

# PRETHODNO NAPREGNUTE KONSTRUKCIJE

**Predavanja  
2020/2021**

**PI - Uvodno predavanje**

**Prof. dr Radmila Sindić-Grebović**

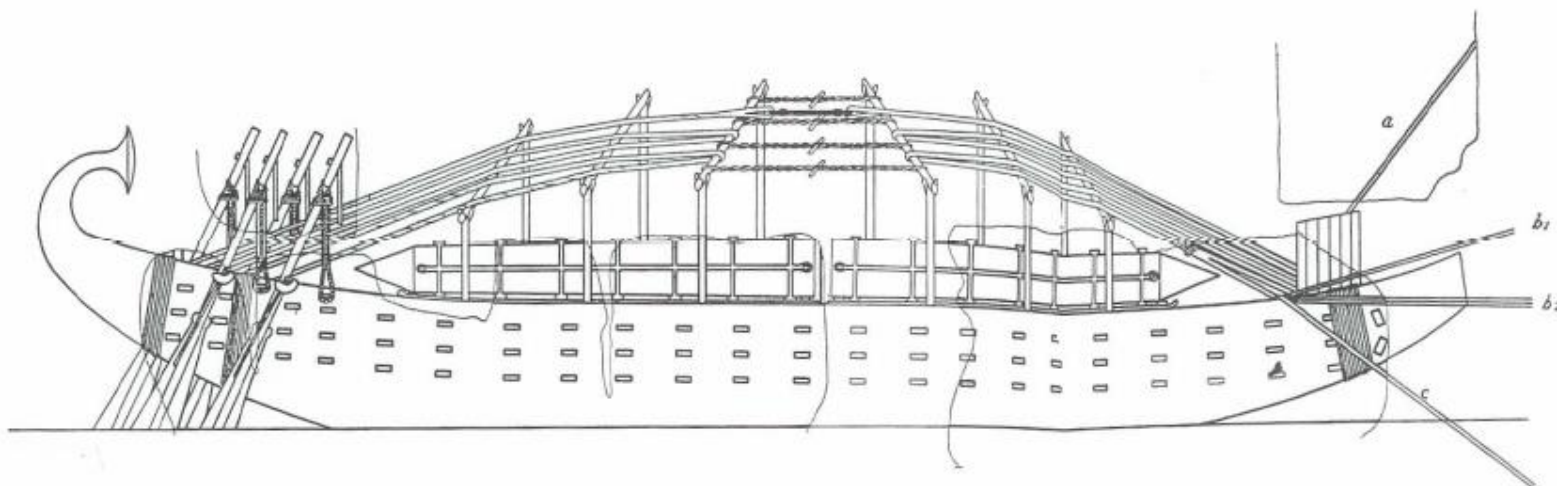
## Osnovni koncept prethodnog naprezanja - primjeri



- **Žice točka na biciklu** su prethodno zategnute. Time se kompenzuju naponi usljed spoljašnjeg opterećenja točka.

- **Zategnut obruč** izaziva pritisak u zidu bureta. Taj napon je suprotnog smjera u odnosu na napon usljed dejstva tečnosti u buretu.

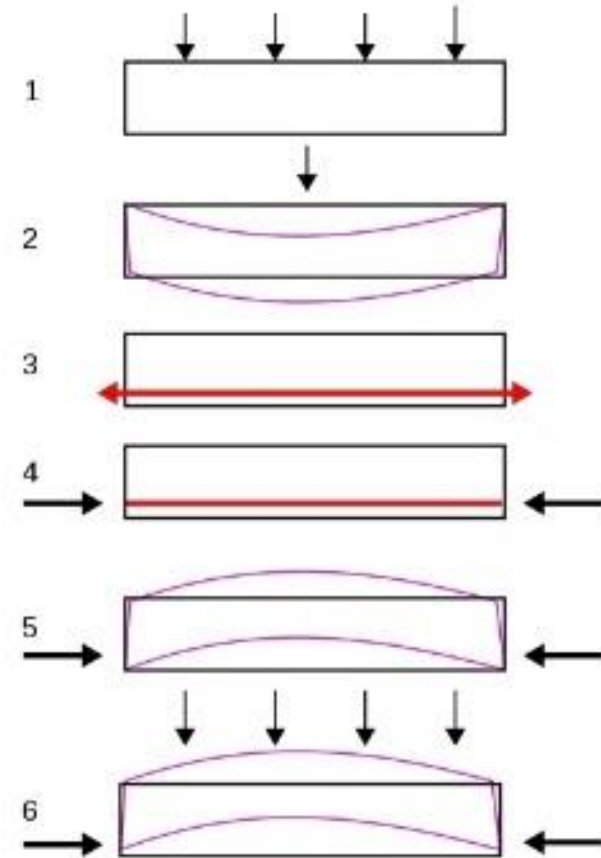
- **Egipatski brod**, građen prije 3500 godina, u kome su trup, stubovi i konopci oblikovani tako da spriječe negativnu krivinu trupa.



## Prethodno naprezanje u građevinskim konstrukcijama

Prethodno naprezanje predstavlja namjerno izazivanje samo-uravnoteženog stanja napona u konstrukciji, prije njenog stavljanja u upotrebu. Unose se naponi usmjereni suprotno od napona usljed eksploatacionog opterećenja.

Koncept prethodnog naprezanja je primjenljiv na konstrukcijama od različitih materijala – drveta, metala, zidanih i betonskih elemenata. Koristi se u malim objektima i velikim strukturama.



## Prethodno naprezanje u armiranobetonskim konstrukcijama

U armiranobetonskom presjeku naponi pritiska se povjeravaju betonu, dok se za prihvatanje napona zatezanja koristi čelik, odnosno armatura.

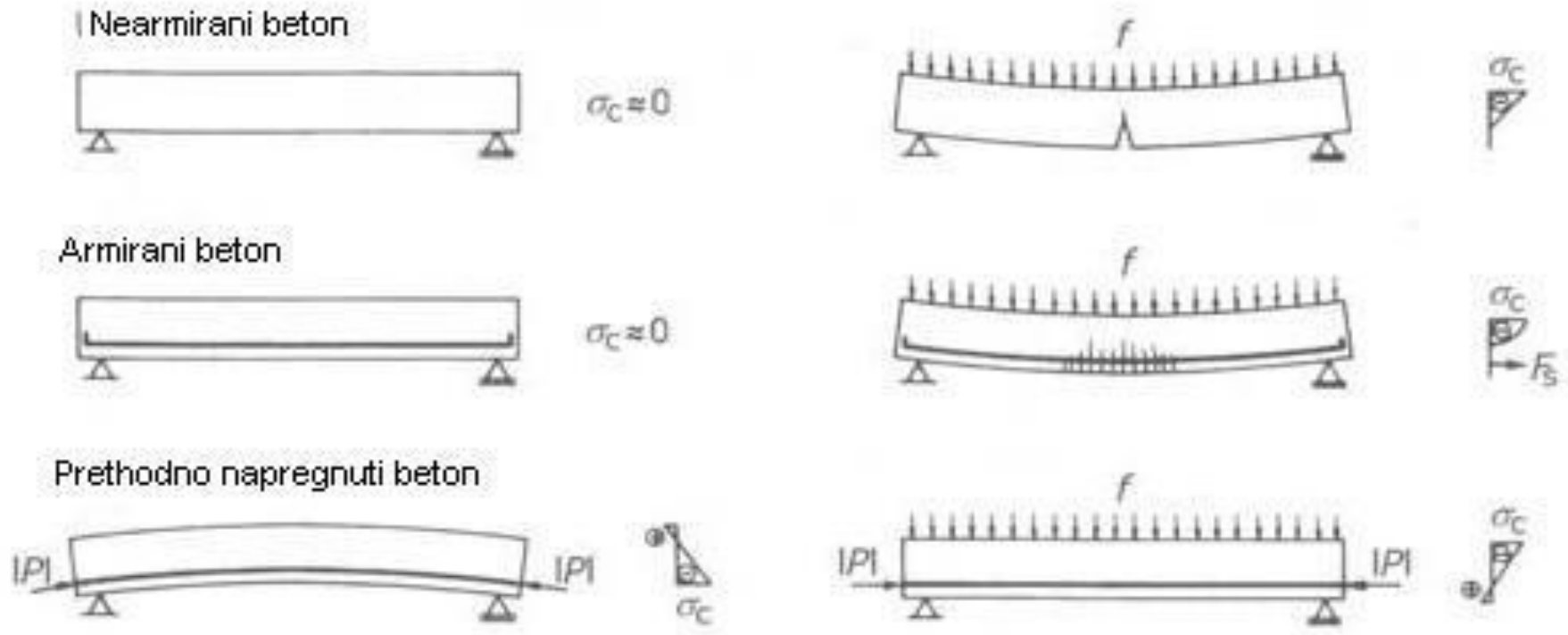
Puno angažovanje armature moguće je tek nakon pojave prslina u betonu. Relativna deformacija koja odgovara iskorišćenom naponu u zategnutom čeliku je 20 puta veća nego deformacija betona pri pojavi prsline. Da bi se postiglo stanje deformacija čelika za prenos sile zatezanja, neizbježno je širenje prslina u zategnutoj zoni betona.

**Nedostaci klasično armiranog betona su razlozi za prethodno naprezanje:**

- neizbježna pojava prslina u zategnutom betonu
- pojava prslina znatne širine
- neiskorišćenost betona u zategnutoj zoni
- velike dimenzije poprečnog presjeka

Prethodnim naprežanjem se unose naponi odgovarajućeg intenziteta i raspodjele, tako da djeluju suprotno od napona usljed spoljašnjeg opterećenja, čime se dobija povoljnije naponsko stanje nego kod klasične armiranobetonske konstrukcije.

**Cilj prethodnog naprežanja je ograničiti napone zatezanja u betonu.**



## Prethodno naprezanje ima višestruku ulogu u konstrukciji

Efekte prethodnog naprezanja se koriste u eksploataciji, kao i tokom građenja. Prethodno naprezanje može biti od suštinskog značaja za funkcionalnost i stabilnost konstrukcije. Primjenom prethodnog naprezanja mogu se uprostiti spojevi, poboljšati svojstva povećanjem krutosti i ograničiti prsline.

**Primjer:** Prethodno naprezanje se koristi za povezivanje i pridržavanje elemenata pri segmentnom građenju, kao i za prihvatanje opterećenja pri eksploataciji.



**Most Moračica na autoputu Bar-Boljare (tokom građenja 2019)**

Prethodno napregnut u dvije faze: pri povezivanju segmenata pri građenju i za prijem eksploatacionog opterećenja.









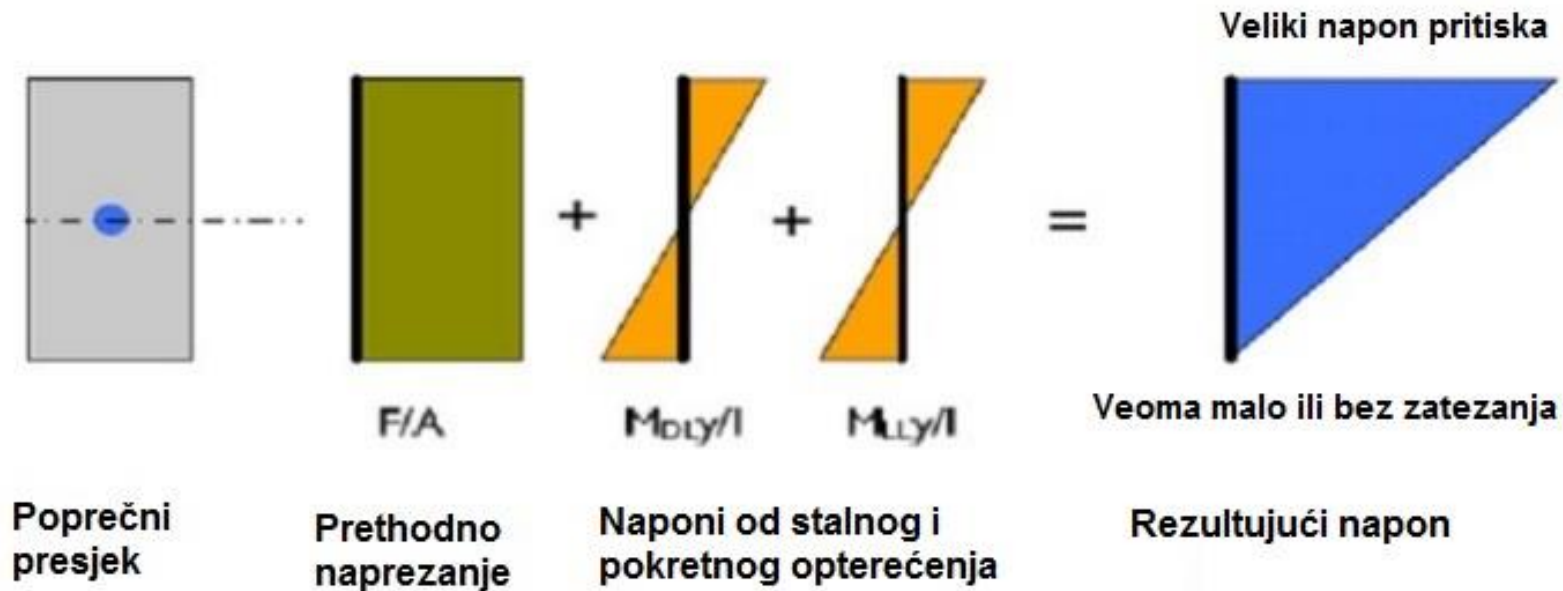






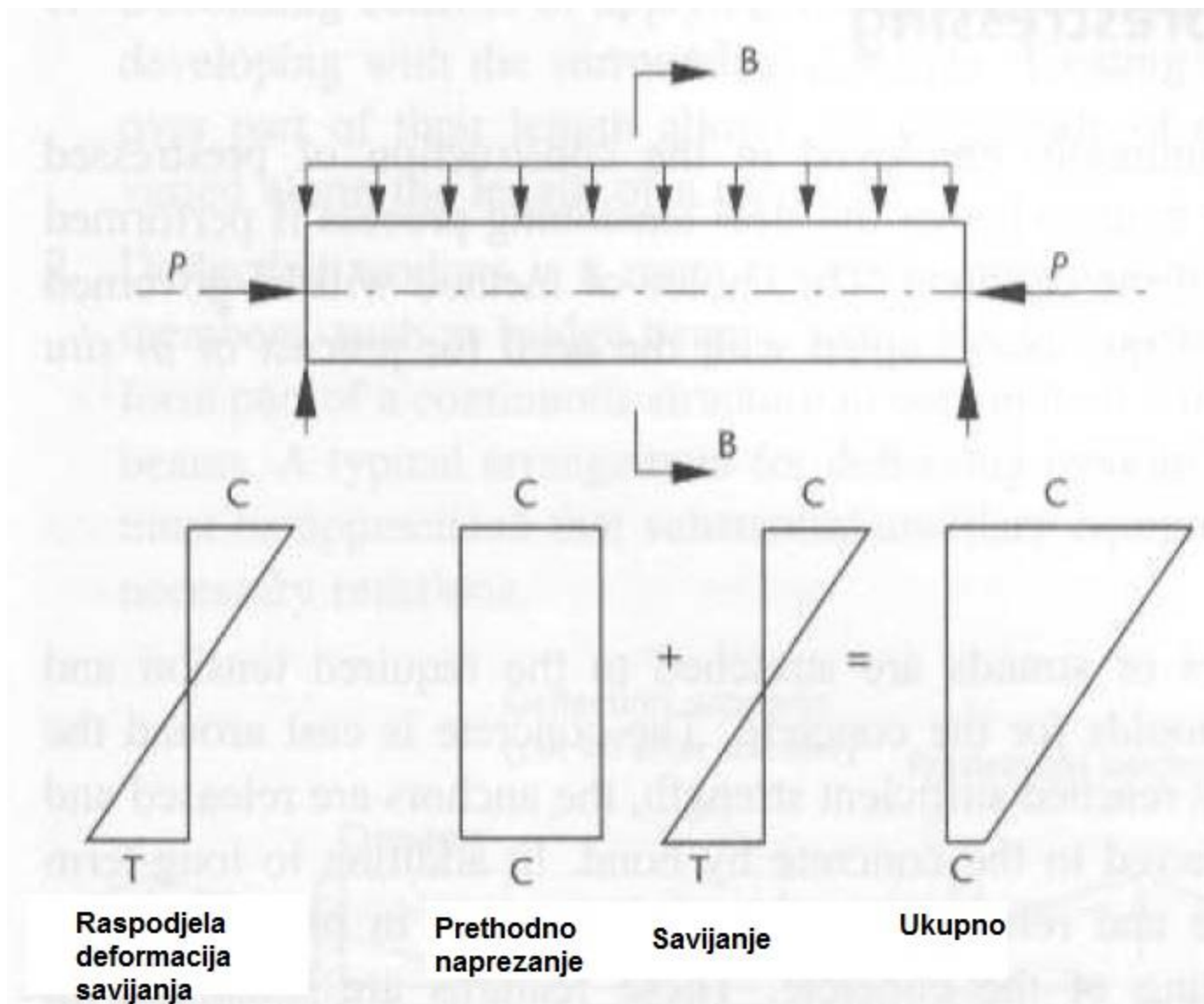


## Princip prethodnog naprezanja

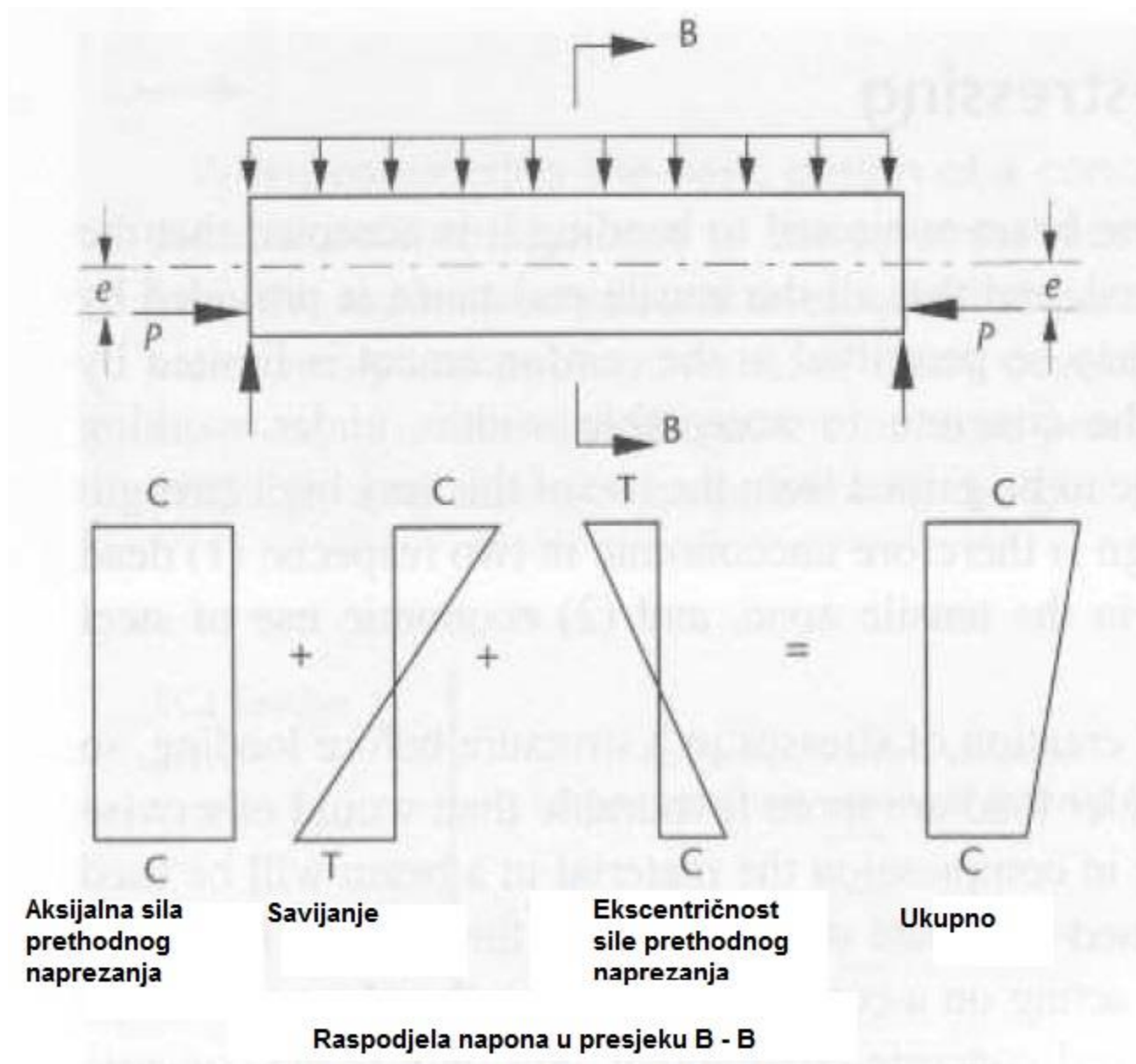


Prethodnim naprezanjem može se ostvariti stanje napona pritiska u cijelom poprečnom presjeku.

## Centrično dejstvo sile prethodnog naprezanja



## Ekscentrično dejstvo sile prethodnog naprezanja





## Prednosti prethodnog naprezanja

- potpuno balansiranje stalnog opterećenja prethodnim naprezanjem;
- veći kapacitet nosivosti za promjenljivo opterećenje;
- izbjegavanje ili znatno smanjenje prslina - smanjenje korozije – povećana trajnost;
- smanjenje ugiba, poboljšanje funkcionalnosti;
- veća iskorišćenost betonskog presjeka – korišćenje materijala visokih čvrstoća;
- upotreba manje količine materijala;
- savladavanje većih raspona;
- tanji presjeci - estetski efektnije i ekonomičnije konstrukcije;
- povećanje nosivosti na smicanje;
- bolje ponašanje pri dinamičkim dejstvima i zamoru;
- pogodnost za izradu rezervoara i drugih konstrukcija pod pritiskom;
- pogodno za nuklearna postrojenja;
- moguća je prefabrikacija

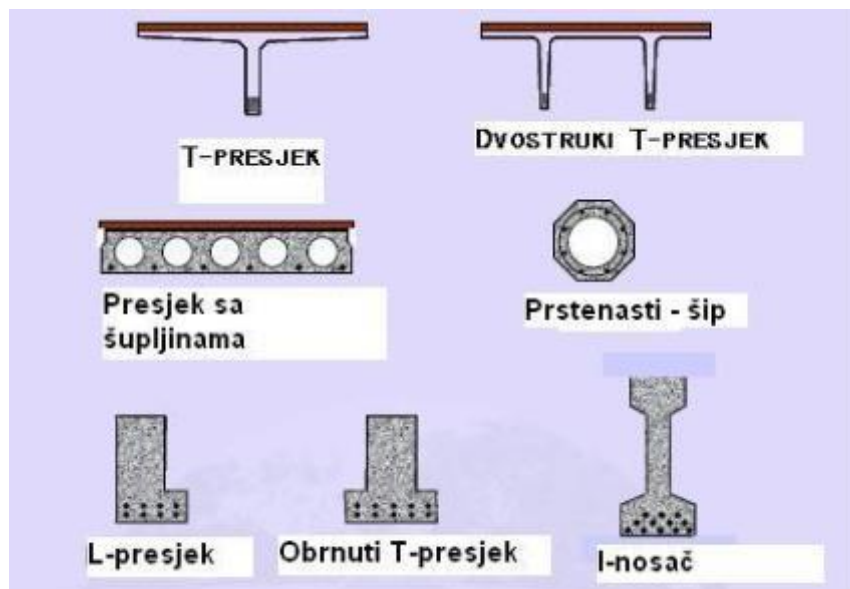
**Prethodno naprezanje se koristi i za rekonstrukciju i ojačanje konstrukcija jer se njime može postići utezanje.**

## Prethodno naprežanje – za izradu prefabrikovanih konstrukcija

### Povoljni efekti:

- Brža izgradnja
- Bolji kvalitet konstruktivnih elemenata
- Manji troškovi održavanja
- Pogodnost izrade tipskih konstrukcija
- Višestruka upotreba oplata što doprinosi znatnoj uštedi

### Poprečni presjeci prethodno napregnutih prefabrikovanih elemenata



## Prethodno napregnuti prefabrikovani elementi - primjeri primjene



### Pristanište Pusan (Busan) u Južnoj Koreji

**Dimenzije: 350x50m**

**Ugrađeno: 100 prethodno napretnih šipova, 800 ploča (8x4m) i 500 vertikalnih panela (22x1.6m)**

**15000m<sup>3</sup> betona visoke čvrstoće; 791 tona čelika za prethodno naprezanje**

### U zgradama:

- ploče
- grede
- stubovi
- fasadni elementi
- smičući zidovi



## Specifičnosti primjene prethodnog naprezanja

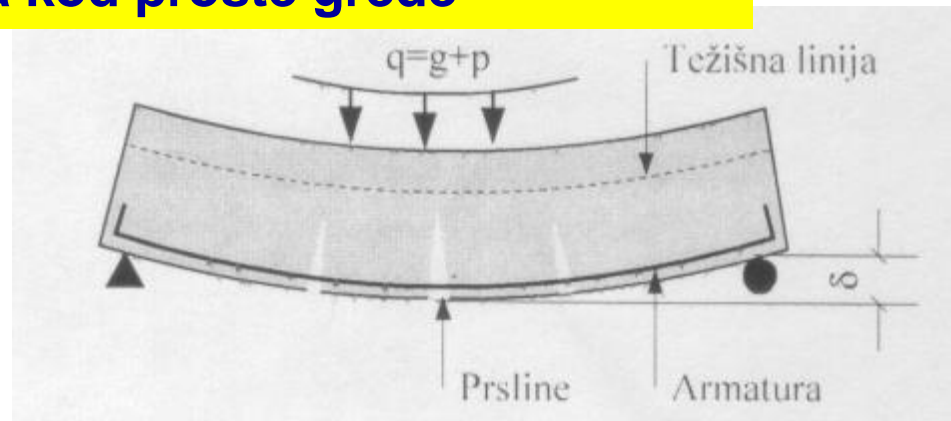
- **Potrebna je radna snaga veće stručnosti i tehnološka obučenosti čime se povećavaju troškovi izrade**
- **Neophodna je upotreba materijala većeg kvaliteta što može povećati troškove**
- **Pomoćna oprema za prethodno naprezanje predstavlja dodatni trošak**
- **Kontrola kvaliteta i nadzor su od posebnog značaja i takođe zahtijevaju veću stručnost**



## Efekti prethodnog naprežanja kod proste grede

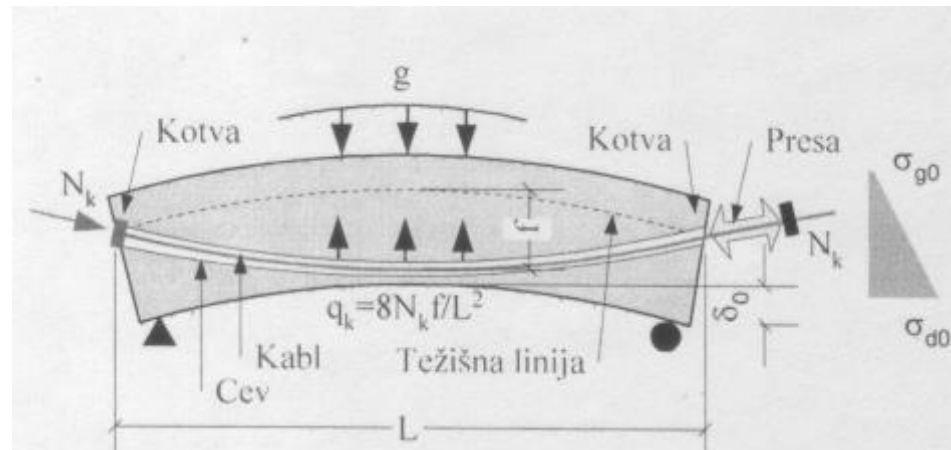
Klasično armirana prosta greda pod dejstvom jednako podijeljenog opterećenja:

- pojavile su se prsline
- greda ima ugib  $\delta$



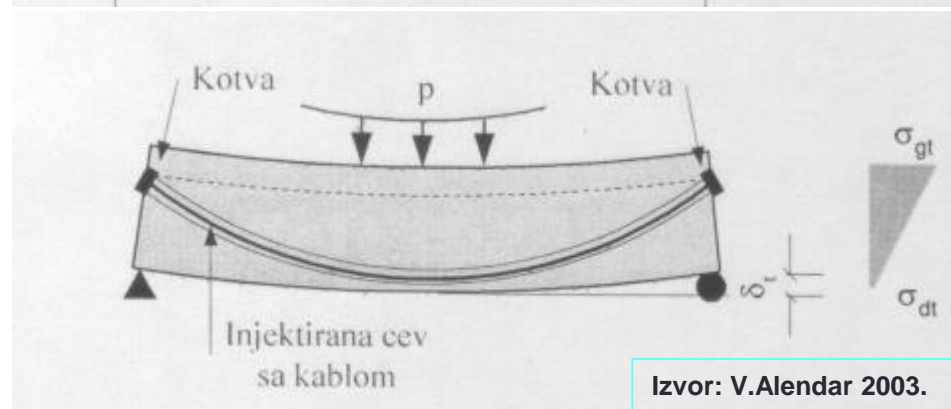
Prethodno napregnuta greda – u početnom stanju  $t_0$ :

Sila u kablju po paraboličnoj putanji izaziva pojavu skretnih sila koje daju efekte jednako podijeljenog opterećenja  $q_k$  i kontra-ugib  $\delta_0$ .

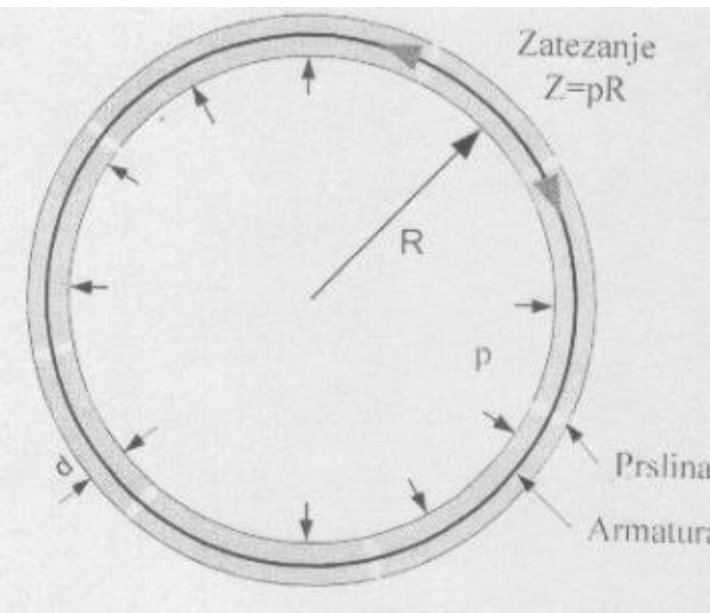


Prethodno napregnuta greda - u krajnjem stanju u trenutku  $t$ :

Cio presjek je pritisnut. Nema pojave prsline. Konačan ugib je znatno manji nego u slučaju klasično armirane grede.



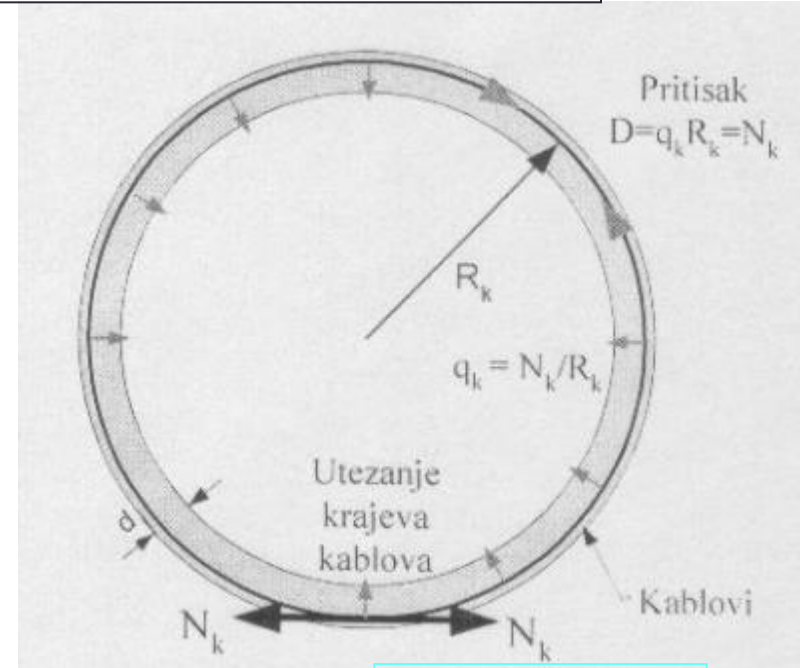
## Efekti prethodnog naprezanja kružnog presjeka - rezervoara



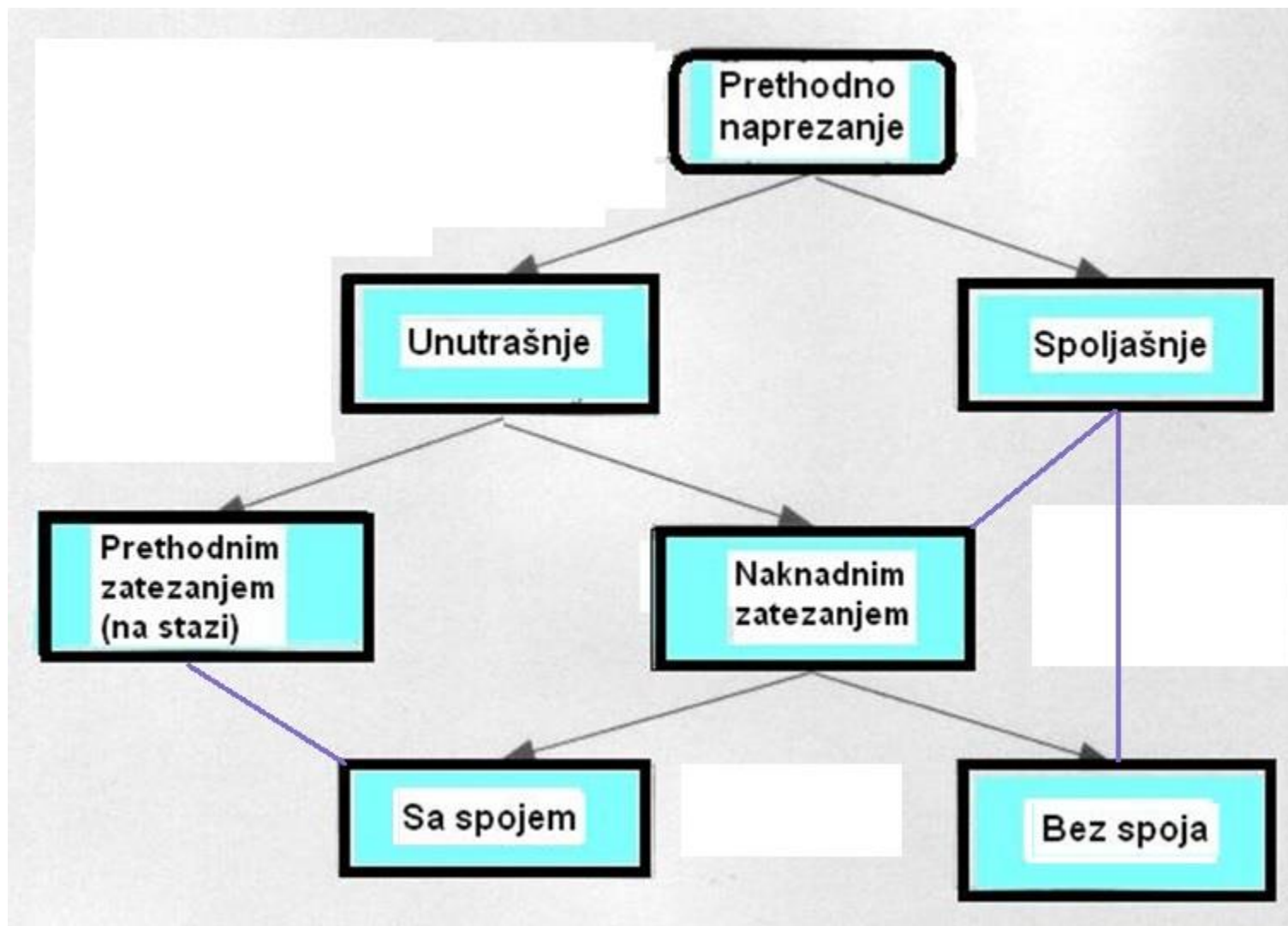
U rezervoaru kružnog poprečnog presjeka koji je ispunjen tečnošću, pritisak  $p$  djeluje na zidove rezervoara što, u prstenastom elementu zida jedinične visine, izaziva silu zatezanja  $Z=pR$ .

Prethodnim naprezanjem silom  $N_k$  stvaraju se radijalni pritisci  $q_k=N_k/R_k$ , odnosno sila pritiska u zidu,  $D=q_kR_k$

Ako je  $D>Z$  u zidu će postojati rezerva pritiska, pa neće doći do pojave prslina.

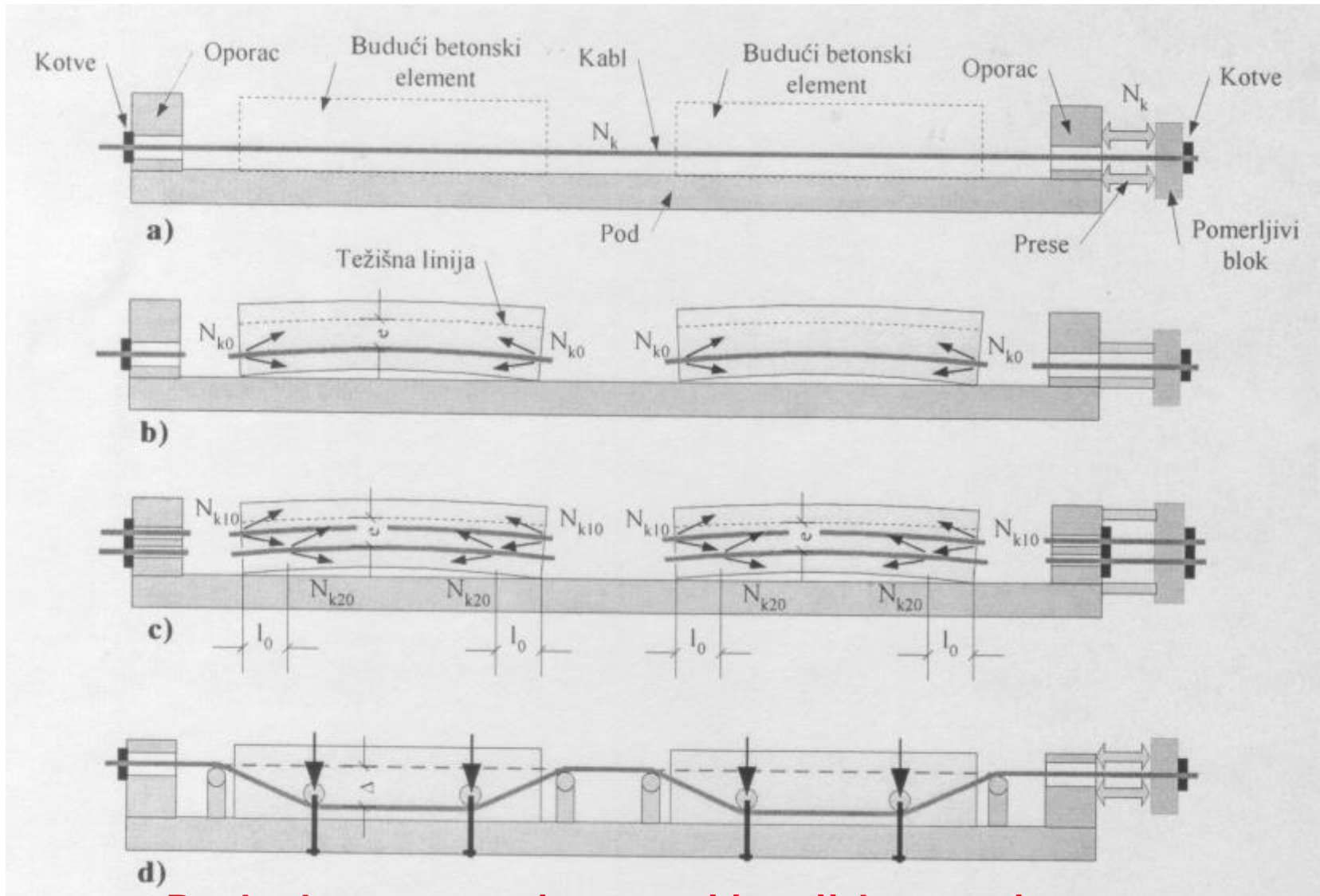


## Vrste prethodnog naprezanja



# Unutrašnje

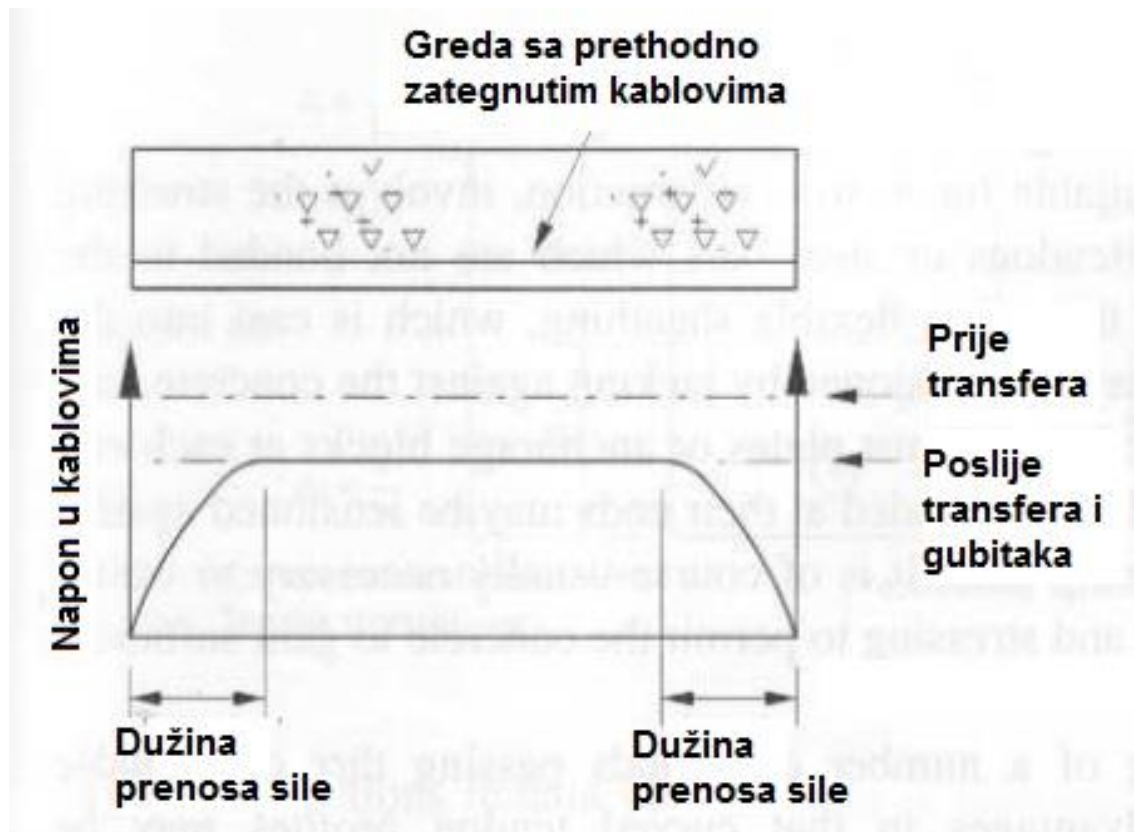
## Prethodno naprežanje prethodnim zatezanjem – na stazi



**Prethodno naprežanje na stazi je uvijek sa spojem.**



## Naponi u kablovima za prethodno naprezanje prethodnim zatezanjem na stazi – prenos sile prijanjanjem



**Unutrašnje**

**Prethodnim zatezanjem – “na stazi”**

**Primjeri:**

**Prethodno nap. paneli**



**Željeznički pragovi**



**Naknadnim zatezanjem unutar presjeka**



## Unutrašnje

### 1. Sa spojem između kablova i betona

- **Ostvaruje se monolitan spoj između čelika za prethodno naprezanje i betona**
  - kod prethodnog naprezanja na stazi gdje se sila iz čelika na beton prenosi prijanjanjem;
  - kod naknadnog zatezanja gdje se popunjavanjem prostora između zida zaštitne cijevi i kabla injektiranjem postiže spoj između čelika i betona.

## Unutrašnje ili spoljašnje

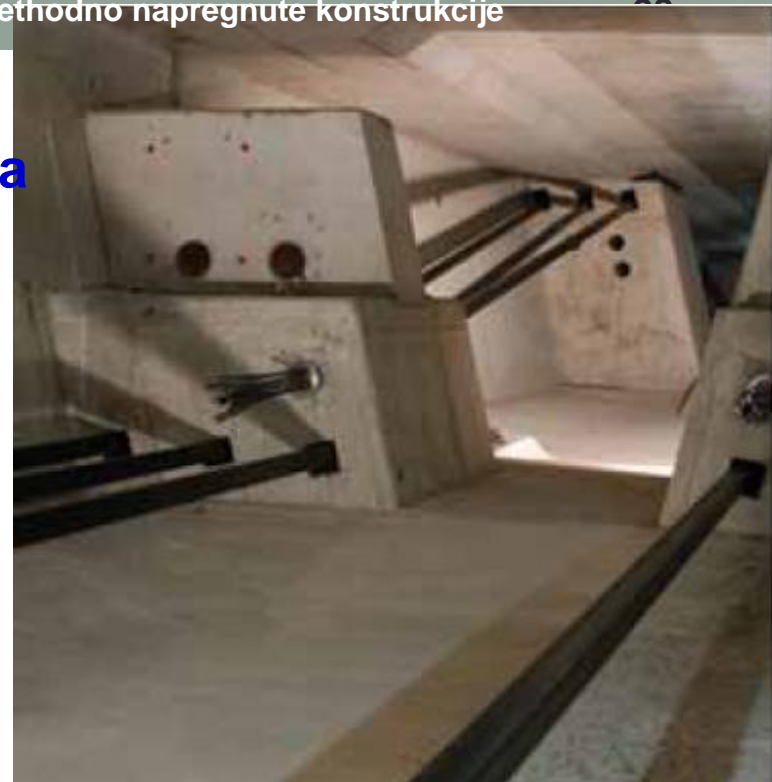
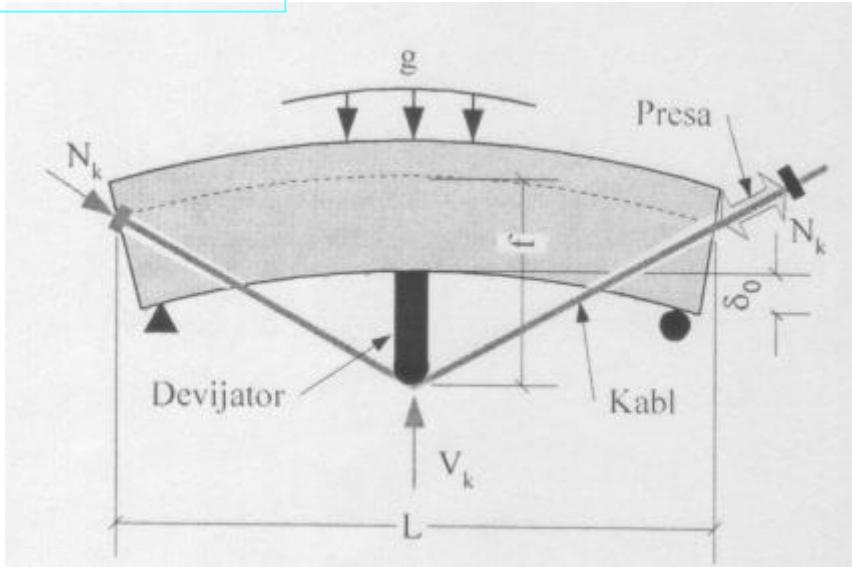
### 2. Bez spoja između kablova i betona

- **Ne ostvaruje se monolitan spoj između čelika za prethodno naprezanje i betona**
  - zaštita kablova se ostvaruje premazivanjem mastima, a kanal se ne popunjava masom koja očvršćava;
  - kod prethodnog naprezanja kablovima izvan presjeka.

## Spoljašnje

## Naknadnim zatezanjem kablovima izvan presjeka

Izvor: V. Alendar 2003.



### Prednosti prethodnog napreznja kablovima izvan presjeka:

1. Može se postići veći ekscentricitet kablova, čime se postiže veći efekat prethodnog napreznja.
2. Kablovi su dostupni kontroli i mogu se po potrebi zamijeniti.



**Spoljašnje**

**Kod prethodnog naprezanja izvan presjeka kablovi se pružaju unutar kutijastog presjeka, a kod greda sasvim izvan nosača.**



## Vrste prethodnog naprezanja

Prema obliku elementa koji se prethodno napreže

Linearno



Kružno

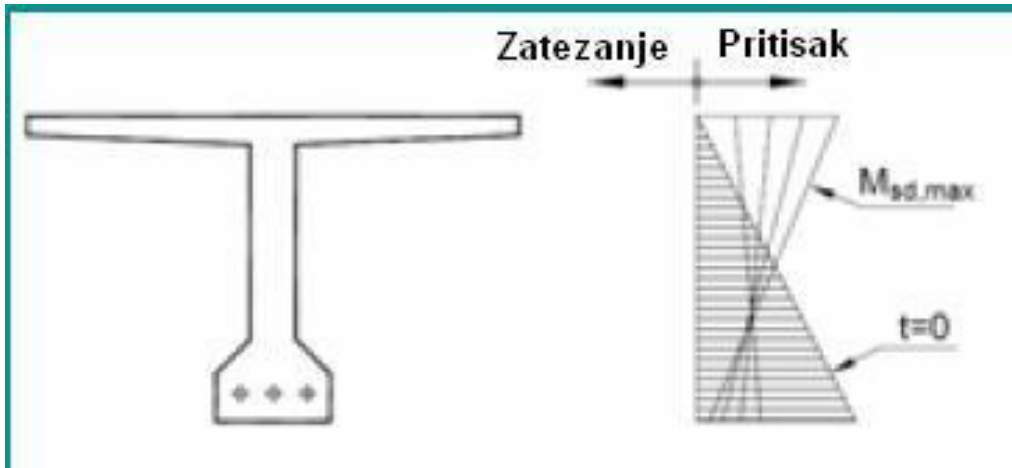


## Vrste prethodnog naprezanja

### Prema stepenu prethodnog naprezanja

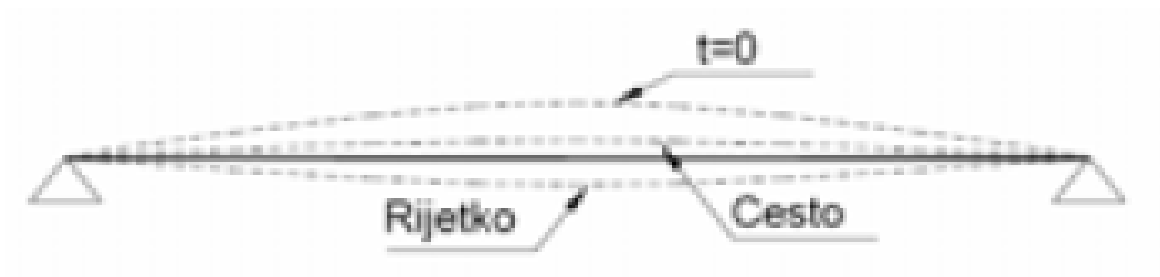
#### Potpuno prethodno naprezanje

- Predstavlja stepen prethodnog naprezanja pri kome se u elementima i konstrukcijama pri najnepovoljnijim kombinacijama dejstava, u fazi eksploatacije, **ne pojavljuju naponi zatezanja u betonu.**



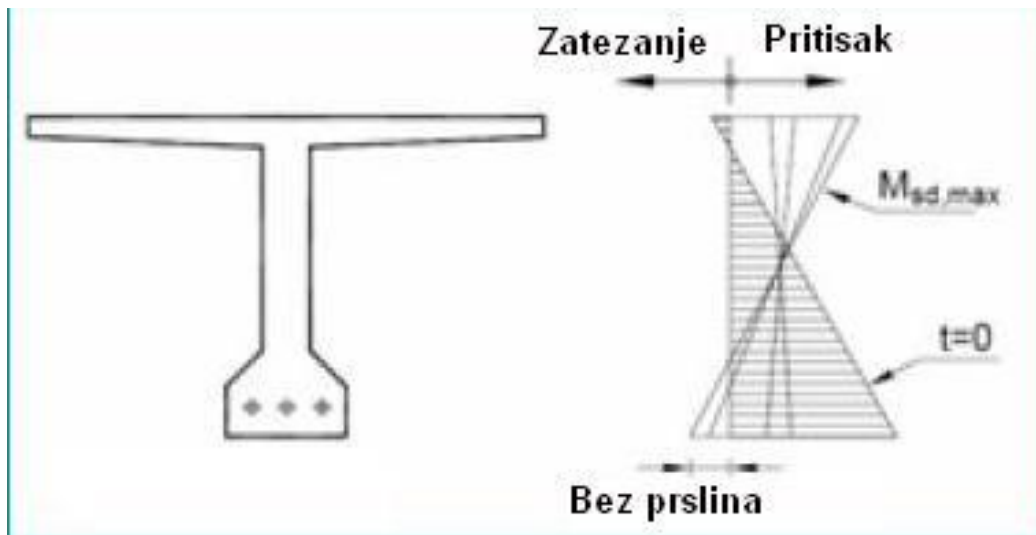
Stepen prethodnog naprezanja  $k=1.0$

$$k = \frac{M_{dek}}{M_G + M_Q} = 1.0$$



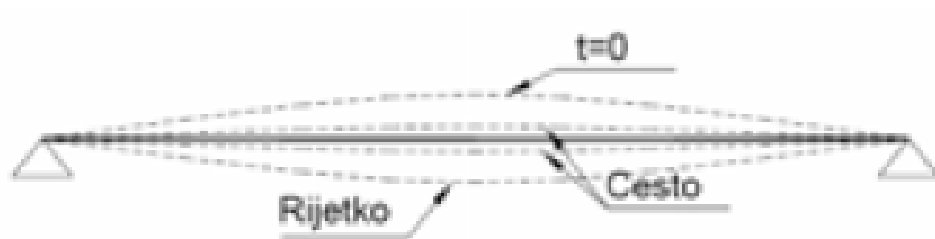
## Ograničeno prethodno naprezanje

- Predstavlja stepen prethodnog naprezanja pri kome se za najnepovoljniju kombinaciju dejstava, u toku građenja i u toku eksploatacije, u betonu mogu pojaviti **normalni naponi zatezanja**, ali takvi da budu **najviše jednaki graničnim naponima**.



Stepen prethodnog naprezanja  $k < 1.0$

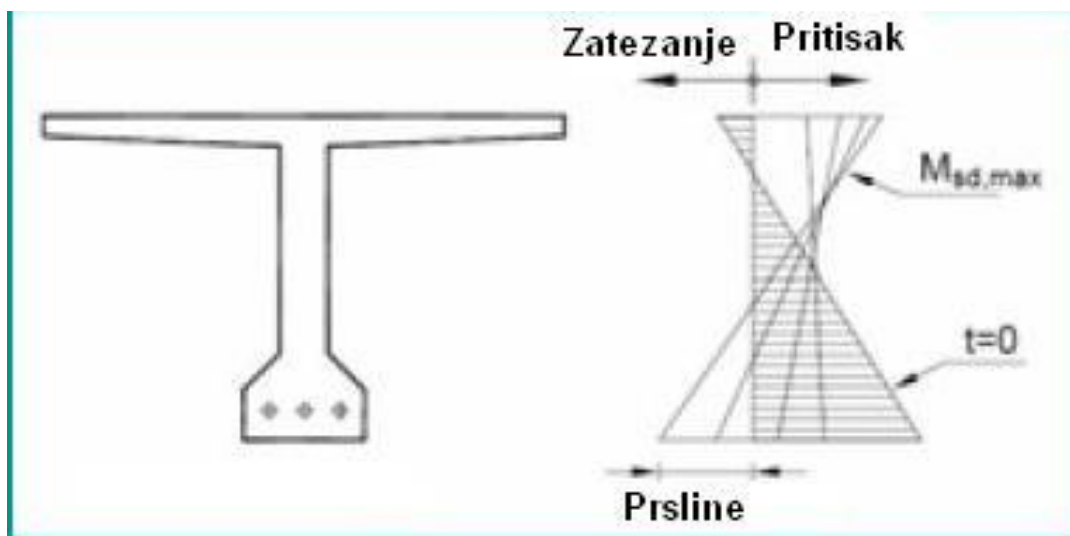
$$k = \frac{M_{dek}}{M_G + M_Q} < 1.0$$





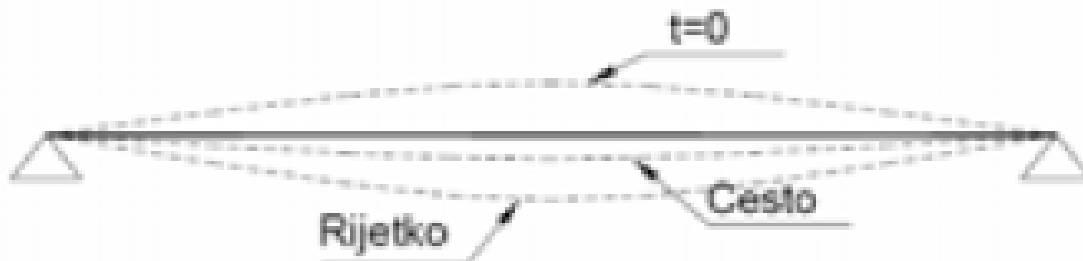
## Parcijalno prethodno naprezanje

- Predstavlja stepen prethodnog naprezanja pri kome se za određenu najnepovoljniju kombinaciju dejstava, u toku građenja i u toku eksploatacije javlja zatezanje u betonu veće od graničnog pa se **u betonu mogu pojaviti prsline**.



Stepen prethodnog naprezanja  $0.4 < k < 0.7$

$$0.4 < k = \frac{M_{dek}}{M_G + M_Q} < 0.7$$



# **MATERIJALI**

## **za prethodno napregnute**

## **konstrukcije**

**Efekti prethodnog naprezanja armirano betonskih konstrukcija su mogući ako se koriste materijali (čelik i beton) visokih mehaničkih karakteristika.**

**Karakteristike materijala koji se najčešće koriste:**

**Čelik za prethodno naprezanje čvrstoće pri zatezanju 1770 – 1860 MPa.**

**Beton čvrstoće pri pritisku veće od 40 MPa.**

# BETON

EN 1992-1-1

- **Klasifikacija:**

**Klase čvrstoće (C)**

- **Klasa čvrstoće:** određuje se prema karakterističnoj čvrstoći pri pritisku izmjerenoj na cilindrima 15/30 cm ( $f_{ck}$ ) ili kockama ivice 15cm ( $f_{ck, cube}$ ) sa fraktilom 5%
- Klase čvrstoće su:

**Od C12/15 do C90/105\***

(\*preporučena  $C_{max}$ ; daje se Nacionalnim aneksom)

- **Čvrstoća betona pri starosti manjoj ili većoj od 28 dana može se odrediti pomoću izraza datih u EN 1992-1-1. Tačnije vrijednosti treba odrediti ispitivanjem, naročito za  $t \leq 3$  dana.**

## Zahtjevi u pogledu kvaliteta betona za prethodno naprezanje

EN 1992-1-1

EN 1992-2

### ➤ Čvrstoća pri pritisku

min C25/30 za naknadno zatezanje

min (C30/37) za prethodno zatezanje

min(C30/37) za mostove

### Ostali važniji zahtjevi

➤ Malo skupljanje i tečenje

➤ Vodonepropusnost

U zonama gdje se javljaju veća naprezanja treba koristiti beton veće čvrstoće (zona sidrenja, npr.)

## EN 1992-1-1

## Čvrstoća betona pri pritisku pri starosti različitoj od 28 dana

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} \quad \text{za } 3 < t < 28 \text{ dana}$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad \text{za } t \geq 28 \text{ dana}$$

**Čvrstoća betona pri pritisku, pri starosti  $t$  (dana), zavisi od vrste cementa, temperature i uslova njege betona.**

**Za srednju temperaturu od 20°C i njegu prema EN 12390, srednja vrijednost čvrstoće betona pri pritisku za različite starosti određuje se prema izrazima:**

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

$f_{cm}(t)$  srednja vrijednost čvrstoće betona pri pritisku u starosti  $t$  dana

$f_{cm}$  srednja vrijednost čvrstoće betona pri pritisku u starosti 28 dana

$\beta_{cc}(t)$  koeficijent koji zavisi od starosti betona

$s$  koeficijent koji zavisi od vrste cementa

## EN 1992-1-1

	Strength classes for concrete													
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$ (Gpa)	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\epsilon_{c1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\epsilon_{cu1}$ (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\epsilon_{c2}$ (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\epsilon_{cu2}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$n$	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\epsilon_{c3}$ (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\epsilon_{cu3}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Klase čvrstoće betona															Analitički izraz/objašnjenje
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% fraktil
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% fraktil
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)]^{0,3}$ ( $f_{cm}$ u MPa)
$\epsilon_{ct}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	videti sliku 3.2 $\epsilon_{ct} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$
$\epsilon_{cu1}$ (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	videti sliku 3.2 za $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu1} (\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
$\epsilon_{c2}$ (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	videti sliku 3.3 za $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}$
$\epsilon_{cu2}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	videti sliku 3.3 za $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	za $f_{ck} \geq 50$ MPa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
$\epsilon_{c3}$ (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	videti sliku 3.4 za $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
$\epsilon_{cu3}$ (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	videti sliku 3.4 za $f_{ck} \geq 50$ MPa $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Tabela 3.1: Čvrstoće i deformacijske karakteristike betona



## Čvrstoća betona pri zatezanju

EN 1992-1-1

### Čvrstoća pri jednoaksijalnom zatezanju

$$f_{ctm} = 0.30f_{ck}^{2/3} \quad \text{Za } \leq \text{C50/60}$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln\left(1 + \left(f_{cm}/10\right)\right) \quad \text{Za } > \text{C50/60}$$

### Veza čvrstoće pri jednoaksijalnom zatezanju i pri zatezanju cijepanjem

$$f_{ct} = 0.9f_{ct,sp}$$

### Čvrstoća na zatezanje pri savijanju

$$f_{ctm,fl} = \max \left\{ \left( 1.6 - \frac{h}{1000} \right) f_{ctm}; f_{ctm} \right\}$$

$h$  –visina poprečnog presjeka u mm

**EN 1992-1-1****Porast čvrstoće na zatezanje sa vremenom**

$$f_{ctm}(t) = [\beta_{cc}(t)]^{\alpha} \cdot f_{ctm}$$

$\beta_{cc}(t)$  prethodno dat izrazom

$\alpha = 1$  za  $t < 28$  dana

$\alpha = 2/3$  za  $t \geq 28$  dana

## Elastične deformacije pri kratkotrajnom opterećenju – modul elastičnosti

### EN 1992-1-1

Vrijednosti modula elastičnosti betona  $E_{cm}$ , za betone sa agregatom od kvarcita date su u tabeli 3.1, EN 1992-1-1.

Određene su korišćenjem izraza:

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3}$$

$f_{cm}$  je u MPa, a  $E_{cm}$  u GPa

**Korekcija zavisno od vrste agregata**

Za betone sa agregatom od krečnjaka  $E_{cm}$  se smanjuje 10%, a sa agregatom od pješčara smanjuje se 30%. Za betone sa bazaltnim agregatima  $E_{cm}$  se povećava 20%.

# Promjena modula elastičnosti sa vremenom

## EN 1992-1-1

Vrijednost modula elastičnosti betona **starosti t (dana)** može da se odredi prema izrazu:

$$E_{cm}(t) = \left[ f_{cm}(t) / f_{cm} \right]^{0.3} E_{cm}$$

Gdje su:

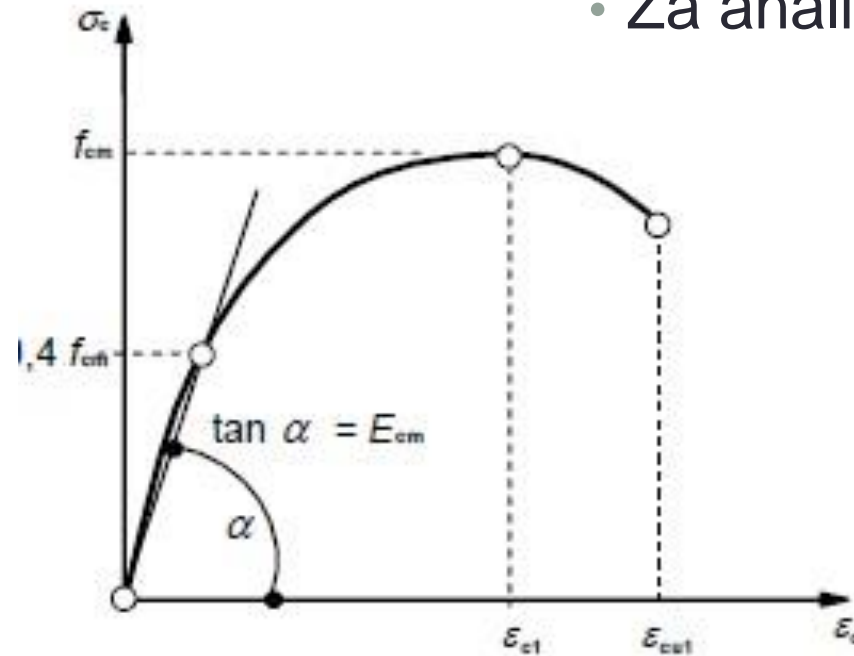
$E_{cm}(t)$ ,  $f_{cm}(t)$  **vrijednosti pri starosti t**

$E_{cm}$ ,  $f_{cm}$  **vrijednosti pri starosti 28 dana**

# Relacije napon-deformacije za beton

EN 1992-1-1

- Za analizu konstrukcija



$$\varepsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31}$$

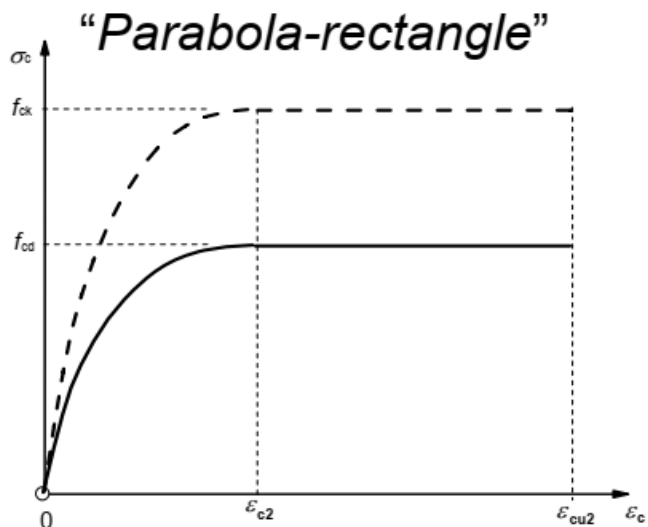
$$\varepsilon_{cu1} (\text{‰}) =$$

$$2,8 + 27 \left[ \frac{(98 - f_{cm})}{100} \right]^4 \frac{f_{cm}}{100} \right]^4$$

$$\text{za } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad \text{inače} \quad 3.5$$

# Relacije napon-deformacije za beton

EN 1992-1-1



$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ for } 0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$n = 1,4 + 23,4 \left[ \frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

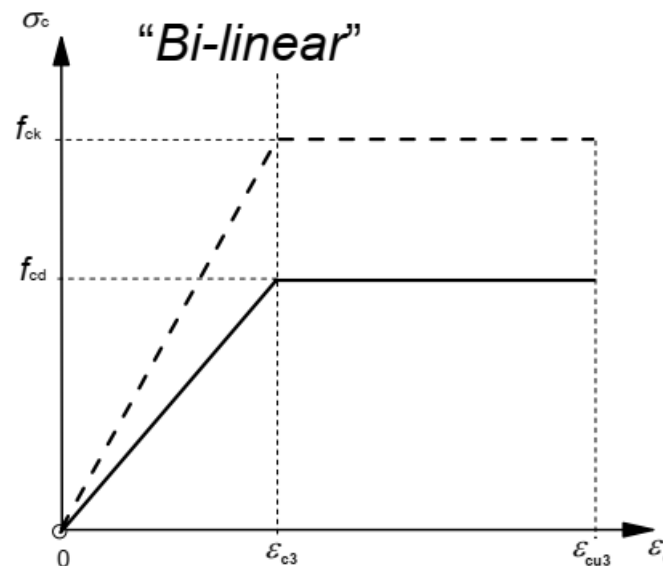
for  $f_{ck} \geq 50$  MPa otherwise 2,0

$$\varepsilon_{c2} \text{ (‰)} = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$$

for  $f_{ck} \geq 50$  MPa otherwise 2,0

$$\varepsilon_{cu2} \text{ (‰)} = 2,6 + 35 \left[ \frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

for  $f_{ck} \geq 50$  MPa otherwise 3,5



$$\varepsilon_{c3} \text{ (‰)} = 1,75 + 0,55 \left[ \frac{(f_{ck} - 50)}{40} \right]$$

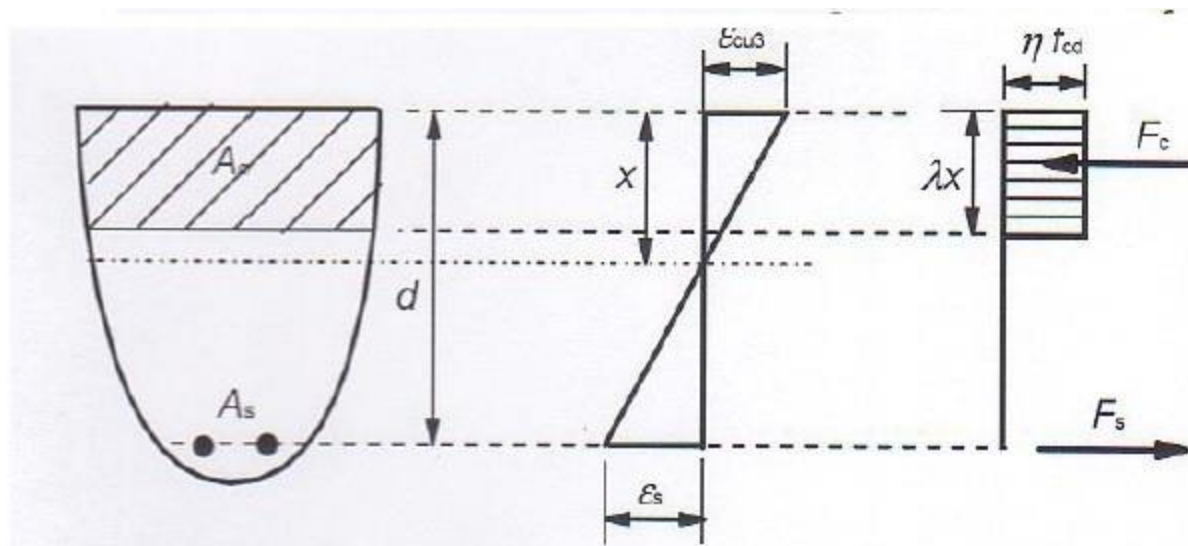
for  $f_{ck} \geq 50$  MPa otherwise 1,75

$$\varepsilon_{cu3} \text{ (‰)} = 2,6 + 35 \left[ \frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

for  $f_{ck} \geq 50$  MPa otherwise 3,5

EN 1992-1-1

## Relacije napon-deformacije za beton



$$\lambda = 0,8 \text{ za } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400$$

za  $50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$

$$\eta = 1,0 \text{ za } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200$$

za  $50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$

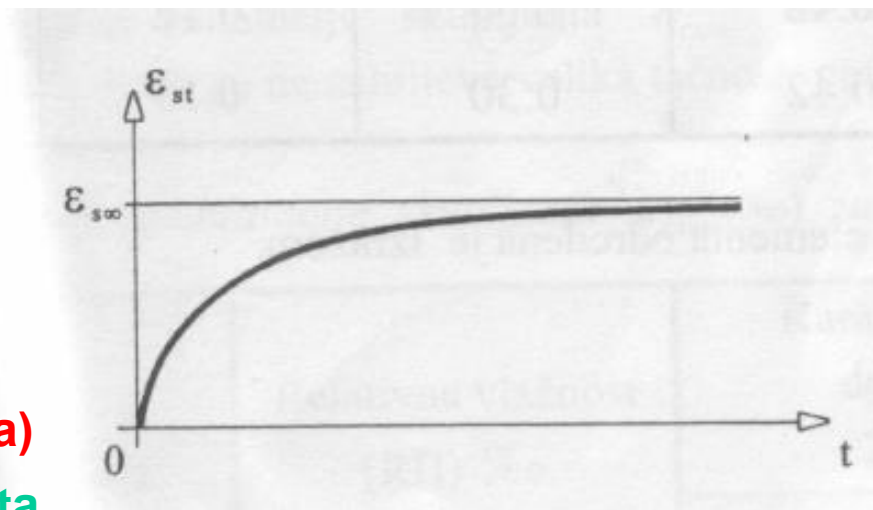
# Skupljanje betona

EN 1992-1-1

- Smanjenje zapremine betona koje nastaje tokom procesa hidratacije cementa
- Proces koji se odvija tokom vremena
- Deformacija skupljanja ne zavisi od opterećenja

Na skupljanje utiču:

- uslovi spoljašnje sredine
- dimenzije poprečnog presjeka
- količina, vrsta i finoća mliva cementa
- vodocementni faktor
- njega betona (početak i dužina trajanja)
- vrsta i granulometrijski sastav agregata
- način ugrađivanja i zbijenost betona



Skupljanje betona u funkciji vremena



## EN 1992-1-1

## Skupljanje betona

- Prema EN 1992-1-1 ukupna deformacija skupljanja ( $\epsilon_{cs}$ ) se sastoji od
  - Deformacije skupljanja usljed sušenja ( $\epsilon_{cd}$ ) – (drying shrinkage strain)
  - Sopstvene deformacije skupljanja ( $\epsilon_{ca}$ ) – (autogenous shrinkage strain)

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

Konačna vrijednost deformacije skupljanja usljed sušenja

$\epsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \epsilon_{cd,0}$ , pri čemu se  $\epsilon_{cd,0}$  može uzeti iz tabele 3.2.

Koeficijent  $k_h$  je dat u tabeli 3.3.

Tabela 3.2: Nominalne veličine nesprečenog skupljanja usled sušenja  $\epsilon_{cd,0}$  (u ‰) za beton sa cementom CEM klase N

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relativna vlažnost (u ‰)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

**EN 1992-1-1**Tabela 3.3: Vrednosti  $k_h$  u izrazu (3.9)

$h_0$	$k_h$
100	1,0
200	0,85
300	0,75
$\geq 500$	0,70

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

$h_0$  - nominalna dimenzija poprečnog presjeka (mm)

**Promjena deformacije skupljanja usljed sušenja tokom vremena** je data

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

$\beta_{ds}$  je dato izrazom (koji se ovdje ne navodi) tako da **za  $t=\infty$   $\beta_{ds} \rightarrow 1$**

**Sopstvene deformacije skupljanja,  $\varepsilon_{ca}$**  dobija se iz izraza:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

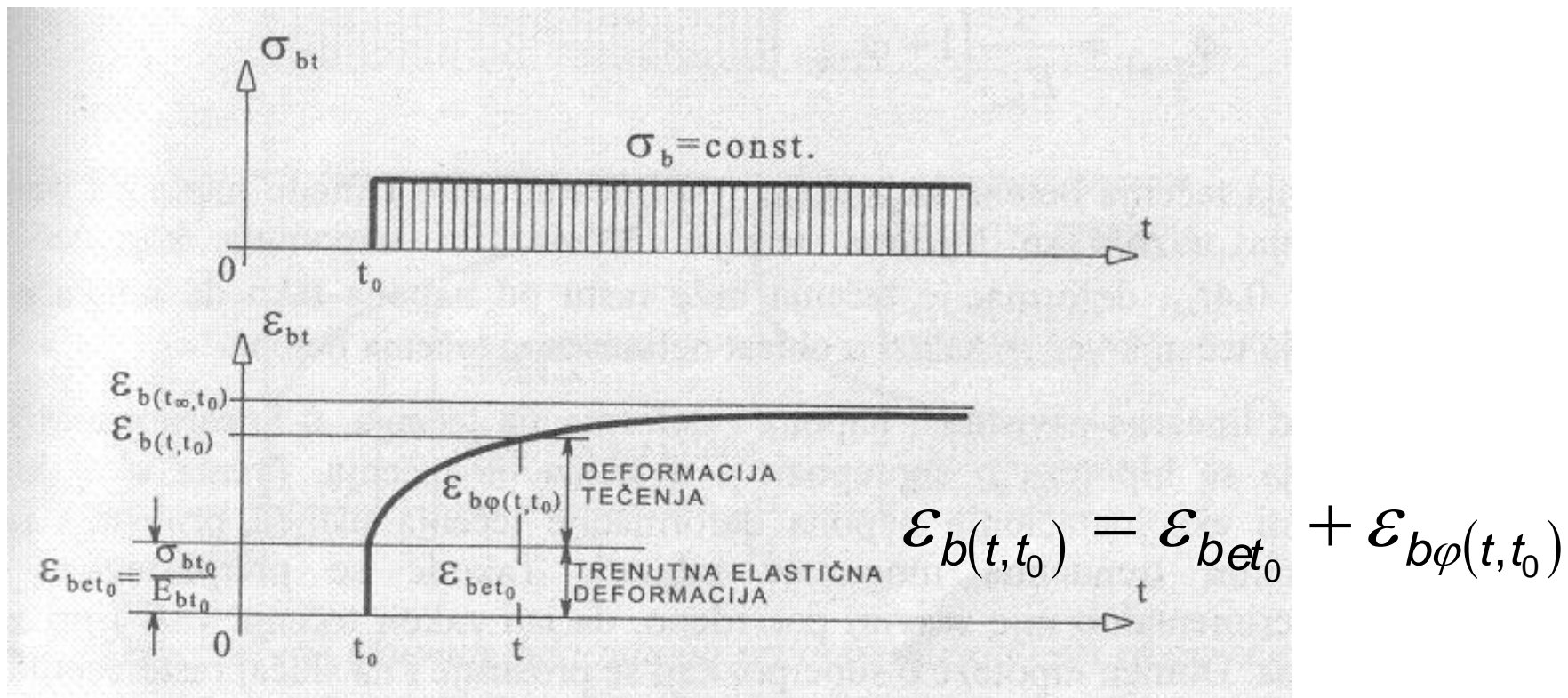
$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad \beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5})$$

gdje je  $t$  u danima.

## Tečenje betona

- Tečenje betona predstavlja porast početne deformacije betona tokom vremena, pri zadržavanju konstantnog opterećenja.

Tečenje betona u funkciji vremena pri konstantnom jednoaksijalnom pritisku prikazano je na dijagramu.



## Linearna teorija tečenja

Za početne napone do  $\sigma_b = (0.4-0.5)f_{bk}$  može se usvojiti pretpostavka o linearnom tečenju (da je deformacija tečenja proporcionalna početnom naponu).

$$\varepsilon_{b(t,t_0)} = \frac{\sigma_{bt_0}}{E_{bt_0}} (1 + \varphi_{(t,t_0)}) = \sigma_{bt_0} \phi_{(t,t_0)}$$

$\varphi_{(t,t_0)}$  - koeficijent tečenja

$$\varphi_{(t,t_0)} = \frac{\varepsilon_{b\varphi(t,t_0)}}{\varepsilon_{be(t_0)}}$$

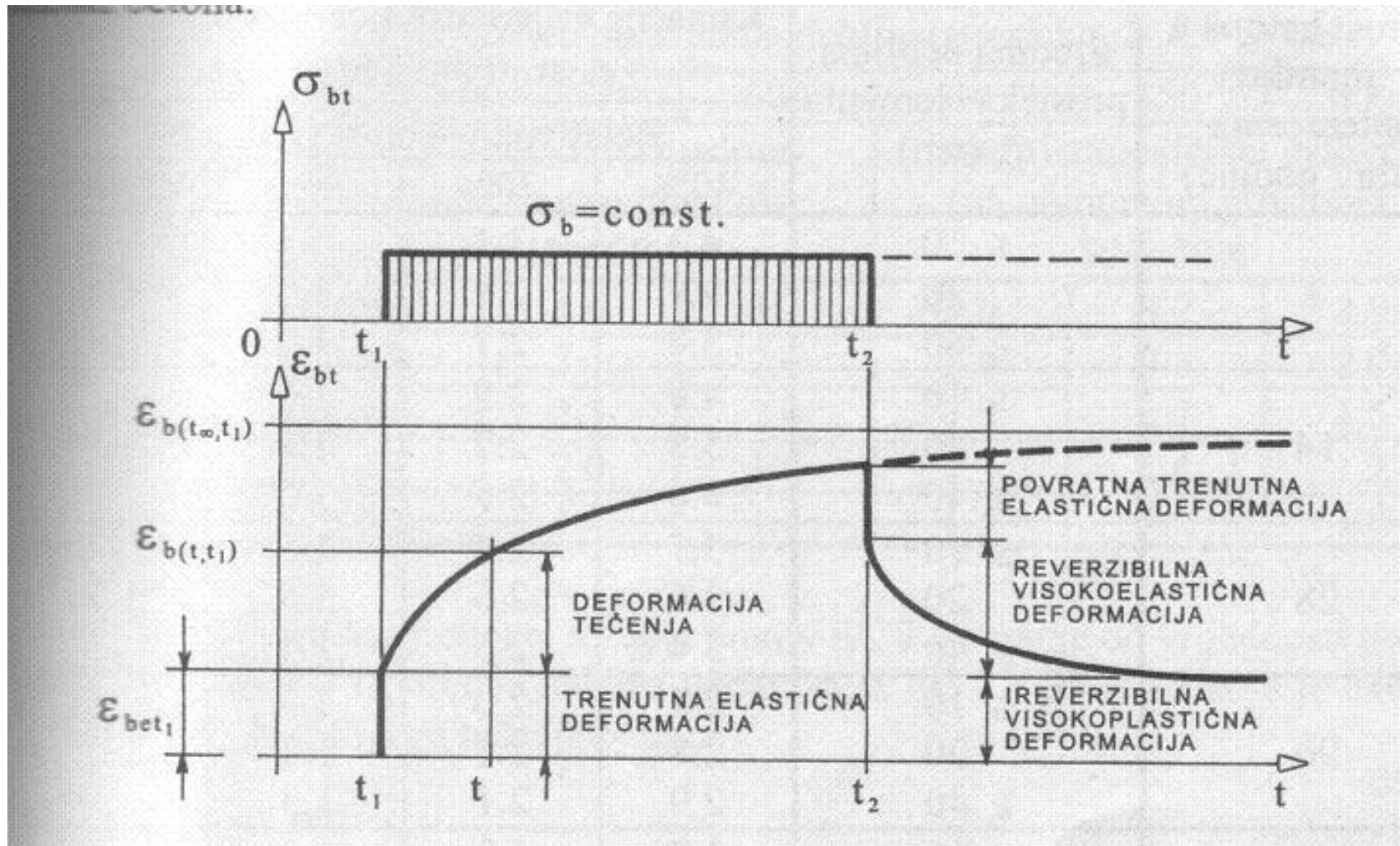
$\phi_{(t,t_0)}$  - funkcija tečenja betona

$$\phi_{(t,t_0)} = \frac{1}{E_{bt_0}} [1 + \varphi_{(t,t_0)}]$$

Kod **linearne teorije tečenja** važi i **pretpostavka o superpoziciji deformacija tečenja**: deformacije tečenja usljed priraštaja napona u različitim trenucima mogu se sabirati.

**Pretpostavka o superpoziciji važi i pri zatezanju, kao i u slučaju rasterećenja.**

## Vremenski tok ukupnih deformacija pri opterećenju i pri rasterećenju



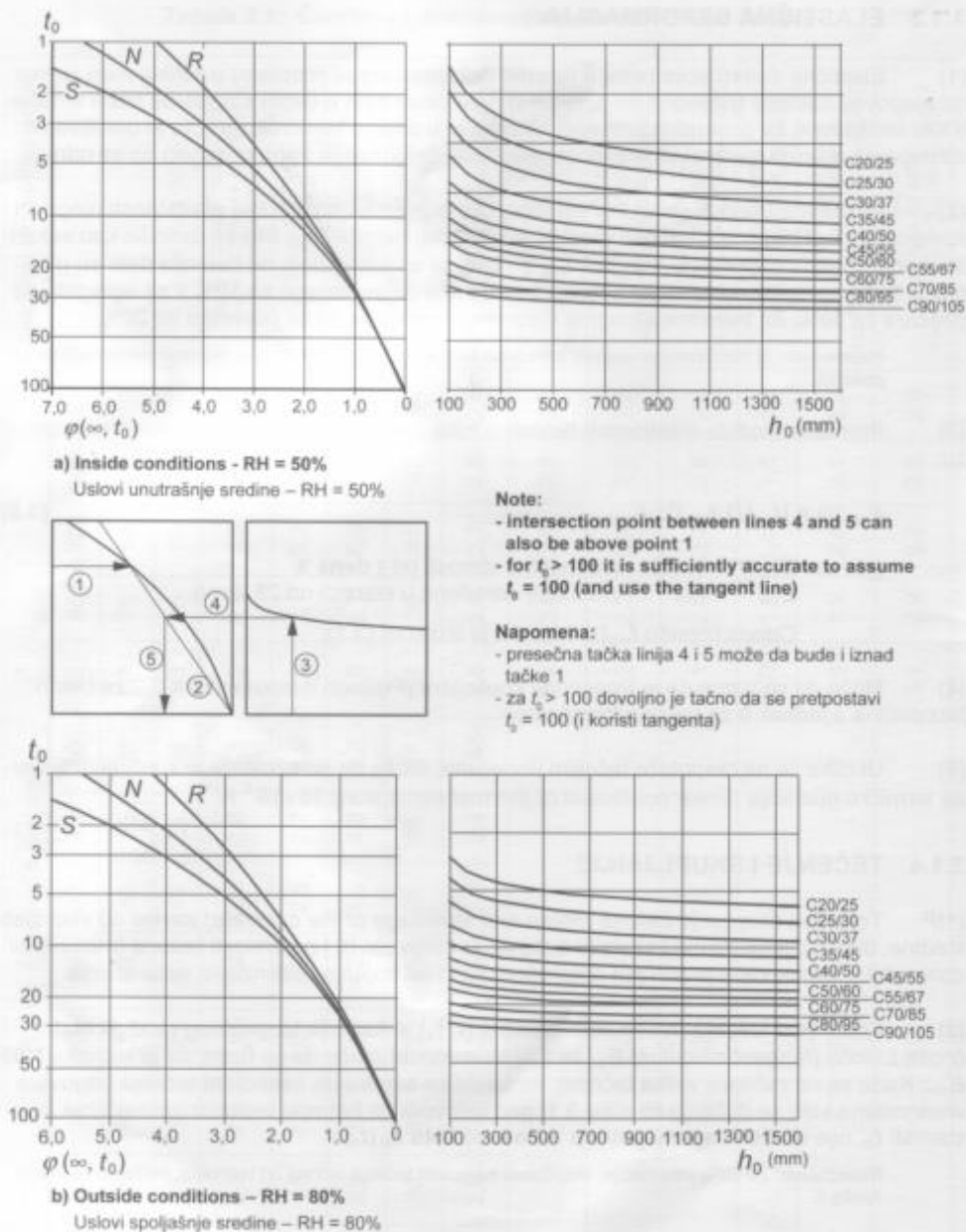
EN 1992-1-1

## Proračun deformacije tečenja

- Koeficijent tečenja je u funkciji tangentsnog modula elastičnosti betona  $E_c$ , pri čemu je  $E_c = 1.05E_{cm}$
- Kad se ne zahtijeva velika tačnost može se usvojiti koeficijent tečenja koji se dobija sa slike 3.1, ako napon pritiska u betonu nije veći od  $0.45f_{ck}(t_0)$ .
- Proračun koeficijenta tečenja zavisno od vremena dat je u aneksu B, EN 1992-1-1.
- Konačna vrijednost deformacije tečenja betona  $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ , za  $t = \infty$ , pri konstantnom naponu pritiska  $\sigma_c$  kojem je beton izložen pri starosti  $t_0$ , se može izračunati pomoću izraza:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \frac{\sigma_c}{E_c}$$

EN 1992-1-1

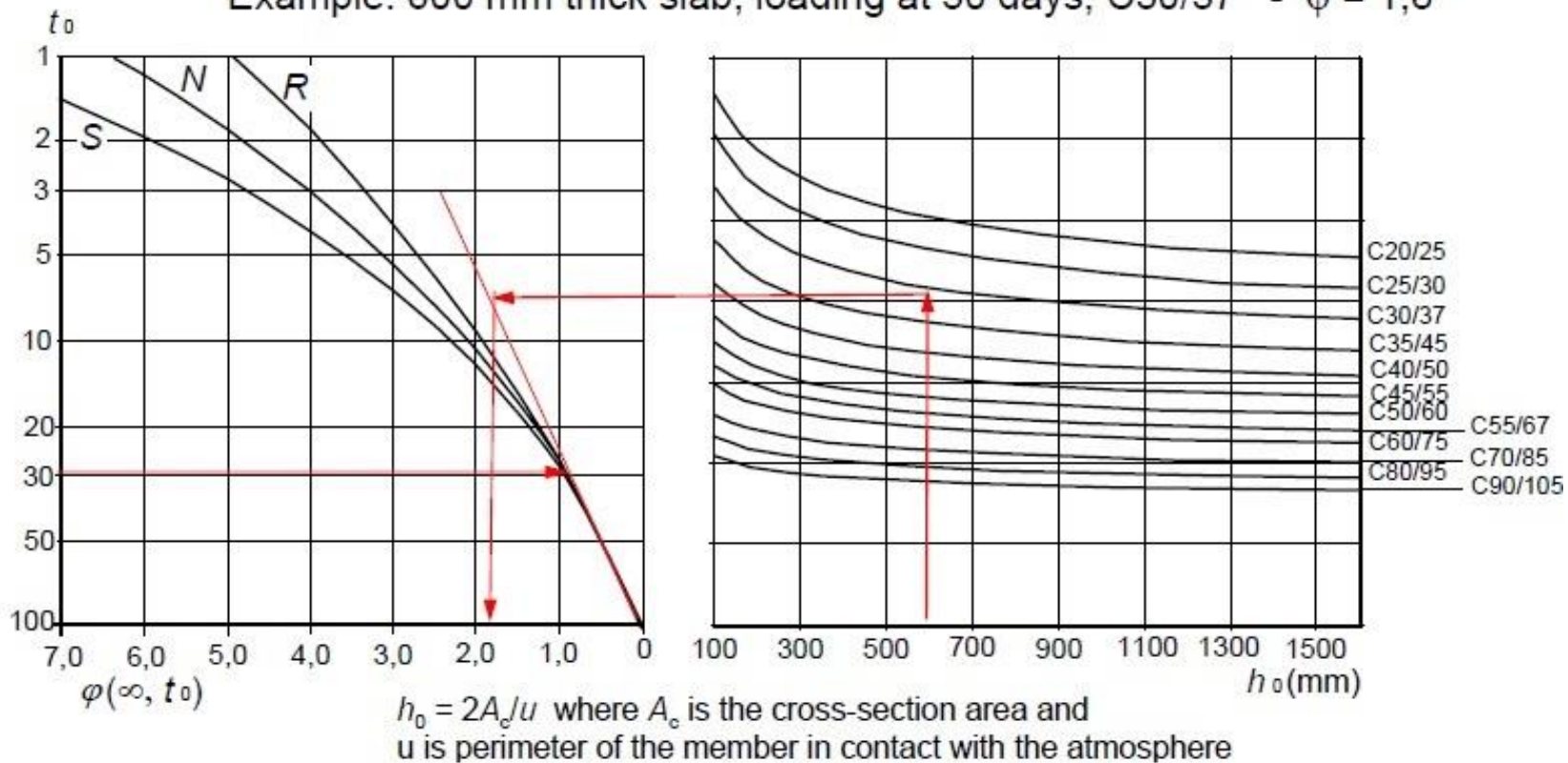


Slika 3.1: Određivanje koeficijenta tečenja  $\varphi(\infty, t_0)$  za beton u normalnim uslovima sredine

## Creep of concrete (3.1.4)

Inside conditions – RH = 50%

Example: 600 mm thick slab, loading at 30 days, C30/37 -  $\varphi = 1,8$





## EN 1992-1-1

Vrijednosti prema EN 1992-1-1, važe za temperaturu sredine  $-40^{\circ}\text{C}$  i  $+40^{\circ}\text{C}$  i srednju relativnu vlažnost između  $\text{RH}=40\%$  i  $\text{RH}=100\%$ .

$\varphi(\infty, t_0)$  konačna vrijednost koeficijenta tečenja

$t_0$  starost betona u trenutku opterećenja  $t_0$  u danima

$h_0 = 2A_c/u$ , gdje je  $A_c$  površina poprečnog presjeka betona, a  $u$  obim izložen sušenju

**S, N, R** klase cementa (CEM 32.5N – klasa **S**, CEM 32.5R i CEM 42.5N – klasa **N**, CEM 42.5 R, CEM 52.5 N i CEM 52.5 R – klasa **R**)

Ako je napon pritiska manji pri starosti betona  $t_0$  veći od  $0.45f_{ck}(t_0)$  u obzir se uzima **nelinearnost tečenja**.

Nominalni **nelinearni koeficijent tečenja** se može dobiti iz izraza:

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \exp(1.5(k_{\sigma} - 0.45))$$

$\varphi_{nl}(\infty, t_0)$  nominalni nelinearni koeficijent tečenja - koristi se umjesto  $\varphi(\infty, t_0)$

$k_{\sigma}$  odnos napon/čvrstoća  $\sigma_c/f_{ck}(t_0)$

# ČELIK

## za prethodno naprezanje

### Zahtjevi kvaliteta

#### ➤ Visoke mehaničke karakteristike

(čvrstoće pri zatezanju 1770 – 1860 MPa)

Usljed reoloških svojstava materijala (betona i čelika), tokom vremena dolazi do pada napona u čeliku, u odnosu na početni napon. Pad napona je **oko 200 MPa**.

Neophodan uslov za postizanje efekata prethodnog naprezanja je da i nakon gubitaka u čeliku za prethodno naprezanje preostane dovoljno veliki napon.

#### ➤ Niska relaksacija

#### ➤ Dovoljna žilavost

#### ➤ Dobra otpornost na koroziju

#### ➤ Otpornost na zamor

## Vrste čelika za prethodno naprezanje

Za prethodno naprezanje koriste se: **žice, šipke, užad, kablovi**

**Žice za prethodno naprezanje su kružnog poprečnog presjeka prečnika do 12 mm.**

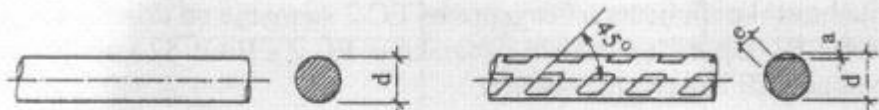
Po obliku (izgledu) mogu biti:

**glatke i profilisane**

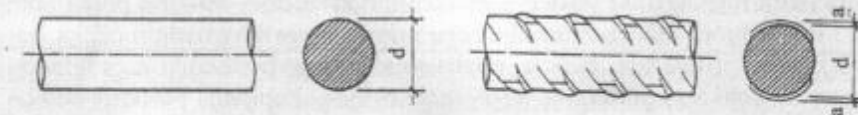
Prema stepenu relaksacije:

**žice sa normalnom relaksacijom**

**žice sa niskom relaksacijom**



Slika 3.4 Čelične žice kružnog poprečnog presjeka

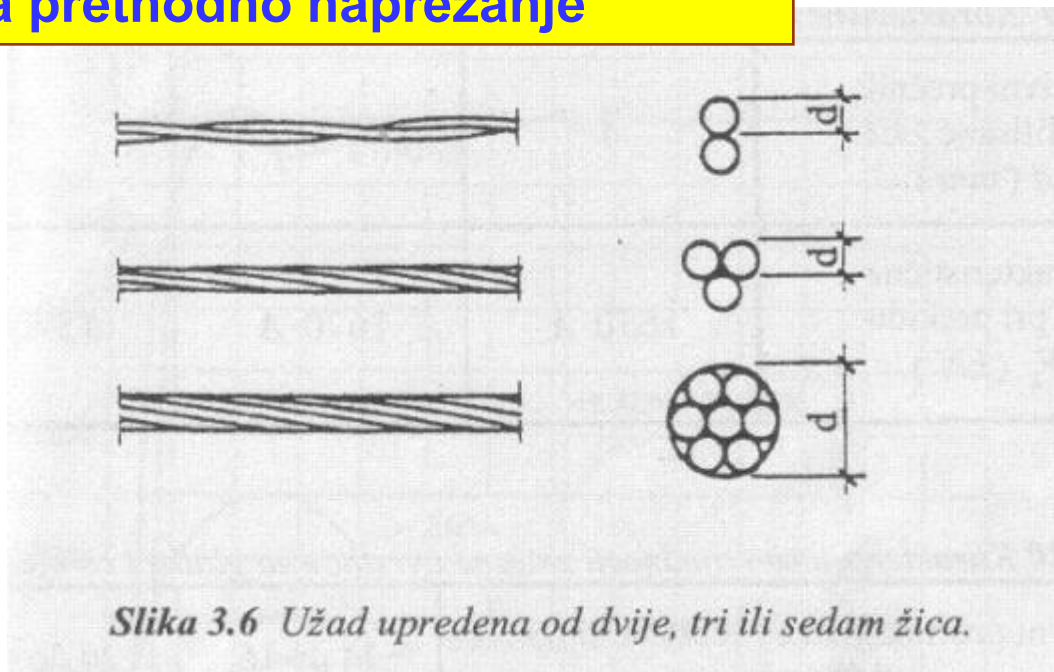


Slika 3.5 Čelične šipke kružnog poprečnog presjeka

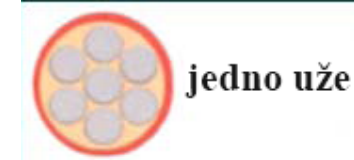
**Šipke za prethodno naprezanje su kružnog poprečnog presjeka prečnika većeg od 12 mm.**

Proizvode se **vrućim valjanjem** i **naknadnom obradom** (vučenjem i naponskim opuštanjem - stabilizacijom)

## Užad za prethodno naprezanje



Slika 3.6 Užad upredena od dvije, tri ili sedam žica.



**Uže** za prethodno naprezanje (strand) se sastoji od **više tanjih žica**. Dobija se upredanjem **dvije, tri ili sedam žica**.

**Prema stepenu relaksacije** može biti:  
 sa normalnom relaksacijom  
 sa niskom relaksacijom.

Užad imaju **nazivne prečnike** koji zavise od prečnika žica kao i broja žica u užetu.

**Nazivni prečnik** užeta može biti od **2 do 16 mm**.

## Standardno uže od sedam žica

bez zaštite



sa zaštitom



Za prethodno naprezanje **sa spojem** primjenjuju se užad **bez zaštite**.

Za prethodno naprezanje **bez spoja** primjenjuju se užad **sa zaštitom**.

## Kablovi za prethodno naprezanje

**Kabl** za prethodno naprezanje (tendon) predstavlja **snop paralelnih užadi** koja se smještaju u **jednu zaštitnu cijev**, a na krajevima se povezuju i ankeruju pomoću **kotve**.

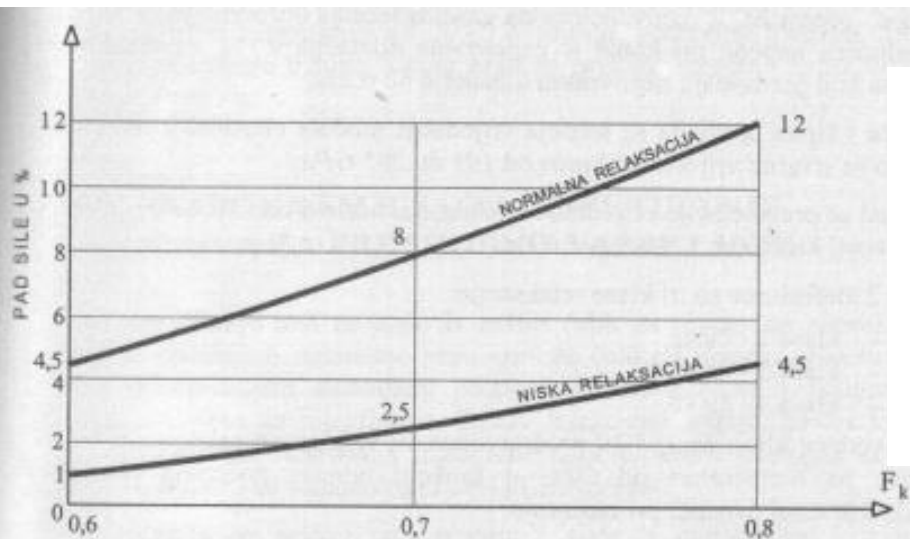
## Relaksacija napona u čeliku za prethodno naprezanje

- Relaksacija napona je pad napona u zategnutoj žici koji se dešava pri zadržavanju konstantne deformacije tokom vremena. To je **čista relaksacija**.
- U čeliku za prethodno naprezanje se relaksacija odvija uz istovremeno smanjenje deformacije u odnosu na početnu, usljed efekata skupljanja i tečenja betona. Ukupna relaksacija je u ovom slučaju manja nego kad se početna deformacija ne mijenja. To je **redukovana relaksacija**.
- Relaksacija zavisi od vrste čelika, veličine početnog napona i od temperature.

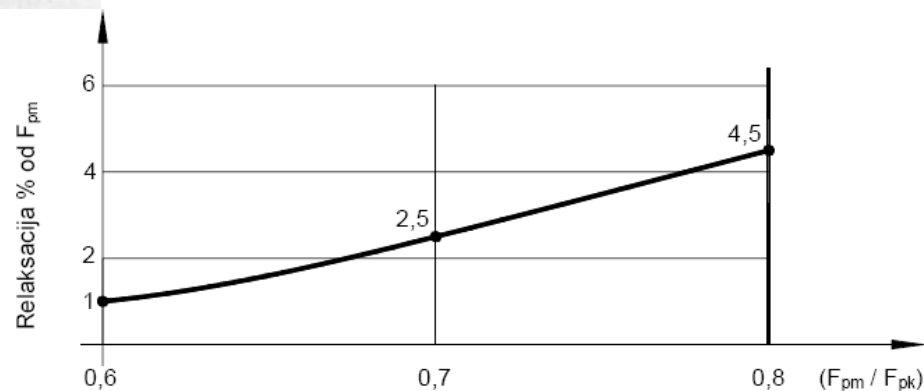
*Tabela 3.12 Vrijednosti relaksacije poslije 1000 časova u zavisnosti od početnog napona*

Vrsta čelika	Kvalitet	Vrijednost relaksacije u % pri početnom opterećenju		
		60%	70%	80%
Čelične žice	Normalni	4.5	8.0	12.0
	Stabilizovani	1.0	2.5	4.5
Čelične šipke		1.5	4.0	6.0
Čelična užad	Normalna	4.5	8.0	12.0
	Stabilizovana	1.0	2.5	4.5

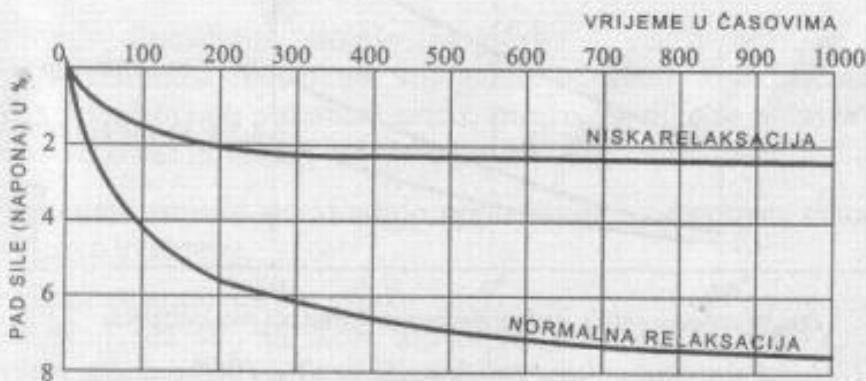
# Relaksacija - posle 1000 časova i tokom vremena



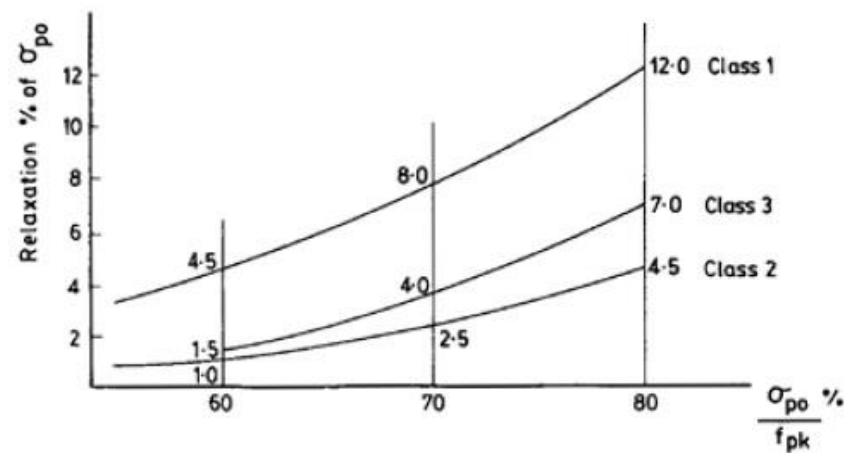
Slika 3.8 Mjera relaksacije u funkciji početnog napona za čeličnu užad



Dijagram relaksacije za čelik niske relaksacije



Slika 3.9 Dijagram relaksacije čeličnih užadi za 1000 h i  $0.7 F_k$



Klase relaksacije čelika prema EN1992-1-1

## EN 1992-1-1 Relaksacija čelika za prethodno naprezanje

### □ U Evrokodu EN 1992-1-1 predviđaju se tri klase relaksacije:

- Klasa 1: žice ili užad – kablovi sa običnom relaksacijom (ordinary relaxation)
- Klasa 2: žice ili užad – kablovi sa niskom relaksacijom (low relaxation)
- Klasa 3: vruće valjane i naknadno obrađene šipke

□ Pri proračunu gubitaka sile prethodnog naprezanja usljed relaksacije koristi se veličina  $\rho_{1000}$  kojom se označava gubitak usljed relaksacije u %, 1000 časova poslije zatezanja na srednjoj temperaturi 20°C.

□ Za vrijednost  $\rho_{1000}$  može se usvojiti: 8% za klasu 1; 2.5% za klasu 2 ; 4% za klasu 3, ukoliko se ne koriste vrijednosti iz sertifikata.

□ Gubici sile prethodnog naprezanja usljed relaksacije treba da se odrede primjenom jednog od izraza, zavisno od klase:

$$\text{Klasa 1} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39\rho_{1000} e^{6.7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5}$$

$$\text{Klasa 2} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0.66\rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5}$$

$$\text{Klasa 3} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1.98\rho_{1000} e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5}$$



- $\Delta\sigma_{pr}$  apsolutna vrijednost gubitka prethodnog naprezanja usljed relaksacije
- $\sigma_{pi}$  pri naknadnom zatezanju je apsolutna vrijednost početnog napona prethodnog naprezanja  $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$ ; pri prethodnom zatezanju je maksimalni napon pri zatezanju kabla, umanjen za trenutne gubitke koji nastaju u toku zatezanja
- $t$  vrijeme poslije zatezanja ( u časovima)
- $\mu = \sigma_{pi}/f_{pk}$  gdje je  $f_{pk}$  karakteristična vrijednost čvrstoće pri zatezanju čelika za prethodno naprezanje
- $\rho_{1000}$  vrijednost gubitaka usljed relaksacije (u %), 1000 časova poslije zatezanja, na srednjoj temperaturi 20°C.

Može se procijeniti da dugotrajne (konačne) vrijednosti gubitaka usljed relaksacije nastaju poslije  $t=500000$  časova (57 godina).