

METALNI MOSTOVI

DIMENZIONIRANJE ČELIČNIH MOSTOVA

DIN-Fachbericht 103

Sadržaj

- 1) Pregled
- 2) Gradiva
- 3) Granična stanja uporabe
- 4) Granična stanja nosivosti
- 5) Izbočavanje konstrukcijskih elemenata sastavljenih od limova
- 6) Ograničenje naprezanja za ispunjenje uvjeta klase 3 poprečnog presjeka

1. Pregled

- Temelji se na EC 1993-1-1 „Dimenzioniranje i konstruiranje čeličnih konstrukcija“.
- U pravilu je pretpostavljen **vijek trajanja** mosta od 100 godina.
- Za osiguranje **trajnosti** mostovi moraju biti dimenzionirani uzimajući u obzir trošenje, zamor i izvanredna djelovanja.
- Konstrukcijski dijelovi s manjim vijekom trajanja moraju biti zamjenjivi (AKZ; ležajevi; zatege, kabeli, vješaljke; prijelazne naprave, zastori kolnika itd.)

2. Gradiva

- Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_y i čvrstoće f_u za šuplje profile

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

- Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_y i čvrstoće f_u za vruće valjane konstrukcijske čelike

Standard i kvaliteta čelika	Debljina			
	$t \leq 40$ mm		40 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

Za plosnate čelike: 40 mm $< t \leq 63$ mm isključivo

- Maksimalne debljine za vlačno opterećene čelične dijelove cestovnih mostova

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				75	65	55	20	-	-
S235J0			S235J0W	100	85	75	60	55	45
S235J2			S235J2W	140	120	100	85	75	60
S275J0				90	80	65	55	50	40
S275J2				130	110	90	80	65	55
	S275-N/M			150	130	110	90	80	65
	S275NL/ML			200	170	150	130	110	90
S355J0			S355J0W	80	65	55	45	40	30
S355J2			S355J2W	110	90	80	65	55	45
S355K2			S355K2W	130	110	90	80	65	55
	S355N/M			130	110	90	80	65	55
	S355NL/ML			175	150	130	110	90	80
	S420N/M			115	95	80	70	55	45
	S420NL/ML			155	135	115	95	80	70
	S460N/M			105	90	75	60	50	40
	S460NL/ML			150	125	105	90	75	60
		S460Q		90	75	60	50	40	35
		S460QL		125	105	90	75	60	50
		S460QL1		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 e (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

- Nominalne vrijednosti granice popuštanja f_{yb} i vlačne čvrstoće f_{ub} za vijke

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: Dopusťaju se samo vijci čvrstoće 4,6, 5,6, 8,8 i 10,9.

3. 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)
- namještanje 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 (umornost) i gubitka krutosti uslijed izbočavanja)
- osiguranje dovoljne trajnosti primjenom odgovarajućih detalja za smanjenje utjecaja korozije i trošenja
- omogućenje provedbe radova održavanja i popravaka (pristup za preglede i radove na održavanju i popravcima, zamjena ležajeva, zamjena prijelaznih naprava itd.)
- U mostogradnji se poglavito zbog problematike umornosti 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).

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 umornosti 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.

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.

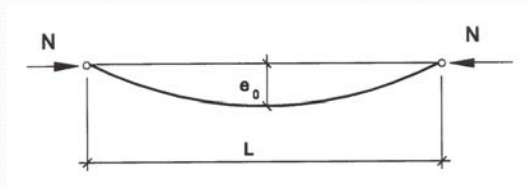
Kod proračuna **stabilizacijskih sustava** za osiguranje postranog stabiliteta nosača ili tlačnih štapova ima se uzeti početna imperfekcija e_0 u obliku luka:

$$e_0 = k_n L/500$$

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

L raspon stabiliziranog konstrukcijskog dijela

n broj stabilizirajućih elemenata



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.

- Dijagrami moment – rotacija ($M - \theta$) i granična raspodjela naprezanja za presjeka klase 1-4

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

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

(a) <u>Djelovi hrpta</u> (obostrano pridržani dijelovi okomito na os savijanja)				
$d \approx h - 3t \quad [t \approx b \approx l_x]$				
Klasa	Hrptat opterećen na savijanje	Hrptat opterećen na tlak	Hrptat opterećen na savijanje i tlak	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
1	$d/t_w \leq 72 \epsilon$	$d/t_w \leq 33 \epsilon$	$\text{for } \alpha > 0.5 :$ $d/t_w \leq 306 \epsilon / (13\alpha - 1)$ $\text{for } \alpha < 0.5 :$ $d/t_w \leq 36 \epsilon / \alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \epsilon$	$d/t_w \leq 30 \epsilon$	$\text{for } \alpha > 0.5 :$ $d/t_w \leq 456 \epsilon / (13\alpha - 1)$ $\text{for } \alpha < 0.5 :$ $d/t_w \leq 415 \epsilon / \alpha$	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	$d/t_w \leq 124 \epsilon$	$d/t_w \leq 42 \epsilon$	$\text{for } \psi > -1 :$ $d/t_w \leq 42 \epsilon / (0.67 + 0.33\psi)$ $\text{for } \psi < -1 :$ $d/t_w \leq 62 \epsilon (1 - \psi) / (-\psi)^{0.5}$	
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355
	ϵ	1	0.92	0.81

(b) <u>Djelovi 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	Vajani šupli profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 33 \epsilon$ $b/t_f \leq 33 \epsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \epsilon$ $b/t_f \leq 42 \epsilon$	
2	Vajani šupli profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 38 \epsilon$ $b/t_f \leq 38 \epsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \epsilon$ $b/t_f \leq 42 \epsilon$	
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	Vajani šupli profili Ostalo	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \epsilon$ $b/t_f \leq 42 \epsilon$	$(b - 3t_f)/t_f \leq 42 \epsilon$ $b/t_f \leq 42 \epsilon$	
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355
	ϵ	1	0.92	0.81

(c) Djelovi pojasa (jednostrano oslonjeni dijelovi)

Vajani presjek

Zavareni presjek

Klas	Oblik poprečnog presjeka	Pojas opterećen na tlak	Pojas opterećen na savijanje i tlak	
			Kraj pojasa u tlaku	Kraj pojasa u vlatu
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
1	Vajani	$c/t_f \leq 10 \epsilon$	$c/t_f \leq 10 \epsilon / \alpha$	$c/t_f \leq 10 \epsilon / \sqrt{\alpha^{1.5}}$
	Zavareni	$c/t_f \leq 9 \epsilon$	$c/t_f \leq 9 \epsilon / \alpha$	$c/t_f \leq 9 \epsilon / \sqrt{\alpha^{1.5}}$
2	Vajani	$c/t_f \leq 11 \epsilon$	$c/t_f \leq 11 \epsilon / \alpha$	$c/t_f \leq 11 \epsilon / \sqrt{\alpha^{1.5}}$
	Zavareni	$c/t_f \leq 10 \epsilon$	$c/t_f \leq 10 \epsilon / \alpha$	$c/t_f \leq 10 \epsilon / \sqrt{\alpha^{1.5}}$
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)				
3	Vajani	$c/t_f \leq 15 \epsilon$	$c/t_f \leq 20 \epsilon \sqrt{t_f/h}$ $c/t_f \leq 21 \epsilon \sqrt{t_f/h}$ t_f prema Kapitul III Tabella 4.2	
	Zavareni	$c/t_f \leq 14 \epsilon$		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y	235	275
		ϵ	1	0.92
				0.81

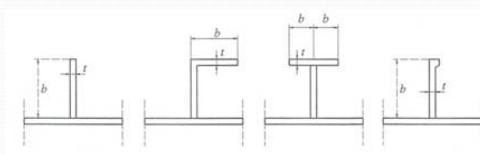
(d) Kutnici
Vidi (c). Jednostrano oslonjeni dijelovi pojasa (tab. 6)

(ne vrijedi za kutnike s kontinuiranom vezom na druge konstrukcijske dijelove)

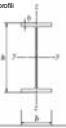
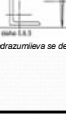
Klasa	Presjek opterećen na tlak							
Raspodjela naprezanja po dijelu presjeka (tlak pozitivan)								
3	$h/t \leq 15 \epsilon : (b + h)/(2t) \leq 11.5 \epsilon$							
(e) Cjevasti profili								
Klasa	Presjek opterećen na savijanje ili na tlak							
1	$d/t \leq 50 \epsilon^2$							
2	$d/t \leq 70 \epsilon^2$							
3	$d/t \leq 90 \epsilon^2$							
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355				
	ϵ	1	0.92	0.81				
	σ^2	1	0.85	66				

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.

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



4.3. Izvijanje

Poprečni presjek	Ograničenje	Deformacije otkriveno na os	Klasa izvijanja		
	$b/t \leq 1,2$ $f_y \leq 40 \text{ MPa}$ $40 \text{ mm} \leq l_y \leq 100 \text{ mm}$	$F \cdot F$	a	a ₁	a ₂
		$F \cdot D$	b	b ₁	b ₂
		$F \cdot F$	c	c ₁	c ₂
		$F \cdot D$	d	d ₁	d ₂
	$b/t \leq 1,2$ $f_y \leq 100 \text{ MPa}$ $l_y \leq 100 \text{ mm}$	$F \cdot F$	e	e ₁	e ₂
		$F \cdot D$	f	f ₁	f ₂
		$F \cdot F$	g	g ₁	g ₂
		$F \cdot D$	h	h ₁	h ₂
	$l_y \leq 40 \text{ mm}$ $l_y \leq 40 \text{ mm}$	$F \cdot F$	i	i ₁	i ₂
		$F \cdot D$	j	j ₁	j ₂
	$l_y \leq 40 \text{ mm}$ $l_y \leq 40 \text{ mm}$	$F \cdot F$	k	k ₁	k ₂
		$F \cdot D$	l	l ₁	l ₂
	$l_y \leq 40 \text{ mm}$ $l_y \leq 40 \text{ mm}$	$F \cdot F$	m	m ₁	m ₂
		$F \cdot D$	n	n ₁	n ₂
	$l_y \leq 40 \text{ mm}$ $l_y \leq 40 \text{ mm}$	$F \cdot F$	o	o ₁	o ₂
		$F \cdot D$	p	p ₁	p ₂

Važna napomena: Podrazumijeva se debljina zavara 8 mm i

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

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

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

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

χ -koeficijent redukcije za mjerodavni slučaj stabilnosti

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

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \lambda^2]^{0.5}}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \\ \alpha &= \text{koeficijent imperfekcije} \\ \bar{\lambda} &= [\beta_A A f_y / N_{cr}]^{0.5} = (\lambda / \lambda_1) [\beta_A]^{0.5} \\ \lambda &= \text{vitkost za odgovarajući slučaj izvijanja} \\ \lambda_1 &= \pi [E / f_y]^{0.5} = 93.9 \varepsilon \\ \varepsilon &= [235 / f_y]^{0.5} \text{ gdje je } f_y \text{ u } [N/mm^2] \end{aligned}$$

Linija izvijanja	a	b	c	d
Koeficijent imperfekcije	0.21	0.54	0.69	0.79

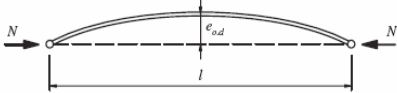
Koeficijent imperfekcije α za kinulu izvijanja a_1 iznosi 0.13.

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

Koeficijent smanjenja χ

$\bar{\lambda}$	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

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



Primjenjeni postupak proračuna	Strelica e_{od}
Elastično	$e_{od} = \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) \frac{W_{el}}{A} \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2}$
Elastično – plastično s linearnom	$e_{od} = \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) \frac{W_{pl}}{A} \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2}$

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.

Računska otpornost na bočno izvijanje definirana je izrazom:

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

$\beta_W = 1$ za presjeke klase 1 i 2

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

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

$W_{el,y}$ 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 $\bar{\lambda}_{LT}$

4.4.2. Nepromjenjivi presjek

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

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

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left[\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0,5}} \leq 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_{LT} > 0,4$$

sa

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

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

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

Relativna vitkost definirana je izrazom:

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

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.

4.4.4. Dokaz tlačnog pojasa kao tlačni štap

Dokaz se provodi prema

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

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.reda na pridržavajuće opruge mogu se uzeti u obzir dodatnom bočnom silom F_{Ed} na priključku opruge na pojas, kako slijedi:

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

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

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

l razmak između opruga

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

$$N_{cr} = m N_E \quad m = \frac{2}{\pi^2} \sqrt{\gamma} \quad c = \frac{C_d}{l}$$

$$N_E = \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad \gamma = \frac{cL^4}{EI}$$

L raspon između nepomičnih oslonaca

l razmak između opruga

C_d krutost opruge

4.5. Dokazi za savijanje i tlak

Postupak vrijedi ako nema planske torzije.

4.5.1. Izvijanje

Klase 1 i 2

Klasa 3

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

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{Ed}}{\chi_y A f_y} \quad k_y \leq 1,5$$

$$\mu_y = \bar{\chi}_y (2\beta_{My} - 4) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] \quad \mu_y \leq 0,9$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{Ed}}{\chi_z A f_y} \quad k_z \leq 1,5$$

$$\mu_z = \bar{\chi}_z (2\beta_{Mz} - 4) + \left[\frac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \right] \quad \mu_z \leq 0,9$$

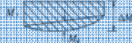
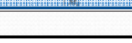
χ_{min} je manja vrijednost od χ_y i χ_z

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

k_y, k_z, χ_{min} isto kao u prethodnoj formuli

$$\mu_y = \bar{\chi}_y (2\beta_{My} - 4) \quad \mu_y \leq 0,9$$

$$\mu_z = \bar{\chi}_z (2\beta_{Mz} - 4) \quad \mu_z \leq 0,9$$

Oblik momentnog dijagrama	Koeficijent momenata β_M
Otporjevanje koncentriranih momenata na krajevima elementa 	$\beta_{M,K} = 1.8 - 0.7x$
Otporjevanje kontinuiranog opterećenja ili kontinuiranog opterećenja i koncentriranog opterećenja   	$\beta_{M,K} = 1.0$ $\beta_{M,K} = 1.4$
Korrigovanje momenata na krajevima i kontinuiranog opterećenja ili koncentriranog opterećenja 	$\beta_M = \beta_{M,K} + \beta_{M,K} - \beta_{M,K} \cdot M_{K,1} / M$
	$M_K = \max M$ Momenti samo u slučaju opterećenja delovanja
	$M_{K,1} = \max M$ Momenti dijagram bez promjene predznaka
	$\Delta M =$
	$\max M = \max M$ Momenti dijagram sa promjenom predznaka

Koeficijenti
momenata β_M

4.5.2. Bočno izvijanje

Klase 1 i 2

Klasa 3

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

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{ED}}{\chi_z A f_y}$$

$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0.15$$

$$k_{LT} \leq 1$$

$$\mu_{LT} \leq 0.9$$

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

4.6. Rešetke

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

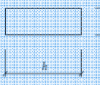
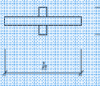
4.7. Lukovi

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.

Povoljni poprečni presjeci vješaljki :

Vijčani priključci imaju veće konstrukcijsko prigušenje od zavarenih priključaka.

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		$L/d \leq 200$

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

5. IZBOČAVANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA SASTAVLJENIH OD LIMOVA

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 naprežanjima
- uzima se u obzir postkritična rezerva
- potrebno je dodatno provesti dokaze uporabljivosti i sigurnosti na umornost

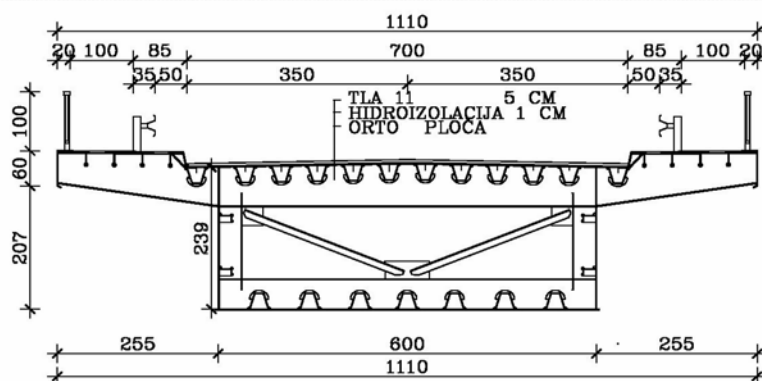
(b) prema *DIN 18800* (1990)

Nosivost na moment savijanja punostijenog nosača prema DIN 18800 Teil 3 i prema DIN-FB 103

1	2	3
Neukruenen nosač prema Din 18800 Teil 3	Neukruenen nosač prema Din-Fachbericht 103	Ukruenen nosač prema Din 18800 Teil 3
$M_{Rd} = 1727 \text{ kNm}$ 78 %	$M_{Rd} = 2206 \text{ kNm}$ 100 %	$M_{Rd} = 2348 \text{ kNm}$ 105 %

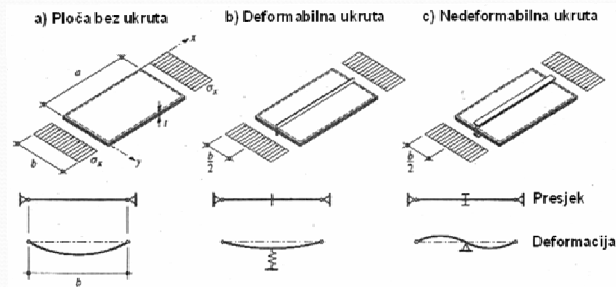
Za česte promjene opterećenja dolazi do cikličkog ponavljanja izbočavanja hrpta, koje se naziva **disanje hrpta**.

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



Poprečni presjek mosta Jasenovac

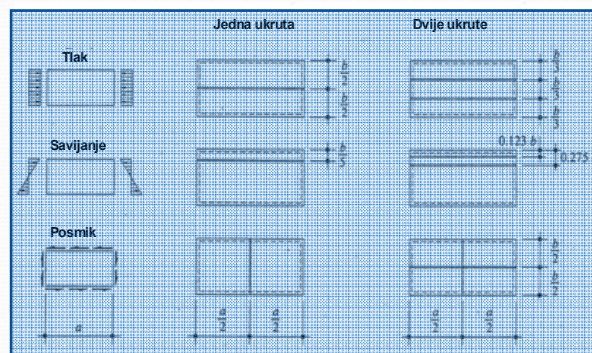
Nosivost ukručene ploče najviše ovisi od razmještaja i krutosti ukruta.
Ako ukruta nije dovoljno kruta, deformira se zajedno s pločom.



Minimalna krutost ukrute γ^* (*DIN 18800*) definira se kao minimalno potrebna krutost uzdužne ukrute za ostvarenje izbočavanja pojedinačnog polja.

U tom slučaju je nosivost izbočavanja ukrućenog polja jednaka nosivosti izbočavanja pojedinačnog polja.

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



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

Sudjelujuće širine i izbočavanje ploča utječu na:

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

Dokazi za ispunjenje postavljenih uvjeta mogu se provesti sljedećim postupcima:

- 1) Postupak sa djelotvornim širinama za uzimanje u obzir sudjelujuće širine i izbočavanja ploča uslijed normalnih naprezanja kod provedbe statičkog proračuna štapnih sustava
- 2) 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
- 3) Postupak proračuna nosivosti:
 - izbočavanje uslijed posmika
 - lokalno izbočavanje uslijed unosa opterećenja na poprečnom rubu (u ravni lima)

- 4) 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
- 5) Uvjeti za izbjegavanje izbočavanja hrpta od sudjelovanja pojasa.
- 6) Zahtjevi na pojedine konstrukcijske dijelove ukrućenih polja.
- 7) Postupak sa ograničenjem naprezanja (granična naprezanja) za ispunjenje uvjeta klase.

Za proračun čeličnih mostova u pravilu se koristi postupak sa ograničenjem naprezanja pod 7). Kod tog postupka proračun naprezanja se provodi sa cjelovitim djelotvornim presjecima (bez redukcije uslijed djelotvorne širine), ali uzimajući u obzir sudjelujuće širine pod 2).

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

5.3.1. Općenito

Utjecaj posmičnih deformacija 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.

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

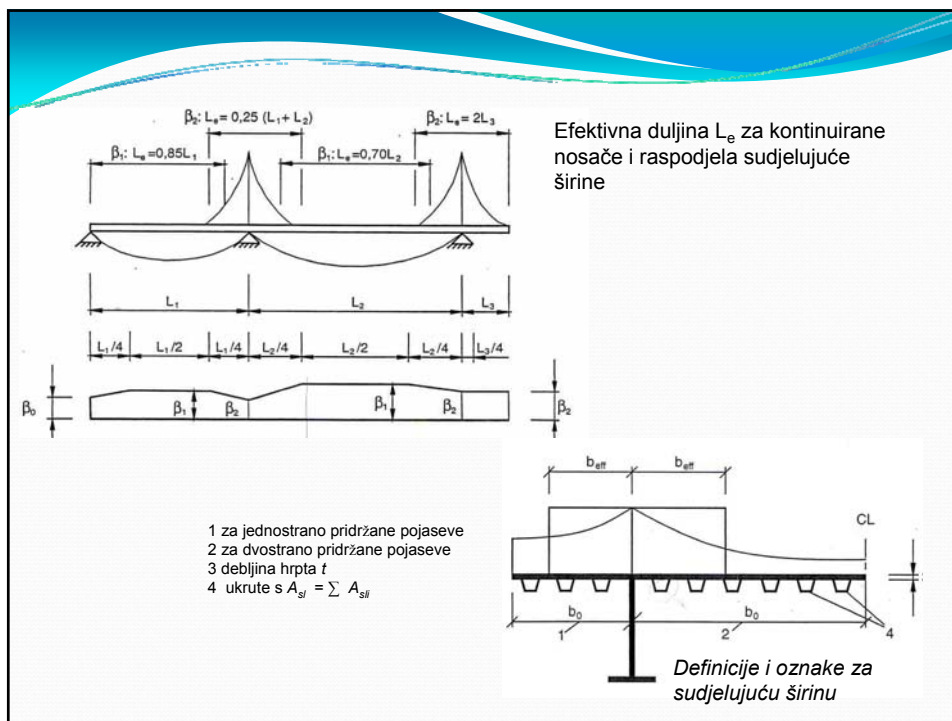
Sudjelujuća širina definira se sljedećim izrazom:

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

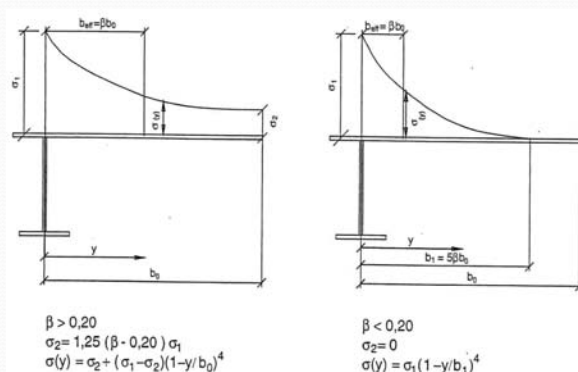
κ	Mjesto dokaza	Vrijednost β
$\leq 0,02$		$\beta = 1,0$
0,02 – 0,70	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	Moment na ležaju	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa} \right) + 1,6\kappa^2}$
$> 0,7$	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	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_1 na kraju

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

A_{sl} = površina svih ukruta na širini b_0



Raspodjela normalnih naprezanja po širini ploče uz uzimanje u obzir posmičnih deformacija



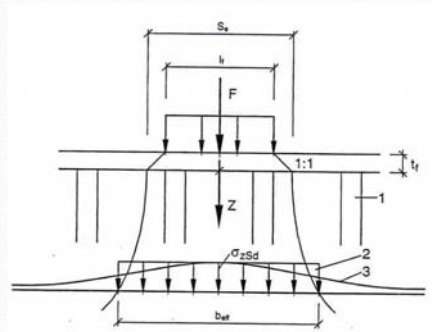
Elastična raspodjela naprezanja u neukrućenoj ili ukrućenoj ploči uslijed lokalnog unosa opterećenja u ravnini lima proračunava se, kako slijedi:

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

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

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

$$s_e = l_f + 2l_f$$



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

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

Neukrućena ploča

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

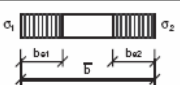
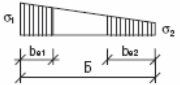
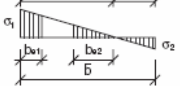
$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \sigma_E$$

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

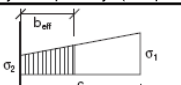
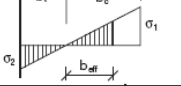
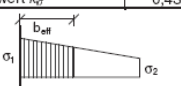
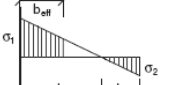
σ_1 ... najveće tlačno naprezanje

σ_2 ... naprezanje na drugom rubu

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

Raspodjela naprezanja (tlak pozitivan)				Efektivna širina b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	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 $1 \geq \psi \geq -1$: $k_\sigma = \frac{16}{\sqrt{(1 + \psi)^2 + 0,112(1 - \psi)^2 + (1 + \psi)}}$						

Koeficijent izbočavanja za obostrano slobodno
oslonjeni lim

Raspodjela naprezanja (tlak pozitivan)			Efektivna širina b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \cdot c$		
			$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_{σ_1}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \cdot c$		
			$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ_2}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Koeficijent izbočavanja za jednostrano oslonjeni
lim

Ukručena ploča

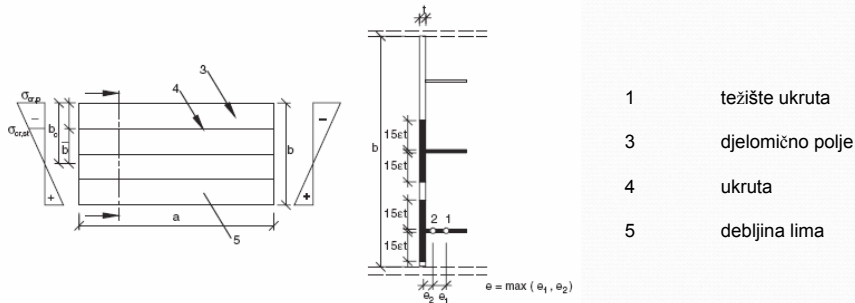
Elastično kritično naprezanje izbočavanja ekvivalentne ortotropne ploče definirano je izrazom:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E$$

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

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

b, t izmjere prema sljedećoj skici



Ponašanje slično izvijanju

Idealno naprezanje izvijanja

Idealno naprezanje izvijanja neukrčene ploče definirano je izrazom:

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

a duljina polja izbočavanja u smjeru uzdužnih naprezanja

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

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

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

A_{st} bruto površina zamjenskog štapa

Kod toga presjek zamjenskog štapa čini ukruta + efektivna širine lima.

Relativna vitkost λ_c izvijanog štapa je:

- $\lambda_c = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,c}}$ kod neukrućenih limova
- $\lambda_c = \sqrt{\beta_{A,C} f_y / \sigma_{cr,c}}$ kod ukrućenih limova

$$\beta_{A,C} = A_{eff,c} / A_c$$

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

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 se s povećanom vrijednosti:

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

$$i = \sqrt{I_{x,st} / A_{st}}$$

$e = \max (e_1, e_2)$ 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

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:

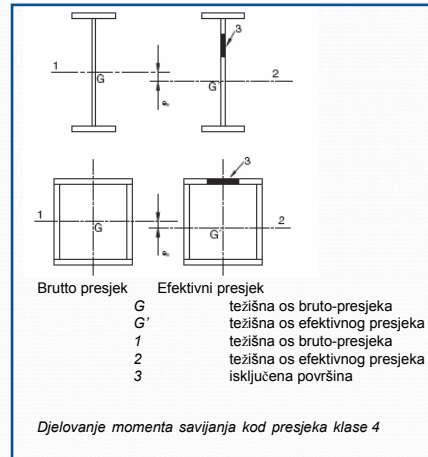
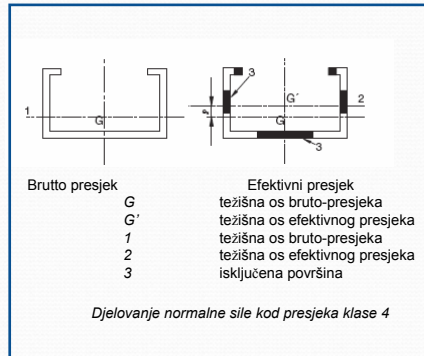
$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c$$

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

$\sigma_{cr,p}$ idealno naprezanje izbočavanja ploče

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

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



5.4.2. Posmična naprezanja

Elastično kritično naprezanje izbočavanja

$$\tau_{cr} = k_r \sigma_E$$

a ... duljina lima (razmak poprečnih ukruta)

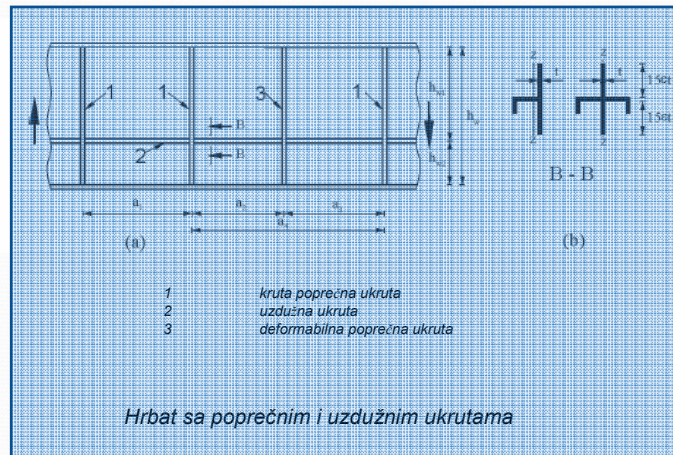
b ... visina lima

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

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

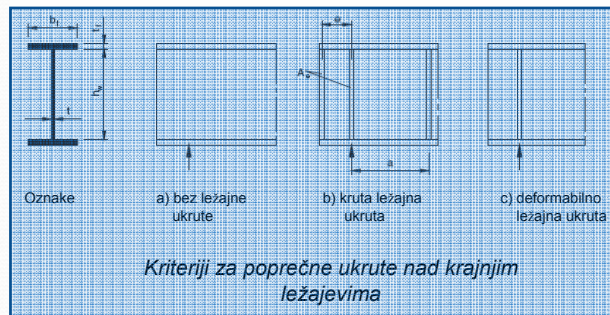
$$k_{rst} = 9 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{st}}{t^3 b} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \sqrt[4]{\frac{I_{st}}{b}}$$

I_{st} ... moment tromosti jedne uzdužne ukrute oko z-osi



Izbočavanje uslijed posmika

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



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

	Krute ukrute	Deformabilne ukrute
$\bar{\lambda}_w < 0.83$	1,00	1,00
$0.83 \leq \bar{\lambda}_w < 1.08$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1.08$	$1.37 / (0.7 + \bar{\lambda}_w)$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$

Tri moguća slučaja:

- nema poprečnih ukruta nad osloncima.
- krute poprečne ukrute nad osloncima. Ovaj slučaj vrijedi i za unutarnja polja izvan polja kod krajnjih oslonaca i za polja kod srednjih oslonaca.
- deformabilne poprečne ukrute nad osloncima.

Vitkost određena je izrazom:

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

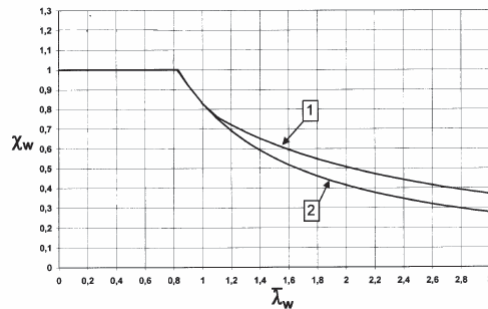
Kod hrptova sa poprečnim ukrutama samo nad osloncima vitkost određuje se izrazom:

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

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

$$\bar{\lambda}_w = h_w / (37,4 t \varepsilon \sqrt{k_r})$$

k_r najmanja vrijednost izbočavanja od posmika polja hrpta.



1. Kruta ukruta
2. Deformabilna ukruta

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:

$$\lambda_w = h_{wf} / (37,4 t \varepsilon \sqrt{k_{rt}})$$

h_{wf} i k_{rt} se računaju za pojedinačno polje sa najvećom vitkosti λ_w

Za izračun k_{rt} uzima se $k_{rst} = 0$.

- $k_r = 5,34 + 4,00 (b/a)^2 + k_{rst}$ za $a/b \geq 1$
- $k_r = 4,00 + 5,34 (b/a)^2 + k_{rst}$ za $a/b < 1$

Dokaz nosivosti provodi se prema izrazu:

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

b širina polja izbočavanja (za hrpat sa razmakom između pojaseva h_w vrijedi $b = h_w$)

t debljina lima

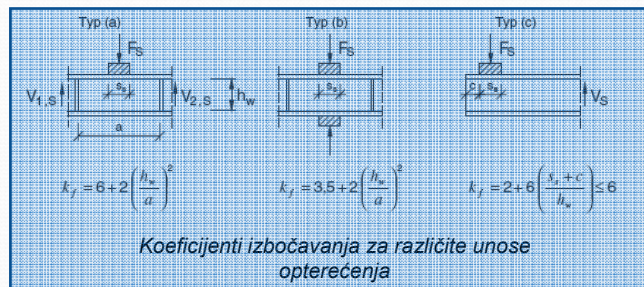
V_{Ed} proračunska vrijednost posmične sile od poprečne sile i torzije

χ_v faktor za doprinos hrpta nosivosti na posmik

5.4.3. Nosivost za poprečno opterećenje

Razlikuju se 3 vrste unosa opterećenja:

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



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

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}$$

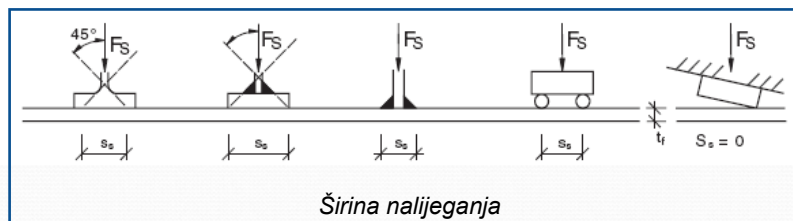
L_{eff} djelotvorna širina rasprostiranja opterećenja uzimajući u obzir izbočavanje hrpta od poprečnog opterećenja

t_w debljina hrpta

f_{yw} granica popuštanja hrpta

$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

l_y djelotvorna širina rasprostiranja bez utjecaja izbočavanja hrpta, ovisna o širini naližeganja s_s , koja treba biti manja od h_w .



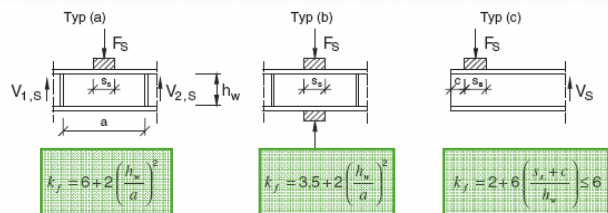
Faktor redukcije χ_F računa se prema izrazima:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{I_y I_w f_{yw}}{E I_{cr}}}$$

$$I_{cr} = 0,9 k_f E \frac{I_w^3}{h_w}$$

Faktor k_f uzima se prema



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:

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

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

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{yy}}{h_w I_w^3} \leq 14 \left[\frac{a}{h_w} \right]^{2,9} + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{h} \right]$$

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

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} b_w}$$

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

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

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

$$I_{y1} = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \leq a \text{ uz uvjet da } I_y \text{ nije veći od razmaka poprečnih ukruta } a.$$

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

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

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

$$l_{y3} = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2}$$

Dokaz se provodi, kako slijedi:

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{yw}} = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w}$$

F_{Ed} proračunska vrijednost poprečnog opterećenja
 L_{eff} djelotvorna širina rasprostiranja uzimajući u obzir izbočavanje hrpta od p
 opterećenja
 t_w debljina hrpta

5.4.4. Interakcija

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:

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

$M_{f,Rd}$ 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

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

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

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:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4$$

5.4.5. Izbočavanje hrpta uslijed popuštanja pojaseva

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

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

A_w ... površina hrpta

A_{fc} ... površina tlačnog pojasa

Vrijednost k uzima se

- 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:

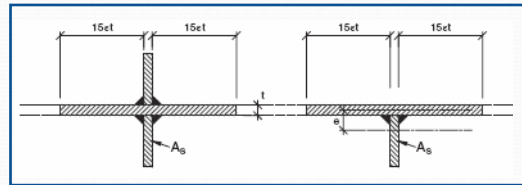
$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{1 + \frac{h_w E}{3 r f_{yf}}}}$$

r ... radius zakrivljenosti tlačnog pojasa

5.4.6. Zahtjevi na konstrukcijske elemente ukrućenih polja limova

Općenito

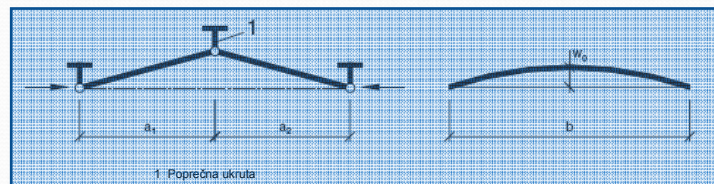
Kod provjere izvijanja ukruta djelotvorni presjek se uzima sa sudjelujućom širinom lima $15 \varepsilon t$ na svakoj strani, ali maksimalno jednako razmaku ukruta.



Djelovanje uzdužnih naprezanja

a) Zahtjevi na poprečne ukrute

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 , 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.

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:

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

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

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

- 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.

b) Zahtjevi na uzdužne ukrute

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

$$I_T / I_p \leq 5,3 f_y / E \quad \text{ima biti zadovoljen uvjet}$$

$$I_T / I_p \geq 11 [t/b_p]^2$$

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

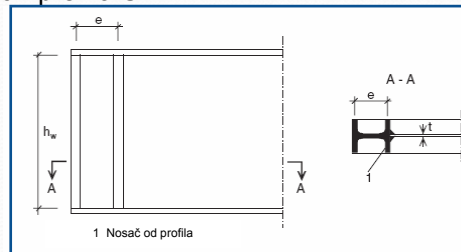
Djelovanje posmičnih naprezanja

a) 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 .

Krutu ležajnu ukrutu alternativno može činiti profil, koji je s limom hrpta povezan prema Sl.



Najmanja površina presjeka svake od dvije ukrute mora iznositi $4 h_w t^2 / e$, kod čega je e razmak između srednjih ravnina ravni limova i mora ispunjavati uvjet $e > 0,1 h_w$.

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.

b) Deformabilne ležajne ukrute

Deformabilna ležajna ukruta je samo jedna dvostrana ležajna ukruta.

c) Poprečne ukrute u polju

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

- za $a / h_w < \sqrt{2}$: $I_{st} \geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2$
- za $a / h_w \geq \sqrt{2}$: $I_{st} \geq 0,75 h_w t^3$

Nosivost krutih ukruta mora se provjeriti za normalnu silu

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

χ_w se određuje za dvostruko polje izbočavanja desno i lijevo od poprečne ukrute, a promatrana poprečna ukruta ne uzima se u obzir.

d) *Uzdužne ukrute*

Uzdužne ukrute mogu biti krute ili deformabilne

Njihova krutost se u oba slučaja može uzeti u obzir kod proračuna vitkosti λ_w

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.

e) *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 $f_{yw} t / \sqrt{3}$.

f) *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 veća od 0,5.

Izvijanje poprečnih ukruta izvan ravnine hrpta treba provjeriti prema liniji izvijanja c i duljini izvijanja $\geq 0,75 h_w$, ako su oba kraja ukrute bočno pridržana.

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.

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:

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

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

χ_v ...koeficijent redukcije

Dokaz se može provesti i prema jednadžbi:

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

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:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult}}{\alpha_{crit}}}$$

- 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.

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

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

$$\alpha_{crit,x} = \frac{\sigma_{crit,x}}{\sigma_{x,Ed}}$$

$$\alpha_{crit,z} = \frac{\sigma_{crit,z}}{\sigma_{z,Ed}}$$

$$\alpha_{crit,\tau} = \frac{\tau_{crit,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}}$$