

PREDNAPETI BETON



– 2 –

**MATERIJALI, SUSTAVI I
TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA TE
PODRUČJE PRIMJENE**

BETON

- **Zahtjevi na beton u prednapetim konstrukcijama:**
 - **Visoka tlačna čvrstoća (*s niskim v/c odnosom*)**
 - **Mali iznos skupljanja i puzanja (*s ograničenjem sadržaja cementa*)**
 - **Mogućnost zaštite od korozije, trajnost (*s niskom propusnošću*)**
- **Svojstva betona su određena hrvatskom normom HRN EN 206-1.**
- **Sastav betona treba osigurati**
 - **pravilnim ugrađivanjem betona, s pomoću vibratora,****a u cilju dobivanja**
 - **što kompaktnijeg i homogenijeg očvrslog betona,**
 - **bez segregacije prilikom miješanja, transporta i ugradbe.**

BETON

- Rabe se betoni prosječne gustoće 2400 kg/m^3 i njeguju se barem prvih sedam dana.

- Veće čvrstoće betona potrebne su kod PB:

- Za prihvaćanje većih naprezanja u sidrenim zonama
- Za veću otpornost u tlaku, vlaku, posmiku i prijanjanju
- Za veću krutost u cilju manjih progiba
- U cilju smanjena pukotina od skupljanja



Ponekad će u krajnjim sidrenim dijelovima elementa biti potreban beton veće čvrstoće

- Najniži razredi betona za prednapeti beton:

- Prethodno prednapinjanje



C 30/37

- Naknadno prednapinjanje



C 25/30

BETON

□ Dopuštena tlačna i vlačna naprezanja u betonu:

Razred betona	C30/37	C35/45	C40/50	C50/60
f_{ck} (N/mm ²)	30,0	35,0	40,0	50,0
Dopušteno tlačno naprezanje u uporabi (N/mm ²)	18,0	21,0	24,0	30,0
Dopušteno tlačno naprezanje u fazi prijenosa (N/mm ²)	13,5	15,8	18,0	22,5
f_{ctm} (N/mm ²)	2,9	3,2	3,5	4,1

□ Modul elastičnosti betona:

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

f_{ck} (MPa)	25	30	35	40	45	50	55	60
E_{cm} (GPa)	31	33	34	35	36	37	38	39

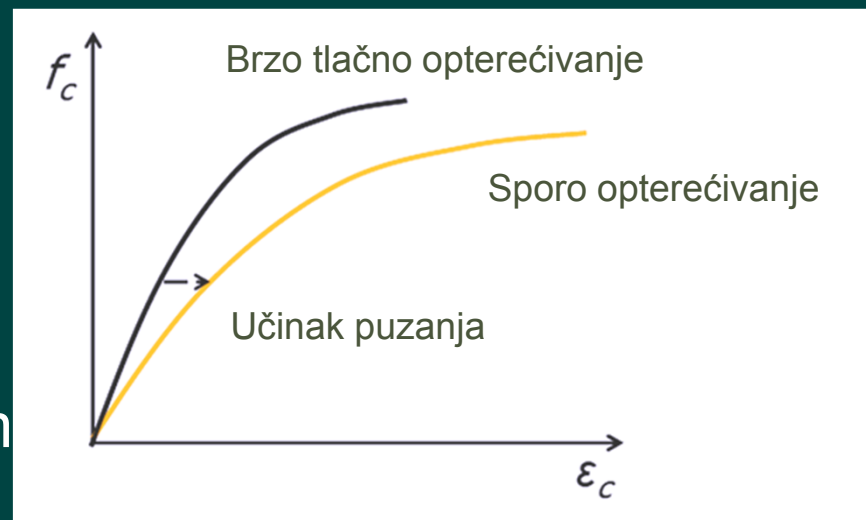
BETON - NAJMANJA POTREBNA TLAČNA ČVRSTOĆA

- Kod prednapinjanja natega sa ili bez sprežanja ostvarena naknadnim injektiranjem cementnog morta, beton u trenutku prednapinjanja t_j mora imati najmanju potrebnu tlačnu čvrstoću f_{cmj} .

	čvrstoće f_{cmj} [N/mm ²] ^a	
razred tlačne čvrstoće betona	prednapinjanje na dio sile (do 30 % sile prema teh.dop.)	prednapinjanje na konačnu silu
C25/30	13	26
C30/37	15	30
C35/45	17	34
C40/50	19	38
C45/55	21	42
C50/60	23	46
C55/67	25	50
C60/75	27	54
C70/85	31	62
C80/95	35	70
C90/105	39	78
C100/115	43	86
^a vrijedi srednja vrijednost tlačne čvrstoće cilindra (kod primjene kocki potrebno je preračunati odnose čvrstoća)		

BETON - PUZANJE

- ❑ Puzanje je povećanje deformacije u vremenu pod konstantnim opterećenjem.
- ❑ Zbog puzanja betona, prednapon u kabelu se s vremenom smanjuje.
- ❑ Puzanje nastaje zbog:
 - premještanja hidratizirane cementne paste
 - izdvajanja vode iz šupljina pod opterećenjem
- ❑ Povećanje deformacija usljed puzanja izaziva pomak u radnom dijagramu pri polaganom opterećivanju u odnosu na radni dijagram pod tzv. brzim opterećivanjem

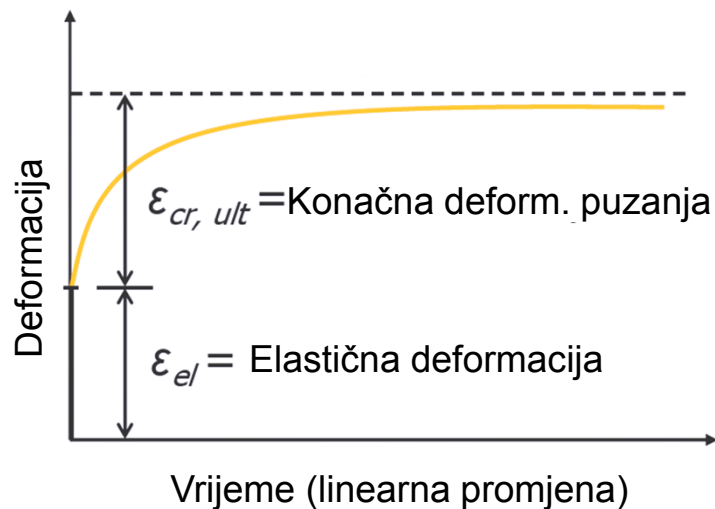


BETON - PUZANJE

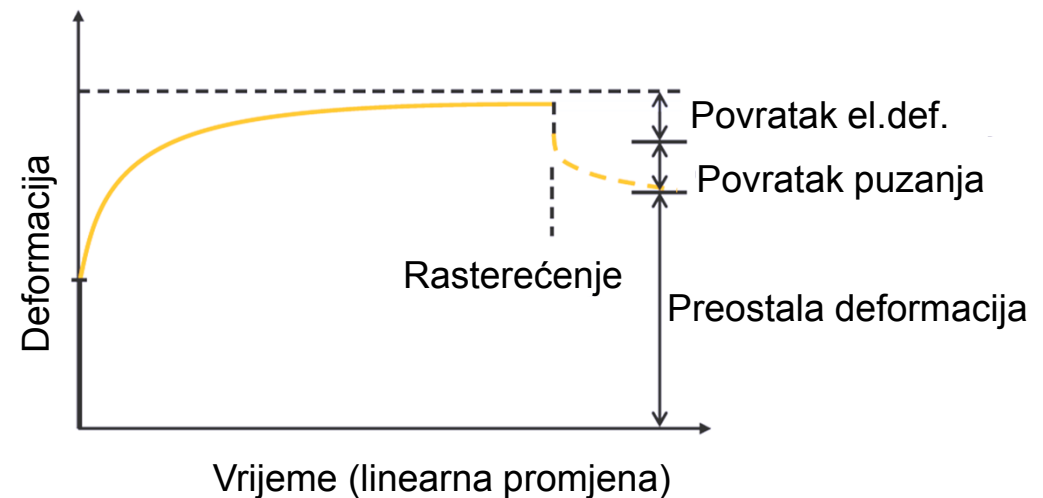
- Puzanje se izražava deformacijom koja se javlja dodatno uz elastičnu deformaciju pod opterećenjem.
- Uz opterećenje blizu razine uporabnog, deformacija od puzanja s vremenom se smanjuje.
- Konačna deformacija puzanja je proporcionalna elastičnoj deformaciji – odnos se zove koeficijent puzanja θ .
- Konačna defomacija puzanja može se (kada je naprezanje u betonu $< 1/3 f_{ck}$) izraziti sa:

$$\varepsilon_{cr,ult} = \theta \varepsilon_{el}$$

BETON - PUZANJE



Promjena deformacije u vremenu za beton pod tlakom



Promjena deformacije u vremenu uz učinak rasterećenja

- Ako se opterećenje ukloni elastična deformacija se obnavlja. Povratni dio el.defomacije manji je od početne elastične deformacije jer se s vremenom modul elastičnosti povećao.

BETON - PUZANJE

□ Puzanje se povećava s povećanjem:

- sadržaja cementa (odnosa količine cementne paste nasuprot agregatu)
- v/c odnosa
- uhvaćenog zraka
- temperature okoliša

□ Puzanje se smanjuje s povećanjem:

- starosti betona pri opterećenju
- relativne vlažnosti
- odnosa volumena i površine oplošja elementa

BETON - PUZANJE

□ Primjer:

- Starost pri opterećenju: 7 dana → $\theta=2,2$
- Starost pri opterećenju: 28 dana → $\theta=1,6$
- Starost pri opterećenju: 365 dana → $\theta=1,1$



- ## □ Velik odnos ukupne deformacije i elastične deformacije zbog puzanja.



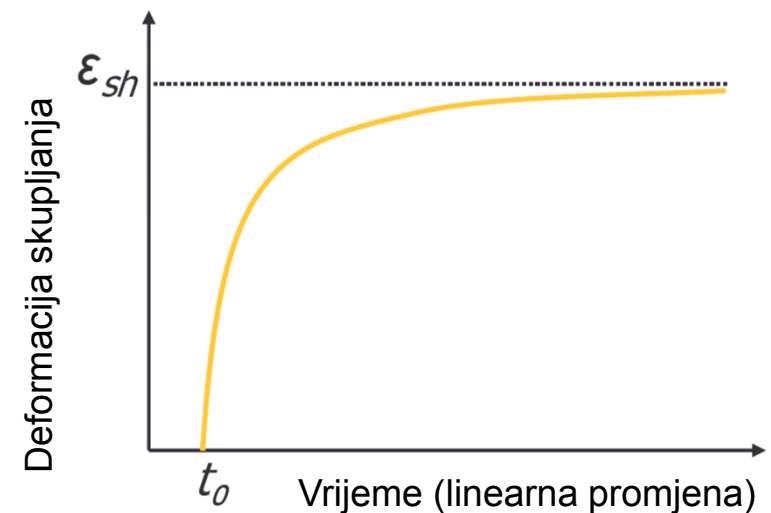
- ## □ Nužnost proučavanja učinka puzanja na gubitak sile prednapinjanja i progib prednapetih elemenata pri savijanju.



- ## □ Na trajnost betona, gubitak prednapinjanja i progib povoljno će utjecati
- pravilna njega,
 - odgađanje primjene opterećenja

BETON - SKUPLJANJE

- Skupljanje je stezanje usljed gubitka vlage.
- I ono utječe na gubitak sile prednapinjanja.
- Događa se usljed:
 - gubitka vode iz šupljina
 - smanjenja volumena betona usljed karbonatizacije
- Deformacija od skupljanja povećava se ali smanjenjem tempom povećanja u vremenu.
- Konačna defomacija skupljanja ϵ_{sh} procjenjuje se za proračun gubitaka sile prednapinjanja.



BETON - SKUPLJANJE

- Deformacija od skupljanja povećava se s povećanjem:
 - temperature okoliša
 - temperaturnih razlika u elementu
 - v/c odnosa
 - sadržaja cementa
- Deformacija od skupljanja smanjuje se s povećanjem:
 - starosti betona pri početku sušenja
 - relativne vlažnosti
 - odnosa volumena i površine oplošja elementa

BETON - SKUPLJANJE

- Približna procjena konačne deformacije od skupljanja

- za predhodno prednaprezanje:

$$\varepsilon_{sh} = 0.0003$$

- za naknadno prednaprezanje:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{0.0002}{\log_{10}(t + 2)}$$

- gdje je t starost u danima pri prijenosu naprezanja koja odgovara trajanju njege betona.



- Što je starost betona veća prilikom prijenosa naprezanja deformacija od skupljanja je manja.



- Na trajnost betona i gubitak prednapinjanja povoljno će utjecati:

- pravilna njega,
 - odgađanje primjene opterećenja

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

□ Zahtjevi na čelik za prednapinjanje su:

- velika čvrstoća (u trenutku prednapinjanja čelik se napreže između 65 % i 75 % njegove karakteristične čvrstoće),
- mala relaksacija (tijekom vremena dolazi do pada napona u čeliku zbog reoloških svojstava betona i čelika),
- dovoljna žilavost (neophodno za građenje duktilnih konstrukcija),
- mala osjetljivost na koroziju,
- geometrijska pravilnost,
- velike duljine pri isporuci,
- dobra prionljivost i
- otpornost na zamor.



ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

- nHRN EN 10138-1 - Čelik za prednap. – 1. dio: Opći zahtjevi (prEN 10138-1:2000)
- nHRN EN 10138-2 - Čelik za prednapinjanje – 2. dio: **Žica** (prEN 10138-2:2000)
- nHRN EN 10138-3 - Čelik za prednapinjanje – 3. dio: **Užad** (prEN 10138-3:2000)
- nHRN EN 10138-4 - Čelik za prednapinjanje – 4. dio: **Šipke** (prEN 10138-4:2000)



ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

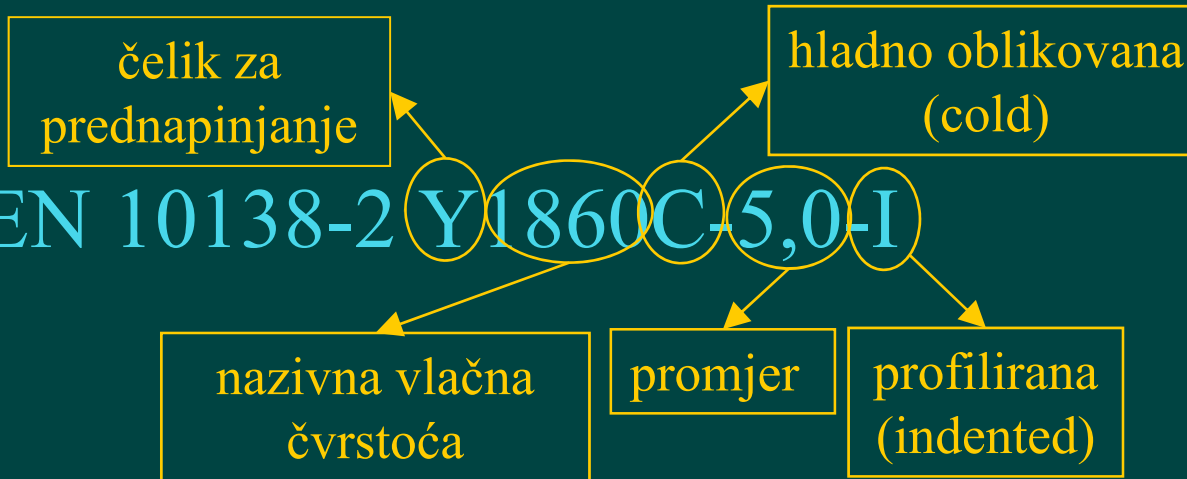
- Svojstva i označivanje čelika za prednapinjanje prema nizu norma nHRN EN 10138

Norma	Naziv	Ime	Broj	Promjer <i>d</i> (mm)	Vlačna čvrstoća <i>R_m</i> (MPa)	Karakt. vrijednost najveće sile <i>F_m</i>
nHRN EN 10138-2	žica	Y1860C	1.1353	3 4 5	1860	13,3 23,4 36,5
	žica	Y1770C	1.1352	3,2 5,0 6,0	1770	14,2 34,8 50,0
	žica	Y1670C	1.1351	6,9 7,0 7,5	1670	62,4 64,3 73,8
	žica	Y1570C	1.1350	9,4 9,5 10,0	1570	109 111 123
nHRN EN 10138-3	uže	Y1960S3	1.1361	5,2	1960	26,7
	uže	Y1860S3	1.1360	6,5 6,8 7,5	1860	39,2 43,5 54,0
	uže	Y1860S7	1.1366	7,0 9,0 11,0 12,5 13,0 15,2 16,0	1860	56 93 140 173 186 260 279
	uže	Y1770S7	1.1365	15,2 16,0 18,0	1770	248 265 354
	uže	Y1860S7C	1.1372	12,7	1860	209
	uže	Y1820S7C	1.1371	15,2	1820	300
	uže	Y1700S7C	1.1370	18,0	1700	380
	šipka	Y1100H	1.1381	15 20	1100	194 346
	šipka	Y1030H	1.1380	25,5 26 26,5 27 32 36 40 50	1030	526 547 568 590 828 1048 1294 2022
nHRN EN 10138-4	šipka	Y1230H	1.1382	26 26,5 32 36 40	1230	653 678 989 1252 1546

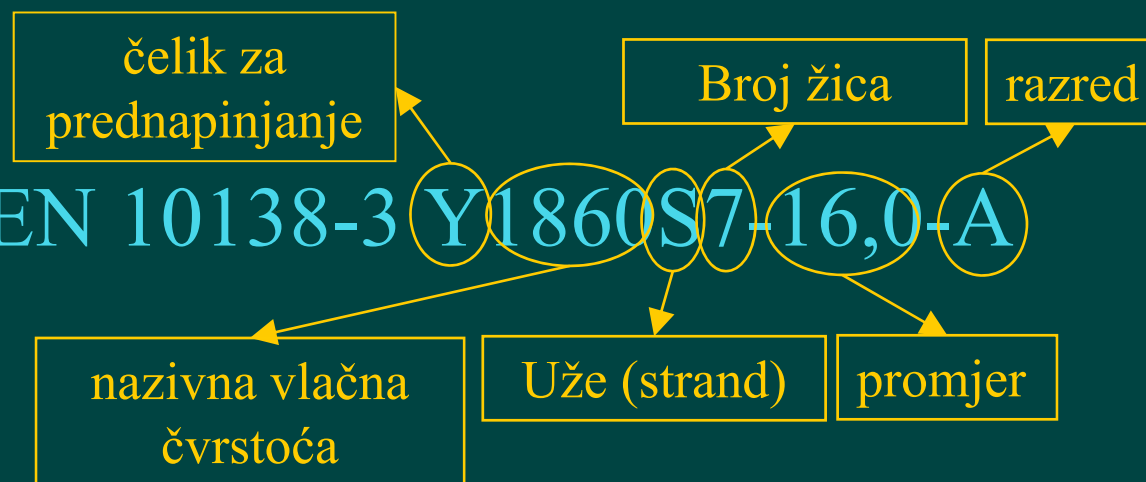
ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

- Primjeri označavanja:

■ Žica nHRN EN 10138-2



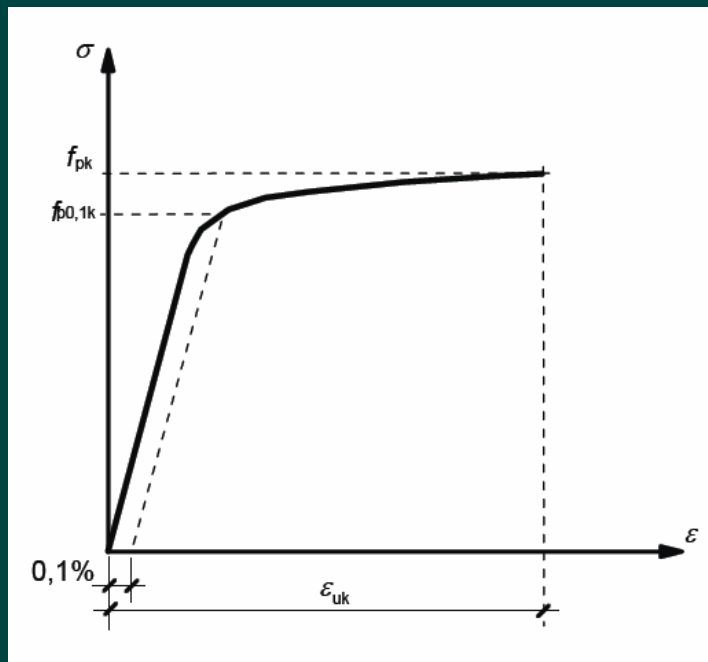
■ Uže nHRN EN 10138-3



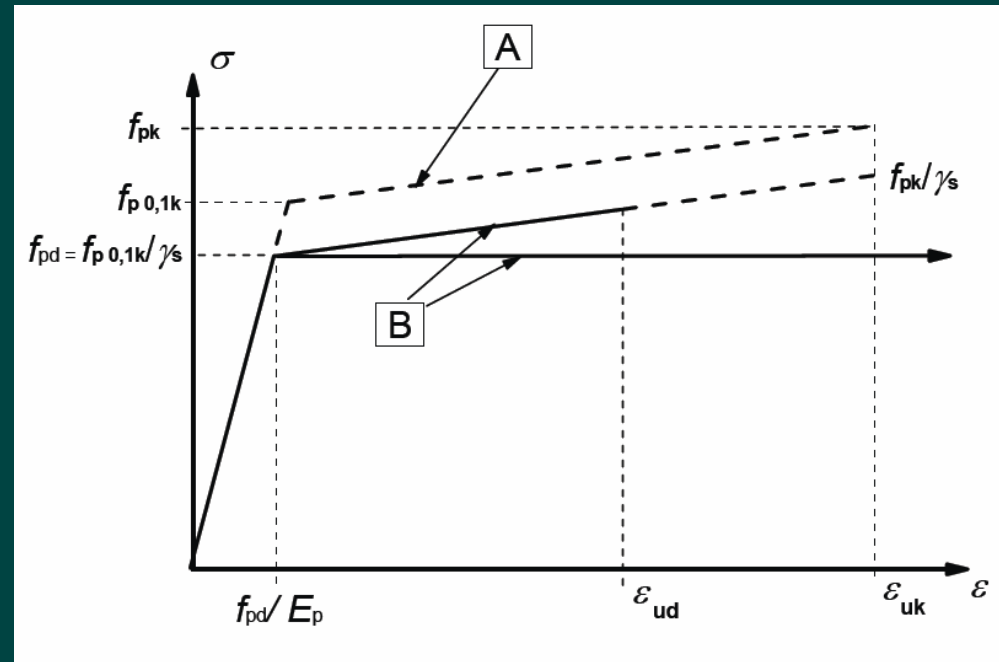
ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

■ Bitna mehanička svojstva:

- karakteristična vlačna čvrstoća f_{pk} , (omjer najveće sile u vlačnom pokusu i nazivne A presjeka).
- karakteristično naprezanje pri zaostaloj deformaciji od 0.1% $f_{p0.1k}$ – tzv. granica popuštanja (omjer sile koja odgovara 0.1%-tnoj trajnoj deformaciji i nazivne ploštine presjeka),
- karakteristična deformacija pri najvećoj sili ε_{uk} (pokazatelj duktilnosti).



STVARNI RADNI DIJAGRAM
ČELIKA ZA PREDNAPINJANJE



IDEALIZIRANI (A) I PRORAČUNSKI
RADNI DIJAGRAM (B)

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

□ DUKTILNOST

- Može se smatrati da je u vlaku prikladna uz preporučenu vrijednost
 - $f_{pk}/f_{p0.1k} \geq 1,1$

□ MODUL ELASTIČNOSTI

- Za žice i šipke
 - može se prihvatiti srednja vrijednost **200** kN/mm²
 - ovisno o postupku proizvodnje, može biti između **195** i **205** kN/mm²
- Za užad
 - uzima se vrijednost **190** kN/mm²
 - stvarna vrijednost, ovisno o postupku ugradbe iznosi **175** do **195** kN/mm²

□ PARCIJALNI KOEFICIJENT SIGURNOSTI

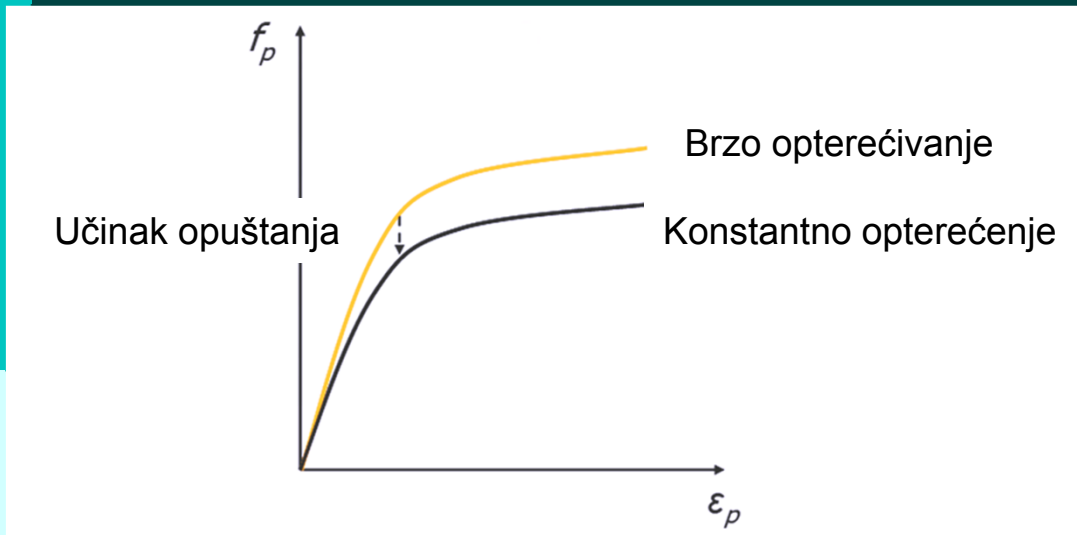
- Osnovna kombinacija: $\gamma_s = 1,15$
- Izvanredne kombinacije (osim potresa): $\gamma_s = 1,0$

□ FIZIKALNA SVOJSTVA (vrijede za područje temperature od -20°C do 200°C)

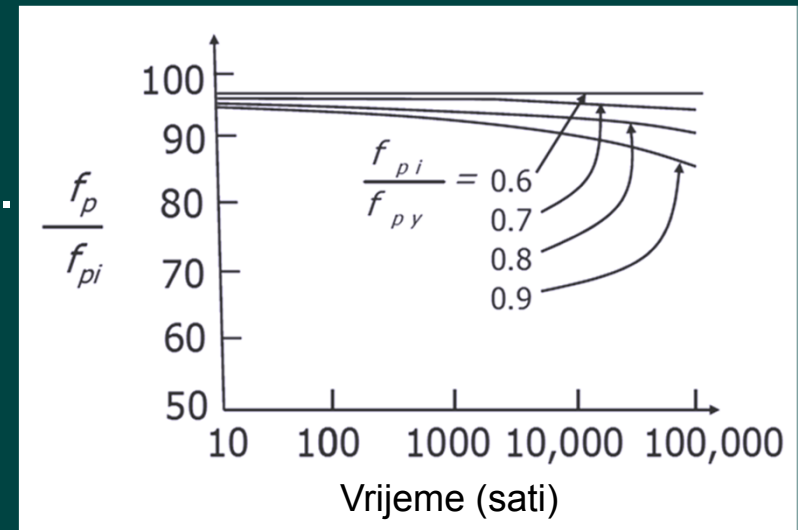
- Gustoća: 7850 kg/m³
- Toplinski koeficijent $10 \times 10^{-6} K^{-1}$

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE - OPUŠTANJE

- ILI RELAKSACIJA je smanjenje naprezanja u vremenu pod konstantnim deformacijama.
- Zbog opuštanja čelika, prednapon u kabelu se s vremenom smanjuje.



Učinak opuštanja s obzirom na različite uvjete opterećenja



Promjena naprezanja za različite razine prednapinjanja

f_p trenutno naprezanje
 f_{pi} početno prednaprezanje
 f_{py} granica popuštanja

- Kada je primjenjeno prednaprezanje veće od 70% granice popuštanja – gubitci od opuštanja su značajni!

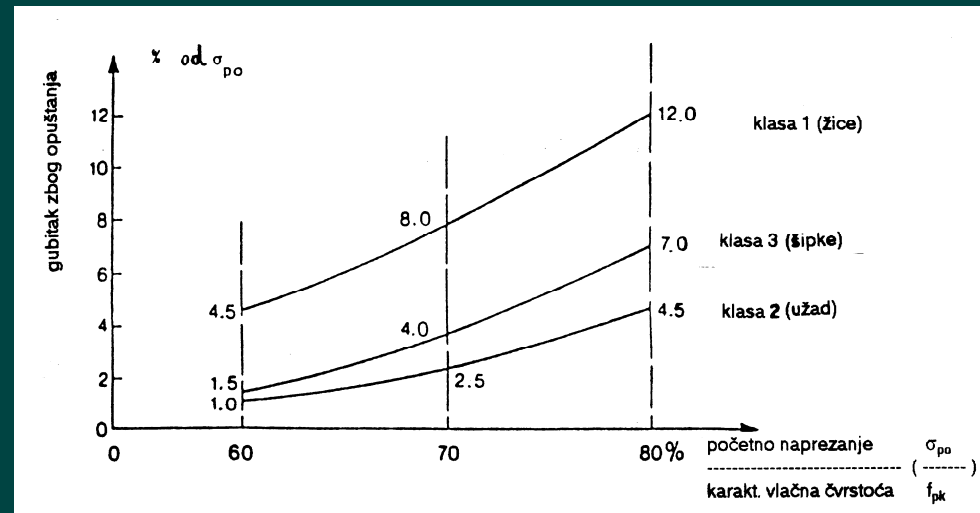
ČELIK ZA PREDNAPINJANJE - OPUŠTANJE

□ Opuštanje ovisi o

■ vrsti čelika,

- Razred 1: žice s velikim opuštanjem
- Razred 2: užad s malim opuštanjem
- Razred 3: šipke s umjerenim opuštanjem

■ početnom prednapinjanju



■ i temperaturi

- Opuštanje pri temperaturi većoj od 20°C bit će veće
- Gubitci zbog opuštanja u kratkom vremenu, kad je temp. konstrukcije veća od 60°C mogu biti 2-3 puta veći od onih pri 20°C
- Najčešće se može uzeti da povećana temperatura u kratkom razdoblju nema utjecaja na rezultate dugotrajnog opuštanja

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE - OPUŠTANJE

□ EN 1992-1-1

- Razred 1:
žice ili užad s uobičajenim opuštanjem

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \rho_{1000} e^{6,7 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

- Razred 2:
žice ili užad s malim opuštanjem

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \rho_{1000} e^{9,1 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

- Razred 3:
vruće valjane i obrađene šipke

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \rho_{1000} e^{8 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

□ Oznake:

- $\Delta\sigma_{pr}$ apsolutna vrijednost gubitaka prednapinjanja od opuštanja
- σ_{pi}
 - apsolutna vrijednost početnog prednapinjanja (za naknadno prednap.)
 - maksimalno vlačno naprezanje primjenjeno na kabelu - trenutni gubitci tijekom procesa prednapinjanja (za prethodno prednapinjanje)
- t vrijeme nakon prednapinjanja
- $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE - OPUŠTANJE

□ EN 1992-1-1

■ Razred 1:

žice ili užad s uobičajenim opuštanjem

$$\rho_{1000} = 8,0 \%$$

■ Razred 2:

žice ili užad s malim opuštanjem

$$\rho_{1000} = 2,5 \%$$

■ Razred 3:

vruće valjane i obrađene šipke

$$\rho_{1000} = 4,0 \%$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \rho_{1000} e^{6,7 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \rho_{1000} e^{9,1 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \rho_{1000} e^{8 \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 (1-\mu)} 10^{-5}$$

□ Proračunske vrijednost gubitaka usljed opuštanja čelika temelje se na:

- ρ_{1000} gubitak od opuštanja u % 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temp. 20°C
- (Vrijednost je dobivena za početno naprezanje $0,7f_p$ gdje je f_p stvarna vlačna čvrstoća uzoraka čelika za prednapinjanje. U proračunu se primjenjuje f_{pk} .)
- Pretpostavljene vrijednosti ρ_{1000} (ako se ne uzimaju iz potvrde)

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

■ ZAMOR

- Pod djelovanjem ponavljajućeg dinamičkog opterećenja čvrstoća elementa može se smanjiti s brojem primjenjenih ponavljanja (ciklusa). To smanjenje čvrstoće nazivamo zamor.
- Kod prednapetog betona zamor se može zanemariti kod elemenata koji pod uporabnim opterećenjem ne doživljavaju raspucavanje.
- Ako element raspuca, zamor može biti opasan usljed visokog naprezanja u čeliku na mjestu pukotina.

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

■ ZAMOR

- Ispitivanje na zamor obavlja se pod 2×10^6 ciklusa opterećenja, a rezultat za čelik je S-N krivulja koja predstavlja ovisnost naprezanja i brojeva ciklusa.
- Granica izdržljivosti predstavlja graničnu vrijednost naprezanja pod kojom uzorak može izdržati neograničen broj ponavljanja (ciklusa) opterećenja.
- Prednapete elemente valja proračunati tako da naprezanje u čeliku pod uporabnim opterećenjem ostane ispod granice izdržljivosti.



Ispitivanje
užadi na zamor

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

▣ TRAJNOST

- Prednapeti beton podložen je naponskoj koroziji i zahvaćanju vodika u agresivnim uvjetima izloženosti.
- Za spregnute natege prikladna zaštita je
 - ▣ alkalna sredina cementne paste
- Za slobodne natege zaštita od korozije obavlja se
 - ▣ Premazom na bazi epoksida
 - ▣ Zamatanjem u vrpce impregniranu mašću
 - ▣ Galvaniziranjem šipki
 - ▣ Uvlačenjem u cijevi.

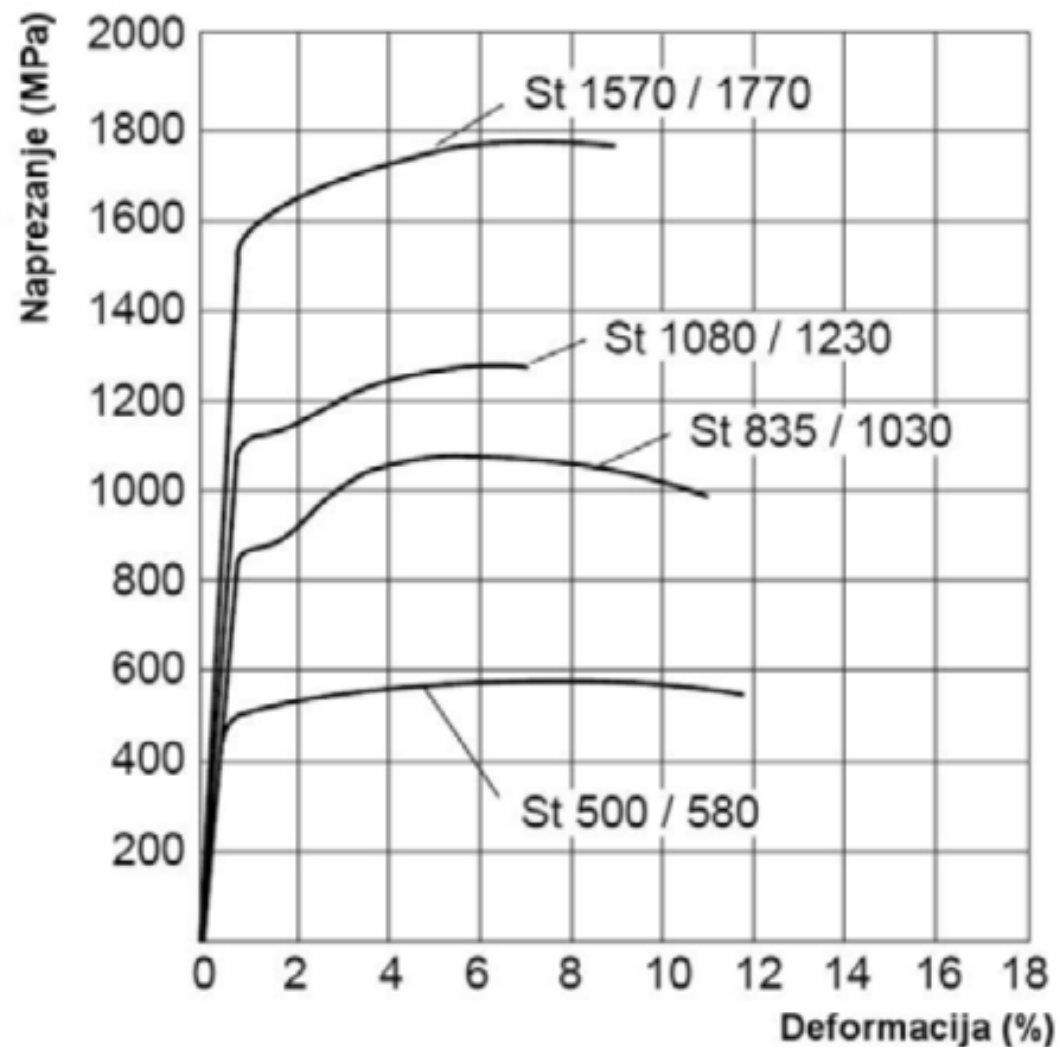
ČELIK ZA PREDNAPINJANJE

▣ NAPONSKA KOROZIJA RASPUCAVANJA

- Čelik visoke čvrstoće od kojega se izvode kabeli u prednapetom betonu može biti podložen
 - ▣ krtosti uslijed vodika (Hydrogen Embrittlement - HE).
 - ▣ U kiselim otopinama željezo se otapa uz nastanak vodika.
 - ▣ Ovaj atomski vodik može difundirati u čelik, pogotovo kad je on vlačno napregnut.
 - ▣ U čeliku se atomi vodika skupljaju u dislokacijama, porama, granicama, i kad koncentracija ovog atomskog vodika dovoljno naraste on se pretvara u molekularni, što dovodi do velikih pritisaka i pucanja čelika.
- S tim u vezi je pojava pukotina od naponske korozije (Stress Corrosion Cracking – SCC).
 - ▣ Naprezanje pospješuje pojavu i razvoj pukotina u metalu koji se nalazi u nemetalnom korozivnom fluidu.
- Problem je najizraženiji kod konstrukcija sastavljenih od odsječaka i to na mjestima spojnica.

ČELIK ZA PREDNAPINJANJE I ARMATURNI ČELIK

□ Razlika

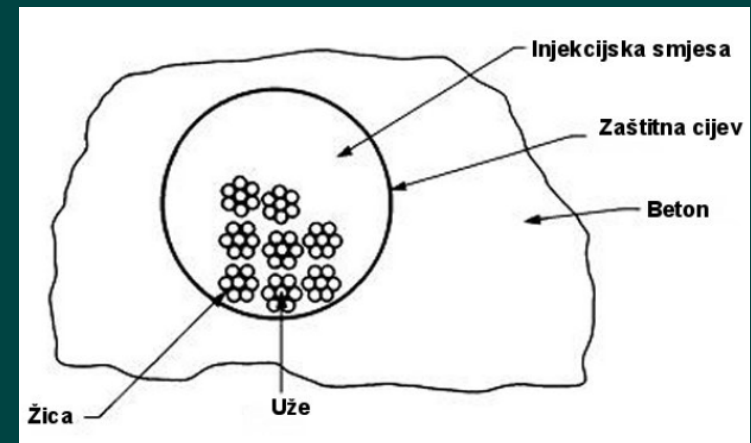


MORT ZA INJEKTIRANJE

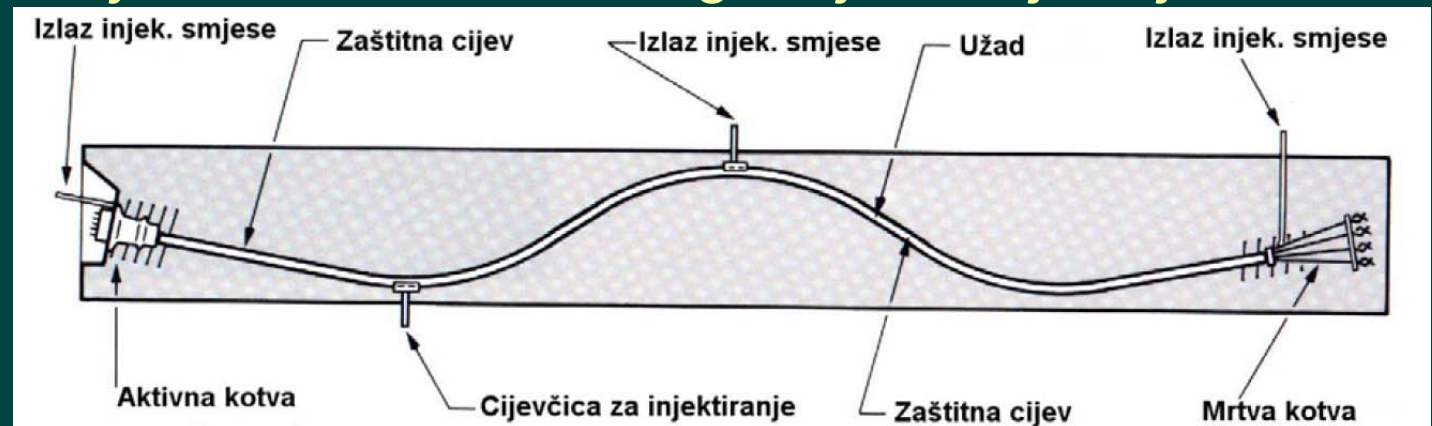
- Za injektiranje cijevi natega rabe se mortovi čija su svojstva opisana u normama
 - HRN EN 446 Mort za injektiranje natega za prednapinjanje - Postupci injektiranja
 - HRN EN 447 Mort za injektiranje natega za prednapinjanje – Svojstva uobičajenih mortova za injektiranje
- Mort je mješavina
 - vode, cementa i ostalih materijala kao što je
 - pijesak,
 - dodaci za smanjenje vode,
 - dodaci za širenje i pocolani
 - v/c odnos je oko 0,45
 - primjenjuje se fini pijesak kako bi se izbjegla segregacija
 - ne smije se upotrebljavati morska i bočata voda

MORT ZA INJEKTIRANJE

- Prostor između kabela i zaštitnih cijevi potrebno je
 - ispuniti mortom za injektiranje ili uljem
 - (ne smije biti zraka ni vode).



- Mort za injektiranje se
 - pod pritiskom ubrizgava u najnižoj točki kabela a
 - odzračivanje i izlaz morta se događaju u najvišoj točki.



MORT ZA INJEKTIRANJE

□ Dvije glavne zadaće.

■ Štiti natege od korozije

- Kako bi se ostvarila dobra zaštita od korozije, čelik mora biti potpuno obavijen cementnim mortom dostatne gustoće.
- Ne smiju se pojavljivati nezapunjeni dijelovi gdje se zadržao zrak ili voda.
- Voda se zimi može zalediti i izazvati odlamanje zaštitnog sloja betona.
- Najmanje šupljine mogu dovesti do korozije čelika.

■ Osigurava sprezanja natege i konstruktivnog elementa

- Za to je potrebna dostatna čvrstoća.

MORT ZA INJEKTIRANJE

□ Cementni mort se ne smije injektirati

- pod velikim tlakom (2 MPa ili druga vrijednost određena postupkom injektiranja)
- niti velikom brzinom

jer se tako onemogućuje

- stvaranje zračnih čepova,
- segregacija,
- oštećivanje konstrukcije, opreme i ventila,
- štite se radnici
- te se omogućuje kontrola protoka morta.



MORT ZA INJEKTIRANJE

- Poželjna svojstva morta za injektiranje jesu:
 - malo izlučivanje vode i sedimentacija
 - kohezija u plastičnom stanju do završetka postupka injektiranja
 - malo izdvajanja cementnog morta
 - male deformacije zbog skupljanja
 - povećanje volumena stvaranjem mikro-pora
 - dostatna tlačna čvrstoća i prionjivosti
 - dostatna otpornost na zamrzavanje
 - odsutnost štetnih sastojaka
 - trajnost, postojanost

MORT ZA INJEKTIRANJE

□ Zahtijev malog izlučivanje vode i sedimentacije:

- Cementni mort ne smije biti proizveden s previše vode jer se ona ne može upiti u okolni beton zbog zaštitne cijevi.
- Izlučena zaostala voda povećava opasnost od korozije i pri niskim temperaturama može se zamrzavati.
- Ispitivanja su pokazala da se u zaštitnim cijevima s gornje strane u prvim satima, zbog sedimentacije, može stvoriti tanka mješavina cementa i vode ili mjehurići zraka.
- Zbog toga se kod velikih natega treba naknadno injektirati.
- Najveće izlučivanje u pravilu nastupa nakon 3-4 sata. Mjerenja treba provesti u tom vremenskom razmaku.

MORT ZA INJEKTIRANJE

- Zahtijev malog izlučivanje vode i sedimentacije:
 - S druge strane, cementni mort ne smije biti previše suh jer se zaštitna cijev može začepiti.
 - Ispitivanja su pokazala da poteškoće s vodom rastu sa starošću cementa.
 - Stoga je potrebno ograničiti starost cementa u proizvodnji cementnog morta za injektiranje.
 - Cement ne smije biti mlađi od 2 do 3 dana kako bi se dostatno ohladio, niti stariji od tri tjedna.



MORT ZA INJEKTIRANJE

■ Zahtjev kohezije u plastičnom stanju do završetka postupka injektiranja:

- Očvršćivanje cementnog morta za injektiranje može početi tek nakon potpunog injektiranja zaštitne cijevi.
- U nekim slučajevima može biti potrebno i nekoliko sati za dovršenje postupka injektiranja.
- Dulji vremenski periodi postižu se dodacima koji ne smiju sadržavati kloride.
- Kod dodataka treba paziti na činjenicu da njihovo djelovanje ovisi o temperaturi.
- Konzistencija jako ovisi i o temperaturi morta. Najbolje vrijednosti bez dodataka postižu se pri temperaturi morta od oko 15 °C.

MORT ZA INJEKTIRANJE

- Zahtijev kohezije u plastičnom stanju do završetka postupka injektiranja:
 - Cementni se mort injektira uz ispunjene uvjete

Temperatura °C	Zrak	Konstruktivski element	Cementni mort
najmanja	5	5	10
najveća	30	25	25

- Kada su temperature veće ili manje od navedenih u tablici, potrebne su posebne mjere koje osiguravaju uspješnost postupka injektiranja.

MORT ZA INJEKTIRANJE

□ Zahtijev malog izdvajanja cementnog morta:

- Kod izdvajanja cementnog morta može doći do zarobljene vode ili velikih promjena volumena tijekom perioda očvršćivanja.

⇒ Stoga je potrebno birati malu vrijednost vodocementnog omjera v/c .



- U isto vrijeme mort mora biti i dostatno plastičan te se

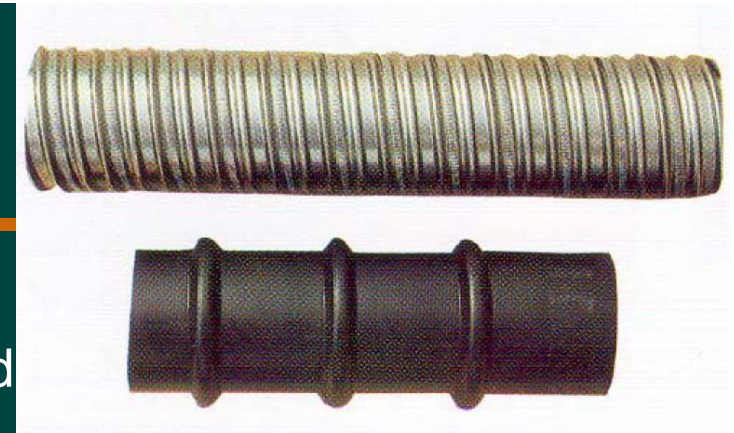
⇒ stoga v/c omjer treba birati u rasponu 0,40 do 0,44.

MORT ZA INJEKTIRANJE

- Zahtjev male deformacije zbog skupljanja:
 - Skupljanje morta je uglavnom vrlo malo jer on ne može izgubiti vodu unutar zaštitne cijevi.
- Zahtjev povećanja volumena stvaranjem mikropora:
 - Mort se do ukrućenja treba širiti kako bi ispunio eventualne praznine.
 - Tlačna sila zbog povećanja volumena ne smije biti prevelika.

CIJEVI NATEGA

- Cijevi u kojima se nalaze natege kod naknadnog prednapinjanja proizvode se od
 - čeličnih (debljine 0,2 – 0,6 mm) ili
 - plastičnih cijevi.
- Norme koje određuju specifikacije i metode ispitivanja čeličnih cijevi jesu:
 - HRN EN 523: Čelične cijevi natega za prednapinjanje – Nazivlje, zahtjevi, kontrola kvalitete
 - HRN EN 524-1: Čelične cijevi natega za prednapinjanje – Ispitne metode – 1.dio: Određivanje oblika i dimenzija
 - HRN EN 524-2: Čelične cijevi natega za prednapinjanje – Ispitne metode – 2.dio: Određivanje ponašanja pri savijanju
 - HRN EN 524-3: Čelične cijevi natega za prednapinjanje – Ispitne metode – 3.dio: Ispitivanje previjanjem
- a za plastične cijevi zasada nema normi.



CIJEVI NATEGA

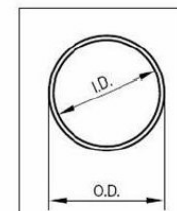
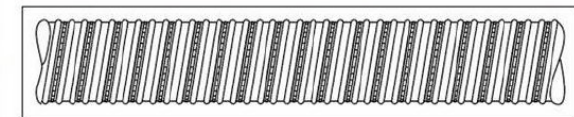
- Cijevi od umjetnih materijala (HDPE) - suvremeno rješenje
- Prednosti:
 - bolja zaštita natega od korozije
 - veća čvrstoća na zamor
 - stalan koeficijent trenja
- Nedostaci:
 - visoki troškovi proizvodnje i ugradnje
 - veliki min. radijusi ugradnje
- Dodatno vrijedi:
 - Moraju imati dostatnu krutost na savijanje i progib.
 - Na njima se ne smiju pojaviti udubljenja ili izbočenja.
 - Debljina mora biti takva da se ne probije uslijed trenja.

CIJEVI NATEGA

- Promjer zaštitne cijevi kabla ovisi o broju užadi.
- Zadnja dva broja kod oznake kabla odnose se na broj užadi. Npr. oznaka kabla 6812 znači da kabel ima 12 užadi.
- Zaštitna cijev je čelična rebrasta i ima dva promjera unutarnji i vanjski.

Promjeri zaštitinih cijevi

tendon type 0.5"	tendon type 0.6"	I.D. mm	O.D. mm
5901	6801	20	25
5902	6802	40	45
5903	6803	50	55
5904	6804	55	60
5905	6805	60	65
5907	6806	65	70
5909	6807	65	70
5912	6809	75	80
5915	6812	80	85
5920	6815	90	95
5927	6819	95	100
5932	6822	100	105
5937	6827	110	118
–	6831	120	128
–	6837	130	138



Primjer za
sustav
Dywidag

CIJEVI NATEGA

- Prostor između natege i zaštitine cijevi može se ispuniti i s drugim materijalima:
 - mast,
 - ulje,
 - vosak.
- Takva **slobodna natega** (unbonded) nije spojena s presjekom i kod nje postoji drugačiji tretman kod dokaza na slom (proračun uzdužne armature).
- Kod **spregnute natege** injektirane injekcijskom smjesom na bazi cementa (bonded) dolazi do promjene deformacija od djelovanja ostalih opterećenja ⇒ dobivamo manje armature iz dokaza na slom.

SPREGNUTE ILI SLOBODNE NATEGE

□ Prednosti prednapinjanja:

- bolja zaštita od korozije
- manji gubici od trenja (0,05 : 0,20)
- manji zamor
- veći koeficijent armiranja
- manji promjeri zaštitnih cijevi
- pojednostavnjenje betoniranja
- smanjenje težine betona kod mostova
- lakša mogućnost kontroliranja
- natege se mogu dotezati i mijenjati
- brže građenje
- u kolničkoj ploči nema cjevčica za odzračivanje
- moguće podešavanje vođenja i količine natega tijekom građenja
- ekonomičnost.

SPREGNUTE ILI SLOBODNE NATEGE

- Nedostaci prednapinjanja bez ostvarenog sprezanja:
 - Natege unutar betonskog presjeka
 - nema sprezanja – potrebna veća količina čelika za armiranje
 - zaštita od korozije



SPREGNUTE ILI SLOBODNE NATEGE

- Nedostaci prednapinjanja bez ostvarenog sprezanja:
 - Natege izvan betonskog presjeka
 - vibracije (podupiranje na svakih 30 m)
 - područje sidra i skretnika
 - ograničenja u vođenju natega
 - oštećivanje natega



TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- Tehnologija kojom se
 - prethodnim napinjanjem visokovrijednog čelika za prednapinjanje
 - u vlačno područje betonskog elementa unosi tlačno naprezanje
 - te tako bolje iskorištavaju svojstva betona i sprečava otvaranje pukotina.
- Sila prednapinjanja prenosi se na beton
 - adhezijski (prianjanje betona i prednapetog čelika) ili
 - nategama (vanjskim ili unutarnjima), koje se sidre u rubne dijelove betonskog elementa.



TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- 80-ih godina 20. stoljeća dogodilo se nekoliko ozbiljnih slomova prednapetih betonskih konstrukcija.
- FIP je osnovao poseban odbor za istraživanje i utvrđivanje uzroka tim pojavama.
- U njemu je nekoliko godina surađivalo oko 35 svjetskih stručnjaka iz tog područja.
- Uočeno je da je najosjetljivija faza prednapinjanja – zaštita natega od korozije pa je jedan od zaključaka bio da ju treba izvoditi specijalizirana ekipa uz obavezni nadzor ovlaštene institucije.

TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- U primjeni je nekoliko licenciranih sustava prednapinjanja koje najčešće izvode specijalizirane tvrtke:

- **Sustav BBRV**

- Tri švicarska građevinska inženjera M. Birkenmaier, A. Brandestin i M. R. Roš formirali su studijsku grupu pod imenom BBR i u suradnji sa strojarskim inženjerom C. Vogtom pronašli i izradili tehnologiju za prednapinjanje betonskih i drugih konstrukcija pod imenom Sustav BBRV.

- **Sustav Vorspann-Technik**

- Na osnovi Freyssinetova patenta razrađen je i proširen sustav Vorspann-Technik. Koriste se pojedinačne žice, šipke, užad te snopovi žica i užadi.

- **Sustav Dywidag**

- Tvrtka Dywidag vlasništvo Dyckerhoff & Widmann iz Münchena proizvodi najviše sustave od pojedinačnih šipki te one od užadi.

- **Sustav VSL**

- Švicarska tvrtaka sa sjedištem u Bernu.

TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- U primjeni je nekoliko licenciranih sustava prednapinjanja koje najčešće izvode specijalizirane tvrtke sljedećim redoslijedom:

- Dobava potrebnih materijala i opreme
 - cijevi za zaštitu natega,
 - visokovrijedne žice, užad ili šipke za prednapinjanje,
 - sidrenih elemenata,
 - materijala i opreme za zaštitu natega od korozije
- Transport i skladištenje potrebnih materijala i opreme
- Izrada natega
- Ugradnja natega
- Prednapinjanje
- Zaštita natega
 - injektiranjem,
 - uljanjem,
 - betoniranjem

TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- ❑ Sam postupak prednapinjanja (unošenje sile u natege) najvažnija je i najosjetljivija faza.
 - Mora biti precizno razrađena i specificirana projektom konstrukcije.
- ❑ Izvođač za sam postupak mora imati
 - precizno pisanu uputu
 - koju specijalizirana ekipa mora slijediti
 - i postupak zapisnički registrirati
 - ❑ sa svim potrebnim podacima,
 - ❑ posebno podacima o dinamici i veličini unošene sile
 - ❑ i realiziranog izduljenja natege



TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- Posebno je nužan dokaz da
 - beton u vrijeme unošenja sile u natege ima normom (HRN ENV 1992-1-1) i projektom zahtijevanu tlačnu čvrstoću.
- Prednapinjanju moraju prisustvovati i *Zapisnik o prednapinjanju* supotpisati
 - i odgovorni nadzorni inženjer izvođača (prema HRN ENV 13670-1)
 - i nadzorni inženjer investitora (prema Zakonu o gradnji).



TEHNOLOGIJA PREDNAPINJANJA

- Za zaštitu natega i njihovih sidrišta također mora postojati
 - pisana uputa,
 - specijalizirana ekipa i
 - nadzor investitora ili ovlaštene institucije.
- Treba se pridržavati sljedećih razdoblja (ako se projektom ne zahtijeva drukčije)
 - Najviše 12 tjedana od proizvodnje natega do injektiranja
 - Najviše 4 tjedna u oplati do injektiranja
 - Najviše 2 tjedna u prednapetom stanju do izvedbe zaštite od korozije.
- Ugrađene cijevi i natega treba do injektiranja zaštititi od prodora vode i prevelikog vlaženja

USPOREDBA ARMIRANOG I PREDNAPETOG BETONA

- ❑ Kod prednapetih konstrukcijskih elemenata zahtjevnije je promatranje nosivosti i djelovanja od armiranobetonskih konstrukcija
- ❑ stalna visoka naprezanja
- ❑ potrebno je uzeti u obzir deformacije betona ovisne o vremenu t
- ❑ provjerava se područje unošenja visokih sila prednapinjanja
- ❑ naprezanja konstrukcije odmah nakon unošenja sile prednapinjanja mogu biti veća od naprezanja u konačnici
- ❑ čelik za prednapinjanje je za razliku od čelika za armiranje uvijek opterećen visokim naprezanjima (relaksacija, korozija)

USPOREDBA ARMIRANOG I PREDNAPETOG BETONA

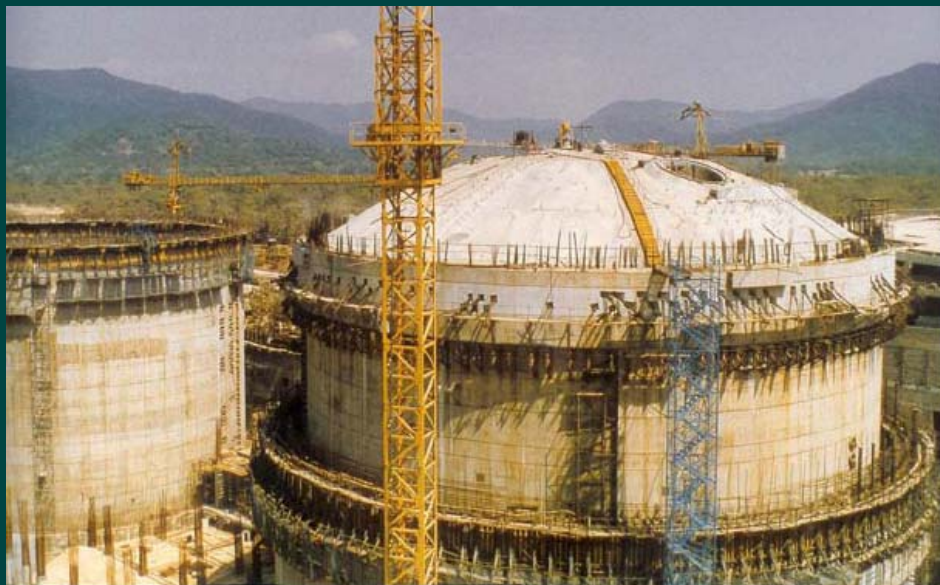
- povećanje sile prednapinjanja nije uvijek na strani sigurnosti
- pretpostavka elastičnog proračuna reznih sila je bolje ispunjena kod PB nego kod AB konstrukcija
- prednapeta konstrukcija nije podesna za velika kolebanja opterećenja
- kod prednapetih konstrukcija prijelaz iz neraspucalog stanja u raspucalo može biti nagli
- kako bi se sila prednapinjanja jednostavno unijela u konstrukciju potrebno je oslanjanje koje uzrokuje minimalne sile prisila
- potrebna je visoka kvaliteta izvedbe

PODRUČJE PRIMJENE PREDNAPETOG BETONA

Cilj prednapinjanja

Inženjerske građevine	MOSTOVI	➔	Veći rasponi, sanacija: povećanje nosivosti, ograničavanje širine pukotina i progiba
	LJUSKE, SPREMNICI	➔	Ograničavanje širine pukotina, nepropusnost, veći rasponi, veći promjeri
Visoko-gradnja	RAVNE PLOČE	➔	Ograničavanje progiba, veći rasponi, ravna oplata
	PREDGOTOVLJENI ELEMENTI	➔	Veći rasponi, ušteda na težini
Temeljenje i hidrotehničke građevine	TRAJNA ILI PRIVREMENA SIDRA	➔	Sile sidrenja u tlo – slobodna građevinska jama
	ZABIJENI PILOTI	➔	Stlačivanje vlačnih naprezanja prilikom zbijanja
	TEMELJNE PLOČE	➔	Ograničavanje širina pukotina, izjednačavanje pritisaka tla
Posebni slučajevi primjene	➔	Tehnike podizanja, sanacije, pomoćno prednapinjanje kod slobodne konzolne gradnje, mostovi sa kosim zategama, sidrenje konzola, betonski proizvodi: stupovi i pragovi	

INŽENJERSKE GRAĐEVINE

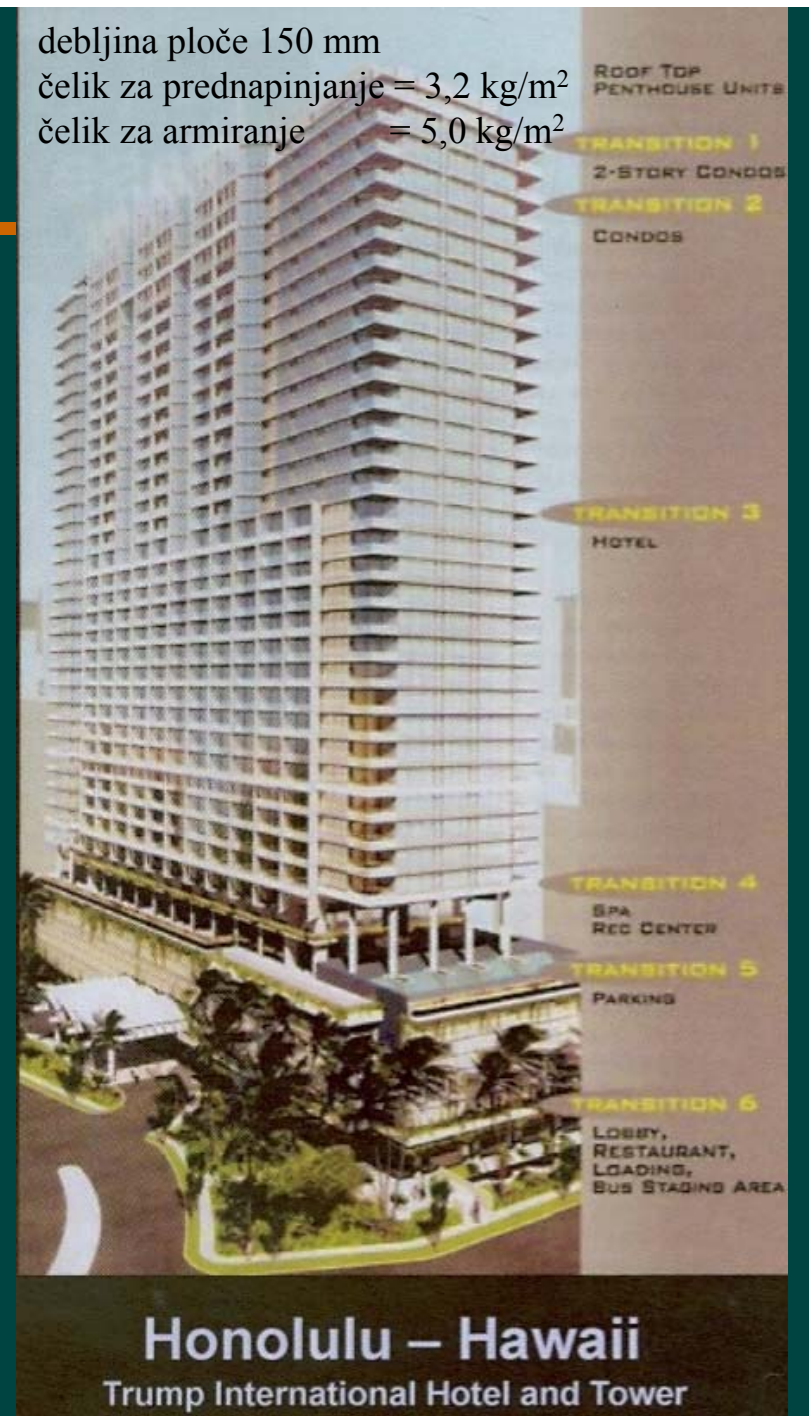


VISOKOGRADNJA

debljina ploče 150 mm
čelik za prednapinjanje = $3,2 \text{ kg/m}^2$
čelik za armiranje = $5,0 \text{ kg/m}^2$



University of California Medical Center, Irvine



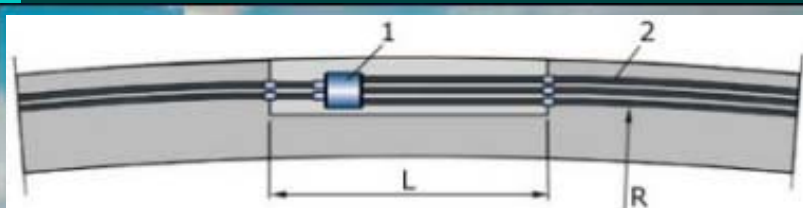
TEMELJENJE I HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE



Naknadno prednapeta ploča spremna za betonir.

- tipična debljina ploče 10 – 15 cm
- razmak greda: 5 m
- natege su na razmaku: 120 – 150 cm

Na slici je vidljiva i brana od vlage ispod pijeska.



PREDNAPETI BETON



**– Sljedeće predavanje –
SILA PREDNAPINJANJA, TRENUTNI I
VREMENSKI GUBITCI**