

PREDNAPETI BETON



– 7 –

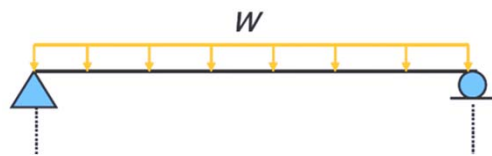
PROGIBI I PUKOTINE

PROGIB OD STALNOG OPTEREĆENJA

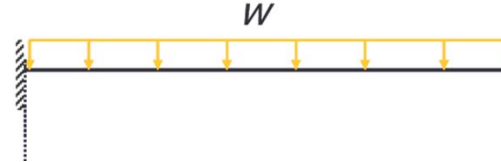
□ Za neke slučajeve izraz za progib uz

- I moment tromosti I
- E modul elastičnosti betona

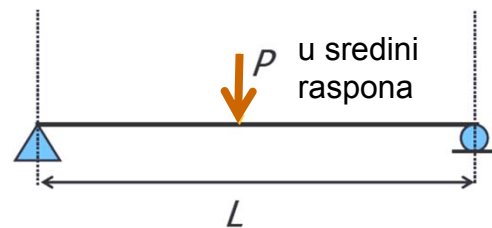
iznosi:



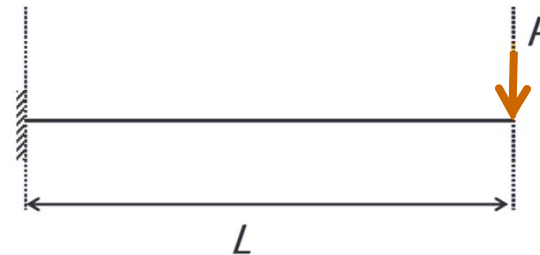
$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{wL^4}{EI}$$



$$\Delta = \frac{wL^4}{8EI}$$



$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI}$$



$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

PROGIB OD PREDNAPINJANJA

- Prednapeti betonski element obično je za isti raspon manje visine nego ab element pa je za očekivati da će progibi biti veći.
- Sila prednapinjanja izaziva progib (nadvišenje) kada je težište kabela ekscentrično u odnosu na težište betonskog presjeka.
- Odižuće opterećenje w_{up} i progib Δ_p za različito vođenje kabela:

	$w_{up} = \frac{8Pe}{L^2}$ $\Delta_p = \frac{5}{384} \frac{w_{up} L^4}{EI}$
	$w_{up} = \frac{4Pe}{L}$ $\Delta_p = \frac{w_{up} L^3}{48EI}$
	$w_{up} = \frac{Pe}{aL}$ $\Delta_p = \frac{a(3-4a^2)w_{up}L^3}{24EI}$

UKUPNI PROGIB

- ...određuje se za dva slučaja:
 - Kratkotrajni progib pri prijenosu sile prednapinjanja
 - Dugotrajni progib pod uporabnim opterećenjem
- **Kratkotrajni progib Δ_{st}** određuje se kao:

$$\Delta_{st} = -\Delta_{P_0} + \Delta_{SW}$$

Δ_{P_0} = Iznos progiba od P_0 (sile prednapinjanja prije dugotrajnih gubitaka)

Δ_{SW} = Progib od vlastite težine

UKUPNI PROGIB

- **Dugotrajni progib Δ_{lt}** teže je proračunati jer su
 - sila prednapinjanja (s vremenom se smanjuje)
 - i deformacija puzanja (povećava se u vremenu pod konst. opterećenjem) međusobno ovisne.
- Granična deformacija puzanja je proporcionalna s elastičnom deformacijom (koef.puzanja θ).
- Pojednostavnjeni izraz, uz prosječnu silu prednapinjanja i zanemarenje učinka skupljanja:

$$\Delta_{lt} = -\Delta_{Pe} - \left(\frac{\Delta_{P0} + \Delta_{Pe}}{2} \right) \theta + (\Delta_{DL} + \Delta_{SL})(1 + \theta) + \Delta_{LL}$$

ΔP_0 = Iznos progiba od P_0 (sile prednapinjanja prije dugotrajnih gubitaka)

ΔP_e = Iznos progiba od P_e (djelotvorne sile prednapinjanja nakon dugotrajnih gubitaka)

Δ_{DL} = Progib od stalnog opterećenja

Δ_{SL} = Progib od trajnog uporabnog opterećenja

Δ_{LL} = Progib od dodatnog uporabnog opterećenja

UKUPNI PROGIB

- **Dugotrajni progib Δ_{lt}**
- Točnija vrijednost određuje se proračunom u vremenskim razmacima.
- Metoda korak-po-korak, gdje se promjena sile prednapinjanja usljed puzanja i skupljanja proračunava na kraju svakog vremenskog perioda.
- Rezultati prethodnog koraka koriste se za sljedeći korak.
- Minimalno je primjeniti 4 vremenska perioda, ali računalom se broj koraka može bitno povećati – više se približavamo točnim vrijednostima.

korak	početak	kraj
1	Prethodno napinjanje: sidrenje čelika Naknadno prednapinjanje: kraj sušenja betona	Trenutak prednapinjanja
2	Kraj koraka 1	30 dana nakon prednapinjanja ili pri primjeni opterećenja
3	Kraj koraka 2	1 godina uporabe
4	Kraj koraka 3	Kraj životnog vijeka

UKUPNI PROGIB

- Primjer proračuna skupljanja i puzanja prema fazama izgradnje i proračuna:

dani		Skupljanje (ε) · 10 ⁻⁵		Puzanje (φ)	
nosač	ploča	nosač	ploča	nosač	ploča
Nosač se napinje na stazi nakon 7 dana, $d_m = 19,5$ cm					
7-15	-	1,89	-	0,25	-
15-28	-	1,96	-	0,22	-
Betonira se kolnička ploča, $d_{m,nos} = 26,7$ cm, $d_{m,pl} = 32,5$ cm					
28-35	0-7	0,697	1,17	0,08	0,58
Uspostavlja se spregnuti presjek nosača i ploče, $d_{m,nos} = 26,7$ cm, $d_{m,pl} = 32,5$ cm					
35-45	7-17	0,996	1,55	0,12	0,26
45-60	17-32	1,08	1,4	0,12	0,19
60-75	32-47	0,88	1,26	0,09	0,16
75-90	47-62	0,88	0,865	0,09	0,10
Djeluje puno opterećenje, $d_{m,nos} = 26,7$ cm, $d_{m,pl} = 32,5$ cm					
90-150	62-122	2,21	2,58	0,21	0,26
150-300	122-272	3,37	3,45	0,28	0,30
300-500	272-472	3,48	3,36	0,25	0,24
500-3000	472-2500	7,14	8,03	0,50	0,52
3000-20000	2500-19500	2,13	3,12	0,23	0,29

GRANIČNI PROGIBI

- Za grede, ploče ili konzole izložene prividno-stalnom opterećenju: $\leq L/250$
- Nadvišenje, uključeno u oplatu: $\leq L/250$
- Kad postoji opasnost oštećenja susjednih dijelova konstrukcije, nakon izgradnje, za prividno-stalno opterećenje: $\leq L/500$

GRANIČNI PROGIBI

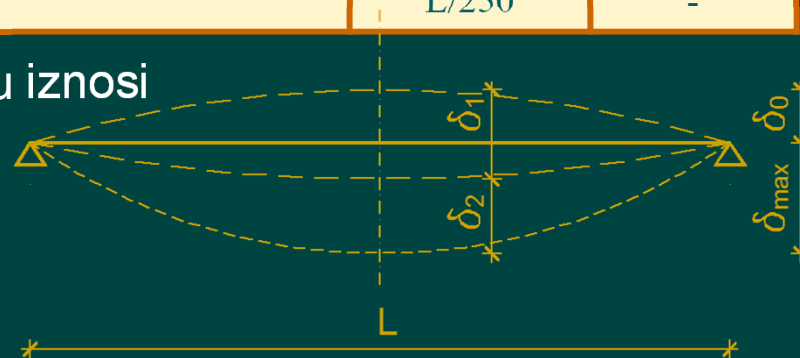
- EN 1990: preporučene granične vrijednosti vertikalnog progiba horizontalne grede

Konstrukcija	$\delta_{\max}$	δ_2
krovovi	L/200	L/300
pristupačni krovovi za drugu namjenu osim održavanja	L/250	L/300
stropovi	L/250	L/300
stropovi/krovovi sa žbukom ili drugim krhkim završnim slojevima ili nesavitljivim pregradama	L/250	L/350
stropovi koje podupiru stupovi (osim ako je progib uzet u obzir u sklopu globalnog proračuna za granično stanje nosivosti)	L/400	L/500
kada $\delta_{\max}$ može narušiti izgled zgrade	L/250	-

- Maksimalni progib u odnosu na horizontalu iznosi

$$\delta_{\max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$$

- δ_0 prethodno nadvišenje grede,
- δ_1 je progib grede uslijed stalnog opterećenja neposredno nakon opterećenja, a
- δ_2 je progib grede uslijed promjenljivog opterećenja i vremenski promjenljivih deformiranja od stalnoga opterećenja.



MOMENTI TROMOSTI

□ Kod **punog i ograničenog prednapinjanja**

- presjeci se dimenzioniraju tako da se ne smiju raspucati pod uporabnim opterećenjem
 - ▶ primjenjuje se moment tromosti cjelokupnog neraspucalog presjeka I .

□ Kod **djelomičnog prednapinjanja**

- dopušta se otvaranje pukotina (ograničene širine) pa se općenito može uzeti:

- Kada je $G \leq 0,25 Q$

- ▶ primjenjuje se moment tromosti cjelokupnog neraspucalog presjeka I .

- Kada je $G > 0,25 Q$, uz ograničenje L/d

- ▶ nije potreban proračun progiba

- Kada je $G > 0,25 Q$, a nema ograničenja L/d , uz vlačno naprezanje pod uporabnim opterećenjem manje od granične dozvoljene vrijednosti

- ▶ primjenjuje se moment tromosti cjelokupnog neraspucalog presjeka I .

- Ovo je pojednostavnjenje jer je proračun djelotvornog momenta tromosti I_{eff} puno kompliciraniji.

GRANIČNI ODNOSI L/d

- EN 1992-1-1 daje izraze za L/d za AB elemente uz prilagodbe za različite konstrukcijske elemente i različite razine naprezanja u armaturi kada nije potreban proračun progiba. (potrebno je razmotriti primjenu za PB).

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{if } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{if } \rho > \rho_0$$

Izrazi vrijede za naprezanje u čeliku (za GSU, u raspucalom presjeku) od 310 MPa ($\approx$ vrijedi za $f_{yk}=500\text{MPa}$), a za drukčija naprezanja radi se prilagodba množenjem s:

$$310 / \sigma_s = 500 / (f_{yk} A_{s,req} / A_{s,prov})$$

Kons. sustav	K	Visoko napregnuti beton $\rho = 1,5\%$	Nisko napregnuti beton $\rho = 0,5\%$
Slobodno oslonjena greda ili ploča	1,0	14	20
Krajnji raspon kontinuirane grede ili ploče	1,3	18	26
Unutarnji raspon grede ili ploče	1,5	20	30
Ploča na stupovima bez greda (dulji L)	1,2	17	24
konzola	0,4	6	8

Kad je širina pojasnice $> 3b_w$ množenje s 0,8

Za raspone > 7 m, množenje s $7/l_{eff}$

K Faktor kojim se uzima u obzir konstrukcijski sustav

ρ_0 Referentni koeficijent armiranja $= \sqrt{f_{ck}} 10^{-3}$

ρ Potrebni vlačni koeficijent arm. u sredini raspona koji se odupire M_{Ed} (za konzole na ležaju)

ρ' Potrebni tlačni koeficijent arm. u sredini raspona koji se odupire M_{Ed} (za konzole na ležaju)

GRANIČNI ODNOSI L/d

- U jednim drugim propisima daju se sljedeća ograničenja pri kojim nije potreban proračun progiba (moglo bi se usporediti ove vrijednosti s onima koje se dobiju proračunom prema EN).

L ≤ 10 m	
Konzolne	$L/d \leq 7$
Slobodno oslonjene grede	$L/d \leq 20$
Kontinuirane grede	$L/d \leq 26$
L > 10 m	
Slobodno oslonjene grede	$L/d \leq (20 \times 10/L)$
Kontinuirane grede	$L/d \leq (26 \times 10/L)$

PRORAČUN PROGIBA (EN 1992-1-1:2004)

- Za elemente izložene savijanju u području od neraspucalog do potpuno raspucalog presjeka vrijedi:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I$$

- α deformacijski parametar (deformacija, zakrivljenost ili rotacija, a pojednostavnjeno progib), α_I za neraspucali i α_{II} za potpuno raspucali pr.
- ζ faktor raspodjele; =0 za neraspucale presjeke
$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$
- β koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj trajanja opterećenja ili ponavljanja opterećenja na prosječnu deformaciju;
= 1,0 za jednostruko kratkotrajno opterećenje;
= 0,5 za dugotrajna opterećenja ili cikluse ponavljanja opterećenja
- σ_s naprezanje u vlačnoj armaturi kod neraspucalog presjeka
- σ_{sr} naprezanje u vlačnoj armaturi kod raspucalog presjeka pod opterećenjem koje otvara prvu pukotinu.
- σ_{sr} / σ_s može se zamijeniti sa M_{cr}/M pri savijanju

PRORAČUN PROGIBA (EN 1992-1-1:2004)

- Progibi se mogu odrediti uz primjenu
 - vlačne čvrstoće betona (najprikladnije f_{ctm})
 - i djelotvornog modula elastičnosti.
 - Za opterećenja pod kojim se razvija puzanje, ukupan progib koji uključuje i puzanje može se odrediti, uz koeficijent puzanja $\varphi(\infty, t_0)$:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

- Zakrivljenost od skupljanja određuje se iz:

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}$$

- $1/r_{cs}$ zakrivljenost od skupljanja
- ε_{cs} slobodna deformacija od skupljanja
- S prvi moment površine armature oko osi presjeka
- I moment tromosti presjeka
- α_e djelotvorni odnos modula elastičnosti = $E_s / E_{c,eff}$
- S i I se računaju za neraspucali i potpuno raspucali presjek, uz konačnu zakrivljenost prema izrazu sa prethodnog slajda

OPĆENITO O PUKOTINAMA

- Širina pukotina u prednapetom elementu ovisit će o:
 - Razini prednapinjanja
 - Vlačnom naprezanju u uzdužnim šipkama armature
 - Debljini zaštitnog sloja
 - Razmaku i promjeru uzdužnih šipki
 - Visini elementa i položaju neutralne osi
 - Čvrstoći prijanjanja
 - Vlačnoj čvrstoći betona

- Kod djelomičnog prednapinjanja omogućava se otvaranje pukotina čija širina mora biti ograničena.

PREPORUČENE GRANIČNE VRIJEDNOSTI ŠIRINE PUKOTINA

Razred izloženosti	Armiranobetonske konstrukcije i prednapete konstrukcije s mortom neinjektiranim kabelima (slobodni)	Prednapete konstrukcije s mortom injektiranim kabelima (spregnute natege)	
	Nazovistalna kombinacija djelovanja	Česta kombinacija djelovanja	
X0	0,4 mm	0,2 mm	
XC1			
XC2	0,3 mm	0,2 mm + kontrola rastlačenja pri nazovistalnoj kombinaciji djelovanja	kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku
XC3			
XC4			
XD1			
XD2			
XD3	zahtijevaju se posebne mjere zaštite		
XS1	0,3 mm	kontrola rastlačenja	kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku
XS2			
XS2			

Nacionalni dodatak za mostove

PREPORUČENE GRANIČNE VRIJEDNOSTI ŠIRINE PUKOTINA

2.22 Ograničenje proračunske širine pukotina, definicija rastlačenja (dekompresije) i primjena, točka 7.3.1(105), NAPOMENE

Preporučene vrijednosti za $w_{\max}$ i odgovarajuća pravila za kombinacije dani su u tablici 7.101(N)(HR).

Tablica 7.101(N)(HR) – Preporučene vrijednosti za $w_{\max}$ i odgovarajuća pravila za kombinacije

Br. retka	Razred izloženosti	Konstrukcijski elementi od armiranoga betona i konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s nespregnutim nategama		Konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s naknadnim prednapinjanjem		Konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s prethodnim prednapinjanjem ^a	
		$w_{\max}$	Dokaz rastlačenja	$w_{\max}$	Dokaz rastlačenja	$w_{\max}$	Dokaz rastlačenja
		mm		mm		mm	
1	XC1 ^b	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c	nije potreban	0,2 za česte kombinacije djelovanja ^c	za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c	0,2 za česte kombinacije djelovanja ^c	za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c
2	XC2, XC3 ^d , XC4 ^d , XD1, XF1, XF2, XF3	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c		0,2 za česte kombinacije djelovanja ^c	za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja ^c	za česte kombinacije djelovanja
3	XA1, XA2, XD2	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja ^c		0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja ^c	za česte kombinacije djelovanja ^c	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja ^c	za česte kombinacije djelovanja ^c
4	XA3, XD3, XF4	0,3 za česte kombinacije djelovanja ^c		0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja ^c	Za česte kombinacije djelovanja ^c	–	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja ^c

NAPOMENE:

- redak ne vrijedi za mostove i slične nosive konstrukcije izložene atmosferskim utjecajima.
 - redak vrijedi za uobičajene mostove s izolacijom i zastorom ili dijelove mostova u području utjecaja izmaglice.
 - redak vrijedi za posebne slučajeve.
 - redak vrijedi za površinu mosta bez izolacije i zastora po kojoj se izravno vozi, rubne grede i dijelove mostova (npr. stupovi i upornjaci) u blizini kolnika do visine 5 m (područje prskanja).
- ^a Nije dopušteno za željezničke mostove.
- ^b Za razred izloženosti XC1 širina pukotina nema utjecaja na trajnost. Navedene granične vrijednosti širine pukotina imaju za cilj osiguranje prihvatljiva izgleda.
- ^c Karakteristična, česta i nazovistalna kombinacija djelovanja definirane su u normi HRN EN 1990:2011.
- ^d Kod zahtjeva za nepropusnost građevine treba ostvariti smanjene širine pukotina.

Za XS1 nema preporuke u dodatku ali kako se za razrede XD1 i XS1 bira jednaki minimalni zaštitni sloj za AB i PB onda možemo zaključiti da S1 spada u istu razinu provjera. Isto bi vrijedilo za XS2 – ide u kategoriju provjere kao XD2, te za XS3 – ide u kategoriju provjere XS3.

MINIMALNA ARMATURA

- Količina se može procijeniti na temelju ravnoteže između vlačne sile u betonu neposredno prije raspucavanja i vlačne sile u armaturi pri popuštanju ili nižem naprezanju ukoliko je potrebno ograničiti širinu pukotina.

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

- $A_{s,min}$ minimalna površina armaturnog čelika u vlačnoj zoni
- A_{ct} površina betona u vlačnoj zoni (dio koji je u vlaku neposredno prije pojave prve pukotine)
- σ_s apsolutna vrijednost maksimalnog naprezanja dozvoljenog u armaturi neposredno nakon raspucavanja (može se uzeti f_{yk}). Niža vrijednost bit će potrebna kako bi se zadovoljila granična širina pukotina s obzirom na maksimalni profil ili razmak šipki.
- $f_{ct,eff}$ srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona djelotvorna u trenutku kada se očekuje pojava prve pukotine, = f_{ctm} ili niže $f_{ctm}(t)$ ako se raspucavanje očekuje prije 28 dana
- k = **1,0** za hrptove visine $h \leq 300$ mm ili pojasnice širine $b < 300$ mm
= **0,65** za hrptove visine $h \geq 800$ mm ili pojasnice širine $b > 800$ mm
- k_c koeficijent kojim se uzima u obzir raspodijela naprezanja u presjeku neposredno prije raspucavanja i promjena kraka sila



MINIMALNA ARMATURA

□ k_c koeficijent kojim se uzima u obzir raspodijela naprezanja u presjeku neposredno prije raspucavanja i promjena kraka sila

■ Za čisti vlak = 1,0

■ Za savijanje sa ili bez uzdužne sile:

□ Pravokutni presjeci i hrptovi sandučastih ili T presjeka

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1(h/h^*)f_{ct,eff}} \right] \leq 1$$

□ Pojasnice sandučastih ili T presjeka

$$k_c = 0,9 \frac{F_{cr}}{A_{ct}f_{ct,eff}} \geq 0,5$$

■ σ_c

naprezanje betona u razmatranom području $N_{Ed}/(bh)$

■ N_{Ed}

uzdužna sila pri GSU na dio poprečnog presjeka koji se razmatra (tlačna sila je pozitivna). Određuje se s karakterističnom vrijednošću prednapinjanja i uzdužnim silama u odgovarajućim kombinacijama.

■ h^*

= h za h < 1,0 m
= 1,0 m za h ≥ 1,0 m

■ k_1

koeficijent koji uzima u obzir učinke uzdužne sile na razdiobu naprezanja
= 1,5 ako je N_{Ed} tlačna sila
= $2h^*/3h$ ako je N_{Ed} vlačna sila

■ F_{cr}

apsolutna vrijednost vlačne sile u pojasnici neposredno prije raspucavanja od M_{cr} proračunatog s $f_{ct,eff}$

MINIMALNA ARMATURA

- Za spregnute kabele u vlačnoj zoni može se pretpostaviti da sudjeluju u kontroli pukotina u okviru udaljenosti ≤ 150 mm od središta kabela. Ovo se uzima u obzir dodavanjem na lijevu stranu izraza:

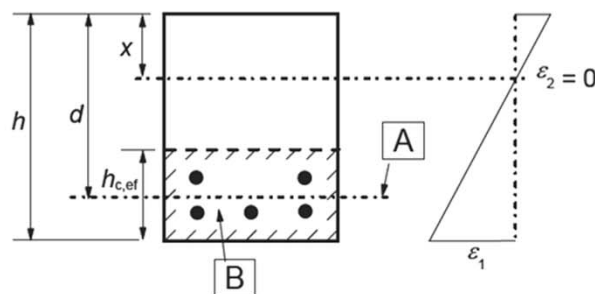
$$\xi_1 A_p' \Delta \sigma_p + A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

- A_p' površina prethodno ili naknadno prednapetih kabela u području $A_{c,eff}$
- $A_{c,eff}$ djelotvorna površina betona u vlaknu koja okružuje armaturu ili prednapete kabele debljine $h_{c,ef}$ (sljedeći slajd)
- $h_{c,ef}$ manja vrijednost od **$2,5(h-d)$; $(h-x)/3$; $h/2$**
- ξ_1 omjer prilagodbe čvrstoće prijanjanja, uzimajući u obzir različite promjere prednapetog i armaturnog čelika
$$= \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi_s}{\phi_p}}$$
 - ξ omjer čvrstoće prijanjanja prednapetog i armaturnog čelika (slajd iza sljed.)
- $\Delta \sigma_p$ promjena naprezanja u prednapetom kabelu od stanja kada je naprezanje u betonu = 0 na istoj razini.

MINIMALNA ARMATURA

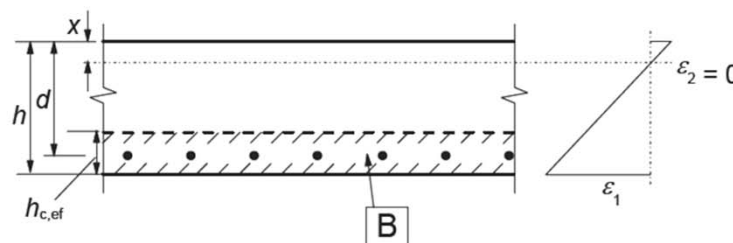
$A_{c,eff}$ djelotvorna površina betona u vlaku

GREDA



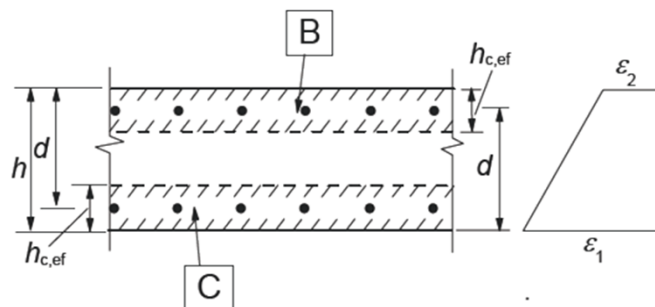
- A** - Razina težišta kabela
- B** - Djelotvorna vlačna površina $A_{c,eff}$

PLOČA



- B** - Djelotvorna vlačna površina $A_{c,eff}$

VLAČNI ELEMENT



- B** - Djelotvorna vlačna površina za gornje područje $A_{ct,eff}$
- C** - Djelotvorna vlačna površina za donje područje $A_{cb,eff}$

MINIMALNA ARMATURA

ξ omjer čvrstoće prijanjanja prednapetog i armaturnog čelika

Čelik za prednapinjanje	ξ		
	Prethodno napinjanje	Spregnuti kabeli, naknadno napinjanje	
		≤ C50/60	≥ C70/85
Glatke šipke i žice	Nije primjenljivo	0,3	0,15
Užad	0,6	0,5	0,25
Zarezane žice	0,7	0,6	0,3
Rebraste šipke	0,8	0,7	0,35
Između navedenih razreda betona interpolacija			

- Nije potrebna minimalna armatura u PB kada je
 - pod karakterističnom kombinacijom djelovanja i
 - uz karakterističnu vrijednost sile prednapinjanja
- beton u tlaku ili je vlačno naprezanje ispod $\sigma_{ct,p} = f_{ct,eff}$

KONTROLA PUKOTINA

□ ... BEZ PRORAČUNA ŠIRINE PUKOTINE:

- za odgovarajuću razinu naprezanja u čeliku daju se granične vrijednosti

- promjera i
- razmaka šipki armature.

□ Tablice su napravljene na temelju vrijednosti:

- $c=25\text{mm}$; $f_{ct,eff} = 2,9\text{MPa}$; $h_{cr}=0,5$; $(h-d)=0,1h$; $k_1=0,8$; $k_2=0,5$; $k_c=0,4$; $k=1,0$; $k_t=0,4$ i $k'=1,0$

□ Maksimalni promjer šipki se modificira sa:

- pri savijanju (kada je bar dio presjeka u tlaku):

$$\phi_s = \phi_s^* (f_{ct,eff}/2,9) \frac{k_c h_{cr}}{2 (h-d)}$$

- pri vlaku:

$$\phi_s = \phi_s^* (f_{ct,eff}/2,9) h_{cr} / (8(h-d))$$

- ϕ prilagođeni maksimalni promjer
- h ukupna visina presjeka
- h_{cr} visina vlačne zone neposredno prije raspucavanja uz karakterističnu vrijednost prednapinjanja i uzdužnu silu pod prividno-stalnom komb.
- d djelotvorna debljina do središta vanjske linije armature

Maksimalni promjeri šipki armature ϕ_s^* (mm)

Naprezanja [MPa]	$W_k=0,4$ mm	$W_k=0,3$ mm	$W_k=0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Maksimalni razmak šipki (mm)

Naprezanja [MPa]	$W_k=0,4$ mm	$W_k=0,3$ mm	$W_k=0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

- ❑ Kod prethodno prednapetog betona, gdje se kontrola pukotina osigurava kabelima koji su u direktnoj vezi s betonom – u tablicama se za naprezanje koristi (ukupno naprezanje – prednaprezanje).
- ❑ Za naknadno prednapinjanje, gdje se kontrola pukotina osigurava uglavnom nenapetom armaturom, može se u tablicama naprezanje u ovoj armaturi proračunati uzimanjem u obzir utjecaja sile prednapinjanja.

KONTROLA PUKOTINA

□ ... BEZ PRORAČUNA ŠIRINE PUKOTINE:

- Kod greda visine ≥ 1000 mm,
- kada je glavna armatura skoncentrirana u malom području visine,
- valja osigurati dodatnu armaturu kojom će se sprečavati pukotine na bočnim stranama grede.
 - Ova armatura raspodjeljuje se jednoliko od razine vlačne armature do neutralne osi.
 - Proračunava se prema izrazu za minimalnu armaturu (slajd 18) uz $k=0,5$ i $\sigma_s = f_{yk}$.
 - Razmak i veličina profila određuju se uz pretpostavku čistog vlaka i naprezanja u iznosu pola vrijednosti onoga za koji se računa glavna vlačna armatura

PRORAČUN ŠIRINE PUKOTINA

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Širina
pukotina

maksimalni razmak pukotina,
ovisi o rasporedu armature

razlika deformacija
čelika i betona

Razlika deformacija čelika i betona: $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

- σ_s naprezanje u vlačnoj armaturi uz pretpostavku raspucalog presjeka. Za prethodno napete elemente može se uzeti $\sigma_s \triangleright \Delta \sigma_p$ = razlika naprezanja u kabelima od stanja kad je deformacija betona ε_c na istoj razini = 0
- $\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 A_p') / A_{c,eff}$ za A_p' ; $A_{c,eff}$; ξ_1 vidi slajd 20.
- α_e odnos modula elastičnosti E_s / E_{cm}
- k_t faktor ovisan o trajanju opterećenja
= 0,6 za kratkotrajno opterećenje
= 0,4 za dugotrajno opterećenje

Maksimalni razmak pukotina: $s_{r,max}$

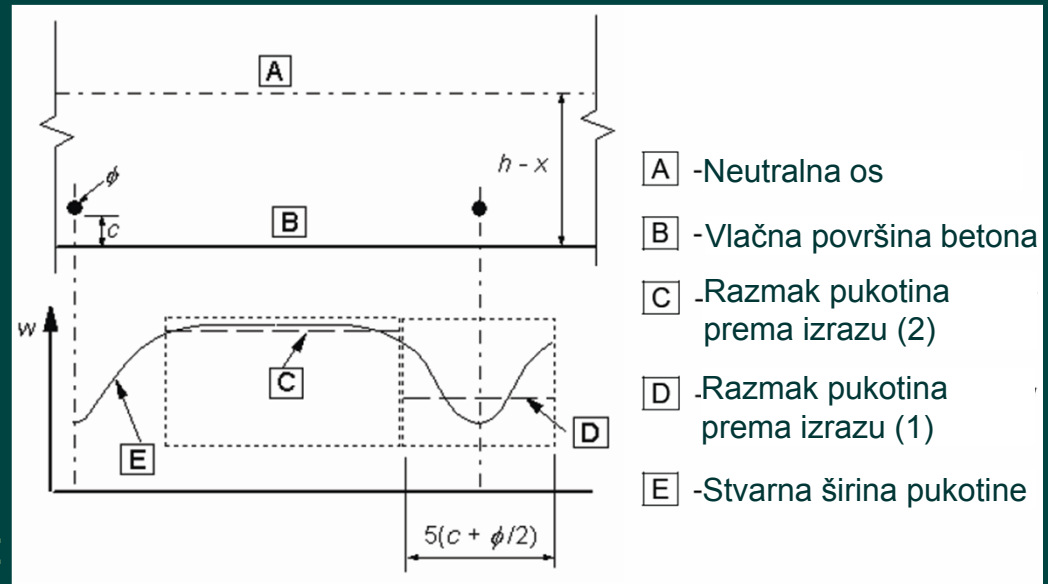
- U području širine $\leq 5(c+\phi/2)$ od osi šipke armature maksimalni razmak pukotina može se odrediti izrazom:

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

- ϕ promjer šipke.
Za n_1 šipki promjera ϕ_1 i n_2 šipki promjera ϕ_2 uzima se:

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2}$$

- k_1 koeficijent koji uzima u obzir svojstva prionljivosti šipki
 - = 0,8 za visoku prionljivost; = 1,6 za šipke s ravnom površinom ili prednapete kabele
- k_2 koeficijent koji uzima u obzir raspodjelu deformacija
 - = 0,5 za savijanje; = 1,0 za čisti vlak; = $(\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2\epsilon_1$ za ekscentrični vlak ili lokalno područje, ϵ_1 je veća, a ϵ_2 manja vlačna deformacija na krajevima promatranog presjeka, za raspucali presjek
- $k_3 = 3,4$; $k_4 = 0,425$

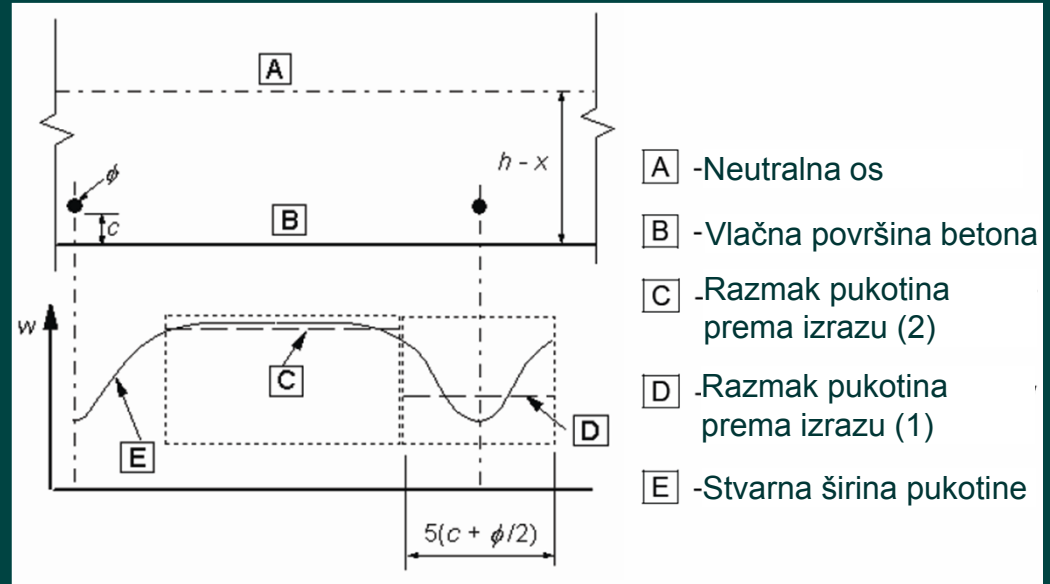


Maksimalni razmak pukotina: $s_{r,max}$

- Kada je razmak šipki $> 5(c + \phi/2)$ ili kada nema armature u vlačnoj zoni, razmak pukotina se uzima sa:

2

$$s_{r,max} = 1,3 (h - x)$$



- Kada je kut između osi glavnih naprezanja i smjera pružanja armature (kod elemenata armiranih u dva okomita smjera) $> 15^\circ$, razmak pukotina se može odrediti:

$$s_{r,max} = \frac{1}{\frac{\cos \theta}{s_{r,max,y}} + \frac{\sin \theta}{s_{r,max,z}}}$$

- θ kut između armature u y smjeru i smjera glavnog vlačnog naprezanja
- $s_{r,max,y}$; $s_{r,max,z}$ razmaci pukotina u y odnosno z smjeru prema izrazu 1 ili 2.

PREDNAPETI BETON

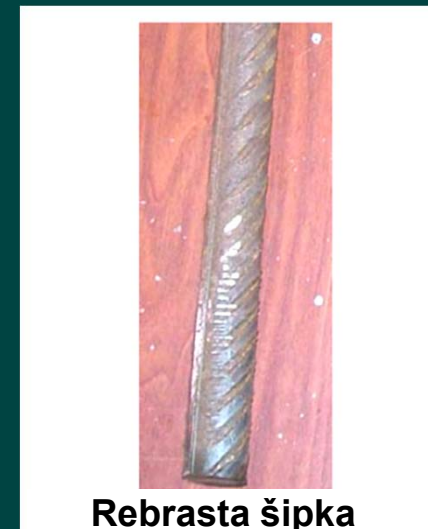
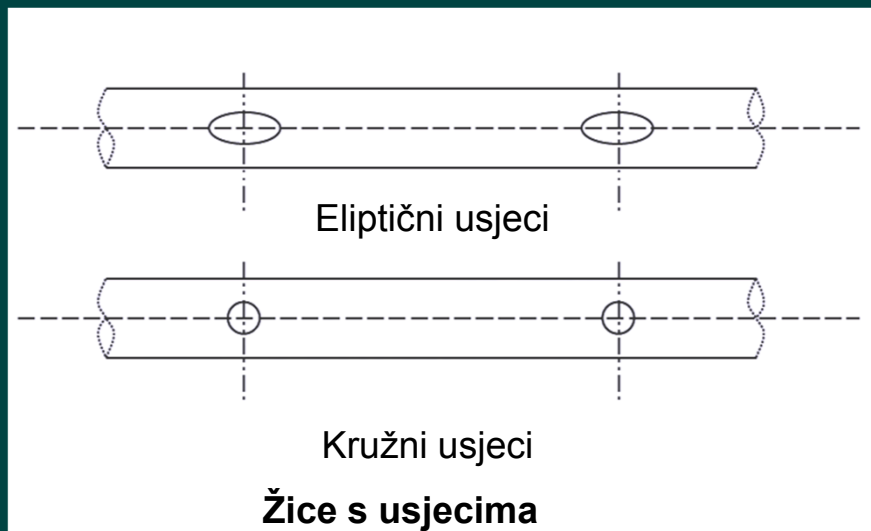


– 8 –

PRIJENOS PREDNAPINJANJA
PRETHODNO PREDNAPETI ELEMENTI

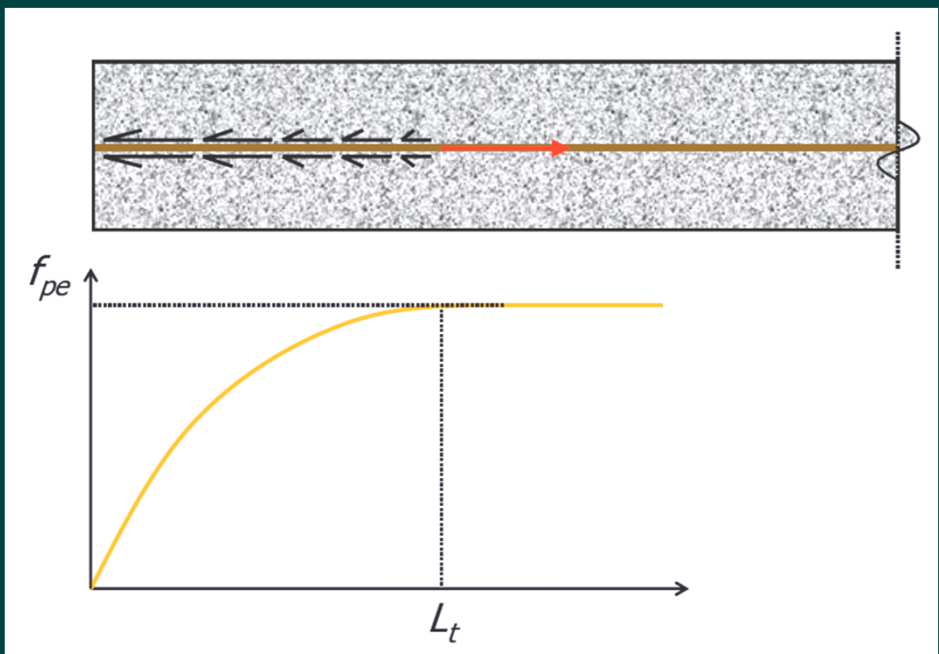
MEHANIZMI PRIJENOSA

- Kod prethodno napetih elemenata nema sustava za sidrenje na krajevima nosača nego se prednapinjanje prenosi vezom između betona i kabela.
- Tri su mehanizma aktivna u tom prijenosu:
 - Adhezija (prianjanje) između betona i čelika
 - Mehanička veza betona i čelika
 - Primarni mehanizam kod žica s usjecima, upletene užadi i rebrastih šipki – deformacije na površini su mjesta postizanja veze
 - Trenje uz prisutnost poprečnog tlaka.



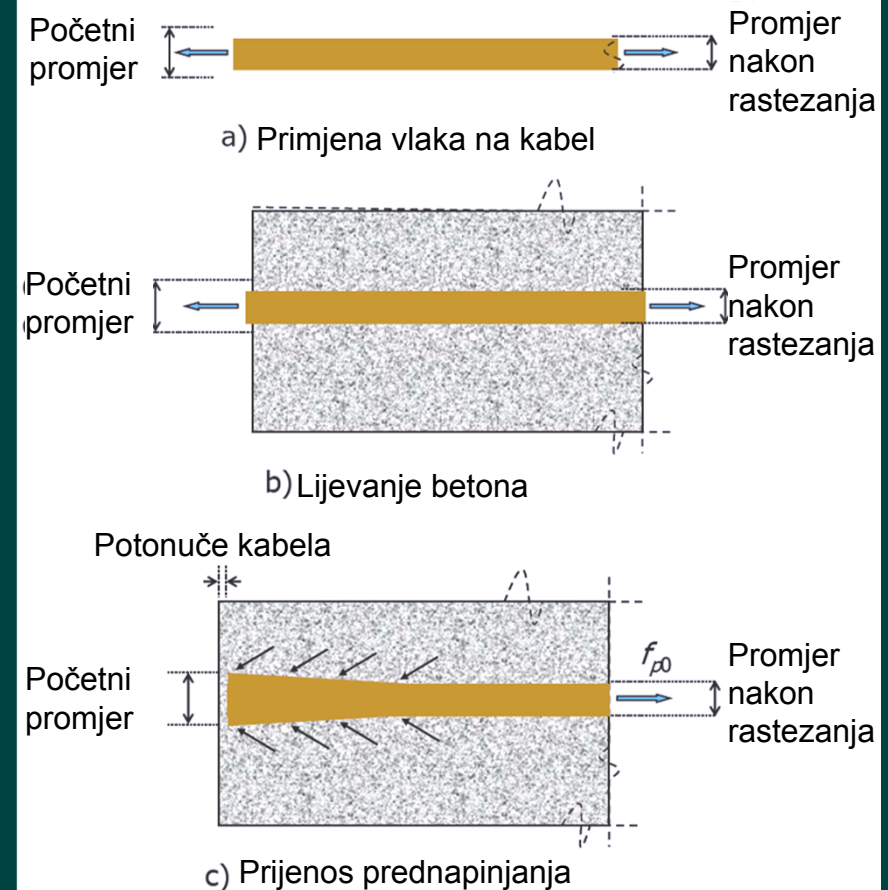
DULJINA PRIJENOSA

- Prednapinjanje se prenosi preko određene duljine sa svakog kraja elementa – duljina prijenosa L_t (l_{pt} – *vidi izraze prema Eurokodu u predavanju Detalji i konstruktivna pravila*).
- Na krajevima elementa naprezanje u kabelu je $=0$, a povećava se preko duljine prijenosa do djelotvornog prednapinjanja f_{pe} pod uporabnim opterećenjem i ostaje konstantno iza tog područja (*prema EC: f_{bpt} naprezanje prijanjanja*).



TZV. HOYER UČINAK (učinak klina)

- ❑ Nakon rastezanja kabela, promjer se smanjuje u odnosu na početni zbog Poissonovog učinka.
- ❑ Kada se nakon očvršćenja betona prednapinjanje prenese na beton, krajevi kabela uđu (potonu) u beton.
- ❑ Naprezanje na krajevima kabela = 0 (nema sustava za sidrenje).
- ❑ Promjer kabela ponovno dobiva svoju početnu vrijednost postupno na duljini prijenosa ► predstavlja učinak klina u betonu ► pomaže u prijenosu prednapinjanja s kabela na beton.
- ❑ Beton treba imati dobru kvalitetu i prikladnu zbijenost na duljini prijenosa
- ❑ *Vidi 1.predavanje SUSTAV HOYER (LONG LINE METHOD)*



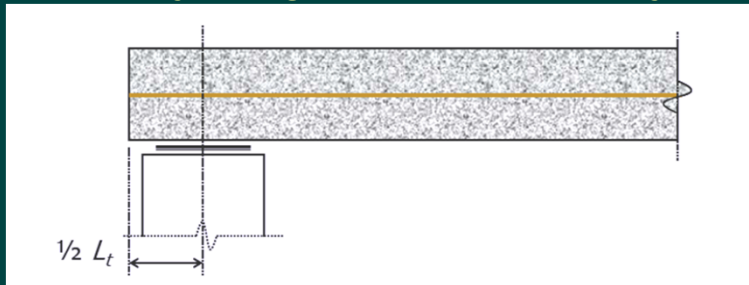
DULJINA PRIJENOSA

□ Ovisit će o:

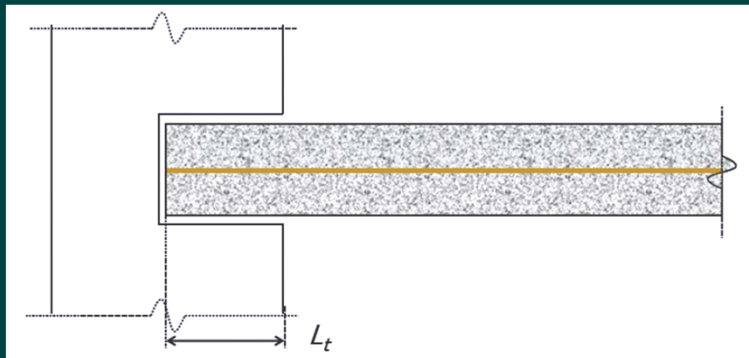
- Vrsti kabela (žica, uža ili šipka)
- Veličini kabela
- Naprezanju u kabele
- Površinskim deformacijama kabela (ravan, s usjecima na razmacima, uvijanje, rebraste)
- Čvrstoći betona pri prijenosu
- Načinu rezanja kabela (naglo rezanje plamenikom ili sporo otpuštanje preše)
- Prisustvu armature za ovijanje
- Učinku puzanja
- Zbijenosti betona
- Veličini zaštitnog sloja betona

DULJINA PRIJENOSA

- ❑ Proračun duljine prijenosa potreban je kako bi presjek s velikim momentom savijanja bio izvan duljine prijenosa tako da kabel zadrži najmanje djelotvorno prednapinjanje f_{pe} u tom presjeku.
- ❑ Kako bi se duljina prijenosa izbjegla u svijetlom rasponu grede preporuke su:
 - Prepust slobodno oslonjene grede iza osi ležaja za najmanje $\frac{1}{2} L_t$



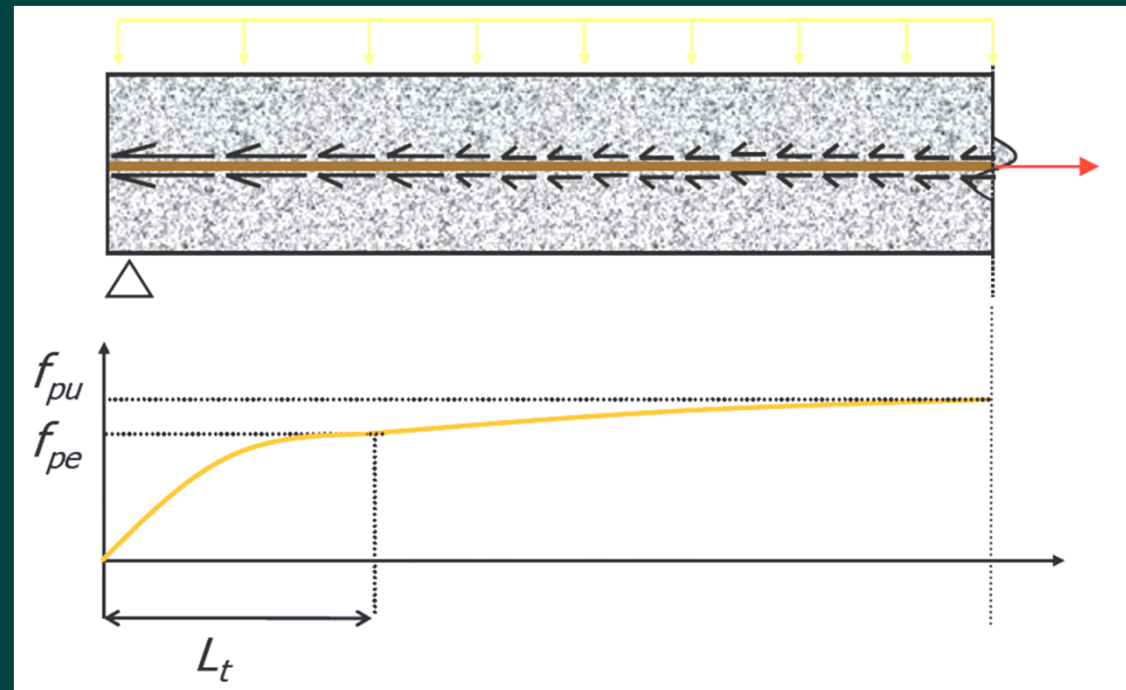
- Duljina upetosti od barem L_t



DULJINA RAZVOJA GRANIČNOG PREDNAPINJANJA ($\approx$ duljina sidrenja)

- Najmanja duljina potrebna da bi naprezanje u kabelu poraslo od 0 do graničnog prednapinjanja f_{pu} (kojim se postiže granična nosivost na savijanje)
- Zbroj duljine prijenosa i duljine prianjanja

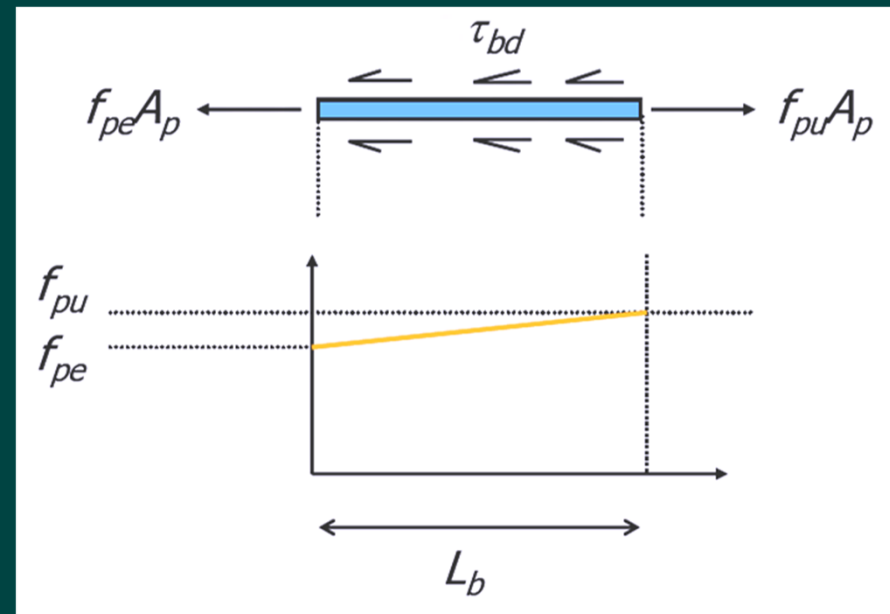
$$L_d = L_t + L_b$$



DULJINA PRIANJANJA

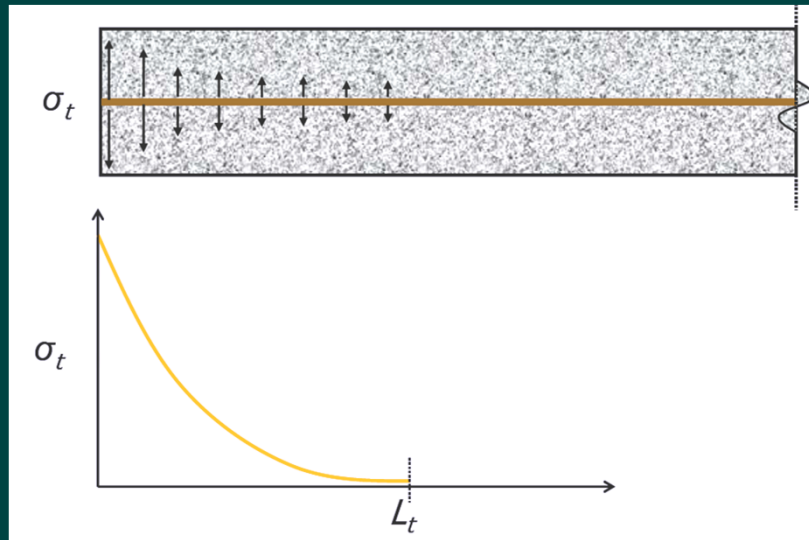
- Minimalna duljina na kojoj naprezanje u kabelu naraste od djelotvornog prednapinjanja f_{pe} do graničnog prednapinjanja f_{pu} .
- Pretpostavlja se linearni porast uz srednje proračunsko naprezanje prianjanja τ_{bd} ($\approx f_{bpd}$, čvrstoća prianjanja u EC)
- Ovisi o:
 - Površinskim uvjetima na kabelu
 - Veličini kabela
 - Naprezanju u kabelu
 - Debljini betona ispod kabela
- Izraz za duljinu prianjanja:

$$L_b = \frac{(f_{pu} - f_{pe})\varphi}{4\tau_{bd}}$$



POPREČNI VLAK I PRIKLADNA ARMATURA

- Prednapinjanje i učinak klina izazivaju poprečno vlačno naprezanje.



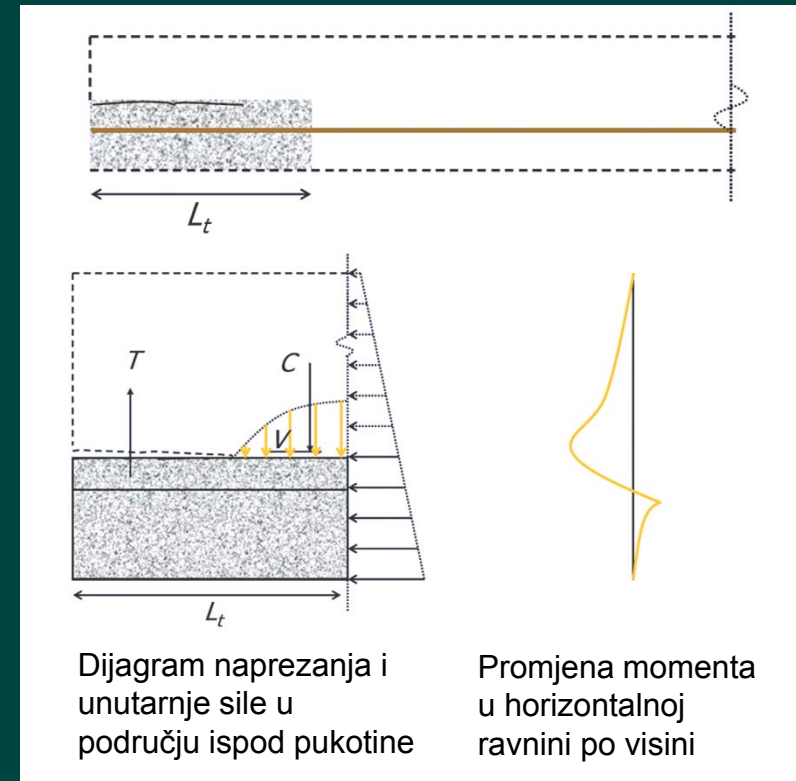
- Kako bi se spriječilo raspucavanje betona potrebna je poprečna armatura (dodatna onoj koja nosi na posmična naprezanja) na krajevima elementa na duljini prijenosa: **armatura rubnog područja**.
 - u obliku zatvornih vilica koja obuhvaća sve kabele i obavija beton.
 - Prva vilica postavlja se što je moguće bliže rubu elementa.
 - Pola armature raspoređuje se na duljini $1/3 L_t$, a preostala polovica na $2/3 L_t$

POPREČNI VLAK I PRIKLADNA ARMATURA

- Razvoj poprečnog vlačnog naprezanja vidljiv je u području ispod pukotine: vlak (T), tlak (C) i posmik (V) razvijaju se usljed momenta (M) koji djeluje u horizontalnoj ravnini na razini pukotine.
- **Armatura rubnog područja** treba preuzeti vlak (T) izazvan momentom (M)

$$A_{st} = \frac{2.5M}{f_s h}$$

- h visina presjeka
- M moment u horizontalnoj ravnini na razini težišta presjeka od dijagrama tlačnog naprezanja iznad težišta
- f_s raspoloživo naprezanje u armaturi rubnog područja
- $h/2,5$ je krak sila momenta



PREDNAPETI BETON

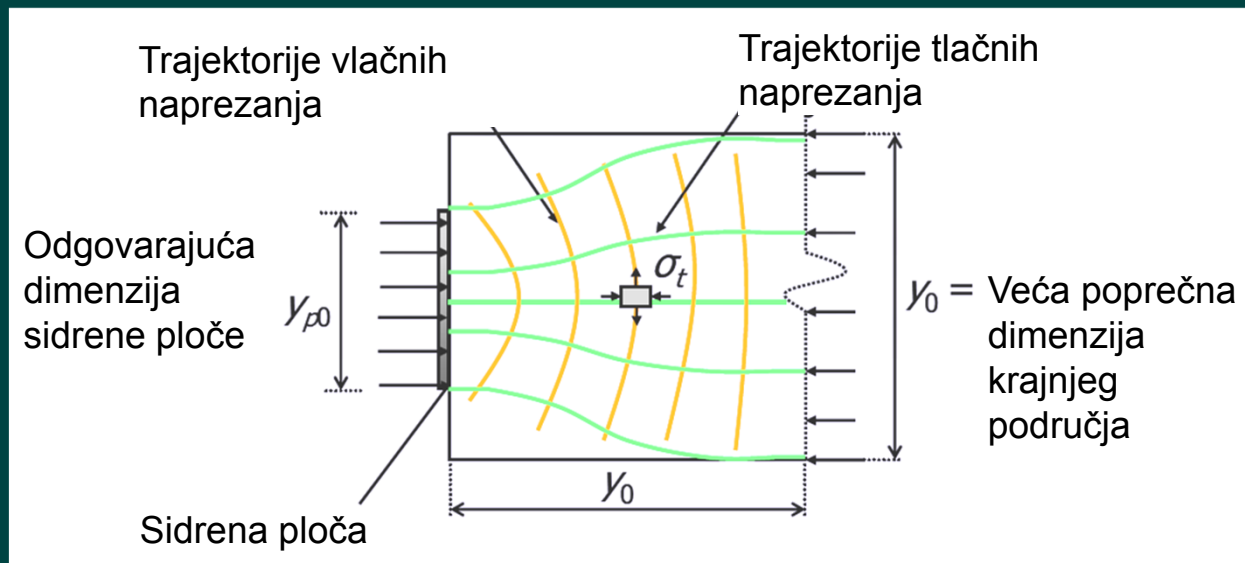


– 8 –

PRIJENOS PREDNAPINJANJA
NAKNADNO PREDNAPETI ELEMENTI

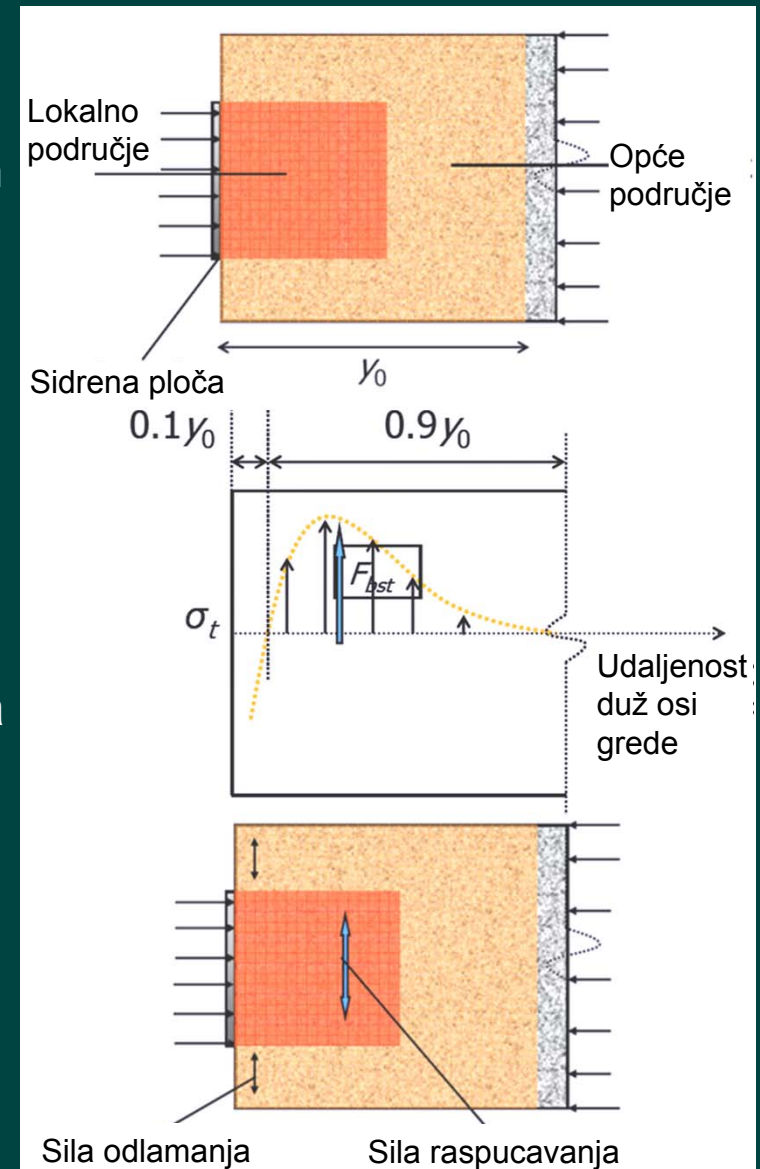
TRAJEKTORIJE NAPREZANJA

- ❑ Kod naknadnog prednapinjanja se naprezanje u kabel unosi u području sidrenog bloka.
- ❑ Nema zahtijeva za duljinom prijenosa ili duljinom razvoja graničnog prednapinjanja (sidrenja).
- ❑ Krajnje područje elementa je izloženo visokom naprezanju te zahtijeva posebni proračun poprečne armature.
- ❑ Trajektorije tlačnog naprezanja nisu na rubovima paralelne, ali se šire od sidrenog bloka dok ne postanu paralelne. Pretpostavka je da postaju paralelne nakon duljine jednake većoj poprečnoj dimenziji rubnog presjeka.



NAPREZANJA I SILE U KRAJNJEM PODRUČJU

- Krajnje područje dijeli se na
 - **Lokalno područje**
 - Područje iza sidrene ploče izloženo visokom naprezanju od unosa sile prednapinjanja.
 - Ponašanje ovog područja ovisit će o samom uređaju za sidrenje i armaturi za ovijanje područja (spiralnoj)
 - **Opće područje**
 - Područje izloženo odlamanju betona – sila odlamanja (*spalling force*).
 - Ojačava se armaturom krajnjeg područja.
- Promjena poprečnog naprezanja u osi presjeka po duljini krajnjeg područja:
 - u području do **$0,1y_0$** je tlačno,
 - nakon toga naprezanje je vlačno, prvenstveno raste, a zatim opada na nulu na duljini **y_0**
- Vlačno poprečno naprezanje je naprezanje razdvajanja (*splitting tensile stress*) a rezultira silom raspucavanja (*bursting force*)

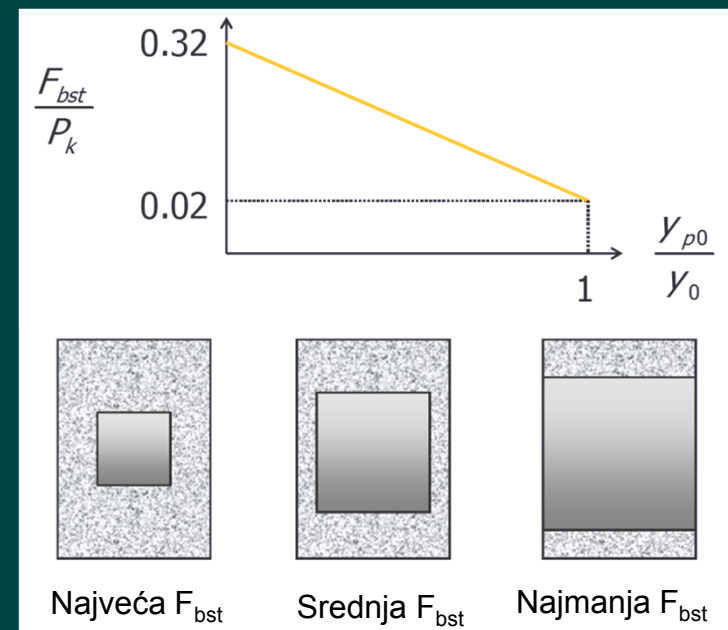


NAPREZANJA I SILE U KRAJNJEM PODRUČJU

- Sila raspucavanja (*bursting force*) za kvadratno krajnje područje sa simetrično postavljenom kvadratnom sidrenom pločom može se odrediti prema:

$$F_{bst} = P_k \left[0.32 - 0.3 \frac{y_{p0}}{y_0} \right]$$

- P_k prednapinjanje u kabelu
 - y_{p0} dimenzija sidrene ploče
 - y_0 dimenzija krajnjeg područja
- S povećanjem veličine sidrene ploče u odnosu na dimenziju krajnjeg područja sila raspucavanja se smanjuje.
- Za pravokutno krajnje područje, sila se računa posebno za oba smjera
 - Za kružnu sidrenu ploču primjenjuje se odgovarajuća kvadratna površina
 - Za više sidrenih ploča krajnje područje se dijeli na više simetrično opterećenih prizmi te se svaka analizira pojedinačno.
 - Vidi predavanje *Detalji i konstruktivna pravila (sidrenje naknadno prednapetih kabela)*

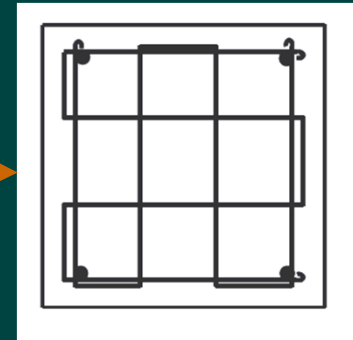
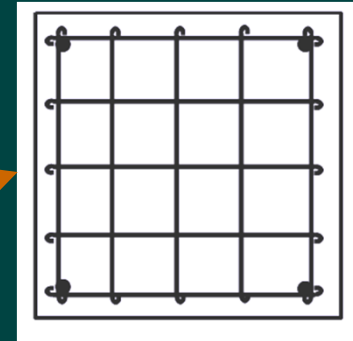


ARMATURA KRAJNJEG PODRUČJA

- Može se odrediti, u svakom glavnom smjeru, na temelju sile raspucavanja:

$$A_{st} = F_{bst} / f_s$$

- gdje se f_s može uzeti kao f_{yd} , a kada je zaštitni sloj manji od 50 mm, f_s se ograničava na vrijednost koja odgovara deformaciji 0,001.
- Oblikuje se kao
 - zatvorene vilice,
 - isprepletena mreža
 - Ili spojna armatura s petljama
- Lokalno područje ojačava se i obavijanjem betona
 - spiralnom armaturom
 - (rade se ispitivanja krajnjih blokova na uzorcima)
- Moguće je krajnje područje izvesti od betona visoke čvrstoće
 - ▶ Upotreba betonog ojačanog raspršenim vlaknima smanjuje raspucavanje.
- Potrebno je i odgovarajuće zbijanje betona.



KRAJNJE PODRUČJE

- ❑ Ponašanje sidrenog bloka i armature krajnjeg područja kritično je tijekom samog prednapinjanja.
- ❑ Uzorci krajnjeg područja ispituju se na tlak.
- ❑ Čvrstoća uzorka krajnjeg područja mora biti veća od proračunske čvrstoće prednapetih kabela.
- ❑ Na slikama je vidljiv slijed izrade jednog takvog uzorka.



Izrada armature krajnjeg područja



Sidrena ploča i vodilica



Cijev i armatura krajnjeg područja



Uzorak nakon betoniranja

PREDNAPETI BETON



– Sljedeće predavanje –
**DETALJI I KONSTRUKTIVNA PRAVILA
PREDNAPETIH KONSTRUKCIJA**