotvorna površina presjeka A_{eff} proračunava se uz pretpostavku samo tlačnih naprezanja od normalne sile N_{Ed} . Kod nesimetričnih presjeka pomak težišne linije e_N djelotvorne površine presjeka A_{eff} u odnosu na težišnu os bruto presjeka izaziva dodatni moment savijanja (vidi Sl. 5.11), koji se mora uzeti u obzir. Djelotvorni moment otpora W_{eff} proračunava se uz pretpostavku samo normalnih naprezanja od savijanja od momenta savijanja M_{Ed} (vidi Sl. 5.12).



G	težišna os bruto-presjeka
G'	težišna os efektivnog presjeka
1	težišna os bruto-presjeka
2	težišna os efektivnog presjeka
3	isključena površina

Slika 5.11: Djelovanje normalne sile kod presjeka klase 4



- | | |
|------|--------------------------------|
| G | težišna os bruto-presjeka |
| G' | težišna os efektivnog presjeka |
| I | težišna os bruto-presjeka |
| I' | težišna os efektivnog presjeka |
| 3 | isključena površina |

Slika 5.12: Djelovanje momenta savijanja kod presjeka klase 4

5.4.2. Posmična naprezanja

5.4.2.1. Elastično kritično naprezanje izbočavanja

Elastično kritično naprezanje izbočavanja uslijed *posmičnih naprezanja* definirano je izrazom:

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \sigma_E \quad (36)$$

a ... duljina lima (razmak poprečnih ukruta)

b ... visina lima

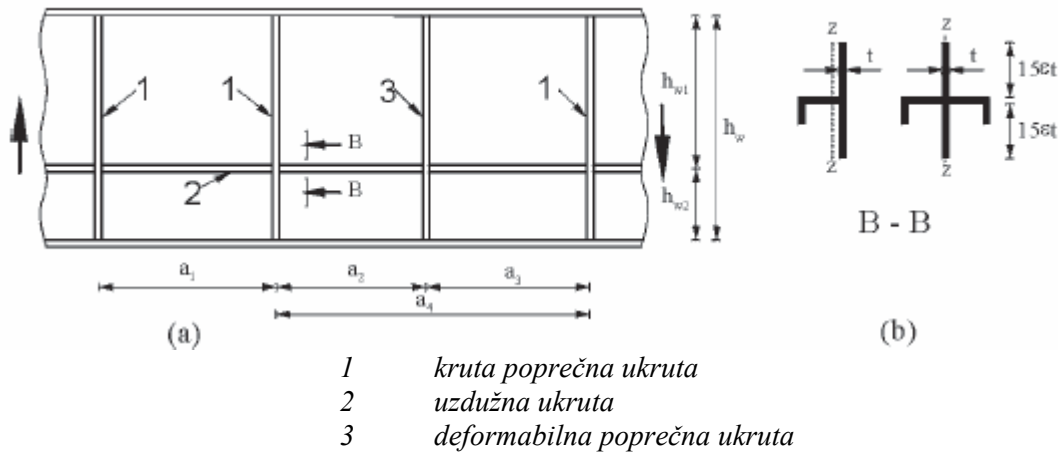
$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 (b/a)^2 + k_{tst} \quad \text{za } a/b \geq 1 \quad (37)$$

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 (b/a)^2 + k_{tst} \quad \text{za } a/b < 1 \quad (38)$$

$$k_{tst} = 9 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{st}}{t^3 b} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{st}}{b}} \quad (39)$$

a razmak poprečnih ukruta

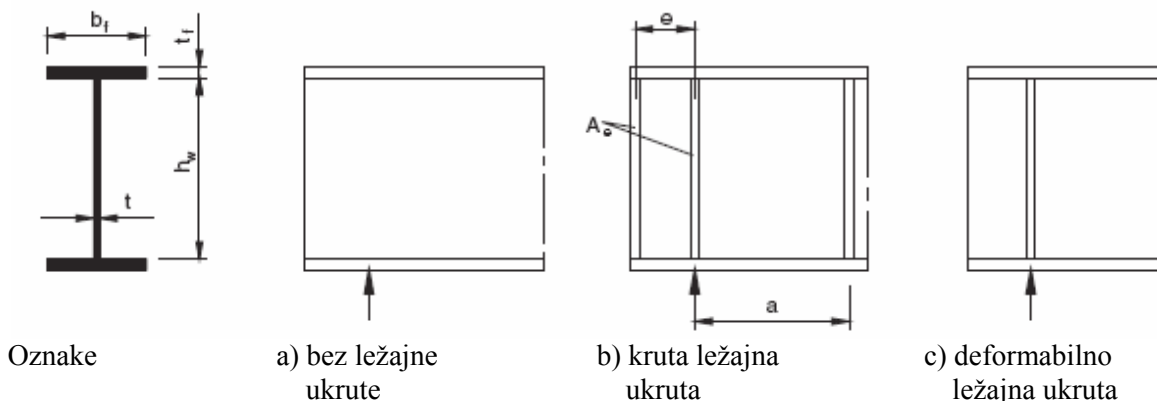
I_{st} ... moment tromosti jedne uzdužne ukrute oko z-osi (vidi Sl. 5.13 (b)). Kod hrptova sa dvije ili više ukruta I_{st} je suma krutosti svih pojedinačnih ukruta, kod čega ne moraju biti ravnomjerno raspoređene.



Slika 5.13: Hrnat sa poprečnim i uzdužnim ukrutama

5.4.2.2. Izbočavanje uslijed posmika

Za neukrčena polja limova s odnosom $h_w/t > 72 \varepsilon$ i za ukrčena polja limova s odnosom $h_w/t > 31 \varepsilon \sqrt{k_{\tau}}$ ima se provesti dokaz na izbočavanje uslijed posmika i ugraditi poprečne ukrute nad ležajevima.



Slika 5.14: Kriteriji za poprečne ukrute nad krajnjim ležajevima

Kod hrptova s poprečnim ukrutama samo nad osloncima i kod hrptova koji su poprečno i/ili uzdužno ukruženi, faktor χ_w za doprinos hrpta preuzimanju (nosivosti) posmika uzima se prema Tab 5.4

	Krute ukrute	Deformabilne ukrute
$\bar{\lambda}_w < 0,83$	1,00	1,00
$0,83 \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

Tablica 5.4: Doprinos hrpta χ_w nosivosti na posmik

Tri moguća slučaja:

- (a) nema poprečnih ukruta nad osloncima. Vidi 6.1 (2) tip c)
- (b) krute poprečne ukrute nad osloncima. Ovaj slučaj vrijedi i za unutarnja polja izvan polja kod krajnjih oslonaca i za polja kod srednjih oslonaca, vidi 5.4.6.3.1
- (c) deformabilne poprečne ukrute nad osloncima, vidi 5.4.6.3.2

Vitkost $\bar{\lambda}_w$ određena je izrazom:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{f_{yw} / \tau_{cr}} \quad (40)$$

Kod hrptova sa poprečnim ukrutama samo nad osloncima vitkost $\bar{\lambda}_w$ određuje se izrazom:

$$\bar{\lambda}_w = h_w / (84,4 t \varepsilon) \quad (41)$$

Kod hrptova sa poprečnim ukrutama nad osloncima i dodatnim poprečnim i/ili uzdužnim ukrutama vitkost λ_w određuje se izrazom:

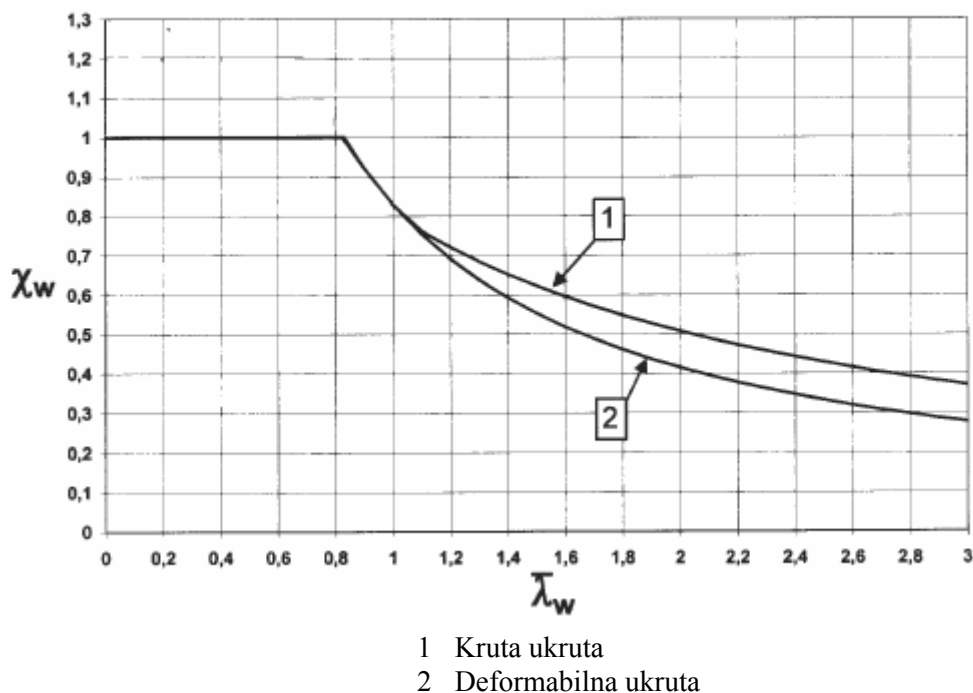
$$\bar{\lambda}_w = h_w / (37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}) \quad (42)$$

k_τ najmanja vrijednost izbočavanja od posmika polja hrpta. Kod krutih pojaseva i krutih poprečnih ukruta (vidi 5.4.6.2.1) mogu se pretpostaviti kruto oslonjeni rubovi. U tom slučaju su polja izbočavanja polja između dvije poprečne ukrute (npr. $a_1 \times b$ na Sl. 5.14).

Ako se koriste i krute i deformabilne poprečne ukrute mora se provjeriti najmanji k_τ i za polja hrpta između svih ukruta (npr. $a_2 \times h_w$ i $a_3 \times h_w$) i za polje hrpta između samo krutih ukruta u kojem se nalaze i deformabilne poprečne ukrute (npr. $a_4 \times h_w$).

Moment tromosti ukruta kod proračuna k_{τ} ima se smanjiti na 1/3 stvarne vrijednosti. Ta redukcija je već uključena u izraze (36) - (39) str. 42.

Napomena: Ova redukcija potrebna je samo kod velikih vitkosti $\lambda_w > 1,3$. Kod $\lambda_w < 0,83$ smije se računati s punom efikasnosti ukruta. Među-vrijednosti smiju se interpolirati, što zahtijeva iterativni proračun. U izrazima (36) – (39) deformabilne poprečne ukrute unutar polja izbočavanja nisu uzete u obzir.



Slika 5.15: Doprinos hrpta χ_w nosivosti na posmik

Kod hrptova s uzdužnim ukrutama vitkost λ_w ne smije se uzeti u račun s manjom vrijednosti od:

$$\lambda_w = h_{wi} / (37,4 t \varepsilon \sqrt{k_{\tau i}}) \quad (43)$$

h_{wi} i $k_{\tau i}$ se računaju za pojedinačno polje sa najvećom vitkosti λ_w . Obično je mjerodavno najveće pojedinačno polje (npr. $a_I \times h_{wi}$ na Sl. 5.13).

Za izračun $k_{\tau i}$ uzima se izraz (36) s $k_{tst} = 0$.

Dokaz nosivosti provodi se prema izrazu:

$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w f_{yw} / (\gamma_{M1} \sqrt{3})} = \frac{V_{Ed}}{b t \chi_w f_{yw} / (\gamma_{M1} \sqrt{3})} \leq 1,0 \quad (44)$$

b širina polja izbočavanja (za hrbat sa razmakom između pojaseva h_w vrijedi $b = h_w$;

t debljina lima

V_{Ed} proračunska vrijednost posmične sile od poprečne sile i torzije

χ_w faktor za doprinos hrpta nosivosti na posmik

5.4.3. Nosivost za poprečno opterećenje

Nosivost hrpta za poprečna opterećenja, koji preko pojaseva djeluju na uzdužnim rubovima hrpta proračunava se za valjane i zavarene nosače, kako slijedi, uz pretpostavku da su pojasevi svojom poprečnom krutosti ili ugradbom spregova pridržani u poprečnom smjeru.

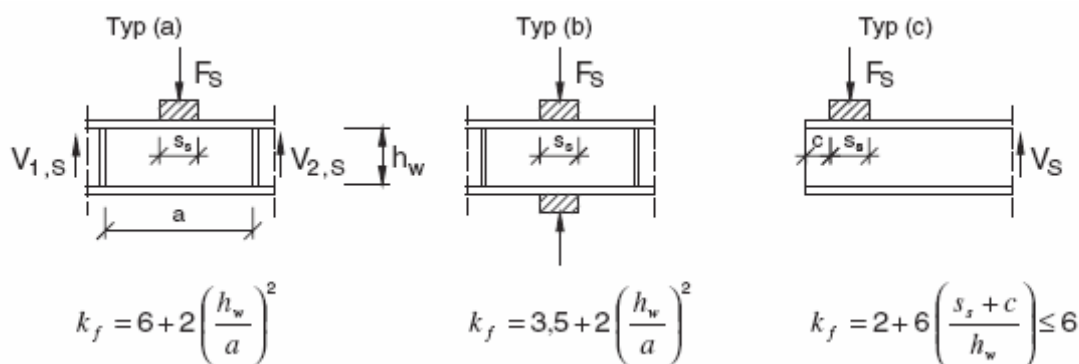
Razlikuju se 3 vrste unosa opterećenja:

- opterećenja, koja se unose jednostrano preko jednog pojasa i u ravnoteži su s poprečnim silama u hrptu, vidi Sl. 5.16 (tip a);
- opterećenja, koja se unose preko oba pojasa i u ravnoteži su sama sa sobom, vidi Sl. 5.16 (tip b);
- opterećenja, koja se unose u blizini kraja nosača bez poprečnih ukruta i u ravnoteži su s poprečnom silom u hrptu, vidi Sl. 5.16 (tip c).

Napomena: Tip unosa opterećenja c) dopušta izračun nosivosti hrpta na ležajevima bez ležajnih ukruta.

Kod sandučastih nosača sa nagnutim hrptovima mora se dokazati nosivost hrptova i pojaseva. Mjerodavne unutarnje sile su komponente vanjskog opterećenja u ravnini hrptova i ravnini pojaseva.

Dodatno se mora provjeriti utjecaj poprečnog opterećenja na nosivost na savijanje konstrukcijskog dijela, vidi 5.4.4.



Slika 5.16: Koeficijenti izbočavanja za različite unose opterećenja

Proračunska vrijednost nosivosti neukrućenog ili ukrućenog hrpta za izbočavanje uslijed poprečnog opterećenja određeno je izrazom:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (45)$$

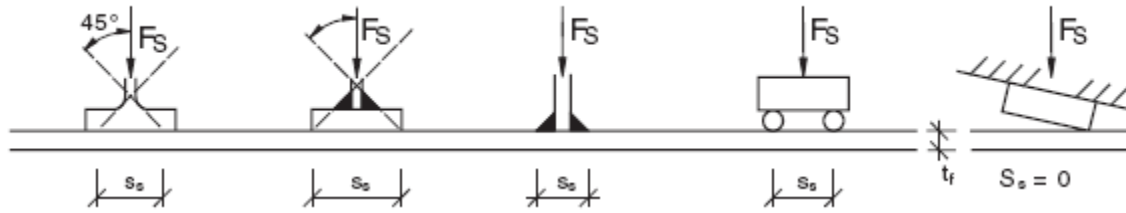
L_{eff} djelotvorna širina rasprostiranja opterećenja uzimajući u obzir izbočavanje hrpta od poprečnog opterećenja

t_w debljina hrpta

f_{yw} granica popuštanja hrpta

$$L_{eff} = \chi_F l_y \quad (46)$$

l_y djelotvorna širina rasprostiranja bez utjecaja izbočavanja hrpta, ovisna o širini naližeganja s_s , koja treba biti manja od h_w (vidi Sl. 5.17: Širina naližeganja).



Slika 5.17: Širina naližeganja

Faktor redukcije χ_F računa se prema izrazima:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (47)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (48)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_f E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (49)$$

Faktor k_f uzima se prema Sl. 5.16.

Kod hrptova sa uzdužnim ukrutama kod kojih je odnos b_1/a ograničen na $0,05 \leq b_1/a \leq 0,3$ s poprečnim opterećenjem tip a) k_f je određen izrazom:

$$k_f = 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 + \left[5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \sqrt{\gamma_s} \quad (50)$$

b_1 je širina opterećenog pojedinačnog polja jednaka čistom razmaku između opterećenog pojasa i prve ukrute i

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{st}}{h_w t_w^3} \leq 14 \left[\frac{a}{h_w} \right]^{2,9} + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{h} \right] \quad (51)$$

Djelotvorna širina rasprostiranja bez utjecaja izbočavanja hrpta l_y određuje se pomoću parametara m_1 i m_2 .

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} b_w} \quad (52)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{za } \bar{\lambda}_F > 0,5; \text{ inače } m_2 = 0 \quad (53)$$

Kod sandučastih nosača se b_f na svakoj strain hrpta ograničava na $15 \varepsilon t_f$.

Za tip a) i tip b) l_y je određen izrazom:

$$l_{y1} = s_s + 2t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \leq a \quad (54)$$

uz uvjet da l_y nije veći od razmaka poprečnih ukruta a .

Za slučaj c) za l_y uzima sa najmanja vrijednost od l_{y1} , l_{y2} i l_{y3} .

$$l_e = \frac{k_f E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (55)$$

$$l_{y2} = l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2} + m_2 \quad (56)$$

$$l_{y3} = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (57)$$

Dokaz se provodi, kako slijedi:

$$\eta_2 = \frac{\frac{\sigma_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} = \frac{\frac{F_{Ed}}{\gamma_{M1}}}{\frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}} \quad (58)$$

F_{Ed} proračunska vrijednost poprečnog opterećenja

L_{eff} djelotvorna širina rasprostiranja uzimajući u obzir izbočavanje hrpta od poprečnog opterećenja

t_w debljina hrpta

Tlačna naprezanja su pozitivnog predznaka.

5.4.4. Interakcija

5.4.4.1. Interakcija posmika, savijanja i normalne sile

Za $\eta_3 \leq 0,5$ utjecaj posmičnih sila na nosivost za savijanje i normalnu silu smije se zanemariti.

Za $\eta_3 > 0,5$ zajedničko djelovanje savijanja i posmika u hrptu I-nosača ili sandučastih nosača mora zadovoljiti uvjet:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\eta_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad (59)$$

$M_{f,Rd}$ proračunska vrijednost plastične nosivosti presjeka na savijanje, uzimajući samo pojaseve

$M_{pl,Rd}$ proračunska vrijednost plastične nosivosti presjeka na savijanje ukupnog presjeka za sve klase

Kod interakcije se η_1 može proračunati s vrijednostima brutto-presjeka. Dokazi nosivosti na moment savijanja i normalnu silu i na posmik moraju biti zadovoljeni. Tlačna naprezanja su pozitivnog predznaka. Unutarnje sile po potrebi treba proračunati po teoriji II.reda.

Interakcijski izraz mora biti zadovoljen u svakom presjeku, no na unutarnjim osloncima kontinuiranih nosača samo izvan razmaka $h_w/2$ od oslonca.

$M_{f,Rd}$ se smije izračunati kao umnožak djelotvorne površine manjeg pojasa, granice popuštanja i razmaka između srednjih ravnina pojaseva.

Ako djeluje i normalna sila N_{Ed} umjesto vrijednosti $M_{pl,Rd}$ koristi se reducirana nosivost

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} [1 - (N_{Ed} / N_{pl,Rd})^2] \text{ i } M_{f,Rd} = M_{f,k} / \gamma_{M2} \quad (60)$$

5.4.4.2. Interakcija poprečnog opterećenja na rubovima, momenta savijanja i normalne sile

Osim dokaza na savijanje i normalnu silu i dokaza na poprečno opterećenje potrebno je provjeriti i interakcijski odnos:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4 \quad (61)$$

5.4.5. Izbočavanje hrpta uslijed popuštavanja pojaseva

Za sprečavanje izbočavanja hrpta uslijed popuštavanja tlačnog pojasa, odnos visine prema debljini hrpta h_w/t_w mora ispunjavati sljedeći uvjet:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (62)$$

A_w ... površina hrpta

A_{fc} ... površina tlačnog pojasa

Vrijednost k uzima se, kako slijedi:

kod iskorištenja plastične rotacije: $k = 0,30$

kod iskorištenja plastične nosivosti na moment savijanja: $k = 0,40$

kod iskorištenja elastične nosivosti na moment savijanja: $k = 0,55$

Kod zakrivljenih nosača s tlačnom pločom na konkavnoj strani treba provjeriti sljedeći uvjet:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{1 + \frac{h_w E}{3 r f_{yf}}}} \quad (63)$$

r ... radius zakrivljenosti tlačnog pojasa

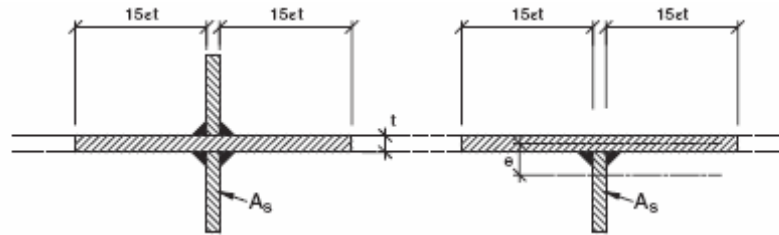
Ako je hrbat nosača ukrućen poprečnim ili uzdužnim ukrutama, vrijednosti h_w/t_w mogu se povećati.

5.4.6. Zahtjevi na konstrukcijske elemente ukrućenih polja limova

5.4.6.1. Općenito

Kod provjere izvijanja ukruta djelotvorni presjek se uzima sa sudjelujućom širinom lima $15 \varepsilon t$ na svakoj strani, ali maksimalno jednako razmaku ukruta, vidi Sl. 5.18.

Normalna sila u poprečnim ukrutama računa se kao zbroj sile uslijed preuzimanja posmika i eventualno uvedenog poprečnog opterećenja.



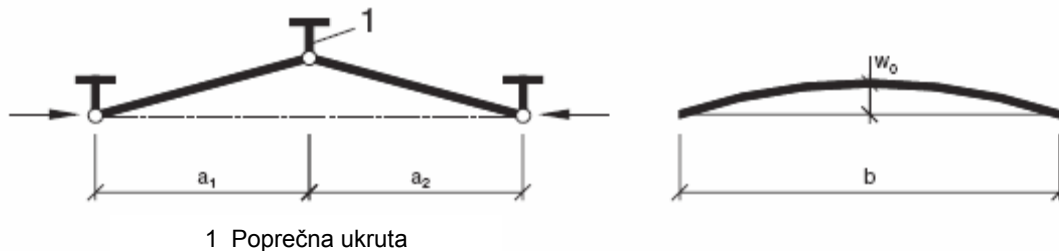
Slika 5.18: Djelotvorni presjek ukruta

5.4.6.2. Djelovanje uzdužnih naprezanja

5.4.6.2.1. Zahtjevi na poprečne ukrute

Poprečne ukrute moraju zadovoljiti sljedeće zahtjeve krutosti i čvrstoće, da bi ispunile uvjete za kruto oslanjanje uzdužnih ukruta.

Poprečna ukruta proračunava se kao zglobno oslonjeni nosač jednog raspona sa geometrijskom imperfekcijom sinusnog oblika $w_0 = s/300$, gdje je s najmanja vrijednost između a_1 , a_2 ili b , Sl. 5.19. a_1 i a_2 su duljine polja izbočavanja desno i lijevo od poprečne ukrute a b je raspon poprečne ukrute. Ekscentriciteti se moraju uzeti u obzir.



1 Poprečna ukruta

Slika 5.19: Poprečna ukruta

Poprečna ukruta ima se dimenzionirati na skretne sile iz tlačnih sila u susjednim poljima, uz pretpostavku da se ostale poprečne ukrute krute i bez imperfekcija. Susjedna polja s uzdužnim ukrutama promatraju se kao zglobno priključena na poprečne ukrute.

Elastičnim proračunom ima se dokazati da najveće naprezanje u ukrutama za proračunsko opterećenje nije veće od granice popuštanja f_{yd} i da dodatna deformacija imperfekciji ne premašuje vrijednost $b/300$.

Oba kriterija su zadovoljena ako moment tromosti I_{st} ukrute ispunjava sljedeće uvjete:

$$I_{st} = \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi} \right)^4 \left(1 + w_0 \frac{300}{b} u \right) \quad (64)$$

gdje je $\sigma_m = \frac{\sigma_{ct,c}}{\sigma_{ct,p}} \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$

$$u = \frac{\pi^2 E e_{\max}}{f_y 300 b} \geq 1,0$$

γ_{M1}

gdje je:

e_{max} razmak između rubnih vlaknaca ukrute i težišta ukrute;

N_{Ed} najveća proračunska vrijednost tlačne sile u susjednim poljima, ali najmanje najveće tlačno naprezanje pomnoženo s pola djelotvorne tlačne površine jednog polja, uključivo ukrute.

5.4.6.2.2. Zahtjevi na uzdužne ukrute

Za izbjegavanje torzijskog izvijanja ukruta otvorenog poprečnog presjeka, kod presjeka bez ili s malom torzijskom krutosti u slučaju:

$$I_T / I_p \leq 5,3 f_y / E \quad (65)$$

ima biti zadovoljen uvjet

$$I_T / I_p \geq 11 [t / b_p]^2 \quad (66)$$

b_p širina lima između ukruta

t debljina lima između ukruta

I_p polarni moment tromosti poprečnog presjeka same ukrute proračunat oko priključka na lim

I_T St.Venant-ov torzijski moment tromosti same ukrute bez lima.

Kod neravnomjerno raspoređenih ukruta sa različitim razmacima b_p se uzima kao srednja vrijednost od b_{p1} b_{p2} obaju susjednih pojedinačnih polja.

Diskontinuirano raspoređene uzdužne ukrute, koje nisu nosivo priključene na poprečne ukrute ili prolaze kroz njih, analiziraju se kako slijedi:

- u obzir se uzimaju samo hrptovi,
- kod statičkog proračuna njihove krutosti se ne uzimaju u obzir,
- kod pojaseva se ne dopuštaju,
- kod proračuna naprezanja se zanemaruju,
- kod određivanja djelotvorne širine pojedinačnih polja hrpta uzimaju se u obzir,
- kod proračuna kritičnih naprezanja za disanje hrpta uzimaju se u obzir.

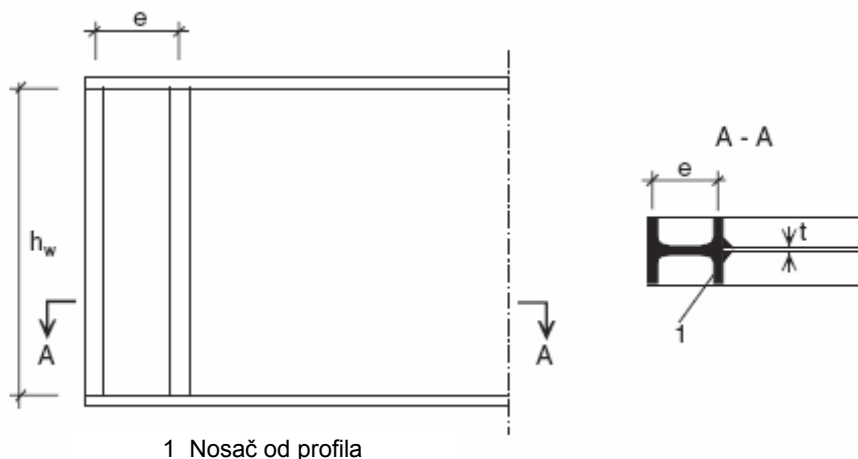
Dokazi čvrstoće za ukrute provode se prema 5.4.1.3 i 5.4.1.4.

5.4.6.3. Djelovanje posmičnih naprezanja

5.4.6.3.1. Krute ležajne ukrute

Krute ležajne ukrute služe za uvođenje ležajnih sila od ležajeva i kao kratki nosači opterećeni na savijanje za sidrenje uzdužnih membranskih naprezanja u ravni hrpta.

Krutu ležajnu ukrutu mogu činiti dvije dvostrano smještene poprečne ukrute, koje formiraju pojaseve kratkog na savijanje opterećenog nosača duljine h_w , vidi Sl. 5.14 (b). Dio hrpta između poprečnih ukruta čini hrbat kratkog na savijanje opterećenog nosača. Krutu ležajnu ukrutu alternativno može činiti profil, koji je s limom hrpta povezan prema Sl. 5.20.



Slika 5.20: Nosač od profila kao ležajna ukruta

Najmanja površina presjeka svake od dvije ukrute mora iznositi $4 h_w t^2 / e$, kod čega je e razmak između srednjih ravnina ravnih limova i mora ispunjavati uvjet $e > 0,1 h_w$, vidi Sl. 5.14 (b). Ako ležajnu ukrutu ne čine dvije poprečne ukrute, elastični moment otpora za savijanje okomito na hrbat mora iznositi najmanje $4 h_w t^2$. Ako poprečnu ukrutu čine dva lima na obadvije strane hrpta, u minimalnu površinu presjeka zbrajaju se obje površine.

Kao alternativa kraj nosača se može oblikovati s jednom dvostranom ukrutom, uz uvjet da je jedna dodatna ukruta ugrađena tako blizu ležaja da pojedinačno polje može preuzeti maksimalni posmik, koji se nastaje kod dimenzioniranja deformabilne ležajne ukrute.

5.4.6.3.2. Deformabilne ležajne ukrute

Deformabilna ležajna ukruta je samo jedna dvostrana ležajna ukruta prema Sl. 5.14 (c). Ona preuzima ležajnu reakciju (vidi 5.4.6.3.6).

5.4.6.3.3. Poprečne ukrute u polju

Poprečne ukrute u polju, koje služe kao kruti oslonci rubova polja izbočavanja hrpta imaju se provjeriti na nosivost i krutost.

Krute poprečne ukrute u polju sa sudjelujućom širinom hrpta moraju zadovoljiti slijedeće minimalne uvjete za moment tromosti:

$$\text{za } a/h_w < \sqrt{2}: I_{st} \geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \quad (67)$$

$$\text{za } a/h_w \geq \sqrt{2}: I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (68)$$

Nosivost krutih ukruta mora se provjeriti za normalnu silu

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \chi_w f_{yw} h_w t / \sqrt{3} \gamma_{M1} \quad (69)$$

sukladno 5.4.6.3.6.

χ_w se određuje za dvostruko polje izbočavanja desno i lijevo od poprečne ukrute, a promatrana poprečna ukruta ne uzima se u obzir. Za slučaj promjenjive posmične sile dokaz se provodi za posmičnu silu na razmaku od $0,5 h_w$ od ruba polja izbočavanja sa najvećom posmičnom silom.

5.4.6.3.4. Uzdužne ukrute

Uzdužne ukrute mogu biti krute ili deformabilne. Njihova krutost se u oba slučaja može uzeti u obzir kod proračuna vitkosti λ_w prema toč. 5.4.2.2.

Ako je za vitkost λ_w mjerodavno pojedinačno polje ukruta se za izbočavanje od posmika smatra krutom.

Ako je uzdužna ukruta uključena u nosivost presjeka treba dokazati njenu nosivost za uzdužna naprezanja.

5.4.6.3.5. Varovi

Varovi se dimenzioniraju na proračunsku vrijednost posmičnog toka V_{Ed} / h_w , ako V_{Ed} nije veća od $\chi_w f_{yw} h_w t / \sqrt{3} \gamma_{M1}$. Za veće vrijednosti varovi između hrpta i pojaseva imaju se dimenzionirati na posmični tok $f_{yw} t / \sqrt{3}$. Inače se moraju provesti detaljniji proračuni.

5.4.6.3.6. Djelovanje poprečnih opterećenja u ravnini hrpta

Ako nosivost neukrućenog lima hrpta nije dovoljna, treba ugraditi poprečne ukrute. Poprečne ukrute uvijek treba ugraditi na mjestima plastičnih zglobova ako je iskoristivost η_2 prema 5.4.3 veća od 0,5.

Izvijanje poprečnih ukruta izvan ravnine hrpta treba provjeriti prema liniji izvijanja c i duljini izvijanja $l \geq 0,75 h_w$, ako su oba kraja ukrute bočno pridržana. Veće duljine izvijanja l treba uzeti kod krajnjih oslonaca, koji se mogu deformirati.

Kod primjene jednostranih ili drugih nesimetričnih ukruta kod dokaza na izvijanje treba uzeti u obzir i ekscentricitet. Ako se ukrute koriste za bočno pridržanje gornjeg pojasa, moraju imati krutost i nosivost koja odgovara pretpostavkama za dimenzioniranje na bočno izvijanje.

Osim dokaza na izvijanje ima se provesti dokaz nosivosti presjeka poprečnih ukruta kod oprečno opterećenog pojasa. Širina lima hrpta, koja se smije uključiti u djelotvorni presjek ograničena je na l_y prema 5.4.3. Mogući izrezi u ukruti imaju se uzeti u obzir.

6. OGRANIČENJE NAPREZANJA ZA ISPUNJENJE UVJETA KLASJE 3 POPREČNOG PRESJEKA

Ovaj postupak može se koristiti za određivanje graničnih naprezanja ukrućenih i neukrućenih limova jednog poprečnog presjeka, da bi se izbjegao proračun djelotvornih širina.

Poprečni presjeci koji udovoljavaju dalje navedenim uvjetima smiju se svrstati u klasu 3.

Za ukrućene i neukrućene limove, pod naprezanjima $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ i τ_{Ed} , dovoljna sigurnost na izbočavanje osigurana je ako vrijedi sljedeći izraz:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_V f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1 \quad (70)$$

ρ_x ... koeficijent redukcije ρ_c prema 5.4.1.3.2 za izračunavanje graničnog naprezanja $\sigma_{x,Rd}$ u x-smjeru, po potrebi uz uzimanje u obzir ponašanja sličnog izvijanju tlačnog štapa

ρ_z ... koeficijent redukcije ρ_c prema 5.4.1.3.2 za izračunavanje graničnog naprezanja $\sigma_{z,Rd}$ u z-smjeru ili koeficijenta redukcije χ_F prema 5.4.3 za poprečno opterećenje u ravnini lima, po potrebi uz uzimanje u obzir ponašanja sličnog izvijanju tlačnog štapa

χ_V ... koeficijent redukcije prema 5.4.2

Napomena 1: Komponente naprezanja mogu se izračunati kao nazivne vrijednosti za potpuno djelozvorne presjeke ili odrediti točnijom membranskom analizom

Napomena 2: Dokaz se može provesti i prema jednadžbi:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq \rho^2 \quad (71)$$

ρ je najmanja vrijednost od ρ_x , ρ_z i χ_V .

Vitkost λ_P polja ploče, definiranog s ρ_x , ρ_z i χ_V računa se prema izrazu:

$$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{\alpha_{ult}}{\alpha_{crit}}} \quad (72)$$

α_{ult} je najmanji faktor povećanja proračunskih opterećenja za dosizanje elastične nosivosti (elastične sile razgraničenja) u kritičnoj točki polja izbočavanja,

α_{crit} je najmanji faktor povećanja proračunskih opterećenja za dosizanje elastične nosivosti (elastične sile razgraničenja) za zajedničko djelovanje naprezanja.

Za izračun α_{ult} koristi se kriterij tečenja u limovima presjeka klase 3:

$$\frac{1}{\alpha_{ult}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 \quad (73)$$

Napomena 1: Kod primjene izraza tečenja u gornjoj jednadžbi pretpostavljeno je da do tečenja dolazi prije dosizanja elastične nosivosti (razgraničenja ravnoteže).

Napomena 2: Umetanje α_{ult} u jednadžbu (71) dovodi do nejednadžbe:

$$\rho \alpha_{ult} / \gamma_{M1} \geq 1$$

Za određivanje α_{crit} može se koristiti analiza konačnim elementima ili odgovarajuća rješenja iz literature.

Napomena Ako postoje vrijednosti $\alpha_{crit,i}$ za sve komponente naprezanja $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ i τ_{Ed} određenog polja naprezanja, vrijednost α_{crit} za zajedničko djelovanje naprezanja $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ i τ_{Ed} može se odrediti za neukrućena polja izbočavanja:

$$\frac{1}{\alpha_{crit}} = \frac{1+\psi_x}{4\alpha_{crit,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{crit,z}} + \left[\left(\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{crit,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{crit,z}} \right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2\alpha_{crit,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2\alpha_{crit,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{crit,\tau}^2} \right]^{1/2} \quad (74)$$

$$\alpha_{crit,x} = \frac{\sigma_{crit,x}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (75)$$

$$\alpha_{crit,z} = \frac{\sigma_{crit,z}}{\sigma_{z,Ed}} \quad (76)$$

$$\alpha_{crit,\tau} = \frac{\tau_{crit,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} \quad (77)$$

Vrijednosti $\sigma_{crit,x}$, $\sigma_{crit,z}$ i τ_{crit} definirana su u toč. 5.4.