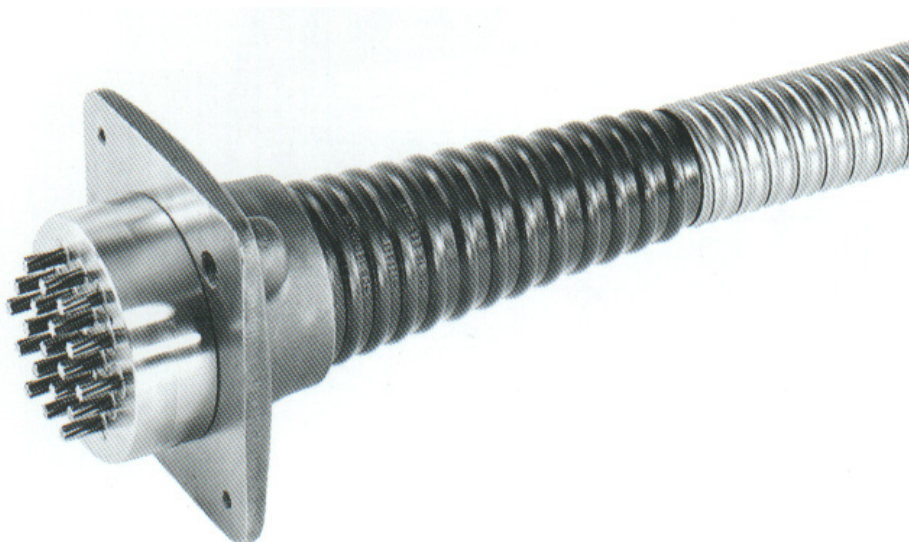

**GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**

Dražen Aničić

PREDNAPETI BETON

(skripta)

(Drugo izdanje - srpanj 2003)



Osijek, 2003.

Nakladnik: Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Crkvena 21, Osijek

Za nakladnika: prof. dr. sc. Vladimir Sigmund, dipl. inž. građ., dekan

Recenzent: doc. dr. sc. Dragan Morić, dipl. inž. građ.

Crteži: Ivanka Netinger, dipl. inž. građ.

Odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku od 12. studenog 2002. godine ovaj se tekst objavljuje kao interno izdanje.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	6
1 OPĆI PODACI O PREDNAPETOM BETONU	7
1.1 Prednapeti beton - građevni materijal 20. stoljeća	
1.2 Kratki povijesni prikaz	
1.3 Načelo prednapinjanja	
1.4 Prethodno i naknadno napete betonske konstrukcije	
1.5 Tehničko zakonodavstvo o prednapetim betonskim konstrukcijama	
1.6 Usklađeni nazivi u području građevnog konstrukterstva	
2 OSNOVE PRORAČUNA	10
2.1 Temeljni zahtjevi koji se postavljaju na građevne konstrukcije	
2.2 Granična stanja	
2.3 Proračunske situacije	
2.4 Djelovanja	
2.5 Građiva	
2.6 Granično stanje nosivosti	
2.7 Granično stanje uporabljivosti	
2.8 Određivanje konačne vrijednosti sile prednapinjanja	
3 SVOJSTVA GRADIVA	12
3.1 Beton	
3.2 Betonski čelik	
3.3 Čelik za prednapinjanje	
3.4 Dodatni elementi u prednapetom betonu	
3.4.1 Sidra, spojke i sedla	
3.4.2 Cijevi za natege	
3.4.3 Cementni mort	
4 PRORAČUN NOSIVOSTI PRESJEKA	20
4.1 Proračunski radni dijagram betona	
4.2 Proračunski radni dijagram betonskog čelika	
4.3 Proračunski radni dijagram čelika za prednapinjanje	
4.4 Dijagram opuštanja čelika za prednapinjanje	
4.5 Zadovoljenje općih uvjeta za prednapeti beton	
4.5.1 Najniži razred betona	
4.5.2 Najmanji broj natega	
4.5.3 Mjerodavne sile prednapinjanja	
4.5.4 Gubici sile prednapinjanja	
4.5.5 Proračun područja sidrenja natega	
4.6 Proračun nosivosti za djelovanje momenta savijanja	
4.7 Proračun nosivosti za djelovanje poprečne sile	
5 PRORAČUN GRANIČNIH STANJA UPORABLJIVOSTI	31
5.1 Ograničenje veličine naprezanja	
5.2 Proračun potrebnih izmjera presjeka uporabom dopuštenih naprezanja	
5.3 Proračun položaja sile prednapinjanja uz zadovoljenje četiri uvjeta za dopuštena naprezanja (Magnetolovi pravci)	
5.4 Proračun širine i razmaka pukotina	
5.5 Proračun progiba	
5.5.1 Opći izrazi za neraspucali presjek	
5.5.2 Detaljni prikaz proračun progiba za raspucali presjek	

6	STABILNOST PREDNAPETIH ELEMENATA	41
6.1	Izvijanje	
6.2	Izbočivanje	
7	IZVEDBA NATEGA, NAPINJANJA I INJEKTIRANJA	44
7.1	Pravila ugradbe	
7.2	Područja sidrenja natega pri naknadnom napinjanju	
7.3	Prijevoz i skladištenje natega	
7.4	Izrada natega	
7.5	Ugradba natega	
7.6	Napinjanje natega	
7.7	Mjerenje naprezanja u žici za prednapinjanje	
7.8	Injektiranje natega	
7.9	Upute za gradilište	
8	SUSTAVI SIDRENJA NATEGA	48
8.1	Sidrenje s pomoću navoja	
8.2	Sidrenje s pomoću klina	
8.3	Sidrenje s pomoću hladno oblikovanih krajeva žica	
8.4	Sidrenje s pomoću omče	
8.5	Sidrenje injektiranjem	
8.6	Sidrenje kraja koji se ne napinje	
8.7	Sidrenje pri prethodnom napinjanju	
9	PREDNAPETE KONSTRUKCIJE	51
9.1	Kontinuirani nosači	
9.2	Rešetkasti nosači	
9.3	Cijevi	
9.4	Okrugli spremnici	
9.5	Ljuske od prednapetog betona	
9.6	Nosači velikih raspona	
9.7	Željeznički pragovi	
10	IZVANA PREDNAPETE KONSTRUKCIJE	55
10.1	Primjena	
10.2	Tehnika zamjene natega	
10.3	Konstruktivske pojedinosti	
10.4	Europska norma ENV 1992-1-5:1994 za konstrukcije sa slobodnim i vanjskim nategama	
10.5	Posebne odredbe za cijevi vanjskih natega	
10.6	Posebne odredbe za skretnike	
10.7	Gubici sile prednapinjanja	
10.8	Posebne odredbe za granična stanja uporabljivosti	
11	DJELOMIČNO PREDNAPETE KONSTRUKCIJE	58
12	POSEBNE PRIMJENE PREDNAPINJANJA	59
12.1	Posebne primjene vanjskih natega	
12.2	Posebne primjene prednapinjanja	
13	ZAMOR PREDNAPETIH KONSTRUKCIJA	63

14	PONAŠANJE PREDNAPETOG BETONA U POŽARU	64
14.1	Nosivi elementi pri djelovanju požara	
14.2	Beton	
14.3	Čelik	
15	KOROZIJSKO RASPUCAVANJE UZ NAPREZANJE	67
16	LITERATURA	69
PRILOG 1	Izvadak iz europske norme ENV 1991-1 Osnove proračuna i djelovanja na konstrukcije, 1. dio: Osnove proračuna	70

PREDGOVOR

Ova su skripta pripremljena za studente osmog semestra Građevinskog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku koji slušaju predmet *Prednapeti beton* nakon predmeta *Betonske konstrukcije*. Sadržaj obuhvaćen ovim skriptama u cijelosti odgovara nastavnom programu i obuhvaća materiju europskih norma serije ENV 1992 za proračun konstrukcija od armiranog i prednapetog betona kao i poglavlja u kojima su prikazane osobitosti prednapetoga u odnosu na armirani beton.

U uvodnome dijelu, nakon temeljnih obavijesti o prednapetomu betonu i kratkog povijesnog prikaza, dan je sažetak odredaba koje se odnose na proračun svih vrsta konstrukcija. Zatim su izložena svojstva sastavnih materijala i dodatnih elemenata svojstvenih samo prednapetomu betonu. Slijede postupci proračuna nosivosti prednapetih presjeka pri djelovanju momenta savijanja i poprečne sile te proračun graničnih stanja upotrebljivosti. Izvijanje i izbočivanje prednapetih nosača obuhvaćeni su bez navođenja teorijskih osnova.

Izloženi su i postupci izvedbe natega, napinjanja i injektiranja te navedeni najpoznatiji sustavi njihova sidrenja. Na razini temeljnih obavijesti obrađene su različite vrste prednapetih konstrukcija i dani podaci o izvana prednapetim i djelomično prednapetim konstrukcijama. Prikazano je više posebnih primjena prednapinjanja u različitim građevnim konstrukcijama i u geotehnici. Ponašanje prednapetog betona pri požaru i pojava korozijskog raspucavanja uz naprezanje sadržaj su dva posljednja poglavlja.

U prilogu dan je izvadak iz europske norme ENV 1991-1 *Osnove proračuna i djelovanja na konstrukcije*.

Tekst ovih skripata izrađen je tako da često umjesto cjelovitih rečenica i objašnjenja sadrži samo natuknice koje će studenta podsjetiti na najvažnije dijelove izlaganja materije na predavanjima. Takav način ujedno će ga primorati da podrobnija objašnjenja potraži u literaturi.

Autor posebno zahvaljuje Ivanki Netinger, dipl. inž. građ. koja je sudjelovala u pripremi skripata izrađivši crteže.

U ovom drugom izdanju ispravljene su pogreške uočene u prethodnom izdanju. Dodana su i nova objašnjenja potrebna za bolje razumijevanje gradiva. Ispušteni su numerički primjeri iz prvog izdanja.

Osijek, srpanj 2003.

Dražen Aničić

1 OPĆI PODACI O PREDNAPETOMU BETONU

1.1 Prednapeti beton – građevni materijal 20. stoljeća

Prednapeti beton - inovativni način primjene armiranoga betona

Primjena:

Zgradarstvo - stropne konstrukcije

Industrijska gradnja – hale (sekundarni nosači, glavni nosači), spremnici tekućina, cjevovodi, ljuske

Mostovi

Silos

Stadioni; dvorane velikih raspona: 61 m u Zagrebu

Željeznički pragovi

Obnova i pojačanje građevina

Primjena u geotehničkim konstrukcijama

Prednosti i mane prednapetog betona:

povećana nosivost zbog manjeg udjela vlastite težine i veće kakvoće gradiva

manji udio vlastite težine – vitkiji nosači

uštede na količini betona i čelika, ali ne i na cijeni

veća krutost zbog neraspucalosti presjeka - manje deformiranje

pukotine koje se zatvaraju – povećana trajnost

mogućnost izrade montažnih nosača velikih raspona

1.2 Kratki povijesni prikaz

0000. načelo izrade bačve i armiranobetonskog spremnika

1886. patent Jacksona, SAD, prednapete zatege

1928. Freyssinet – prethodno prednapinjanje čelikom visoke čvrstoće; puzanje betona

1930. Vianini – centrifugiranje cijevi omotane prednapetom žicom

1937. prvi cestovni mostovi od prednapetog betona

1940. prednapeti željeznički pragovi

1943. prva knjiga o prednapetom betonu (Mörsch)

1944. prvi željeznički most (Magnet, Bruxelles)

1944. prednapeti rešetkasti nosači (Rüsch, München)

1946. Mirko Roš (1879-1962), EMPA, Zürich – laboratorijska ispitivanja

1950. Pariz, prvi međunarodni kongres za prednapeti beton

1952. prve primjene prednapetog betona u SAD

Prednapeti beton u Jugoslaviji i Hrvatskoj

Sustav IMS

Jugobeton, Zagreb, 1960.

Jugomont

Hidroelektra, Industrogradnja, Viadukt

1.3 Načelo prednapinjanja

Armirani beton - temeljne pretpostavke za djelovanja i proračun: tlak, savijanje, savijanje s uzdužnom silom
pukotine - krutost - korozija - nosivost - uporabivost

Prednapeti beton - tlačna sila u razini neutralne osi
- tlačna sila na donjem rubu jezgre
- tlačna sila izvan jezgre

Sila prednapinjanja je vanjska tlačna sila koja djeluje na beton

Krivolinijski tok sile prednapinjanja – skretne sile

Prednapinjanje vanjskim nategama

Elastična i plastična svojstva gradiva – betona i čelika

Visokovrijedni čelik – veće izduženje u odnosu na obične čelike. σ - ϵ dijagram za:

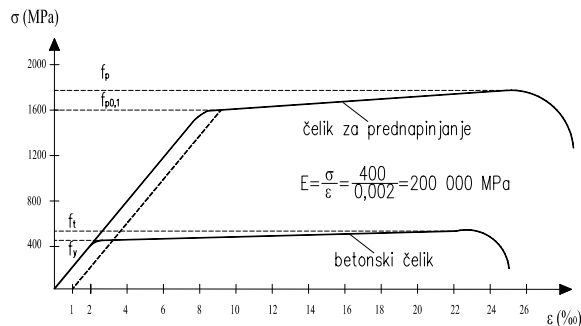
RA 400/500 MPa: $\epsilon=0,2\%$ Y... 1600-2000 MPa: $\epsilon=0,8-1,0\%$ na granici popuštanja

Natega kao opruga

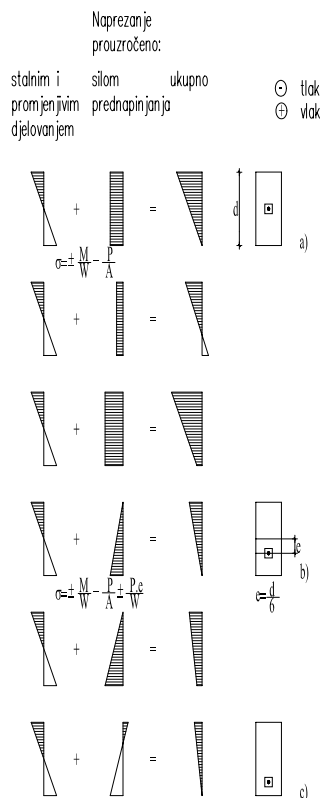
Gubici prednapinjanja - podjela:

trenutačni (kratkotrajni) (elastična deformacija betona, prokliznuće klina, trenje, neravnine natega)

dugotrajni (puzanje i skupljanje betona, opuštanje čelika)



Slika 1.1 - Dijagram naprezanje-deformacija betonskog čelika i čelika za prednapinjanje



Slika 1.2 - Dijagrami naprezanja prednapetog pravokutnog presjeka:
a) s nategom u osi, b) s nategom na rubu jezgre, c) s nategom izvan jezgre

1.4 Prethodno i naknadno napete betonske konstrukcije

Postupci prethodnog i naknadnog prednapinjanja
Napinjanje u koracima (fazama)

1.5 Tehničko zakonodavstvo o prednapetim betonskim konstrukcijama

YU Pravilnik 1971 - zastario
Sustav europskih norma (EN) ukupno 58 norma u 9 skupina - EN 1991 do EN 1999
ENV 1992-1-1:1992 = EC2
Objašnjenje ENV i EN

1.6 Usklađeni nazivi u području građevnog konstrukterstva

Prema normi HRN ISO 8930:2002

Tablica 1.1 - Dopušteni i pogrešni nazivi

Dopušteni naziv	Pogrešan naziv	Engleski / njemački
ploština (m ²)	površina	area, Fläche
površina (izgled, boja)	--	surface, Oberfläche
naprezanje	napon	stress, Spannung, Beanspruchung
prednapinjanje	prednaprezanje	prestressing, Vorspannung
prednapeti beton	prednapregnuti beton	prestressed concrete
posmik, smik	smicanje	shear
moment tromosti	moment inercije	moment of inertia (gravity)
proračun	izračun, račun	design, analysis, calculation
proračunski raspon	efektivni raspon	effective span
natega	kabel, kabeli, kablovi	cable, Spannglied
granica popuštanja	granica tečenja, istezanja	yield point, yield strength
čvrstoća	granična čvrstoća	ultimate strength
granično stanje nosivosti	krajnje granično stanje	ultimate limit state
granično stanje uporabivosti (upotrebljivosti)	--	serviceability limit state
deformacija (mm/mm), ϵ	relativna deformacija	strain, Dehnung
deformiranje, deformiranost (mm)	deformacija	deformation, Verformung
parcijalni koeficijent sigurnosti	parcijalni čimbenik sigurnosti	partial safety factor
parcijalni faktor sigurnosti	--	partial safety factor
stremen, poprečna armatura	vilica	stirrup
promjenljivo, uporabno opterećenje	korisno opterećenje	
decimalni zarez 6,57	decimalna točka 6.57	--

2 OSNOVE PRORAČUNA

2.1 Temeljni zahtjevi koji se postavljaju na građevne konstrukcije

- nosivost – s primjerenom pouzdanošću preuzimaju se djelovanja pri izvedbi i tijekom uporabnog vijeka
- uporabljivost – s prihvatljivom vjerojatnošću zadržava se zahtijevana uporabna svojstva
- trajnost
- šteta nesrazmjerna uzroku za izvanredna djelovanja – progresivni slom

Kako ih postići?

- odabirom prikladnog gradiva
- odgovarajućim proračunom
- svrsishodnim oblikovanjem
- kontrolom projekta, izvedbe i uporabe

2.2 Granična stanja

- granična stanja nosivosti: ravnoteža, stabilnost, slom, slijeganje tla
- granična stanja uporabljivosti: progibi, vibracije, pukotine

2.3 Proračunske situacije

- stalne (P-permanent)
- prolazne (T-transient) pri gradnji ili popravku
- izvanredne (A-accidental) – eksplozija, požar, potres

2.4 Djelovanja

- stalna prednapinjanje je stalno djelovanje ali se posebno razmatra
- promjenljiva: uporabno opterećenje - snijeg, vjetar
- izvanredna: eksplozija, udar, potres

Vjerojatnost otkazivanja nosivosti

Smisao nejednadžbe $S_d \leq R_d$

Statistička raspodjela čvrstoća gradiva i otpornosti

Karakteristične vrijednosti djelovanja X_k - 5 %-tna fraktila

Proračunske vrijednosti djelovanja - $X_d = X_k \cdot \gamma_d$

2.5 Gradiva

Karakteristične vrijednosti svojstva materijala X_k

Proračunske vrijednosti svojstva materijala $X_d = X_k / \gamma_M$

2.6 Granično stanje nosivosti

- stabilnost $E_{d,dst} < E_{d,stab}$
- stalna i prolazna proračunska situacija

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$

- izvanredna proračunska situacija

$$\sum \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_P P + A_d + \sum_{i>1} \gamma_{1,i} Q_{k,i} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

ψ - koeficijent kombinacija

$\gamma_P = 0,9$ do $1,2$

- uzimanje u obzir prednapinjanja: povoljni učinak $\gamma_P = [0,9]$, nepovoljni $\gamma_P = [1,2]$
- parcijalni koeficijent sigurnosti za gradiva

osnovna kombinacija	- beton 1,5	betonski čelik i č. za prednapinjanje 1,15
izvanredna kombinacija	- beton 1,3	betonski čelik i č. za prednapinjanje 1,00

2.7 Granično stanje uporabljivosti

Kombinacija djelovanja

- rijetka $\sum G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ za provjeru naprezanja $\psi_{0,2} = 0,6$ do $1,0$

- česta $\sum G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$ za provjeru širine pukotine $\psi_{1,1} = 0,2$ do $0,9$

- nazovistalna $\sum G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$ za provjeru progiba $\psi_{2,1} = 0$ do $0,8$

Koefcijente ψ vidi u prilogu 1.

2.8 Određivanje konačne vrijednosti sile prednapinjanja

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_c - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_{sl} - \Delta P_t(t)$$

P_0	početna sila
ΔP_c	elastična deformacija elementa pri unošenju sile
$\Delta P_{\mu}(x)$	učinak trenja i neravnosti natege
ΣP_{sl}	učinak prokliznuća klina (samo kod naknadnog napinjanja)
$\Delta P_t(t)$	učinak puzanja, skupljanja i opuštanja

Napomena: znakom [] ili [_] u ENV 1992 i ovdje označene su "okvirne" brojne vrijednosti u toj europskoj prednormi.

3 SVOJSTVA GRADIVA

3.1 Beton

Stari naziv: marka betona (npr. M30)

Razredi betona - karakteristične tlačne čvrstoće prema ENV 1992-1-1

Razred	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50

Vlačna čvrstoća betona

$$f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 f_{ctm}$$

$$f_{ctk;0,95} = 1,3 f_{ctm}$$

gdje je:

f_{ctm} srednja vlačna čvrstoća

f_{ck} karakteristična tlačna čvrstoća valjka

$f_{ctk;0,05}$ donja granična karakteristična vlačna čvrstoća (5%-tna fraktila)

$f_{ctk;0,95}$ gornja granična karakteristična vlačna čvrstoća (95 %-tna fraktila)

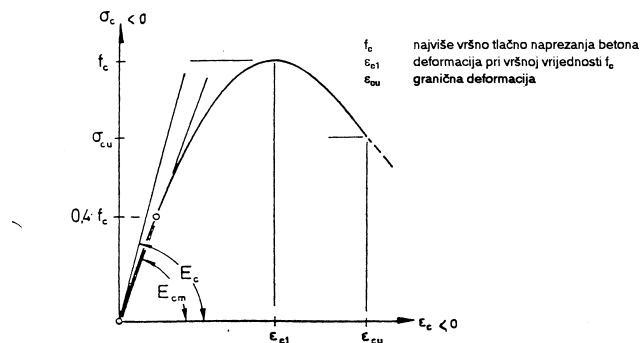
Odgovarajuće srednje i karakteristične vrijednosti za različite razrede čvrstoća betona dane su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 (prema ENV 1992-1-1) Razredi betona, srednje vrijednosti vlačnih čvrstoća f_{ctm} i karakteristične vlačne čvrstoće betona f_{ctk} (u N/mm²) - donja i gornja vrijednost

Razredi betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Vlačna čvrstoća									
f_{ctm}	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk;0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ctk;0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3

Dijagram naprezanje - deformacija

Dijagram naprezanje-deformacija betona kod jednoosnoga tlačnog naprezanja općenito ima shematski izgled prema slici 3.1.



Slika 3.1 - Dijagram naprezanje - deformacija za jednoosni tlak

Modul elastičnosti betona

Tangentni modul

Sekantni modul = proračunski modul

Način ispitivanja modula elastičnosti

Tablica 3.2 - Razredi čvrstoće betona i moduli elastičnosti

Razred	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
E (GPa)	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36	37

$$E_{cm} = 9,5 (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (E_{cm} \text{ u kN/mm}^2; f_{ck} \text{ u N/mm}^2)$$

Poissonov omjer (koeficijent)

Poissonov omjer pri elastičnim je deformacijama jednak 0,2.

Toplinski koeficijent

Kad je toplinska deformacija od malog značenja u proračunu se uzima $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Puzanje i skupljanje

Tumačenje fenomena skupljanja

Tumačenje fenomena puzanja

Numeričke vrijednosti prema ENV 1992-1-1

Tablica 3.3 - Konačne vrijednosti skupljanja $\varepsilon_{cs\infty}$ (u mm/m) za obični beton

Položaj konstrukcijskog elementa	Relativna vlažnost zraka (%)	Srednji polumjer konstrukcijskog elementa $2A_c/u$ (mm)	
		≤ 150	600
Unutra	50	-0,60	-0,50
Vani	80	-0,33	-0,28

gdje je A_c ploština presjeka betona, a u je opseg presjeka.

Tablica 3.4 - Konačne vrijednosti koeficijenta puzanja $\Phi(\infty, t_0)$ za obični beton

Starost pri opterećivanju t_0 (u danima)	Srednji polumjer konstrukcijskog elementa $2A_c/u$ (mm)					
	50	150	500	50	150	600
	UVJETI OKOLIŠA					
	suh (unutra) (RH = 50%)			vlažan (vani) (RH = 80%)		
1	5,5	4,6	3,7	3,6	3,2	2,9
7	3,9	3,1	2,6	2,6	2,3	2,0
28	3,0	2,5	2,0	1,9	1,7	1,5
90	2,4	2,0	1,6	1,5	1,4	1,2
365	1,8	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0

RH - engl. relative humidity

Dijagram $\varepsilon - t$ deformacija pri opterećenju/rasterećenju - vrijeme karakteristična za prikaz puzanja

Povratni dio deformacije

Nepovratni dio deformacije

3.2 Betonski čelik (prEN 10080-1 do 6:1999)

Definicija: betonski čelik je proizvod iz čelika kružnog ili gotovo kružnog presjeka prikladan za armiranje betona.

Nedosljednost označivanja u europskim normama

Tablica 3.5 - Oznake u ENV 1992-1-1 i prEN 10080-1

Naziv	prEN 10080-1:1999	ENV 1992-1-1
Granica popuštanja	R_e	f_y
Naprezanje pri trajnoj deformaciji od 0,2%	$R_{p0.2}$	$f_{p0.2}$
Vlačna čvrstoća	R_m	f_t
Omjer vlačne čvrstoće i granice popuštanja	R_m / R_e	f_t / f_y
Postotak ukupnog izduljenja pri najvećoj sili	A_{gt}	ε_{su}
Nazivni promjer	d	ϕ
Čvrstoća pri zamoru	$2\sigma_A$	$\Delta\sigma_{Rsk}$

Oznake i kratice

- f_R svedena ploština rebra
- f_{Rk} karakteristična svedena ploština rebra
- $f_{0,1k}$ karakteristično naprezanje betonskog čelika pri trajnoj deformaciji od 0,1 %
- f_t vlačna čvrstoća betonskog čelika
- f_{tk} karakteristična vlačna čvrstoća betonskog čelika
- ε_u deformacija betonskog čelika kod najvećeg opterećenja
- ε_{uk} karakteristična deformacija betonskog čelika pri najvećoj sili (jednolična deformacija)

Oblici betonskog čelika

šipke, kolutovi i mreže

Podjela betonskih čelika

Čelici se dijele prema:

- (i) vrsti čelika definiranoj vrijednošću zahtijevane karakteristične granice popuštanja (f_{yk}) u N/mm^2
- (ii) razredu, koji se odnosi na duktilnost
- (iii) izmjerama
- (iv) svojstvima površine - glatki, rebrasti, udubljeni (ili uzubljeni, engl. indented)
- (v) zavarljivosti

Fizikalna svojstva

- gustoća, obujamska masa $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- toplinski koeficijent $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Kemijska svojstva

ekvivalent ugljika $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \leq 0,52 \%$
apsolutna količina ugljika $C \leq 0,24 \%$

Mehanička svojstva

Čvrstoća

Granice popuštanja f_{yk} i vlačna čvrstoća f_{tk} uvijek se definiraju kao karakteristične vrijednosti. Dobivaju se kao kvocijent sile pri dostignuću granice popuštanja odnosno najveće sile i **nazivne ploštine** (engl. nominal area) presjeka.

Za proizvode bez izražene granice popuštanja f_{yk} uzima se vrijednost $f_{0,1k}$.

Duktilnost

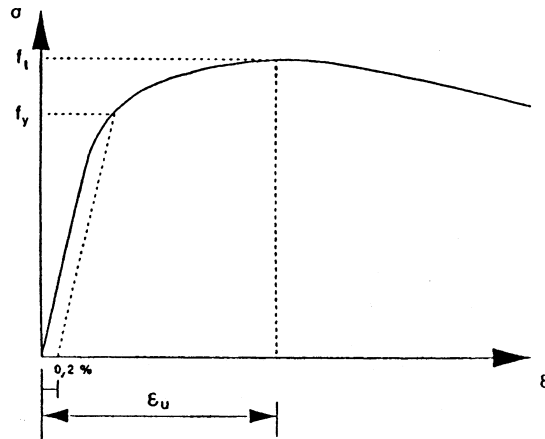
visoka duktilnost

$$\varepsilon_{uk} > |_{-5\%}| ; \quad (f_t / f_y)_k > |_{-1,08}|$$

obična duktilnost

$$\varepsilon_{uk} > |_{-2,5\%}| ; \quad (f_t / f_y)_k > |_{-1,05}|$$

Tu ε_{uk} označava karakterističnu deformaciju pri najvećoj sili (vidi sliku).



Slika 3.2 - Tipični dijagram naprezanje - deformacija za betonski čelik

Modul elastičnosti

Modul elastičnosti betonskog čelika iznosi $E = 200 \text{ kN/mm}^2$

Tablica 3.6 - Osnovna fizikalno-mehanička svojstva betonskih čelika

Oznaka čelika	B500A	B500B	B450C	B500A	B500B	B450C
Razred duktilnosti	A	B	C	A	B	C
Način isporuke	kolutovi	šipke kolutovi	šipke kolutovi	mreže		
Oblici	rebrasti, udubljeni, glatki	rebrasti	rebrasti	rebraste		
d (mm)	4-16	6-40 6-16	6-40 6-16	5-16	6-16	6-16
R_e (N/mm ²)	500	500	450	500	500	450
R_m/R_e	1,05	1,08	$\geq 1,15; \leq 1,35$	1,05	1,08	1,15-1,35
A_{gt} (%)	2,5	5,0	7,5	2,5	5,0	7,5
f_R	0,039 do 0,056					

Nazivi elemenata rebrastog betonskog čelika:

uzdužno rebro
poprečno rebro
visina rebra, h
razmak rebara, c
kut nagiba poprečnog rebra, β
nagib istake poprečnog rebra, α
udubljeni betonski čelik
nazivna ploština presjeka
svedena ploština rebra

Nazivna ploština presjeka je ploština presjeka istovrijedna ploštini kružne glatke šipke nazivnoga promjera

Svedena ploština rebra f_R je ploština projekcije svih rebara na ravninu okomitu na uzdužnu os šipke, podijeljena s duljinom žice i nazivnim opsegom $f_R = \Sigma A_i / (\text{opseg} \times \text{duljina})$

3.3 Čelik za prednapinjanje

Oznake i kratice

f_p	vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje
f_{pk}	karakteristična vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje
$f_{p0,1}$	naprezanje čelika za prednapinjanje pri zaostaloj deformaciji 0,1 % (skraćeno: granica popuštanja 0,1 %)
$f_{p0,1k}$	karakteristično naprezanje čelika za prednapinjanje pri zaostaloj deformaciji 0,1% (skraćeno: karakteristična granica popuštanja 0,1 %)
ε_u	deformacija čelika za prednapinjanje kod najveće sile
ε_{uk}	karakteristična deformacija čelika za prednapinjanje kod najveće sile

Oblici proizvoda od kojih se izrađuju natege

Žice, šipke i užad

Podjela na razrede i geometrija

Proizvodi se dijele prema:

- vrsti, s navođenjem karakter. granice popuštanja 0,1% ($f_{p0,1k}$) i karakteristične vlačne čvrstoće (f_k) u N/mm^2
- razredu, s navođenjem relaksacijskoga ponašanja
- izmjerama
- obilježjima površine

Žice i šipke ne smiju se zavarivati.

Fizikalna svojstva

- gustoća (obujamska masa) $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- toplinski koeficijent $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Mehanička svojstva

Čvrstoća

Granica popuštanja 0,1%, $f_{p0,1k}$ i vlačna čvrstoća f_{pk} uvijek se definiraju kao karakteristične vrijednosti. One se dobivaju kao kvocijent sile koja odgovara 0,1%-tnoj trajnoj deformaciji odnosno najveće sile u vlačnom pokusu i nazivne ploštine presjeka.

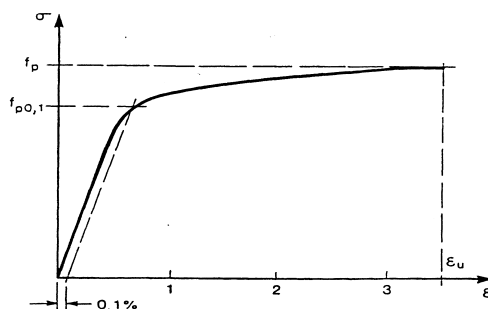
Naglasiti razliku u definiranju granice popuštanja kod betonskog čelika (0,2%) i čelika za prednapinjanje (0,1%).

Dijagram naprezanje - deformacija

Proizvođač mora za proizvode, uz dokument o isporuci, priložiti dijagrame naprezanje-deformacija s datumima proizvodnje.

Duktilnost

Proizvodi moraju biti primjereno duktilni, kako je to utvrđeno normama serije EN 10138.



Slika 3.3 - Tipični dijagram naprezanje-deformacija čelika za prednapinjanje

Modul elastičnosti

Za žice i šipke $E=200 \text{ kN/mm}^2$. Ovisno o postupku proizvodnje, stvarna vrijednost može biti između 195 i 205 kN/mm^2 .

Za užad $E=190 \text{ kN/mm}^2$. Stvarna vrijednost, ovisno o postupku izradbe, može biti između 175 i 195 kN/mm^2 .

3.4 Dodatni elementi u prednapetom betonu

3.4.1 Sidra, spojke i sedla

Što su sidra

Što su spojke

Što su sedla

Prijenos sila od natege na beton i od natege na nategu

Svojstva, postupci ispitivanja i postupci potvrđivanja sukladnosti utvrđeni su normama ili europskim tehničkim dopuštenjima (ETA - European Technical Approval).

3.4.2 Cijevi za natege

Oblik cijevi mora omogućiti besprijekoran prijenos sila s natega na beton.

Svojstva, postupci ispitivanja i postupci potvrđivanja sukladnosti utvrđeni su normama ili europskim tehničkim dopuštenjima.

EN 523 Čelične cijevi za natege – Nazivi, zahtjevi, kontrola kvalitete

EN 524-1 do –6 Čelične cijevi za natege – Metode ispitivanja

Opći zahtjevi

Cijevi moraju imati dovoljnu čvrstoću da preuzmu različita mehanička opterećenja.

Cijevi moraju imati naborani (engl. corrugated) profil zbog osiguranja dovoljne prionljivosti s betonom izvana i injekcijskim mortom iznutra.

Cijevi ne smiju biti korodirane.

Cijevi moraju biti nepropusne. Spojevi moraju brtviti.

Promjer ne smije odstupati više od $\pm 1\%$ ili $\pm 0,5 \text{ mm}$.

Raspon promjera: 25 – 100 mm

Debljina lima 0,2 – 0,6 mm

Označivanje cijevi

Omjer punjenja cijevi nategama ne smije prijeći $A_{\text{natega}} / A_{\text{cijevi}} = 0,50$

Ispitivanje na savijanje

Duljina uzorka 1000 mm, Ispit. koncentriranom silom u $L/2$.

$F_{pl}/d = 3 - 6 \text{ N/mm}$ ovisno o promjeru cijevi

Trajna deformacija 5-10 % označuje granicu popuštanja F_{pl}

Ispitivanje na dvosmjerno previjanje

Cijev se previja oko dva oblika s polumjerom $r=75-180$ cm. Nakon previjanja kroz cijev se propusti uteg nešto manjeg promjera od cijevi i utvrdi je li prolazi kroz nju.

Bočna otpornost

Ispituje se na cijevi položenoj na tvrdi podlogu, a opterećuje se koncentriranom silom na cijev. Cijev mora izdržati $F_1=500 - 1000$ N ovisno o promjeru, a trajno umanjeње unutarnjeg promjera ne smije prijeći 10% ili 5 mm.

Vlačna čvrstoća

Ispituje se vlačna čvrstoća dva komada cijevi spojena spojkom. Spoj mora izdržati $F_2 = 250 - 2200$ N ovisno o promjeru cijevi.

Brtvljenje

Ispituje se nakon prethodno provedenih ispitivanja. Cijev duljine 1100 mm napuni se vodom koju se stlači na 0,5 bara. Tlak se drži 5 minuta. Gubitak vode ne smije prijeći 1,5% obujma.

3.4.3 Cementni mort

Cementni mort mora imati odgovarajuća svojstva, npr:

- veliku sposobnost tečenja (fluidnost) i koheziju u plastičnom stanju
- malu deformaciju skupljanja kod stvrdnjavanja
- čvrstoću i otpornost na smrzavanje u stvrdnutom stanju
- ne smije gubiti fine sastojke - segregacija se mora spriječiti.

Postupak miješanja mora jamčiti zahtijevana svojstva.

Više o mortovima za injektiranje vidi u normama:

HRN EN 445:2000 Mort za injektiranje natega – Metode ispitivanja

HRN EN 446:2000 Mort za injektiranje natega - Postupci injektiranja

HRN EN 447:2000 Mort za injektiranje natega – Svojstva uobičajenih mortova za injektiranje

Tablica 3.7 - Proizvodni asortiman i označivanje čelika za prednapinjanje prema normama serije EN 10138

Norma	Naziv	Ime	Broj	Promjer d (mm)	Vlačna čvrstoća R _m (MPa)	Karakt. vrijednost najveće sile F _m
prEN 10138-2:2000	žica	Y1860C	1.1353	3 4 5	1860	13,3 23,4 36,5
prEN 10138-2:2000	žica	Y1770C	1.1352	3,2 5,0 6,0	1770	14,2 34,8 50,0
prEN 10138-2:2000	žica	Y1670C	1.1351	6,9 7,0 7,5	1670	62,4 64,3 73,8
prEN 10138-2:2000	žica	Y1570C	1.1350	9,4 9,5 10,0	1570	109 111 123
prEN 10138-3:2000	uže	Y1960S3	1.1361	5,2	1960	26,7
prEN 10138-3:2000	uže	Y1860S3	1.1360	6,5 6,8 7,5	1860	39,2 43,5 54,0
prEN 10138-3:2000	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
prEN 10138-3:2000	uže	Y1770S7	1.1365	15,2 16,0 18,0	1770	248 265 354
prEN 10138-3:2000	uže	Y1860S7G	1.1372	12,7	1860	209
prEN 10138-3:2000	uže	Y1820S7G	1.1371	15,2	1820	300
prEN 10138-3:2000	uže	Y1700S7G	1.1370	18,0	1700	380
prEN 10138-4:2000	šipka	Y1100H	1.1381	15 20	1100	194 346
prEN 10138-4:2000	šipka	Y1030H	1.1380	25,5 26 26,5 27 32 36 40 50	1030	526 547 568 590 828 1048 1294 2022
prEN 10138-4:2000	šipka	Y1230H	1.1382	26 26,5 32 36 40	1230	653 678 989 1252 1546

Označivanje čelika za prednapinjanje

žica

EN 10138-2 Y1770C-5,0-I 1770 – nazivna vlačna čvrstoća; C – cold drawn wire; 5,0 – nazivni promjer; I – indented

uže

EN 10138-3 Y1860S7-16,0-A 1860 – nazivna vlačna čvrstoća; S – strand (uže); 7 – broj žica; 16,0 – nazivni promjer;
A- razred duktilnosti

šipka

EN 10138-4 Y1030H-26-R 1030 - nazivna vlačna čvrstoća; 26 – nazivni promjer; H- hot rolled bar; R - ribbed

4 PRORAČUN NOSIVOSTI PRESJEKA

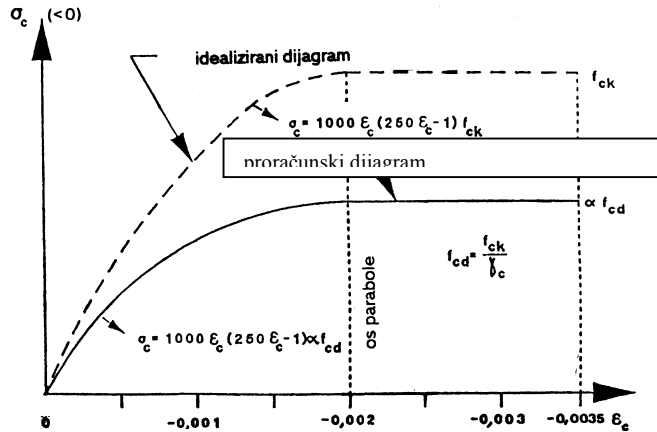
4.1 Proračunski radni dijagram betona

idealizirani f_{ck}
proračunski $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$

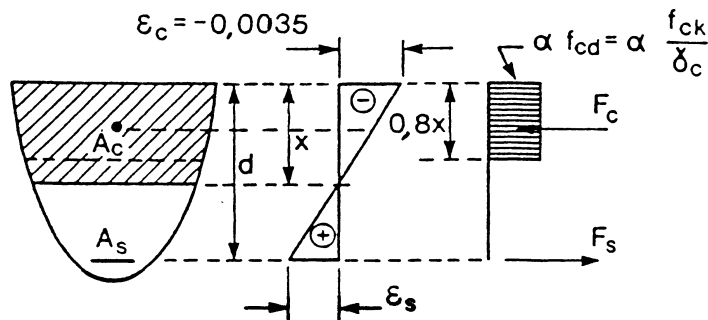
Pravi: parabola do $\varepsilon = 2/1000$, pravac od $\varepsilon = 2$ do $3,5/1000$

Idealizirani: zamjena bilinearnim dijagramom uz $\alpha \cdot f_{cd} = \alpha f_{ck} / \gamma_c$ $\alpha = 0,85$ uzima u obzir puzanje

Linearna raspodjela napreznja po visini presjeka: gore ε_c , dolje ε_s , tlačna sila F_c , vlačna sila F_s , tlačno područje $0,80x$



Slika 4.1 - Proračunski radni dijagram betona



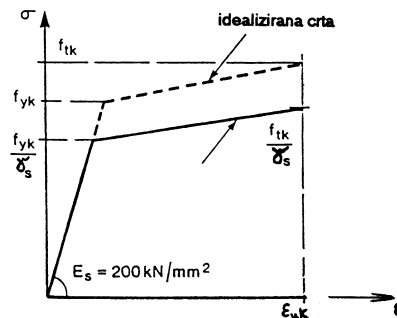
Slika 4.2 - Deformacije i napreznja betonskog presjeka

4.2 Proračunski radni dijagram betonskog čelika

Idealizirani bilinearni dijagram f_{tk} , f_{yk} . Nagib pravca nakon granice popuštanja je vrlo mali: 0,01

Proračunski bilinearni dijagram je niži za f_{yk} / γ_s

$E = 200$ GPa; ε_{uk} nije ograničeno; puna linija u sl. 4.3: proračunski radni dijagram



Slika 4.3 - Radni dijagram betonskog čelika

4.3 Proračunski radni dijagram čelika za prednapinjanje

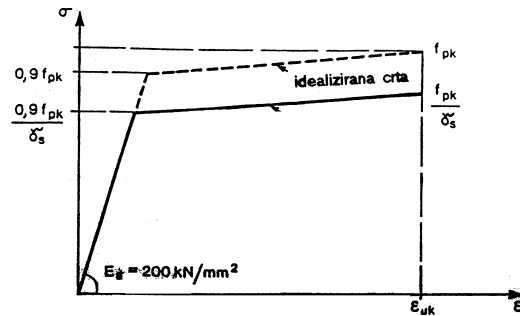
Vrijedi od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dimenzioniranje se osniva na $f_{p0,1k}$

Idealizirani bilinearni dijagram: granica popuštanja je na $0,9 f_{pk}$; čvrstoća na f_{pk}

Proračunski bilinearni dijagram: granica popuštanja na $0,9 f_{pk} / \gamma_s$; proračunska čvrstoća a f_{pk} / γ_s

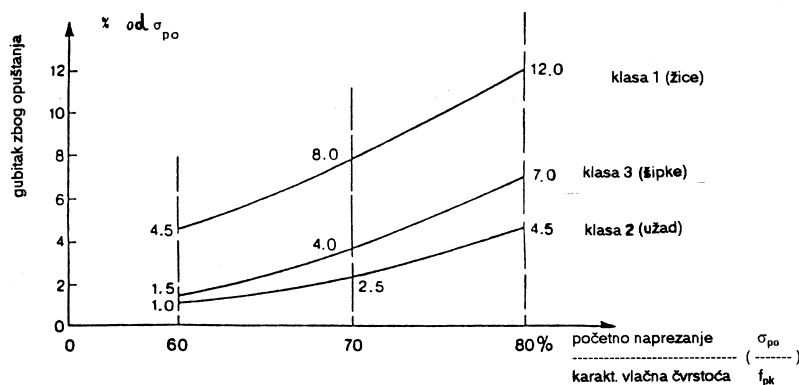
Puna linija u sl. 4.4: proračunski radni dijagram



Slika 4.4 - Radni dijagram čelika za prednapinjanje

$E=200\text{ GPa}$; ϵ_{uk} nije ograničeno

4.4 Dijagram opuštanja čelika za prednapinjanje



Slika 4.5 - Dijagram opuštanja čelika za prednapinjanje

Ordinarna os daje gubitak zbog opuštanja u % za 1000 sati

Apscisna os daje omjer σ_{po} / f_{pk} za omjere 60 – 70 – 80 %

Početno opuštanje : 1 sat 15%, 100 sati 55%, 1000 sati 100%.

Konačno: 3 x (1000-satno)

U proračunu gubitaka sile prednapinjanja uzima se konačna vrijednost opuštanja.

4.5 Zadovoljenje općih uvjeta za prednapeti beton

4.5.1 Najniži razred betona

C25/30 za naknadno napinjanje

C30/37 za prethodno napinjanje

4.5.2 Najmanji broj natega

pojedine šipke ili žice	3
šipke ili žice skupljanje u nategu ili uže	7
natega osim užadi	3

4.5.3 Mjerodavne sile prednapinjanja

Provjera s obzirom na čelik

Najveća sila u natezi na kraju natega $P_0 \leq A_P \cdot \sigma_{0\max}$ za $t=0$

$$\sigma_{0,\max} = \sigma_{p0} = -0,80 f_{pk} \quad \text{ili}$$

$$\sigma_{0,\max} = \sigma_{p0} = -0,90 f_{p0,1k} \quad \text{mjerodavna je manja vrijednost}$$

Provjera s obzirom na beton

Najveća sila neposredno nakon prednapinjanja (odnosno neposredno nakon proklizavanja na klinu) koja se **predaje na beton** za $t=0$

$$P_{m,0} = A_P \sigma_{pm,0} = 0,75 f_{pk} A_P \quad \text{ili}$$

$$P_{m,0} = 0,85 f_{p0,1k} A_P \quad \text{mjerodavna je manja vrijednost}$$

4.5.4 Gubici sile prednapinjanja

Konačna sila u vrijeme t jednaka je početnoj sili P_0 umanjenoj za gubitke

a) prethodno napeti elementi

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_c - \Delta P_\mu(x) - \Delta P_t(t)$$

b) naknadno napeti elementi

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_c - \Delta P_\mu(x) - \Delta P_{sl} - \Delta P_t(t)$$

ΔP_c gubitak zbog elastičnog skraćanja betona

ΔP_c – proračunava se s pomoću modula elastičnosti čelika i betona te polovicom naprezanja betona u razini natega, jer je prosječna deformacija jednaka polovici najveće deformacije, ako pretpostavljena raspodjela ima oblik obrnutog trokuta.

Proračun ΔP_c (**vrijedi za prethodno napinjanje**). Kod naknadnog napinjanja elastično skraćanje nastupa tijekom napinjanja i nadoknađuje se odmah korekcijom sile na preši. **Ako ima više natega koje se postupno napinju taj zaključak ne vrijedi.**

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c$$

$$\Delta \sigma_s / E_s = \sigma_c / E_c$$

$$\Delta \sigma_s = \sigma_c E_s / E_c$$

$$\Delta P_c = \Delta \sigma_s \cdot A_s = \sigma_c A_s E_s / E_c$$

Kako je položaj sile prednapinjanja najčešće ekscentričan u odnosu na težište presjeka, tako da je raspodjela naprezanja od sile prednapinjanja trokut, prosječno je naprezanje betona $\sigma'_c = 0,5\sigma_c$ a gubitak sile prednapinjanja je tada

$$\Delta P'_c = 0,50 \Delta P_c$$

$\Delta P_\mu(x)$ gubitak zbog trenja

$$\Delta P_\mu(x) = P_o (1 - e^{-\mu (\Theta + kx)})$$

gdje je:

- μ koeficijent trenja između natege i cijevi
- Θ zbroj kutova skretanja natege na duljini x (neovisno o smjeru i predznaku)
- k neželjeni kut skretanja (na jedinicu duljine), ovisan o vrsti natege

Koeficijent μ ovisi o značajkama površine natege i cijevi, o mogućoj prisutnosti hrđe, o promjenama duljine natege i obliku presjeka natege. Ako nema točnijih podataka rabe se ove vrijednosti za μ :

hladno vučena žice	$\mu=0,17$
užad	$\mu=0,19$
rebraste šipke	$\mu=0,65$
okrugle glatke šipke	$\mu=0,33$

Vrijednosti "k" trebaju biti dane u potvrđama sukladnosti, a nalaze se općenito u području $0,005 < k < 0,01$ po dužnom metru. Vrijednost "k" ovisi o preciznosti rada, razmaku između podupirača natege, vrsti cijevi i stupnju zbijanja pri ugradnji betona. Vrijednost "k" prikazuje neželjenu neravnost natege (engl. wobble=kolebanje, klimanje).

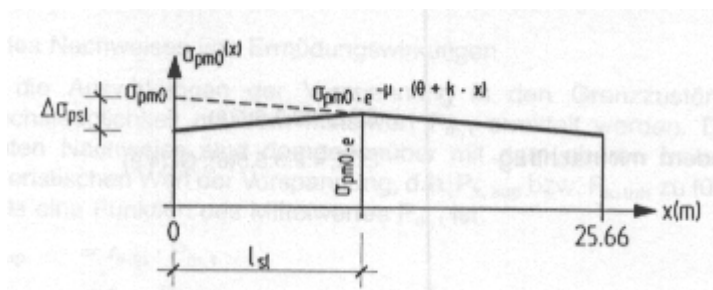
ΔP_{sl} gubitak zbog proklizavanja klina (sl = engl. slip)

Proklizavanje klina određuje se za svaki sustav prednapinjanja prema iskustvu. Iznosi obično 3-6 mm. Tada je gubitak sile:

$$\Delta P_{sl} = A_p \Delta \sigma_{psl} = 2 A_p E_p \Delta_{sl} / \ell_{sl}$$

gdje je:

- A_p ploština presjeka natege
- E_p modul elastičnosti čelika natege
- Δ_{sl} veličina proklizavanja na klinu u mm
- ℓ_{sl} duljina uvlačenja (proklizavanja, skraćivanja) natege u mm
- $\varepsilon = \Delta_{sl} / \ell_{sl}$ prosječna deformacija na duljini proklizavanja
- $\Delta \sigma_{psl}$ gubitak naprezanja u nategi na njezinu kraju



Slika 4.6 - Proklizavanje klina pri napinjanju natege

Duljina proklizavanja ℓ_{sl} proračunava se uz pretpostavku da je na kraju te duljine naprezanje u nategi upravo jednako najvećem dopustivom za trenutak prednapinjanja tj. $t=0$: $\sigma_{mP0} = 0,8 f_{pk}$ ili $0,9 f_{p0,1k}$ umanjenom za gubitak prouzročen trenjem. To naprezanja iznosi:

$$\sigma_{pm0,e} = \sigma_{pm0} \cdot e^{-\mu (\Theta + k \ell_{sl})}$$

Duljina proklizavanje dobiva se po formuli:

$$\ell_{sl}^2 = \frac{\Delta \ell_{sl} E_p}{\sigma_{pm0} \mu [(8f / \ell_{tot}^2) + k]}$$

gdje je:

- f strelica parabolično povinute natege
- ℓ_{tot} ukupna duljina nosača
- μ koeficijent trenja
- k neželjni kut skretanja natege (neravnost)

Dvije gornje jednadžbe treba riješiti iteracijom, variranjem vrijednosti za ℓ_{sl} sve dok obje ne budu zadovoljene

Uz poznatu duljinu proklizavanja ℓ_{sl} natege iznosi **prosječna deformacija** zbog tog učinka

$$\varepsilon_{sl} = \Delta_{sl} / \ell_{sl}$$

a prosječni gubitak prednapinjanja na duljini proklizavanja

$$\Delta \sigma_{psl, \text{prosj}} = \varepsilon_{sl} E_p$$

Kako raspodjela ove deformacije po duljini natege ima oblik trokuta, gubitak prednapinjanja na kraju nosača je dva puta veći od prosječnoga i iznosi

$$\Delta \sigma_{psl} = 2 \Delta \sigma_{psl, \text{prosj}}$$

Gubitak sile prednapinjanja prouzročen proklizavanjem, ΔP_{sl} , tada iznosi kako je navedno na početku ovog odlomka.

$\Delta P_t(t)$ gubitak ovisan o vremenu (skupljanje, puzanje, opuštanje)

$$\Delta P_t(t) = A_p \cdot \Delta \sigma_{p,c+s+r}$$

indeksi znače:

- P - engl. prestressing - prednapinjanje
- c - engl. creep - puzanje
- s - engl. shrinkage - skupljanje
- r - engl. relaxation - opuštanje

$$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_s(t, t_0) E_s + \Delta \sigma_{pr} + \alpha \cdot \Phi(t, t_0) (\sigma_{cg} + \sigma_{cpo})}{1 + \alpha (A_p / A_c) (1 + z_{cp}^2 A_c / I_c) (1 + 0,8 \Phi(t, t_0))}$$

gdje je:

- $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$ promjena naprezanja u natezi zbog puzanja, skupljanja i opuštanja na mjestu x u trenutku "t"
- $\varepsilon_s(t, t_0)$ procijenjena konačna vrijednost deformacije prouzročene skupljanjem
- α E_s / E_{cm}
- E_s modul elastičnosti čelika za prednapinjanje
- E_{cm} modul elastičnosti betona
- $\Delta \sigma_{pr}$ promjena naprezanja u nategama na mjestu x zbog opuštanja. Može se odrediti prema slici 4.5.
Za obične zgrade smije se umjesto σ_p uzeti $0,85 \sigma_{pgo}$.
- $\Phi(t, t_0)$ koeficijent puzanja – vidi u poglavlju 3.
- σ_{cg} naprezanje betona u visini natege od vlastite težine i drugih stalnih djelovanja
- σ_{cpo} početna vrijednost naprezanja u betonu u razini natege od prednapinjanja
- A_p ploština presjeka svih natega u promatranom području

A_c ploština betonskoga presjeka
 I_c moment tromosti betonskoga presjeka
 z_{cp} udaljenost između težišta betonskog presjeka i natege

4.5.5 Proračun područja sidrenja natege (prethodno napinjanje; naknadno napinjanje)

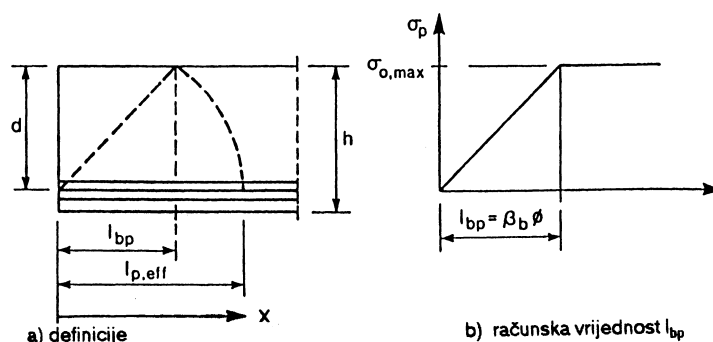
Valja razlikovati:

- (i) **duljinu prijenosa** l_{bp} preko koje se sila prednapinjanja (P_0) prethodno napete natege prenosi u potpunosti na beton
- (ii) **duljinu uvođenja** $l_{p,eff}$ unutar koje se naprezanje u betonu postupno rasprostire do linearne raspodjele u betonskom presjeku
- (iii) **duljinu sidrenja** l_{ba} unutar koje se najveća vrijednost sile prednapinjanja (F_{pu}) u prethodno napetom elementu u potpunosti unese u beton

Područja uzajamno utječu jedno na drugo.

Duljina prijenosa sile prednapinjanja P_0

$l_{bp} = \beta_b \phi$ $\beta_b = 50-70$ za užad i žice $\beta_b = 30-55$ za rebrasti čelik Vidi tablicu 4.1



Slika 4.7 - Duljina prijenosa sile prednapinjanja l_{bp} i duljina uvođenja $l_{p,eff}$

Za proračun uzima se $l_{bpd} = 0,8 l_{bp}$ ili $1,2 l_{bp}$. Vrijedi nepovoljnija vrijednost za promatrano djelovanje.

Duljina prijenosa l_{bp} ovisi o promjeru i vrsti natege, značajkama površine natege, čvrstoći betona i stupnju zbijenosti betona. **Vrijednosti se temelje na eksperimentalnim podacima ili na iskustvu** s primijenjenim tipom natege. Za proračunske potrebe duljina prijenosa definirana je kao višekratnik nazivnoga promjera (ϕ) žice ili užeta

$$l_{bp} = \beta_b \phi$$

Tablica 4.1 - Faktor β_b za proračun duljine prijenosa sile prednapinjanja sa žica ili užadi (glatke ili profilirane) na beton, ovisno o čvrstoći betona

Stvarna čvrstoća betona kod prijenosa sile prednapinjanja (N/mm ²)	25	30	35	40	45	50
β_b užad i glatke ili profilirane žice	75	70	65	60	55	50
β_b rebraste žice	<u>55</u>	<u>50</u>	<u>45</u>	<u>40</u>	<u>35</u>	<u>30</u>

Duljina uvođenja koncentrirane sile u beton - pravokutni presjek

$$l_{p,eff} = \sqrt{(l_{bpd}^2 + d^2)} \quad = \text{duljina nakon koje naprezanje u betonu postaje jednolično}$$

Duljina sidrenja prethodno napete natege u graničnom stanju nosivosti

Sidrenje natege kod prethodnog napinjanja u elementima izloženim savijanju u graničnom stanju nosivosti, ovisno je o stanju područja sidrenja (raspucalo ili neraspucalo). Područje sidrenja natege (slika) dopušteno je uzeti kao neraspucalo ako vlačno naprezanje u betonu u graničnom stanju nosivosti (vlačno naprezanje zbog savijanja, glavno vlačno koso naprezanje) ne premašuje proračunsku vlačnu čvrstoću f_{ctd} , uzimajući u obzir mjerodavnu silu prednapinjanja P_d .

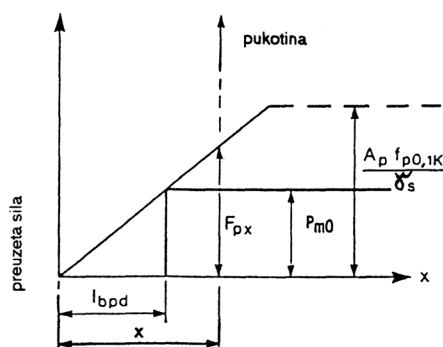
Ako vlačno naprezanje ne premaši vrijednost $f_{ct,0,05}$ uzima se bez daljnjih ispitivanja, da je uvjet za sidrenje ispunjen.

Kad vlačno naprezanje premaši vrijednost $f_{ct,0,05}$, valja dokazati da dijagram vlačnih sila, u skladu sa slikom ne izlazi iz dijagrama pokrivanja vlačnih sila, koji se sastoji iz vlačne sile natege i vlačne sile nenapete armature.

Sila koju preuzima natega određuje se prema formuli i slici 4.8.

$$F_{px} = \frac{x}{l_{bpd}} P_0 \leq \frac{A_p f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

x - razmak od čela nosača do prve pukotine

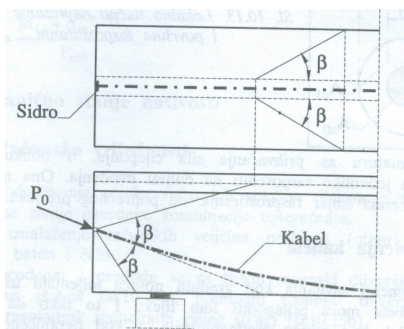


Slika 4.8 - Duljina sidrenja prethodno napete natege u graničnom stanju nosivosti

Duljina sidrenja naknadno napetih natega

Najveća moguća sila koja može djelovati na mjestu pojedine natege je $P_0 = A_p f_{0,1p,k}$

Vlačne sile nastale pri uvođenju koncentriranih sila mogu se procijeniti primjenom štapne analogije ili pomoću nekoga drugoga prikladnoga postupka. Potrebnu armaturu valja oblikovati uz pretpostavku da u njoj djeluje naprezanje jednako proračunskoj granici popuštanja. Za uvođenje sile prednapinjanja koje počinje na kraju natege uzima se da se ona širi pod kutom 2β (slika 4.9) gdje se za kut β uzima $\beta = \arctg 2/3$.



Slika 4.9 - Duljina uvođenja sile P_0 u nosač T presjeka: gore - tlocrt, dolje - pogled

Armiranje na mjestu uvođenja sile prednapinjanja

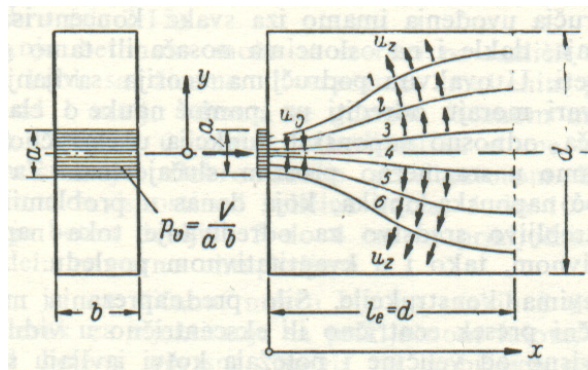
Tok poprečnog naprezanja σ_y kod djelovanja koncentrirane sile (poprečni tlak – poprečni vlak)

Duljina uvođenja jednaka je visini presjeka

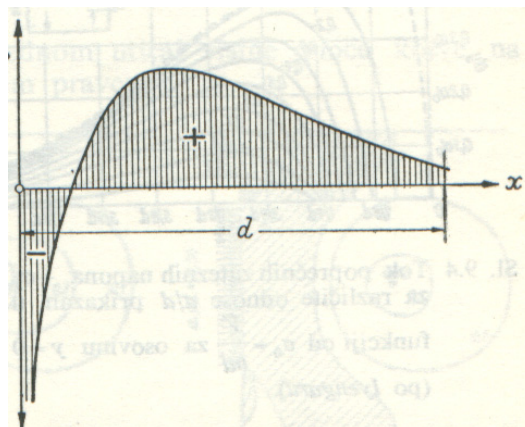
Sila cijepanja

$$F_u = 0,3 P_{0d} (1 - a/d) \quad \text{Vidi sl. 4.10}$$

Objašnjenje za slučaj uvođenja više koncentriranih sila na kraju elementa



Slika 4.10 - Uvođenje sile prednapinjanja na kraju nosača



Slika 4.11 - Naprezanje na mjestu uvođenja sile prednapinjanja

4.6 Proračun nosivosti za djelovanje momenta savijanja

Opći uvjet za proračun nosivosti za djelovanje momenta savijanja:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$M_{Sd} = \gamma_G M_G + \gamma_Q M_Q + [\gamma_P M_P \text{ NE } ???!!!!]$$

$$\gamma_G = 1,35 \quad \gamma_Q = 1,50 \quad \gamma_P = 1,0$$

Sila prednapinjanja kod slobodno oslonjenog nosača NE UZIMA se na strani djelovanja. M_P je dodatni moment savijanja koji se javlja samo kod statički neodređenih prednapetih konstrukcija (vidi točku 9.1).

Nosivost u slučaju sloma preko betona

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = 0,85 \cdot \alpha_v \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \mu_{Rd} b d^2 f_{cd}$$

**Prva varijanta proračuna: ploština armatura (betonskog čelika i čelika za prednapinjanje) je odabrana.
Traži se granična nosivost presjeka**

Nosivost u slučaju sloma preko armature
Sila prednapinjanja UZIMA se na strani nosivosti !!!

$$M_{Rd} = A_{s1} \sigma_{s1} z_s + A_p \sigma_p z_p$$

$$\sigma_{s1} = \varepsilon_{s1} E_s \leq f_{yk} / \gamma_s$$

$$\sigma_p = \varepsilon_p E_s = 0,9 f_{pk} / \gamma_s$$

Dimenzioniranje s pomoću tablica za AB elemente naprezane na savijanje

**Druga varijanta proračuna: ploština čelika za prednapinjanja A_p je poznata.
Traži se potrebna ploština betonskog čelika.**

Koraci:

proračunati bezdimenzijsku vrijednost $\mu_{sd} = M_{sd} / b_g d^2 f_{cd}$ b_g je širina tlačnog područja

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad \gamma_c = 1,5$$

Pronaći iz tablice pripadajući ε_{s1} , ε_c , ξ , ζ a zatim proračunati ploštinu betonskoga čelika

$$A_{s1} = (M_{sd} - A_p \sigma_p z_p) / (f_{yd} \cdot z_s)$$

Krak unutarnjih sila

$$z_p = \zeta d_p \quad \text{natega}$$

$$z_s = \zeta d_s \quad \text{bet. čelika}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

4.7 Proračun nosivosti za djelovanje poprečne sile

Proračun je sličan kao za obične armiranobetonske konstrukcije s tim da se u obzir uzima prednapinjanje presjeka. Uvijek treba predvidjeti minimalnu poprečnu armaturu osim kod elemenata tipa punih ploča, te šupljih ili rebrastih ploča. Proračunskoj poprečnoj sili treba dodati komponentu poprečne sile koja nastaje od prednapinjanja, ako su natege zakrivljene ili kose.

Opći uvjet za proračun nosivosti za djelovanje poprečne sile

$$V_{sd} \leq V_{Rd}$$

1. slučaj

Nije potreban poseban proračun poprečne armature ako je zadovoljen uvjet

$$V_{sd} \leq V_{Rd1}$$

2. slučaj

Potrebno je:

a) dokazati nosivost tlačnih štapova $V_{sd} \leq V_{Rd2}$

b) proračunati poprečnu armaturu iz uvjeta ravnoteže $V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd}$

1. slučaj

Proračun V_{Rd1}

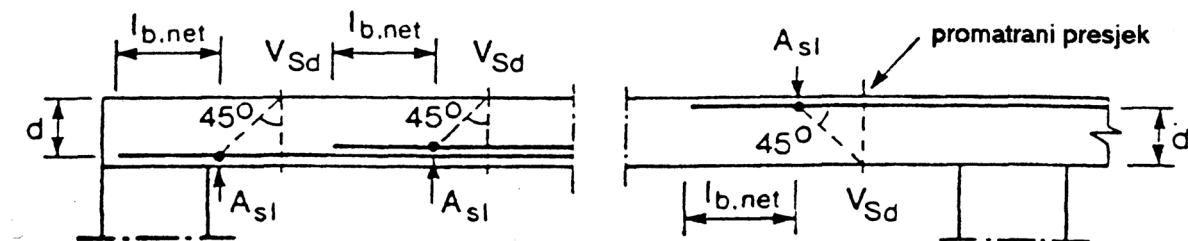
V_{Rd1} – nosivost neraspucalog betonskog presjeka za poprečnu silu

$$V_{Rd1} = b_w d [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1) + 0,15 \sigma_{cP}]$$

$$k = 1,6 - d \geq 1 \quad (d \text{ u metrima})$$

$\rho_1 = A_{s1} / (b_w d) \leq 0,02$ koeficijent armiranja uzdužnom armaturom

A_{s1} – ploština vlačne armature koja se sidri za najmanje $d + l_{b,net}$ iza promatranoga presjeka (vidi sliku 4.12).



Slika 4.12 - Duljina sidrenja pri prijenosu poprečne sile

$\sigma_{cP} = N_{Sd} / A_c$ prosječno osno naprezanje betona prouzročeno uzdužnom silom i/ili silom prednapinjanja

b_w – najmanja širina poprečnoga presjeka

$\tau_{Rd} = (0,25 f_{ctk,0,05}) / \gamma_c$ – osnovna vrijednost proračunske posmične čvrstoće

Tablica 4.2 - Vrijednosti τ_{Rd} (MPa) ako je uzeto $\gamma_c = 1,50$

f_{ck}	25	30	35	40	45	50
τ_{Rd}	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,48

2. slučaj

a) Dokaz nosivosti tlačnih štapova $V_{Rd2,red}$

Nosivost tlačnih štapova umanjuje se zbog djelovanja sile prednapinjanja:

$$V_{Rd2,red} = 1,67 V_{Rd2} (1 - \sigma_{cP,eff} / f_{cd}) \leq V_{Rd2}$$

Nosivost tlačnih štapova iznosi:

$$V_{Rd2} = 0,5 v f_{cd} b_w z$$

$$v = 0,7 - f_{ck} / 200 \geq 0,5 \quad \text{faktor djelotvornosti}$$

f_{ck} u MPa

b_w – najmanja širina presjeka u vlačnome području – odbiti polovicu promjera cijevi natega

$$b_{w,nom} = b_w - 0,5 \sum \phi_n$$

$$\sigma_{cP,eff} = (N_{Sd} - f_{yk} A_{s2} / \gamma_s) / A_c \quad \text{tlačno naprezanje u elementu}$$

A_{s2} – ploština tlačne armature

b) Nosivost poprečne armature V_{Rd3}

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd} \quad \text{proizlazi iz uvjeta ravnoteže poprečnih sila}$$

$$V_{cd} = V_{Rd1} \quad \text{- doprinos betona nosivosti na poprečnu silu}$$

$V_{wd} = A_{sw} f_{yw,d} \cdot z / s$ - doprinos **vertikalnih** spona nosivosti na poprečnu silu

A_{sw} – ploština svih grana spona čiji je razmak s

$f_{yw,d}$ – proračunska granica popuštanja poprečne armature

$z = 0,9 d$

s – razmak spona

$V_{wd} = A_{sw} 0,9 d f_{yw,d} (1 + \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha / s$ - doprinos **nagnute** poprečne armature

Prednapeti elementi sa zakrivljenim nategama – umanjenje poprečne sile

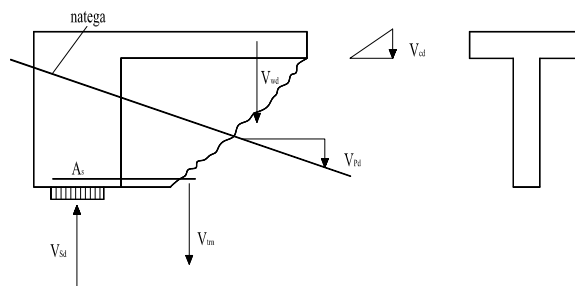
$$V_{Sd1} = V_{Sd} - V_{Pd}$$

V_{Sd1} – proračunska poprečna sila prouzročena opterećenjem nakon umanjenja za pozitivan učinak natega

V_{Sd} – proračunska poprečna sila prouzročena opterećenjem

$V_{Pd} = P_{mt} \cdot 0,9 \sin \alpha$ - proračunska komponenta poprečne sile od nagnutih natega usporedna sa V_{Sd} s predznakom “+” ako je istog smjera kao i V_{Sd} . Sila prednapinjanja je srednja vrijednost sile P_{mt} umanjena za gubitke prednapinjanja pomnožena s odgovarajućim parcijalnim koeficijentom sigurnosti $\gamma_p = 0,9$.

α - kut nagiba natega prema osi nosača



Slika 4.13 - Mehanizam prijenosa poprečne sile u betonu i armaturi

5 PRORAČUN GRANIČNIH STANJA UPORABLJIVOSTI

$E_d \leq C_d$ Proračunska vrijednost $\leq$ proračunske (normom dane) konstante

Utjecaj na izgled, uporabljivost, trajnost

Tri su granična stanja uporabljivosti:

granično stanje naprezanja - za proračun primjenjuje se kombinacija djelovanja: rijetka

granično stanje raspucavanja - za proračun primjenjuje se kombinacija djelovanja: česta

granično stanje deformiranja - za proračun primjenjuje se kombinacija djelovanja: nazovistalna

5.1 Ograničenje veličine naprezanja

Za provjeru veličine naprezanja primjenjuje se **rijetka kombinacija** djelovanja

$$\Sigma G_{k,j} + P + \Sigma_{i>1} Q_{k,i} \quad \psi_{0,2} = 0,6 \text{ do } 1,0$$

Svrha: spriječiti pretjerano raspucavanje i plastično deformiranje

Tablica 5.1 - "Dopuštene" vrijednosti naprezanja betona i čelika za granična stanja uporabljivosti

	rijetka kombinacija	česta kombinacija	nazovistalna kombinacija
beton	$\sigma_c \leq 0,6 f_{ck}$		$\sigma_c \leq 0,45 f_{ck}$
betonski čelik	$\sigma_s \leq 0,8 f_{yk} *$		
čelik za prednapinjanje	$\sigma_{pm,t} \leq 0,75 f_{pk}$		

* kad se ne proračunavaju prisilna deformiranja i drugi učinci, a zbog sprečavanja neelastičnog deformiranja

Tlačno naprezanje betona ograničeno je zbog sprečavanja uzdužnih pukotina uz armaturu u agresivnom okolišu što se javlja kod visokog postotka armiranja ($>1\%$).

Pukotine: 0,2 mm za PB 0,3-0,4 mm za AB

5.2 Proračun potrebnih izmjera presjeka uporabom "dopuštenih naprezanja

Za odabrani presjek elementa postave se četiri uvjeta koje treba zadovoljiti **pri provjeri graničnog stanja uporabljivosti**:

Za gornji rub presjeka:

za $t=0$ ne smije se premašiti dopušteno vlačno naprezanje σ_{ct}

za $t=\infty$ ne smije se premašiti dopušteno tlačno naprezanje σ_c

Za donji rub presjeka:

za $t=0$ ne smije se premašiti dopušteno tlačno naprezanje σ_c

za $t=\infty$ ne smije se premašiti dopušteno vlačno naprezanje σ_{ct}

Oznake znače:

$$\eta = P_{\infty} / P_0 < 1,0$$

P_0 početna sila prednapinjanja

P_{∞} konačna sila prednapinjanja

y udaljenost od središta sile prednapinjanja do težišta presjeka

A ploština betonskoga presjeka

σ_G naprezanje prouzročeno vlastitom težinom

σ_{G+Q} naprezanje prouzročeno vlastitom težinom i uporabnim opterećenjem

W_g moment otpora s obzirom na gornji rub presjeka

W_d moment otpora s obzirom na donji rub presjeka
Predznaci: vlak +, tlak –

Za gornji rub vrijedi:

$$\text{za } t=0 \quad P_0 y / W_g - P_0 / A - \sigma_G \leq \sigma_{ct}$$

$$\text{za } t=\infty \quad \eta P_0 y / W_g - \eta P_0 / A - \sigma_{G+Q} \leq -\sigma_c$$

Oduzmemo li drugu jednadžbu od prve dobivamo:

$$P_0 y / W_g - \eta P_0 y / W_g - P_0 / A + \eta P_0 / A - \sigma_G + \sigma_{G+Q} \leq \sigma_{ct} + \sigma_c$$

Kako je $-\sigma_G + \sigma_{G+Q} = \sigma_Q = M_Q / W_g$ sljedi:

$$\frac{P_0 y (1-\eta)}{W_g} - \frac{P_0 (1-\eta)}{A} + \frac{M_Q}{W_g} \leq (\sigma_{ct} + \sigma_c)$$

$$AP_0 y (1-\eta) - W_g P_0 (1-\eta) + AM_Q \leq W_g A (\sigma_{ct} + \sigma_c)$$

$$W_g \geq \frac{AP_0 y (1-\eta) + AM_Q}{A(\sigma_{ct} + \sigma_c) + P_0 (1-\eta)}$$

$$W_g \geq \frac{P_0 y (1-\eta) + M_Q}{(\sigma_{ct} + \sigma_c) + P_0 (1-\eta) / A}$$

Za $\eta=1$ (ako nema gubitka početne sile prednapinjanja)

$$W_g \geq \frac{M_Q}{\sigma_{ct} + \sigma_c}$$

Za donji rub vrijedi:

$$\text{za } t=0 \quad -P_0 y / W_d - P_0 / A + \sigma_G \leq -\sigma_c$$

$$\text{za } t=\infty \quad \eta P_0 y / W_d - \eta P_0 / A + \sigma_{G+Q} \leq \sigma_{ct}$$

Oduzmemo li drugu jednadžbu od prve dobivamo:

$$-P_0 y / W_d - \eta P_0 y / W_d - P_0 / A + \eta P_0 / A + \sigma_G - \sigma_{G+Q} \leq -\sigma_c - \sigma_{ct}$$

Kako je $\sigma_G - \sigma_{G+Q} = -\sigma_Q = -M_Q / W_d$ sljedi:

$$\frac{-P_0 y (1-\eta)}{W_d} - \frac{P_0 (1-\eta)}{A} - \frac{M_Q}{W_d} \leq -(\sigma_c + \sigma_{ct})$$

$$-AP_0 y (1-\eta) - W_d P_0 (1-\eta) - AM_Q \leq -W_d A (\sigma_c + \sigma_{ct})$$

$$W_d \geq \frac{-AP_0 y (1-\eta) - AM_Q}{-A(\sigma_c + \sigma_{ct}) + P_0 (1-\eta)}$$

$$W_d \geq \frac{-P_0 y(1-\eta) - M_Q}{-(\sigma_c + \sigma_{ct}) + P_0(1-\eta)/A}$$

Za $\eta=1$ (ako nema gubitka početne sile prednapinjanja)

$$W_d \geq \frac{-M_Q}{-(\sigma_c + \sigma_{ct})} = \frac{M_Q}{\sigma_{ct} + \sigma_c}$$

Zaključci:

- Vlastita težina nema utjecaja na određivanje izmjera presjeka
- Presjek prednapetog elementa može biti manji nego li u armiranom betonu
- Ako je potrebna ekscentričnost y sile P veća od moguće s obzirom na odabrane izmjere potrebno je visinu presjeka povećati.

Jednadžbe vrijede približno i ako je $\eta < 1$.

Za $\eta=0,85$ i uobičajeni omjer y/d dobiva se

$$W_g \geq \frac{M_Q}{0,78 \sigma_c + \sigma_{ct}} \quad i$$

$$W_d \geq \frac{M_Q}{0,93 \sigma_c + \sigma_{ct}}$$

Uvrstimo li granične vrijednosti:

$$M_{sd} = 1,5 M_Q \quad \sigma_c = 0,40 f_c \quad \sigma_{ct} = 0,04 f_c$$

dobivamo:

$$W_g = 2,84 M_Q / f_c \quad W_d = 2,43 M_Q / f_c \quad W_g / W_d = (I/y_g) / (I/y_d) = 2,84 / 2,43 = 1,17$$

$$y_d / y_g = 1,17$$

5.3 Proračun položaja sile prednapinjanja uz zadovoljenje četiri uvjeta za dopuštena naprezanja (Magnetoli pravci)

Za gornji rub presjeka:

- za $t=0$ ne smije se premašiti dopušteno vlačno naprezanje σ_{ct}
- za $t=\infty$ ne smije se premašiti dopušteno tlačno naprezanje σ_c

Za donji rub presjeka:

- za $t=0$ ne smije se premašiti dopušteno tlačno naprezanje σ_c
- za $t=\infty$ ne smije se premašiti dopušteno vlačno naprezanje σ_{ct}

$$\eta = P_\infty / P_0 < 1,0$$

P_0 početna sila prednapinjanja

P_∞ konačna sila prednapinjanja

Gornji rub presjeka :

$$\text{za } t=0 \quad P_0 y / W_g - P_0 / A - \sigma_G \leq \sigma_{ct}$$

$$P_0 A y - P_0 W_g - \sigma_g A W_g \leq \sigma_{ct} A W_g$$

$$y = \frac{(\sigma_{ct} + \sigma_G) A W_g + P_0 W_g}{P_0 A}$$

$$y = W_g / A + (\sigma_{ct} + \sigma_G) \cdot W_g / P_0$$

$$y = W_g / A + (M_G + \sigma_{ct} W_g) / P_0 \quad (1)$$

Gornji rub presjeka:

$$\text{za } t=\infty \quad \eta P_0 y / W_g - \eta P_0 / A - \sigma_{G+Q} \leq -\sigma_c$$

$$\eta P_0 A y - \eta P_0 W_g - \sigma_{G+Q} A W_g \leq -A W_g \sigma_c$$

$$y = \frac{A W_g (\sigma_{G+Q} - \sigma_c)}{\eta P_0 A} + \frac{\eta P_0 W_g}{\eta P_0 A}$$

$$y = W_g / A + (-\sigma_c + \sigma_{G+Q}) W_g / \eta P_0$$

$$y = W_g / A + (M_{G+Q} - \sigma_c W_g) / \eta P_0 \quad (2)$$

Donji rub presjeka

$$\text{za } t=0 \quad -P_0 y / W_d - P_0 / A + \sigma_G \leq \sigma_c$$

$$-P_0 y A - P_0 W_d + \sigma_G A W_d \leq \sigma_c A W_d$$

$$y = \frac{A W_d (-\sigma_G + \sigma_c)}{-P_0 A} + \frac{P_0 W_d}{-A P_0}$$

$$y = W_d / A + (M_G - \sigma_c W_d) / P_0 \quad (3)$$

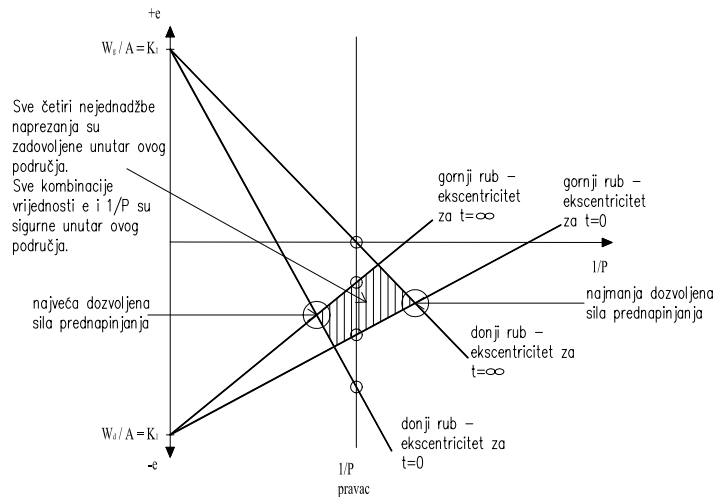
$$\text{za } t=\infty \quad -\eta P_0 y / W_d - \eta P_0 / A + \sigma_{G+Q} \leq \sigma_{ct}$$

$$-\eta P_0 y A - \eta P_0 W_d + \sigma_{G+Q} A W_d \leq A W_d \sigma_{ct}$$

$$y = \frac{A W_d (\sigma_{ct} - \sigma_{G+Q})}{-A \eta P_0} + \frac{\eta P_0 W_d}{-\eta P_0 A}$$

$$y = -W_d / A - (-M_{G+Q} + \sigma_{ct} W_d) / \eta P_0 \quad (4)$$

Jednadžbe (1) do (4) definiraju linearnu zavisnost y i $1/P_0$ i nazivaju se **Magnetelovi pravci**. Ako se oni nacrtaju u koordinatnom sustavu $1/P_0 - y$, područje koje zatvaraju daje zadovoljenje sva četiri početna uvjeta dopuštenih naprezanja.



Slika 5.1 Magelovi pravci

5.4 Proračun širine i razmaka pukotina (primjenjivo za djelomično prednapete konstrukcije)

Za provjeru širine i razmaka pukotina primjenjuje se česta kombinacija djelovanja

$$\Sigma G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \psi_{1,1} = 0,2 \text{ do } 0,9$$

Svaki proračun širine pukotine je približan.

Izgled pukotine pod povećalom

Karakteristična srednja širina pukotine $\leq$ definirane (ugovorene) veličine

$$w_k \leq w_g$$

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{sm}$$

$\beta = 1,7$ – omjer proračunske i srednje širine pukotine

$$s_{rm} = 50 + 0,25 k_1 k_2 \phi / \rho_r \quad \text{srednji razmak pukotina u mm}$$

$$\varepsilon_{sm} = [\sigma_s / E_s] [1 - \beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2] \quad \text{srednja vrijednost deformacije armature}$$

Koeficijent kojim se u obzir uzima prionljivost armature

$$k_1 = 0,8 \text{ za RA} \quad k_1 = 1,6 \text{ za GA}$$

Koeficijent kojim se u obzir uzima oblik raspodjele deformacija po visini presjeka

$$k_2 = 0,5 \text{ za savijanje}$$

$$k_2 = 1,0 \text{ za čisti vlak}$$

$$\rho_r = A_s / A_{c,eff} \quad \text{za AB}$$

A_s – ploština čelika koja se nalazi u vlačnom području

$A_{c,eff}$ – proračunska ploština betona u vlačnom području

ϕ – promjer šipke u mm; ako su razni ϕ treba uzeti prosječni ϕ

σ_s – naprezanje armature uz pretpostavku raspucalog presjeka

σ_{sr} – naprezanje vlačne armature za opterećenje koje prouzročuje raspucavanje

$$\rho_r = (A_s + \xi_0 A_p) / A_{c,eff} \quad \text{za PB}$$

$$\xi_0 = 0,5 \phi / \phi_p$$

ϕ_p – profil cijevi

$$\text{za AB vrijedi: } A_{c,eff} = b d_{c,eff} = b \cdot 2,5 (h - d)$$

$$\text{za PB vrijedi: } d_{c,eff} \leq (h - x) / 3$$

β_1 koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj prionljivosti betonskog čelika i betona

= 1,0 za rebrasti čelik

= 0,5 za glatki betonski čelik

β_2 koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj trajanja opterećenja ili ponovljenog opterećenja

= 1,0 za pojedinačno kratkotrajno opterećenje

= 0,5 za trajno opterećenje ili za opetovano opterećenje

5.5 Proračun progiba

Za provjeru progiba primjenjuje se **nazovistalna** kombinacija djelovanja

$$\Sigma G_{k,j} + P + \Sigma_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \psi_{2,1} = 0 \text{ do } 0,8$$

Za nazovistalnu kombinaciju djelovanja proračuna se moment savijanja M_{sd} .

5.5.1 Opći izrazi – vrijede za neraspucali presjek

Za neraspucali presjek vrijede formule iz Mehanike i Otpornosti materijala

$$f_{tot} \leq f_g$$

f_{tot} – ukupni progib od kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja

$$f_{tot} = f_{kratkotrajni} + f_{dugotrajni}$$

Ukupni progib:

$$f_{tot} = f_k + K_r \cdot \Phi(\infty) \cdot f_k = [1 + K_r \Phi(\infty)] \cdot f_k$$

$\Phi(\infty)$ – koeficijent puzanja koji iznosi za $t=28$ dana i vlažnost $\geq 50\%$ $\Phi(\infty) = 2,5$

Utjecaj tlačne armature koja umanjuje progib uzima se u obzir koeficijentom :

$$K_r = 1,0 - 0,6 A_{s2} / A_{s1} \geq 0,4$$

f_k – kratkotrajni progib

Izrazi za kratkotrajni progib:

- za slobodno oslonjenu gredu opterećenu jednoličnim opterećenjem

$$f_k = 5 q \ell^4 / (384 EI) = 5 M_{sd} \ell^2 / (48 EI) = M_{sd} \ell^2 / (9,6 EI) = k \ell^2 (1/r)$$

Proračun nije potreban ako je vitkost na savijanje:

$$\ell_{eff} / d \leq C_d \quad \text{- granice dane u normi čime se osigurava zadovoljenje uvjeta da je progib } f_{tot} \leq \ell_{eff} / 250.$$

Taj odnos za nosač slobodno oslonjen na dva ležaja iznosi 18 (jako napregnut betona) do 25 (slabo napregnut beton).

5.5.2 Detaljni prikaz proračuna progiba za raspucali presjek

Zahtjevi za proračun deformiranja (tj. progiba)

Precizan proračun obuhvatio bi:

- učinke skupljanja i puzanja
- sudjelovanje betona na vlak između pukotina
- pukotine zbog prijašnjih opterećenja
- utjecaj prisilnih naprezanja kao što je temperatura
- vrste opterećenja: statičko ili dinamičko
- odgovarajući modul elastičnosti betona, uzimajući u obzir vrstu agregata i starost betona u vrijeme opterećenja

Oznake:

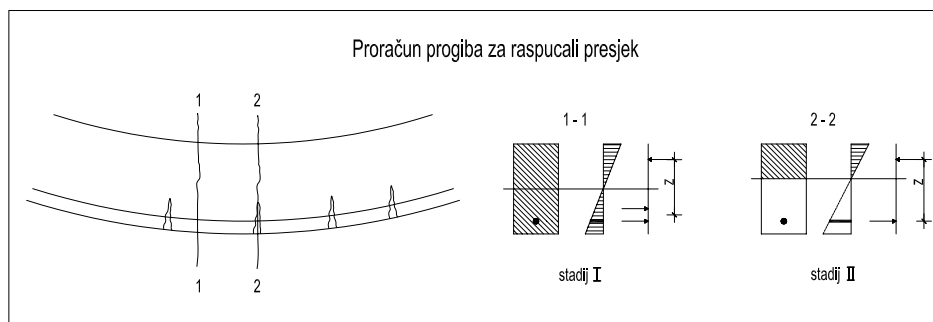
$E_{c,eff}$	proračunski modul elastičnosti betona
M_{cr}	moment pri pojavi prve pukotine
N_{cr}	uzdužna sila pri pojavi prve pukotine
$(1/r)_{cs}$	zakrivljenost zbog skupljanja
S	statički moment ploštine armature u odnosu na težište presjeka
α	koeficijent deformiranja (može biti deformacija, progib, zakrivljenost ili zaokretanje)
α_1	vrijednost α za neraspucali presjek
α_{II}	vrijednost α za raspucali presjek
α_e	omjer modula elastičnosti ($E_s/E_{c,eff}$)
β_1	koeficijent kojim se uzimaju u obzir svojstva prionljivosti betonskog čelika i betona
β_2	koeficijent kojim se uzima u obzir trajanje opterećenja ili ponovljeno opterećenje
ε_{cs}	deformacija od slobodnog skupljanja (mjera skupljanja)
ζ	koeficijent raspodjele, $\zeta=0$ za neraspucali presjek
σ_s	naprezanje u vlačnoj armaturi proračunanoj na temelju raspucalog presjeka
σ_{sr}	naprezanje u vlačnoj armaturi proračunanoj na temelju raspucalog presjeka za kombinaciju opterećenja koja uzrokuje prvu pukotinu (Napomena: σ_s/σ_{sr} može se zamijeniti s M/M_{cr} za savijanje ili N/N_{cr} za čisti vlak. Uvijek je $\sigma_{sr}/\sigma_s < 1$)
Φ	koeficijent puzanja
M_{cr}	$= f_{ctm} \cdot W = f_{ctm} \cdot b_m \cdot h^2 / 6$ za pravokutni presjek

Izračunani rezultat ne treba uzeti kao točno predviđanje očekivanih progiba, pa se zbog toga ne preporučuje primjena pretjerano opsežnih proračunskih postupaka.

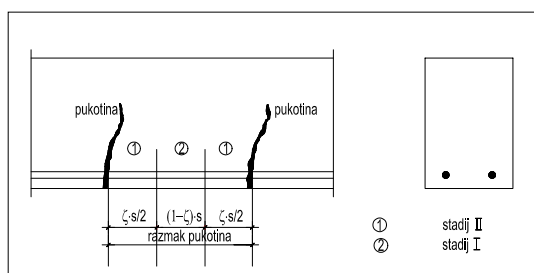
Postupak proračuna

Pretpostavlja se da postoje dva krajnja uvjeta kod deformiranja betonskih presjeka:

- neraspucalo stanje - u tom slučaju čelik i beton djeluju zajedno i elastično u vlačnom i tlačnom području
- potpuno raspucalo stanje - u tom slučaju zanemaruje se nosivost betona na vlak.



Slika 5.2 - Proračun progiba raspucalog presjeka



Slika 5.3 - Duljine koje pripadaju raspucalom i neraspucalom presjeku između dvaju pukotina

Elementi koji nisu napregnuti iznad proračunske vlačne čvrstoće betona bilo gdje u elementu smatraju se neraspucalim. Elementi kod kojih se očekuju pukotine ponašaju se kao da se nalaze između neraspucalog i potpuno raspucalog stanja. Za elemente opterećene pretežno na savijanje odgovarajuće ponašanje opisano je jednačinom:

$$(1/r)_m = \zeta (1/r)_{II} + (1 - \zeta) (1/r)_I$$

gdje je:

$(1/r)_m$ zakrivljenost proračunana kao kombinacija progiba za raspucalo i za neraspucalo stanje

$(1/r)_I$ i $(1/r)_{II}$ odgovarajuće vrijednosti zakrivljenosti za potpuno neraspucalo i potpuno raspucalo stanje

ζ koeficijent raspodjele dan jednačinom

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\sigma_{sr} / \sigma_s \right)^2$$

β_1 koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj prionljivosti betonskog čelika i betona

= 1,0 za rebrasti čelik

= 0,5 za glatki betonski čelik

β_2 koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj trajanja opterećenja ili ponovljenog opterećenja

= 1,0 za pojedinačno kratkotrajno opterećenje

= 0,5 za trajno opterećenje ili za opetovano opterećenje

σ_s naprezanje u vlačnoj armaturi proračunanoj na temelju raspucalog presjeka

σ_{sr} naprezanje u vlačnoj armaturi proračunanoj na temelju raspucalog presjeka za kombinaciju opterećenja koja uzrokuje prvu pukotinu

Opći izraz za progib glasi

$$f = k l^2 \cdot (1/r)$$

gdje je:

k koeficijent ovisan o M- dijagramu

l proračunski raspon

$(1/r)$ zakrivljenost elementa u $L/2$

Zakrivljenost od stalnih djelovanja i puzanja:

$$(1/r)_{load} = M/E_{c,eff} I$$

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \Phi(\infty))$$

Zakrivljenost od skupljanja:

$$(1/r)_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S / I$$

Ukupna zakrivljenost:

$$(1/r)_{ukupno} = (1/r)_{load} + (1/r)_{cs}$$

$$\alpha_e = E_s / E_{c,eff}$$

S statički moment ploštine (armature) za neraspucali ili za raspucali presjek – ovisno o tome koji se progib proračunava

I moment tromosti za neraspucali ili za raspucali presjek – ovisno o tome koji se progib proračunava

U tablici su dane vrijednosti koeficijenta "k" koji ovisi o momentnom dijagramu odnosno shemi opterećenja.

Tablica 5.2 - Vrijednosti koeficijenata "k" za razne vrste djelovanja

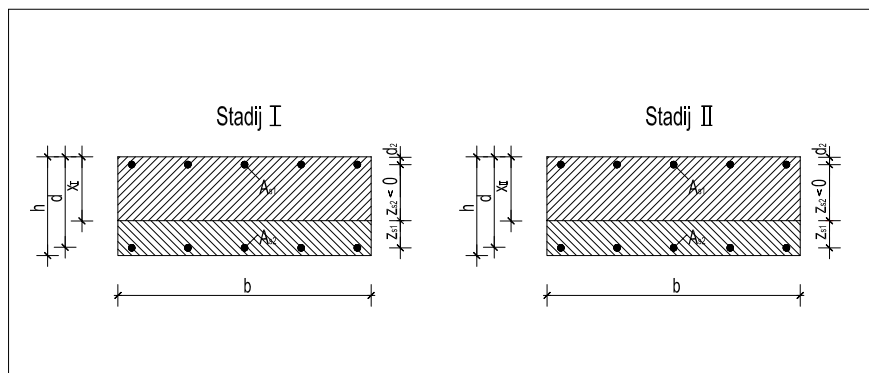
Djelovanje	Vrsta nosača	k
Moment savijanja na jednom kraju	Slobodno oslonjen nosač	0,0625
Momenti savijanja na oba kraja	Slobodno oslonjen nosač	0,125
Jednolično raspodijeljeno opterećenje	Slobodno oslonjen nosač	5/48
Opterećenje raspodijeljeno po pravokutnom trokutu	Slobodno oslonjen nosač	0,102
Koncentrirana sila na udaljenost αl od ležaja	Slobodno oslonjen nosač	$(3 - 4 \alpha^2) / [48(1-\alpha)]$
Koncentrirana sila na udaljenosti αl od mjesta upetosti	Konzola	$\alpha (3-\alpha) / 6$

Formule za proračun vrijednosti x (položaj neutralne osi), S i I za neraspucane i raspucane presjeke dane su za pravokutni i T presjek u posebnom prilogu (tablica 8.6 str. 248-249) publikacije H.U.Litzner: Concrete Structures – Euro-Design Handbook, 1995). Ovdje se daju formule za proračun vrijednosti za pravokutni presjek iz te publikacije.

Proračun parametara x, I i S za neraspucali (stadij I) i raspucali presjek (stadij II)

Stadij I :

Proračun položaja neutralne osi



Slika 5.4 - Oznake pri proračunu progiba

$$x_I = k_{xI} \cdot h$$

$$\rho_I = A_{sI} / (bh)$$

*

$$k_{xI} = (0,5 + A_I) / (1 + B_I)$$

$$A_I = \alpha_e \rho_I d/h \cdot [1 + A_{s2} d_2 / (A_{s1} d)]$$

$$B_I = \alpha_e \rho_I (1 + A_{s2} / A_{s1})$$

Proračun momenta tromosti

$$I_I = k_I b h^3 / 12$$

$$k_I = 1 + 12 (0,5 - k_{xI})^2 + 12 \alpha_e \rho_I (d/h - k_{xI})^2 + 12 \alpha_e \rho_I (A_{s2}/A_{s1}) \cdot (k_{xI} - d_2/h)^2$$

Proračun statičkog momenta armature

$$S_I = A_{s1} \cdot z_{s1} + A_{s2} \cdot z_{s2} \quad z_{s2} < 0$$

Stadij II. :

Proračun položaja neutralne osi

$$x_{II} = k_{xII} \cdot h$$

$$\rho_{II} = A_{s1} / (bd)$$

$$k_{xII} = - B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}}$$

$$A_{II} = \alpha_e \rho_{II} \cdot [1 + A_{s2} d_2 / (A_{s1} d)]$$

$$B_{II} = \alpha_e \rho_{II} (1 + A_{s2} / A_{s1})$$

Proračun momenta tromosti

$$I_{II} = k_{II} b d^3 / 12$$

$$k_{II} = 4 k_{II}^3 + 12 \alpha_e \rho_{II} (1 - k_{xII})^2 + 12 \alpha_e \rho_{II} (A_{s2}/A_{s1}) \cdot (k_{xII} - d_2/d)^2$$

Proračun statičkog momenta armature

$$S_{II} = A_{s1} \cdot z_{s1} + A_{s2} \cdot z_{s2} \quad z_{s2} < 0$$

Nadvišenje nosača

- pojam
- od koje ravnine se mjeri progib
- kako se rješava slučaj nosača kod kojega je proračunski progib veći od dopuštenoga

6 STABILNOST PREDNAPETIH ELEMENATA

6.1 Izvijanje

$$P_k = \pi^2 EI / l^2 \quad \text{Eulerova kritična sila}$$

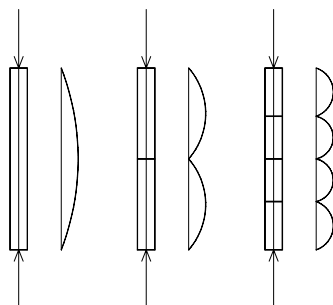
Razlika u izvijanju za prednapeti elementi sa slobodnom ili vanjskom nategom i element sa nategom u prethodno ili naknadno napetom elementu kad postoji prionljivost između natege i betona.

Ako je natega slobodna element se izvija kao da je izložen nekoj drugoj tlačnoj sili.

Na σ - ε dijagramu pri prednapinjanju je već “potrošen” donji dio radnog dijagrama betona pa za vanjsku silu preostaje gornji dio s manjom vrijednošću modula E.

Ako postoji prionljivost izvijanje nije moguće jer je kritična sila beskonačno velika. Sila prednapinjanja ostaje cijelo vrijeme centrična (i pri deformiranom obliku štapa) što kod neprednapetog elementa nije slučaj, jer s otklonom od početnog položaja raste moment ($M=P \cdot e$) prouzročen tlačnom silom.

Ispitivanja Magnela (1944) dokazala su ovakvo razmatranje.



Slika 6.1 -Prikaz izvijanja prednapetog štapa do kojega NE MOŽE doći

Ako je	$l_i = l$	$l_i = l/2$	$l_i = l/4$
Kritična sila izvijanja je	P_{k1}	$P_{k2} = 4P_{k1}$	$P_{k3} = 16P_{k1}$

Element u kojem postoji prionljivost između natege i betona ne može se izvinuti. Može se slomiti kad se dostigne tlačna čvrstoća betona.

6.2 Izbočivanje

Problem se javlja pri podizanju vrlo vitkih nosača velikih raspona kada se vade iz oplata ili prenose. Oni se zbog tlačne sile u pritisnutoj pojasnici mogu bočno izbočiti. U tom je trenutku sila prednapinjanja veća nego li u fazi uporabe, a čvrstoća betona manja od krajnje.

Teorijska istraživanja Lebella (1959)

Izbočivanje vitkih nosača pri dizanju i prijenosu

Kritični rasponi su $L > 30$ m

Kritični moment savijanja u smjeru slabije osi (y-y) pri kojem nastupa izvijanje je

$$M_{cr} = (\pi/l) \cdot K$$

$$K = \sqrt{E I_y \cdot G I_T}$$

I_y moment tromosti pojaseva oko osi y-y

I_T torzijski moment tromosti presjeka

E modul elastičnosti
 $G=0,4E$ modul smika
 ℓ raspon (=duljina) nosača

Kako postoji razlika u duljini između raspona (duljine) nosača i točaka između kojih je nosač obješen ($\ell_0=0,942\ell$) dobiva se kritična vrijednosti jednoličnog opterećenja kao

$$q_{cr} = 8 M_{cr} / \ell_0^2 = 8 (\pi/\ell) K / (0,942 \ell)^2 = 28,31 K / \ell^3$$

Uvjet stabilnosti protiv izbočivanja je postignut ako je zadovoljeno da je

$$q_{sd} < q_{cr}$$

U slučaju podizanja nosača q_{sd} je njegova vlastita težina u kN/m^1

Torzijski moment tromosti presjeka koji se sastoji od nekoliko pravokutnih presjeka proračunava se po izrazu (vidi Šimić, Otpornost materijala I., str. 272)

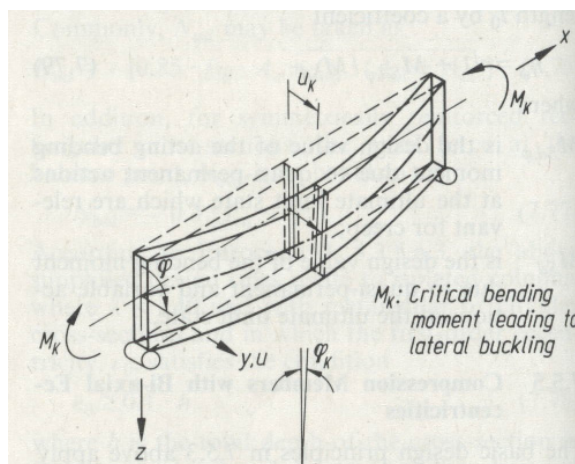
$$I_T = \sum \beta_i h_i b_i^3$$

gdje je:

β_i koeficijent iz tablice
 b_i manja stranica pravokutnika i
 h_i veća stranica pravokutnika i

Tablica 6.1 - Koeficijenti za proračun torzijskog momenta tromosti

h/b	1	1,5	2	3	4	8	10
β	0,141	0,196	0,229	0,263	0,281	0,307	0,313



Slika 6.2 - Izbočivanje vitkog prednapetog nosača

Dodatni moment savijanja zbog kojega se nosač može izbočiti je netočan položaj kuka za dizanje na krajevima nosača - kad one nisu postavljene u vertikalnoj osi nosača. Tada horizontalna komponenta sila pri dizanju s pomoću užadi daje u gornjem pojasu tlačnu silu i dodatni moment savijanja u smjeru slabije osi otpornosti.

Naginjanje nosača pri pokušaju dizanja u kosom smjeru može dovesti do iznenadnog (nezaustavljivog) sloma. Tada cijelu težinu nosača mora preuzeti otpornost nosača u slabijoj ravnini. Kako se nosač deformira povećava se ekscentričnost djelujuće sile, nosač se raspucava, time mu se umanjuje moment tromosti, povećava se progib, povećava se ekscentričnost i to je put ka nezaustavljivom slomu.

Ovaj slučaj treba razlikovati od slučaja izvijanja (točka 6.1) jer se ovdje gornji pojas nosača može u trenutku dizanja nalaziti u stanju vlačnih i vrlo malih tlačnih naprezanja.

Prema eksperimentalnim ispitivanjima i proračunima sigurnost protiv izbočivanja armiranobetonskih i prednapetih greda osigurana je ako su zadovoljana ova dva uvjeta:

$$\ell_{0t} < 50 b$$

$$h < 2,5 b$$

gdje je:

ℓ_{0t} duljina tlačnog područja između bočnih oslonaca (koji osiguravaju nosač od izbočivanja)

b širina tlačnog područja

h ukupna visina nosača

7 IZVEDBA NATEGA, NAPINJANJA I INJEKTIRANJA

7.1 Pravila ugradbe

Kod prethodnog napinjanja natege moraju biti razmaknute.

Kod naknadnog napinjanja snopovi natega općenito nisu dopušteni.

Dopuštena je primjena parova natega koje su položene vertikalno jedna iznad druge ako su predviđene primjerene mjere kod napinjanja i injektiranja. Kod dvostruko zakrivljenih natega potrebna je osobita pažnja.

Određivanje veličine zaštitnog sloja za cijevi natega

Vodoravni i vertikalni razmaci cijevi ili natega

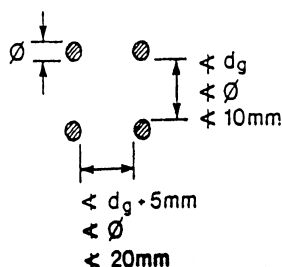
Moraju se odrediti tako da se omogući pravilna ugradba i zbijanje betona te da se postigne dostatno prijanjanje između betona i natege.

- za prethodno napinjanje vrijedi

Najmanji horizontalni i vertikalni svijetli razmak pojedinih natega prikazan je na slici.

d_g promjer najvećeg zrna agregata

ϕ promjer cijevi natege



Slika 7.1 - Svijetli najmanji razmak natega pri prethodnom napinjanju

- za naknadno napinjanje vrijedi

Svijetli razmak između cijevi treba iznositi:

- horizontalno: $d_{duct} \geq \begin{vmatrix} 40 \\ _ \end{vmatrix}$ mm

- vertikalno : $d_{duct} \geq \begin{vmatrix} 50 \\ _ \end{vmatrix}$ mm

gdje d_{duct} označava promjer cijevi.

7.2 Područja sidrenja natega pri naknadnom napinjanju

U područjima sidrenja treba uvijek uz sve vanjske površine predvidjeti armaturu raspoređenu u obliku pravokutnih armaturnih mreža.

Kad se kod naknadnog napinjanja skupine natega polažu na određenom razmaku jedne od drugih, trebaju na njihovu kraju biti postavljeni prikladni stremenovi za prihvat vlačnih sila cijepanja.

U svakom dijelu područja sidrenja treba postotak armiranja iznositi najmanje 0,15% u oba poprečna smjera.

Za osiguranje sidrenja treba primijeniti zatvorene stremenove.

7.3 Prijevoz i skladištenje natega

Natege, cijevi, sidra i nastavci moraju biti zaštićeni od štetnih utjecaja za vrijeme prijevoza i skladištenja, a kod ugradbe sve do dovršetka betoniranja.

Za vrijeme prijevoza i skladištenja natega mora se izbjegavati:

- kemijske, elektromehaničke ili biološke utjecaje bilo koje vrste koji uzrokuju koroziju
- bilo kakvo oštećenje natega
- bilo kakvo onečišćenje štetno za prijanjanje ili trajnost
- bilo kakva deformacija natega koja nije predviđena projektom
- bilo kakvo nezaštićeno skladištenje na kiši ili na zemlji
- prijevoz natega vodenim putem bez prikladne ambalaže
- zavarivanje u blizini natega bez njihove posebne zaštite (zaštita od kapljevina pri zavarivanju).

Kod cijevi treba uzeti u obzir ovo:

- treba izbjegavati mjestimična oštećenja i koroziju na unutarnjoj strani
- treba zajamčiti vodonepropusnost
- treba postići otpornost na kemijsko i mehaničko škodljivo djelovanje.

7.4 Izrada natega

Uređaji koji se primjenjuju za spajanje natega (spojke) i sidra, moraju se propisati normom. Dijelovi od kojih se sastoji natega moraju se sastavljati i ugrađivati u skladu s normama.

Cijevi i njihovi spojevi moraju odgovarati projektu.

Osobito se mora voditi računa o:

- čuvanju oznaka na svim dijelovima
- primjerenom postupku rezanja
- pravocrtnom vođenju žica u sidra i spojeve, kako to zahtijeva proizvođač
- stručnom sastavljanju
- prijevozu; kod dizanja s pomoću kрана treba izbjegavati izvijanje ili savijanje.

7.5 Ugradba natega

Kod ugradbe natega treba uzeti u obzir ove kriterije:

- zaštitni sloj i razmake natega
- dopuštena odstupanja položaja natega, spojki i sidara
- laganu ugradbu betona.

Dopuštena odstupanja položaja natega u odnosu na projektirani položaj

Ako visina prednapetog elementa označena sa "d" iznosi:

za $d < 200$ mm :

- za pojedinačne žice koje su dio užeta
 - za pojedinačne natege i užad:
- $$\Delta l = \pm 0,025 d$$

za $d > 200$ mm:

- za pojedinačne žice koje su dio užeta
 - za pojedinačne natege:
- $$\Delta l = \pm 0,025 d \text{ ili } \Delta l = \pm 20 \text{ mm}$$

- za užad:

$$\Delta l = \pm 0,04 d \text{ ili } \Delta l = \pm 30 \text{ mm}$$

Dopušteno je odrediti također i druga odstupanja od onih koja su gore navedena, ako se dokaže da ona ne smanjuju zahtijevanu razinu sigurnosti.

- Pričvršćenje cijevi prije betoniranja
- Odzračnici
- Zaštita od prodora vode i mraza te nečistoća

7.6 Napinjanje natega

Napinjanje se mora izvoditi prema unaprijed utvrđenom programu napinjanja.

Na gradilištu ili u tvornici moraju biti predložene pismene upute o postupku napinjanja.

Osoblje zaduženo za prednapinjanje mora biti stručno i odgovarajuće osposobljeno.

Za vrijeme prednapinjanja treba se pridržavati prikladnih mjera sigurnosti koje treba propisati inženjer.

A) Prethodno napinjanje

Upute za prethodno napinjanje trebaju sadržavati ove podatke:

- o nategama i uređajima za napinjanje
- redoslijed po kojem se moraju napinjati pojedine natega
- tlak u preši ili silu u preši koja se ne smije prekoračiti
- konačni tlak ili silu koja se očekuje na preši na kraju postupka napinjanja
- najveće dopušteno naprezanje natega i prokliznuće na sidrima
- način i redoslijed kojim treba otpuštati pojedine natega
- čvrstoću betona u trenutku otpuštanja, koju bi trebalo provjeriti
- prikladnost i uporabljivost višekratno rabljenih dijelova sidra.

B) Naknadno napinjanje

Projektant treba odrediti:

- postupak napinjanja
- vrstu i kakvoću čelika za prednapinjanje
- broj šipki i žica u pojedinim nategama
- čvrstoću betona, koja mora biti postignuta prije početka napinjanja
- redoslijed kojim se natega moraju napinjati te mjesta napinjanja
- po potrebi trenutak otpuštanja skele za vrijeme napinjanja
- silu napinjanja koja se mora postići na preši
- zahtijevano produljenje natega prema projektu
- najveće prokliznuće
- broj, vrstu i položaj spojki.

Nadzorni inženjer pri postupku napinjanja treba zabilježiti:

- vrstu primijenjenih uređaja za napinjanje, koji moraju biti umjereni
- na gradilištu izmjerena izduljenja natega
- izmjereni tlak na preši
- izmjereno prokliznuće
- tlak injektiranja morta
- odstupanja izmjerenih vrijednosti od projektiranih
- postignutu čvrstoću betona
- redoslijed kojim su natega napinjane
- po potrebi vrijeme skidanja oplata.

7.7 Mjerenje naprezanja u žici za prednapinjanje

Veza naprezanja, frekvencije titranja i raspona napregnute žice koja slobodno titra dana je jednadžbom:

$$\sigma_P = 4 (\gamma/g) f^2 L^2 \quad \text{Savarov zakon}$$

$$\gamma = 78500 \text{ N/m}^3 = 78,5 \text{ kN/m}^3 \text{ (za čelik)}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L \quad u \text{ (m)}$$

$$f \quad u \text{ (1/s) ili } u \text{ (Hz)}$$

$$\sigma_P = (4 \cdot 78,50 / 9,81) \cdot f^2 L^2 = 32 f^2 L^2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Primjer:

Za $L=0,5 \text{ m}$ i $f=440 \text{ Hz}$

$$\sigma_P = 1548 \text{ N/mm}^2$$

Postupak ispitivanja: za žicu fiksirati "ležajeve". Zatirati ju udarcem čekićem. Mjeriti frekvenciju.

Zavisnost frekvencije o načinu naliježanja na ležajeve. Utjecaj susjednih (kraćih) raspona.

Instrument: frekvencimetar

7.8 Injektiranje natega

Natega u cijevima, spojke i sidra moraju biti zaštićeni od korozije.

Ako se prekorači dopušteno vrijeme između napinjanja i injektiranja, natega se moraju zaštititi do injektiranja.

Za pripremu i provedbu injektiranja moraju postojati upute i program.

Ako nastupi mraz, treba poduzeti prikladne mjere koje će spriječiti smrzavanje vode u cijevima koje još nisu injektirane. Nakon razdoblja mraza moraju se cijevi prije injektiranja odlediti.

Korozijska zaštita natega - alkalnost, potpuna obavijenost

7.9 Upute za gradilište

Prije injektiranja gradilište treba osigurati:

- uređaje spremne za pogon (uključujući i jednu rezervnu pumpu za injektiranje kako bi se izbjegli prekidi injektiranja)
- stalne zalihe vode i zraka pod tlakom
- zalihe potrebnih gradiva (nešto više nego što je potrebno, da se uzme u obzir količina istekla na odzračnicima)
- cijevi bez škodljivih tvari (npr. vode, leda)
- pripremljene i označene odzračnike
- pripravnost za uzimanje uzoraka za kontrolno ispitivanje gradiva za injektiranje
- mogućnost pokusnog injektiranja na odabranim cijevima, u slučaju sumnje
- osigurano nesmetano tečenje morta.

Program injektiranja mora sadržavati ove odredbe:

- svojstva uređaja i gradiva za injektiranje
- redoslijed ispuhivanja i pranja
- redoslijed injektiranja i ispitivanja morta za injektiranje (sposobnost tečenja, segregacija)
- količinu morta za injektiranje pripremljenu za svako injektiranje
- prethodnu brigu o održavanju čistoće cijevi
- uputu za slučaj smetnje u pogonu i škodljivih vremenskih uvjeta
- u slučaju potrebe dodatno injektiranje.

8 SUSTAVI SIDRENJA NATEGA

Da bi pojedini sustav prednapinjanja bio potpun potrebno je da ima:

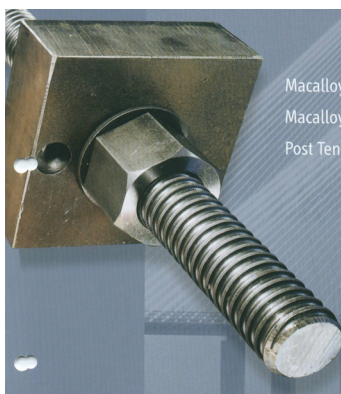
- dovoljan izbor različitih veličina natega za potreban raspon sila
- dobru prolaznost natega kroz cijevi
- mogućnost nastavljanja natega
- mogućnost naknadnog napinjanja
- mogućnost lake nabavke dijelova
- uvjete napinjanja koji su jednostavni, ne iziskuju puno vremena i previše precizan rad

Navodi se nekoliko najčešćih sustava sidrenja natega:

- 1 Sidrenje s pomoću navoja
- 2 Sidrenje s pomoću klina
- 3 Sidrenje s pomoću hladnooblikovanih krajeva žica
- 4 Sidrenje s pomoću omče
- 5 Sidrenje injektiranjem
- 6 Sidrenje kraja koji se ne napinje
- 7 Sidrenje pri prethodnom prednapinjanju

8.1 Sidrenje s pomoću navoja

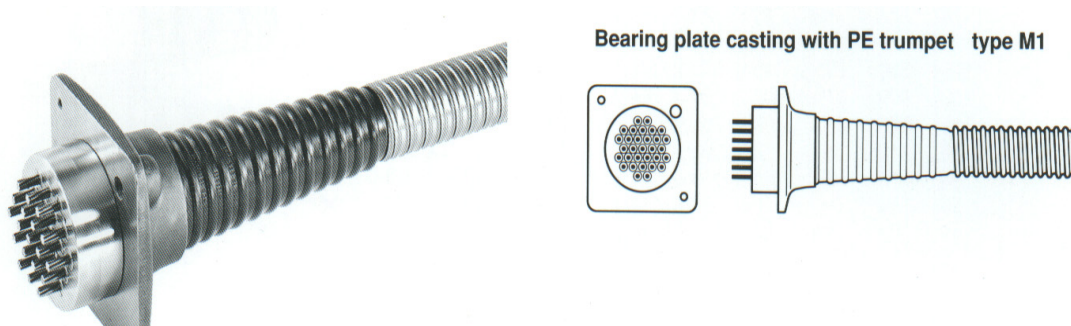
Pogodno za napinjanje štapova (sustav Dywidag). Za $\phi 10-50$. Nema nareza već je šipka izrađena s navojem u procesu valjanja šipke



Slika 8.1 - Sidrenje štapa s pomoću navoja

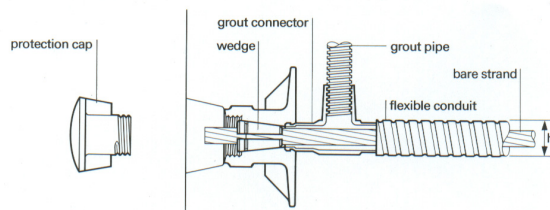
8.2 Sidrenje s pomoću klina

Najčešće upotrebljavani sustav za napinjanje natega od usporednih žica. Klin prenosi silu trenjem na svoje bočne površine, a zaklinjenje se postiže ostvarenim poprečnim tlakom na klinu. Tipično za taj sustav je proklizavanje žice sve do trenutka dok se klin dovoljno ne zaklini. Zaklinjavanje može biti ručno (udaranjem po klinu) ili hidraulično (gdje je proklizavanje neznatno). Klin se može nalaziti s unutarnje strane natega (najčešće) ili s vanjske strane natega, u kojem slučaju se unutar natega nalazi cilindrični uložak. Natega se može sastojati od više komada užadi ili od samo jednog užeta.

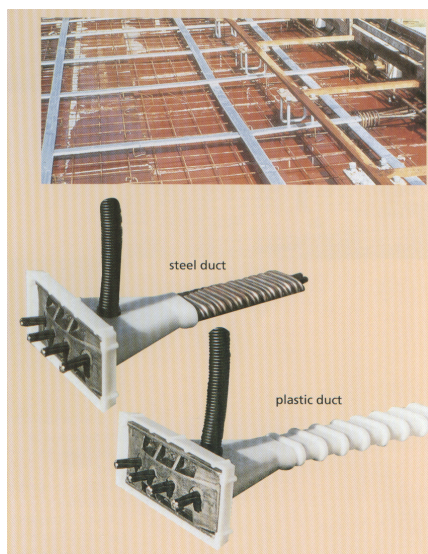


Slika 8.2 - Sidrenje natega od više užadi s pomoću klinova

Bonded Tendon



Slika 8.3 - Sidrenje natege od jednog užeta s pomoću klinova



Slika 8.4 - Plosnate natege sa sidrenim pločama, odzračnikom i cijevi

8.3 Sidrenje s pomoću hladno oblikovanih krajeva žica

To je sustav BBRV (prema autorima Birkenmaier-Brandestini-Roš-Vogt). Kraj svake žice provuče se kroz maticu koja ima narez izvana i iznutra. Na kraju svake žice hladnim postupkom posebnim se uređajem izradi “glavica” koja drži kraj žice na matici. Vlačnom šipkom (vretenom) uvijenom u maticu poteže se matica hidrauličnom prešom do željene sile (ili pomaka) nakon čega se s pomoću vanjske matice natega osloni na podložnu ploču koja je u kontaktu s betonom.

8.4 Sidrenje s pomoću omče

Žica natege obavije se oko zakrivljenoga betonskog bloka izvan elementa koji se prednapinje u obliku omče. Između bloka i elementa postavljene su hidrauličke preše koje napinju nategu. Moguće je i da natega završava u obliku dvostuke omče u krutom bloku. Napinjanje je hidrauličkim prešama.

Međuprostor između bloka i elementa zapuni se krutim materijalom (čelične ploče ili AB blokovi).

8.5 Sidrenje injektiranjem

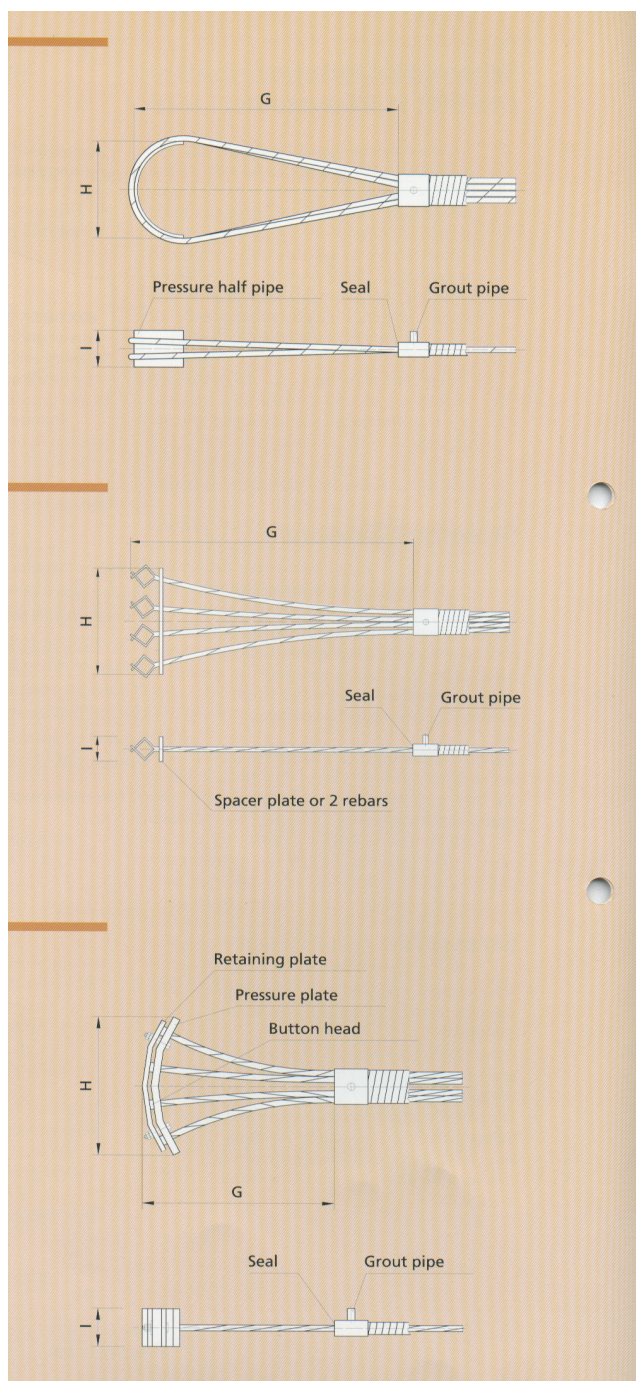
Kod nekih se sustava nakon injektiranja cijevi oko natega mogu ukloniti pojedini elementi sidra i ponovno upotrijebiti. U tom se slučaju sila prednapinjanja na beton prenosi kroz otvrdnulu injekcijsku smjesu na cijev i dalje na beton.

8.6 Sidrenje kraja koji se ne napinje

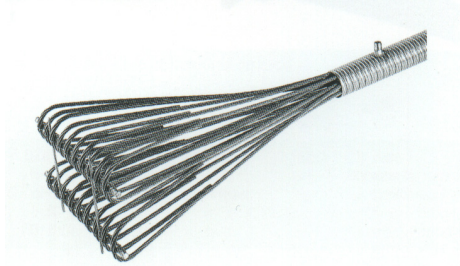
Žice natege mogu se raširiti, zaviti, a dijelovi užeta rasplesiti te cijelu silu prenijeti trenjem i prionljivošću na beton. Ugrađene spirale omogućuju preuzimanje poprečnih sila cijepanja. Sidrena ploča, ako je potrebna može također ostati ubetonirana.

8.7 Sidrenje pri prethodnom prednapinjanju

Hoyerov učinak: tanka žica presječena izvan betona želi se “uvući”. Pritom povećava promjer (svega nekoliko tisućinki mm) Sila se na beton prenosi trenjem i prionljivošću



Slika 8.5 - Sidrenje plosnatih natega s pomoću omče, hladnim deformiranjem kraja i rasplitanjem užeta



Slika 8.6 - Sidrenje kraja natege koji se ne napinje omčom

9 PREDNAPETE KONSTRUKCIJE

9.1 Kontinuirani nosači

Razlika između prednapetog statički određenog i statički neodređenog nosača.

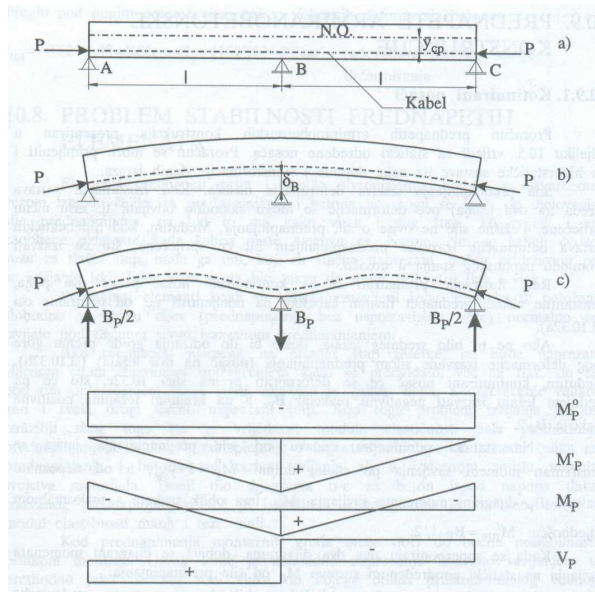
- Kod statički određenog - sila prednapinjanja ne mijenja ležajne reakcije već ga deformira nosač.
- Kod statički neodređenog - sila prednapinjanja uzrokuje promjenu ležajnih reakcija – dolazi do odizanja na srednjem ležaju, pa je potrebno dodatnom reakcijom na unutarnjem ležaju dovesti nosač u željeni položaj.

Superponiraju se dva momentna dijagrama – od sile prednapinjanja P koja daje $M_p^0 = P \cdot y_{cp}$ i dodatne reakcije u “ B_p ” koja daje $M_p' = B_p \ell/2$. Superpozicijom dvaju momentnih dijagrama dobiva se resultantni dijagram M_p . Od sile B_p na ležajima nastaju dodatne reakcije $B_p/2$ odnosno dodatni dijagram poprečnih sila V_p .

Dodatni se moment može regulirati krivolinijskim vođenjem natege.

Konkordantno vođenje natege = ako je dodatna reakcija u $B=0$. Vođenje natege je krivocrtno.

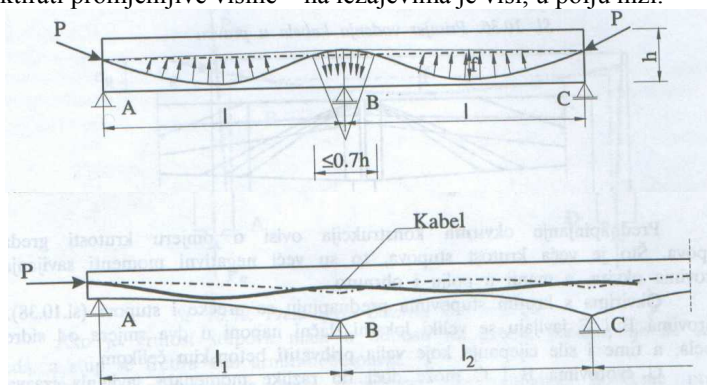
Mana: natega se ne iskorištava u cijelosti jer se ne iskorištava puna visina nosača za preuzimanje vanjskih opterećenja.



Slika 9.1 - Prednapinjanje kontinuiranog nosača

Preporuka za proračun:

- natege voditi uvijek što niže zbog bolje iskorištenja ekscentričnosti
- kontinuirani nosač projektirati promjenljive visine – na ležajevima je viši, u polju niži.



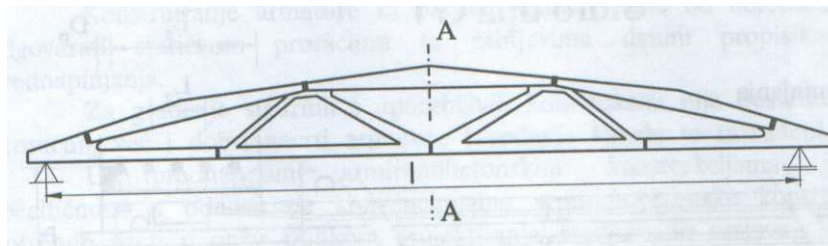
Slika 9.2 - Vođenje natege kod kontinuiranog nosača

9.2 Rešetkasti nosači

Načini izvedbe:

- Donji pojas prednapet – izveden u komadu, armatura dijagonala sidrena u pojas
- Pojedinačni štapovi predgotovljeni, zalijevanje spojeva na gradilištu i naknadno prednapinjanje
- Pojedinačni trokutovi rešetke predgotovljeni, spojeni na gradilištu i prednapeti.

Proračun treba provesti za sve faze izrade, prijevoza i montaže.



Slika 9.3 - Prednapeti rešetkasti kosač

9.3 Cijevi

Kanalizacijske cijevi velikih promjera.

Strojno napinjanje omotanom spiralom

Sprečavanje pukotina – procurivanje, trajnost

Autoterapeutsko svojstvo prednapinjanja

Izvanredne situacije – povećani tlak

Brtvljenje spojeva cijevi

Kanali za navodnjavanje - predgotovljeni elementi u obliku polucijevi na čaškastim stupovima.

9.4 Okrugli spremnici

Primjena: voda, ulje, nafta, benzin, kemikalije, sol, žitarice

Zahtjev: vodonepropusnost

Oblik dijagrama momenata savijanja u stijenci - uz podnicu je najveći

Formule za količinu istjecanja ako je poznata širina pukotine

U zidu spremnika: membranske sile od tlaka tekućine. Vlačno naprezanje zbraja se sa tlačnim od prednapinjanja.

Vlačna sila u kružnoj ljuski prema membranskoj teoriji:

$$F_s = \gamma r h \quad (\text{kN/m})$$

γ - obujamska težina tekućine

r - polumjer ljuske

h - visina stupca mjereno odozgor

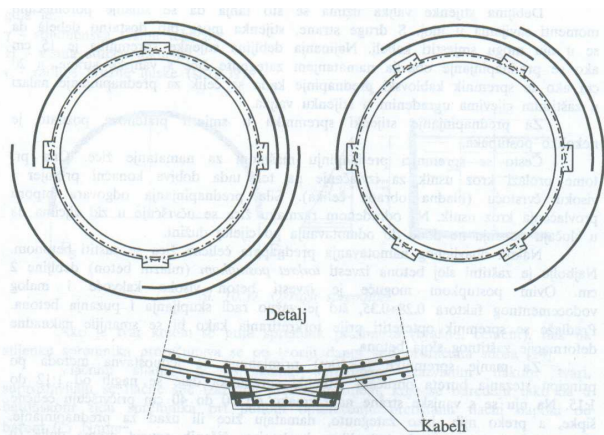
Spriječene i/ili slobodne deformacija na spoju podne ploče i stijenske spremnika: rješenje je razdjelnica.

Načini prednapinjanja:

- natege smještene u debljini stijenske $d_{\min} > 20$ cm – tri po opsegu – prijeklopi natega

natege smještene izvana $d_{\min} > 15$ cm: stroj za namatanje; učvršćenje u zid na više mjesta. Zaštita žica torkretbetonom.

Za manje promjere ($D < 20$ m): poput obruča na buradi: namotane žice nabijaju se prema dolje čekićem preko vertikalnih šipke - klizača



Slika 9.4 - Prednapinjanje spremnika

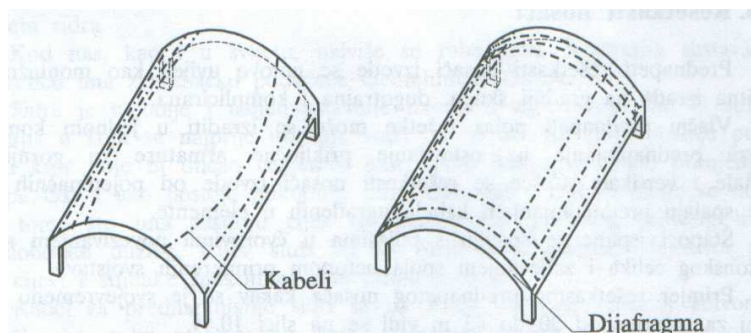
9.5 Ljuske od prednapetog betona

Cilindrične ljuske - Poliedarske ljuske - Peroni

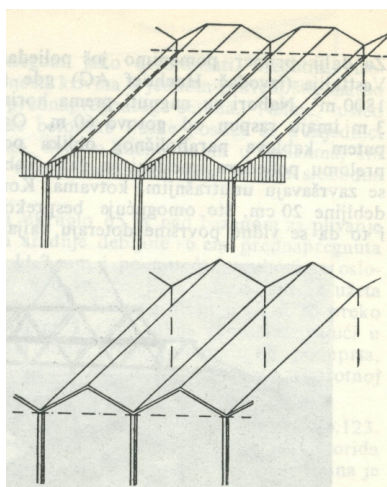
Pilasti (shed) krovovi

Kupole - prednapinjanje donjeg vlačnog prstena.

Natege treba da slijede trajektorije vlačnih naprezanja. Postavljaju se u vlačno područje i vode po zakrivljenim plohama.

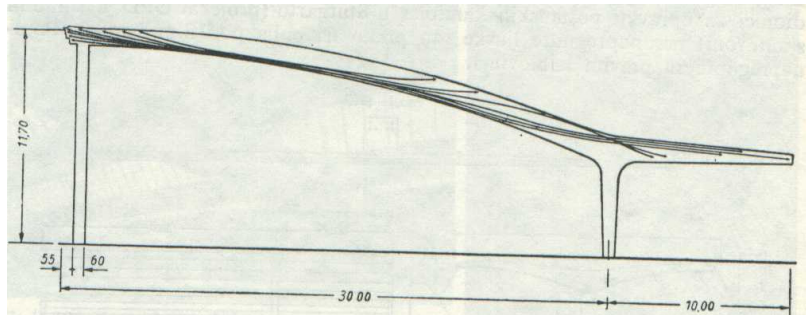


Slika 9.5 - Prednapeta valjkasta ljuska



Slika 9.6 - Prednapete poliedarske ljuske

9.6 Nosači velikih raspona



Slika 9.7 - Glavni nosač izložbene hale raspona 30 m

9.7 Željeznički pragovi

Oblici: trapezni, pravokutni
Opterećenje: od kolosijeka; od prednapinjanja
Štap na elastičnoj podlozi
Zamor
Kvaliteta betona: B55, B60

9.8 Mostovi od prednapetog betona

Vidi u predmetu *Mostovi*.

10 IZVANA PREDNAPETE KONSTRUKCIJE

10.1 Primjena

a) stalne natege – injektiranje cementnim mortom

b) zamjenjive natege

- injektiranje cementnim mortom;
- injektiranje mekanim smjesama (smjesa ulja i sapuna). Temperatura injektiranja ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – veći tlak ili 90°C – manji tlak);
- galvanizirane natege – nema zaštitne cijevi;
- natege od pojedinačno zaštićenih žica – injektiranje prostora između pojedinačnih žica;
- provjetravanje cijevi i držanje niskog postotka vlage $<40\%\text{RH}$ računalom upravljanim postupcima zbog sprečavanja korozije.

c) privremene natege



Slika 10.1 -Vanjske natege u sandučastom mostu

10.2 Tehnika zamjene natega

prostor za uređaje za prednapinjanje

moгуćnost pristupa uzduж natega

rasvjeta i prozračivanje komora građevine

unos – iznos starih i novih natega kroz posebne otvore

Otpuštanje prije rezanja – hidraulički; zagrijavanjem; uklanjanjem cijevi i otucanjem cementnog morta

10.3 Konstrukcijske pojedinosti

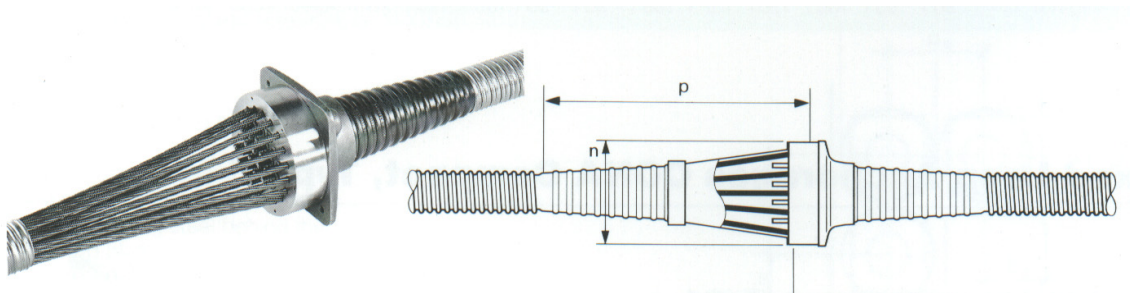
Pri proračunu izvana prednapetih konstrukcija vrijede sva načela dana za obične prednapete konstrukcije.

Osjetljivost vanjskih natega na požar

Skretnici

Spojke

Sidra



Slika 10.2 - Spojka natega od više užadi

10.4 Europska norma za konstrukcije sa slobodnim i vanjskim nategama (ENV 1992-1-5:1994)

Norma obrađuje dvije različite tehnologije:

- prednapinjanje manjim nategama, općenito od jednog užeta, postavljenog u plastičnu cijev maloga promjera u beton
- prednapinjanje većim nategama, postavljenim izvan betona, općenito u sandučastu nosaču ili između rebara konstrukcije koja se sastoji od više nosača.

Prva se tehnologija obično rabi za stropove zgrada, dok se druga više rabi pri građenju mostova. Definicije iz područja ove norme:

Skretnik: Uređaj oko kojeg se natega savija i gdje ona unosi radijalnu silu u konstrukciju;

Vanjska natega: Naknadno napeta natega postavljena izvan betonskoga presjeka, ali unutar obrisa betonske konstrukcije, povezana s konstrukcijom jedino sidrima i skretnicima;

Unutarnja slobodna natega: Naknadno napeta natega unutar betonskog presjeka napravljena od zaštićenog užeta ili čelične šipke povezana s konstrukcijom samo sidrima;

Zaštićena natega: Mašću zaliveno uže postavljeno u plastičnoj cijevi u kojoj se može slobodno pomicati u uzdužnom smjeru.

10.5 Posebne odredbe za cijevi vanjskih natega

Ako se rabi cementno injektiranje, cijev mora moći preuzeti nazivni unutarnji tlak od $[1,0] \text{ N/mm}^2$. Može se zahtijevati i otpornost na veći tlak ako vođenje natega zahtijeva veći injekcijski tlak.

Ako se rabi cementna smjesa, unutarnji promjer cijevi mora biti najmanje $1,6 \sqrt{A_p}$, gdje je A_p nazivni presjek natega. Ova je odredba identična ranije navedenom uvjetu da ploština cijevi mora biti jednaka dvostrukoj ploštini presjeka natega.

Ako nedostaju podaci u tehničkim uvjetima, debljina "t" čeličnih cijevi mora biti u skladu s većom vrijednosti od:

$$t \geq \phi / 50$$

$$t \geq 1,5 \text{ mm}$$

gdje ϕ označava vanjski promjer.

U nedostatku podataka u potvrdi o prikladnosti debljina "t" cijevi od polietilena visoke gustoće mora biti u skladu s većom vrijednosti od:

$$t \geq \phi / 16$$

$$t \geq 5 \text{ mm}$$

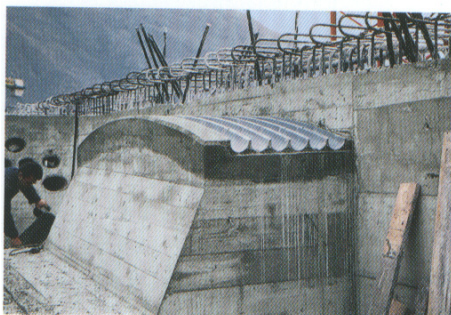
10.6 Posebne odredbe za skretnike

Skretnik mora zadovoljavati ove zahtjeve:

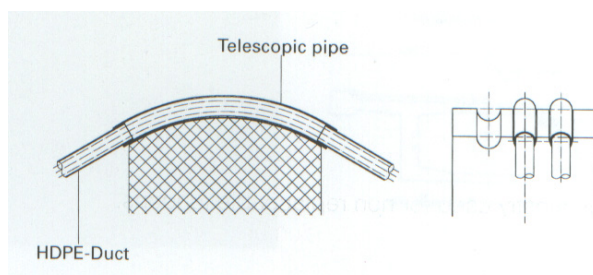
- mora preuzeti uzdužne i poprečne sile kojima ga opterećuje natega te ih mora prenijeti na konstrukciju
- mora osigurati vezu između dvaju ravnih odsječaka natega bez neprihvatljiva kutnog diskontinuiteta.

Propisuje se najmanji polumjer natega na skretniku (2,5 – 5,0 m)

U području skretanja, cijevi mogu biti izrađene od čelika ili polietilena visoke gustoće, no u slučaju polietilenskih cijevi mora biti dokazano da one mogu podnijeti radijalni tlak i uzdužne pomake natega bez oštećenja i bez utjecaja na njihovo ispravno funkcioniranje. Ako su cijevi od čelika, treba ih prethodno saviti na polumjer predviđen u projektu.



Slika 10.3 - Skretnik za više natega oblikovan kao sedlo



Slika 10.4 - Skretnik u obliku sedla

10.7 Gubici sile prednapinjanja

Za natege izvan betona koje se sastoje od paralelnih žica ili užadi može se zanemariti gubitak prednapinjanja uzrokovan neželjenim kutnim skretanjem (netočnost natege).

U nedostatku točnijih podataka, za vanjske natege mogu se za koeficijent trenja μ uzeti vrijednosti iz tablice 10.1.

Tablica 10.1 Koeficijent trenja μ za razne vrste slobodnih natega

Koeficijent trenja μ	Čelična cijev	Polietilenska cijev
Podmazana užad	0,18	0,12
Podmazane žice	0,16	0,10
Nepodmazana užad	0,25	0,14
Nepodmazane žice	0,24	0,12

Za unutarnje pojedinačno uže obloženo mašću u nedostatku točnijih podataka za koeficijent trenja μ između užadi i cijevi te neželjeni kut skretanja φ_1 , mogu se uzeti vrijednosti:

$$\mu = [0,05] \quad \varphi_1 = [0,06] \text{ rad/m};$$

10.8 Posebne odredbe za granična stanja uporabljivosti

a) Osim kombinacije djelovanja definiranih u ENV 1992-1-1, mora se uzeti u obzir **temperaturna razlika** od $[\pm 10^\circ]$ K između vanjskih natega i betonske konstrukcije, a ako su natege izložene i izravnom zračenju sunca, potrebno je posebno razmatranje.

b) U elementima s nearmiranim spojevima prednapetima izvana, u spojevima **nisu dopuštena** pri rijetkoj kombinaciji djelovanja naprezanja u betonu $\sigma_c > [0]$ (tj. prekoračenje graničnog stanja **rastlačenja**). Kod te provjere za silu prednapinjanja treba uzeti srednju vrijednost P_m .

c) Vanjske natege moraju biti prikladno zaštićene od fizičkog napada ili **vandalizma**.

d) Prikladnim uređajima moraju se spriječiti kritične **poprečne vibracije** vanjskih natega uzrokovane prometom, vjetrom ili drugim uzrokom.

11 DJELOMIČNO PREDNAPETE KONSTRUKCIJE

Definicija: Djelomično prednapete konstrukcije su one kod kojih se za najnepovoljniju kombinaciju opterećenja dopuštaju pukotine ograničene širine. Npr. za G+Q element je raspucan, za G je potpuno prednapet pa mu je cijeli presjek stlačen.

Stupanj prednapinjanja izražava se omjerom momenta rastlačenja (dekompresije) M_{dek} i ukupnog momenta $M_{G+\Delta G+Q}$

$$k = M_{dek} / M_{G+\Delta G+Q}$$

za $k=0$ element nije prednapet (obična AB konstrukcija)

za $k=1,0$ element je potpuno prednapet

Kod djelomično prednapete konstrukcije povoljne vrijednosti omjera k kreću se od 0,4 do 0,8

Moment rastlačenja M_{dek} je moment izazvan vanjskim djelovanjem koji djeluje u smjeru suprotnom od momenta prouzročenog silom prednapinjanja i poništava tlačno naprezanje prouzročeno tom silom.

Najmanja ukupna ploština betonskog čelika i čelika za prednapinjanja dobiva se za $k=0,6$. tj. $(A_p + A_s) = \min$

Djelomično prednapete konstrukcije su ekonomične u uvjetima vrlo blagog agresivnog okoliša jer se pukotine u vlačnom području otvaraju samo u nekim slučajevima opterećenja, dok je veći dio uporabnog vijeka konstrukcija u cijelosti prednapeta.

PREDNAPETI BETON					ARMIRANI BETON	
potpuno prednapeta konstrukcija			djelomično prednapeta konstrukcija			
o			o		o	
k=1,0			1 > k > 0		k=0	
o			o		o	
f_{cd}	tlak	← 0 →	vlak	f_{ctd}		
				*		**
		1,0	(0,8)	0,4	0,0	
* pojava prve pukotine						
** granična širina pukotine						

Slika 11.1 - Potpuno i djelomično prednapete konstrukcije

12 POSEBNE PRIMJENE PREDNAPINJANJA

12.1 Posebne primjene vanjskih natega

- dodatno armiranje oštećenih konstrukcija ili konstrukcija nedovoljne nosivosti – pojačanje mostova pri prijevozu 400 tona teškog kontejnera za NE Krško, kružni spremnici i silosi, ako dolazi do promjena namjene
- rekonstrukcija konstrukcije čija je armatura oštećena korozijom
- upotreba kod čeličnih, drvenih i zidanih konstrukcija (zvonici u Dubrovniku; drveni nosači velikih raspona)

12.2 Posebne primjene prednapinjanja

Prednapinjanje stropnih konstrukcija zbog manje konstrukcijske visine (nema greda)

Poprečno prednapinjanje kolničkih ploča mostova (tanje ploče)

Prednapinjanje u geotehnici

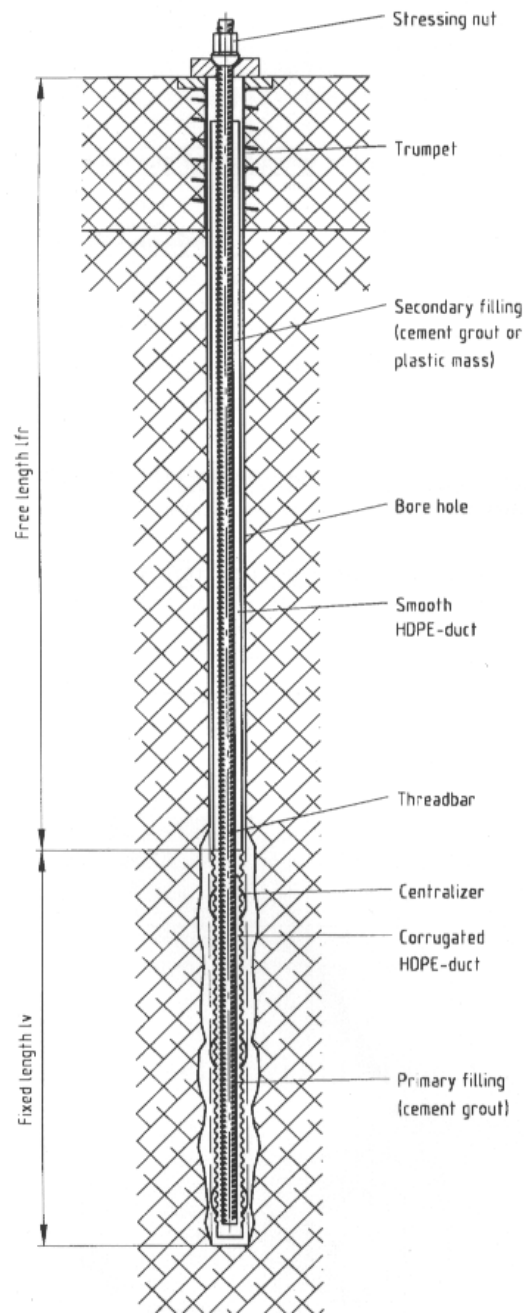
- razlike u nazivlju između prednapetog betona i geotehnike
Ono što se u PB naziva natega u geotehnici se naziva geotehničko sidro
Ono što se u PB naziva sidro u geotehnici se naziva glava sidra
- aktivna (prednapeta) i pasivna (nenapeta) geotehnička sidra
- elementi sidra: glava sidra s maticom i podložnom pločom
 bušotina
 zaštitna cijev
 slobodna dionica sidra – slobodna duljina natega
 sidrišna dionica – duljina sidrenja
 injekcijsko tijelo
- raspodjela naprezanja prijanjanja uzduž duljine sidrenja
- gubici prednaprezanja zbog deformabilnosti medija
- koeficijenti sigurnosti $F_s = 1,5 - 2,0$: iskustveno; dokaz: pokusno opterećenja sidra do sloma (izvlačenja)
- duljine sidrenja – u stijeni; u šljunku; u glinovitim tlima

Tri mogućnosti dostizanja granične nosivosti (popuštanja) sidra: na čeliku, po oplošju sidro-injekcijska smjesa; po oplošju inj. smjesa – stijena.

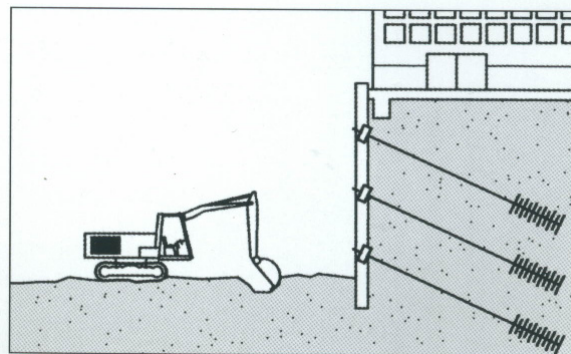
Primjene:

- a) sidrenje **građevnih jama** (žmurje, izvedbe u gradovima)
- b) sidrenje **potpornih zidova i prirodnih** (potencijalno labilnih !) kosina
- c) sidrenje zbog osiguranja od uzgona pri visokoj podzemnoj vodi u rahlim tlima: **brodske prevodnice, tuneli pod rijekama i morem, slapišta i brzotoci uz brane**
- d) sidrenje konstrukcija s velikim vlačnim silama (žičare, dalekovodni stupovi, stupovi off-shore platforma)
- e) sidrenje pri konzolnoj izvedbi grednih i lučnih **mostova**
- f) sidrenje **gravitacijskih brana** pri njihovu povišenju ili osiguranju na nova opterećenja (potres)
- g) stabilizacija **pokosa i kliznih ploha**
- h) sidrenje **svodova tunela**
- privremena stabilizacija stijena u fazi iskopa

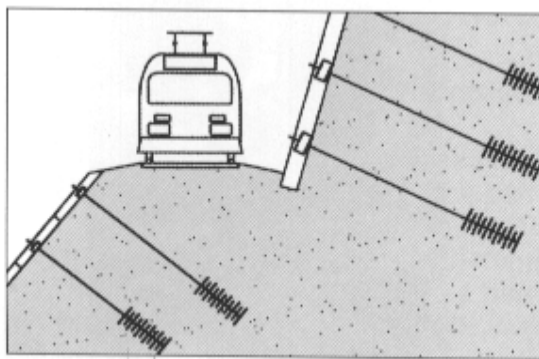
- trajna stabilizacija nedovoljno stabilnih dijelova tunela



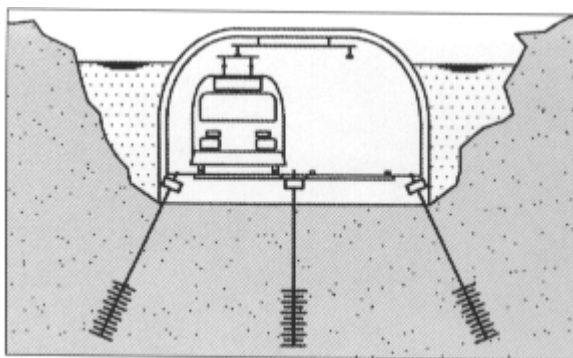
Slika 12.1 - Geotehničko sidro, prednapeti štap



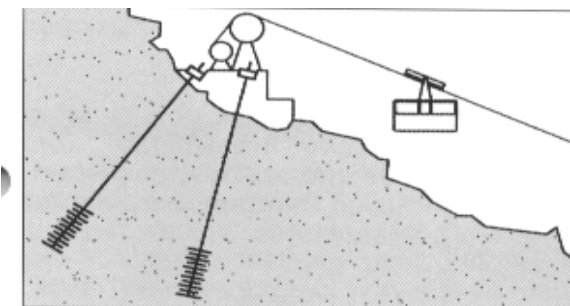
Slika 12.2 - Prednapinjanjem se pridržava žmurje



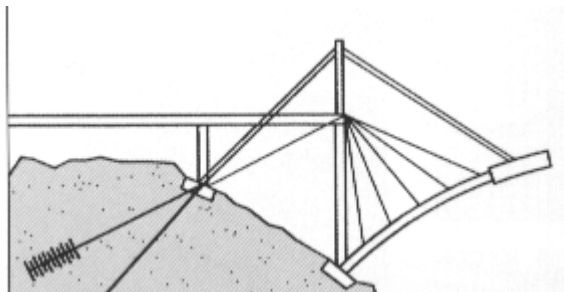
Slika 12.3 - Prednapinjanjem se pridržava potporni zid



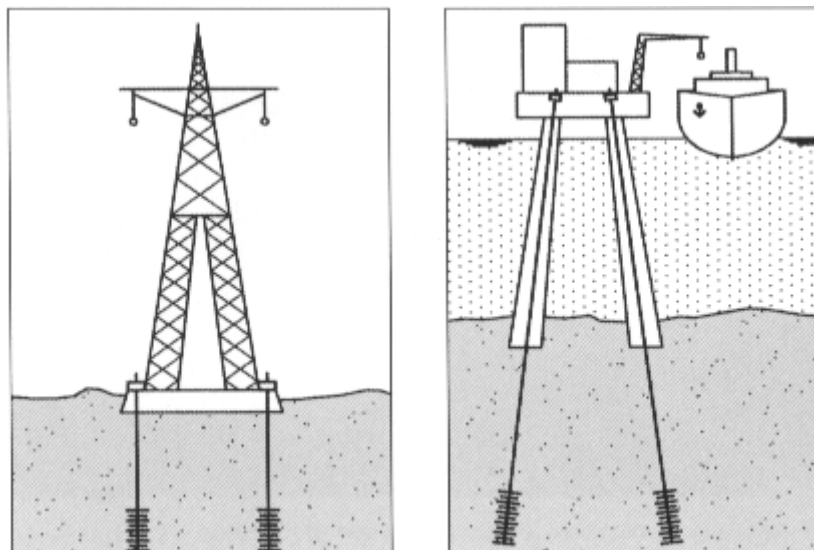
Slika 12.4 - Prednapinjanjem se tunel osigurava protiv uzgona



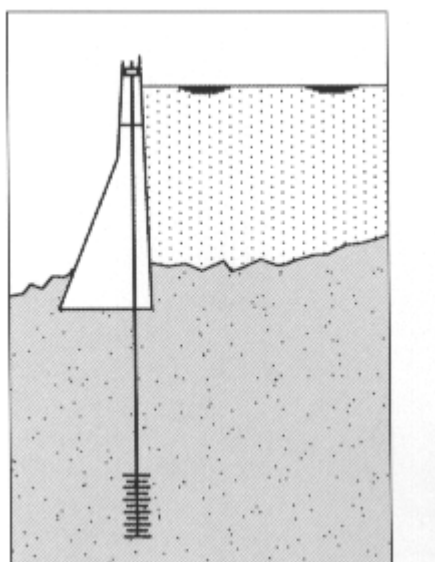
Slika 12. 5 - Prednapinjanjem se vlačne sile prenose u nosive dijelove brdskog masiva



Slike 12.6 - Prednapinjanjem se izvede mostovi konzolnim postupkom



Slika 12.7 - Preuzimanje vlačnih sila prednapinjanjem u tlo



Slika 12. 8 - Prednapinjanje brane

13 ZAMOR PREDNAPETIH KONSTRUKCIJA

Broj oscilacija za dokazivanje otpornosti na zamor je $N=2 \cdot 10^6$

Potpuno prednapinjanje – bolje: presjek je neprekidno tlačno naprezan

Djelomično prednapinjanje – lošije: presjek je naprezan naizmjenično tlačno i vlačno; izmjenično otvaranje i zatvaranje pukotina prouzročuje nepovratno oštećivanje u vlačnom području.

Pri projektiranju treba razmotriti važnost problema zamora.

Analizirati mogući broj oscilacija i pripadajuće razine naprezanja u uporabnom vijeku konstrukcije.

Željeznički mostovi – cestovni mostovi

Pojave pri zamoru:

- gubitak prionljivosti kod prethodno napetih elemenata
- popuštanje prednapinjanja
- raspucavanje
- povećanje progiba
- slom preko čelika u obliku krhkog sloma čelika

Gornja granica opterećenja zamora je oko 60% statičkog opterećenja

Zamor betonskih konstrukcija u europskim normama još obrađen iako je to prije 10 godina bilo predviđeno.

14 PONAŠANJE PREDNAPETOG BETONA U POŽARU

14.1 Nosivi elementi pri djelovanju požara

Normna krivulja požara: 1000 °C 60 minuta.

pri 200 °C čelik i beton još imaju početna svojstva

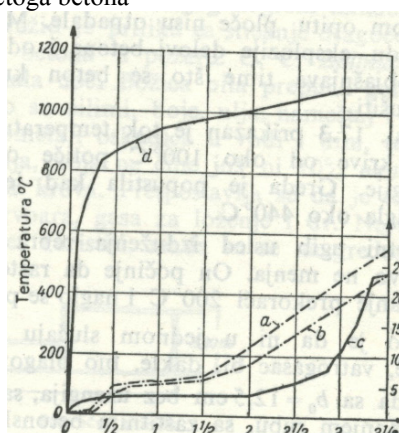
pri 600 °C čelik u cijelosti gubi čvrstoću

pri 800 °C beton u cijelosti gubi čvrstoću

Zaštitni sloj betona sprečava napredovanje topline požara do čelika. Slobodna voda u betonu pri 100 °C isparava. Tlak pare uzrokuje raspucavanje – toplina ubrzano stiže do čelika.

Otpornost prednapetog betona pri djelovanju požara postiže se definiranjem debljine zaštitnog sloja u zavisnosti od zahtijevane požarne otpornosti.

Rezultati ispitivanja greda od prednapetoga betona



a) i b) temperatura čelika za prednapinjanje, c) linija progiba u cm, d) linija porasta temperature

Slika 14.1 - Ponašanje prednapete grede pri požaru. Na osi x - vrijeme u satima

14.2 Beton (prema ENV 1992-1-2)

Umanjenje karakteristične tlačne čvrstoće betona kao funkcije temperature Θ određeno je koeficijentom $k_c(\Theta)$ prema jednadžbi:

$$f_{ck}(\Theta) = k_c(\Theta) f_{ck}(20^\circ\text{C})$$

U pomanjkanju točnijih podataka, za beton s kremenim agregatom primjenjuju se niže navedene veličine za $k_c(\Theta)$ (vidi sliku 14.2). Te su vrijednosti na strani sigurnosti za druge vrste betona.

$$\begin{aligned} k_c(\Theta) &= 1,0 && \text{za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C} \\ k_c(\Theta) &= (1600 - \Theta) / 1500 && \text{za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 400^\circ\text{C} \\ k_c(\Theta) &= (900 - \Theta) / 625 && \text{za } 400^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 900^\circ\text{C} \\ k_c(\Theta) &= 0 && \text{za } 900^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

14.3 Čelik (prema ENV 1992-1-2)

Umanjenje karakteristične čvrstoće betonskoga čelika kao funkcije temperature Θ određeno je koeficijentom $k_s(\Theta)$ prema jednadžbi:

$$f_{yk}(\Theta) = k_s(\Theta) f_{yk}(20^\circ\text{C})$$

Umanjenje karakteristične čvrstoće čelika za prednapinjanje kao funkcije temperature Θ određeno je koeficijentom $k_p(\Theta)$ prema jednadžbi:

$$f_{pk}(\Theta) = k_p(\Theta) f_{pk}(20^\circ\text{C})$$

Za vlačnu armaturu greda i ploča, gdje je $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$, umanjenoje čvrstoće može se uzeti kako je niže navedeno (vidi sliku 14.3, krivulja 1).

$$\begin{aligned} k_s(\Theta) &= 1,0 & \text{za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 350^\circ\text{C} \\ k_s(\Theta) &= (6650 - 9\Theta) / 3500 & \text{za } 350^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 700^\circ\text{C} \\ k_s(\Theta) &= (1200 - \Theta) / 5000 & \text{za } 700^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

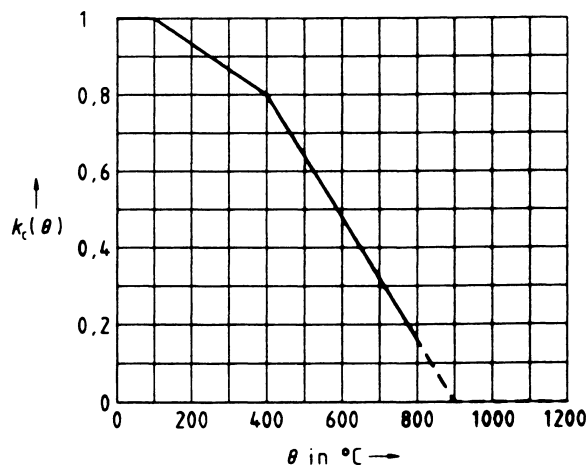
Za tlačnu armaturu u stupovima i tlačnim područjima greda i ploča mora se uzeti umanjenoje čvrstoće pri deformaciji od 0,2 %, kako je niže navedeno (vidi sliku 14.3, krivulja 2). To vrijedi i za vlačnu armaturu ako je $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$, kad se rabe pojednostavnjeni ili opći proračunski postupci.

$$\begin{aligned} k_s(\Theta) &= 1,0 & \text{za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C} \\ k_s(\Theta) &= (1100 - \Theta) / 1000 & \text{za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 400^\circ\text{C} \\ k_s(\Theta) &= (8300 - 12\Theta) / 5000 & \text{za } 400^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 650^\circ\text{C} \\ k_s(\Theta) &= (1200 - \Theta) / 5500 & \text{za } 650^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

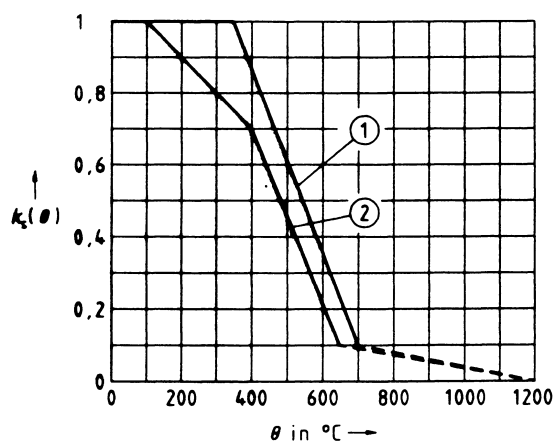
U pomanjkanju točnijih podataka, za čelik za prednapinjanje dopušteno je rabiti ove vrijednosti za $k_p(\Theta)$ (slika 14.4).

$$\begin{aligned} &\text{za šipke} \\ k_p(\Theta) &= 1,0 & \text{za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (1600 - \Theta) / 1500 & \text{za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 250^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (700 - \Theta) / 500 & \text{za } 250^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 650^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (1000 - \Theta) / 3500 & \text{za } 650^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1000^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= 0 & \text{za } 1000^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

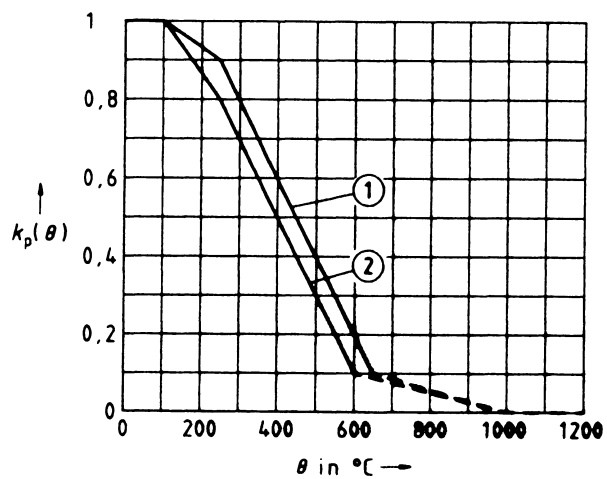
$$\begin{aligned} &\text{za žice i užad} \\ k_p(\Theta) &= 1,0 & \text{za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (850 - \Theta) / 750 & \text{za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 250^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (650 - \Theta) / 500 & \text{za } 250^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 600^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= (1000 - \Theta) / 4000 & \text{za } 600^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1000^\circ\text{C} \\ k_p(\Theta) &= 0 & \text{za } 1000^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Slika 14.2 Koeffcijent $k_c(\Theta)$ umanjenja tlačne čvrstoće (f_{ck}) betona s kremenim agregatom pri povišenim temperaturama



Slika 14.3 Koeficijent $k_s(\theta)$ umanjenja karakteristične čvrstoće f_{yk} betonskog čelika pri povišenim temperaturama



Krivulja (1): šipke
Krivulja (2): žice i užad

Slika 14.4 Koeficijent $k_p(\theta)$ umanjenja karakteristične čvrstoće f_{pk} čelika za prednapinjanje pri povišenim temperaturama

15 KOROZIJSKO RASPUCAVANJE UZ NAPREZANJE

Stari naziv za ovu pojavu: naponska korozija.
Sljedeći nazivi prihvaćeni su u normi HRN ISO 844:1999:

stress corrosion - korozija uz naprezanje

proces koji uključuje koroziju i deformaciju metala uslijed naprezanja ili zaostalog naprezanja

stress corrosion cracking - korozijsko raspucavanje uz naprezanje

raspucavanje zbog korozije uz naprezanje
(u ovome se tekstu rabi kratica KRUN)

hydrogen embrittlement

vodikova krhkost

KRUN je pojava raspucavanja koja se javlja u legurama a prouzročena je zajedničkim djelovanjem vlačnih naprezanja i prisutnošću određenog korozivnog okoliša. Da bi ona nastala na inženjerskoj konstrukciji moraju biti istodobno zadovoljena tri uvjeta:

- poseban okoliš koji pogoduje raspucavanju
- metalurški sastav materijala mora biti osjetljiv na KRUN
- vlačno naprezanje mora biti iznad određene granice.

Ova je pojava posebno važna za korisnike potencijalno osjetljivih legura jer može nastati pri uporabnim uvjetima uzrokujući iznenadni slom konstrukcije bez prethodnog upozorenja.

Do danas je ponuđeno mnogo teorija koje objašnjavaju ovu pojavu. Načelno se razlikuju dvije skupine tumačenja: a) anodno raspadanje i b) katodno raspadanje.

Parametri koji uzrokuju KRUN mogu se podijeliti na parametre materijala, okoliša i mehaničke parametre.

Parametri materijala

Sastav legure i njezina mikrostruktura imaju velik učinak na osjetljivost materijala na KRUN u određenom okolišu. Svaka se legura sastoji od osnovnog materijala, dodataka, nečistoća i elemenata u tragovima. Metalurški uvjeti koji uvjetuju osjetljivost na KRUN jesu sastav legure na razini molekula, veličina zrna, njihova orijentacija i zaostala naprezanja pri izradi materijala. Tako npr. u nehrđajućem čeliku krom i molibden pogoduju stvaranju pasivnoga sloja (filma) na površini materijala. Ugljik u tragovima može prouzročiti stvaranje kromovog karbida na granici zrna a čelik postaje osjetljiv na KRUN između zrna materijala.

Okolišni parametri

Mogu se navesti oni uvjeti koji pogoduju pojavi KRUN prema podacima kako su opaženi na konstrukcijama. Obično je okoliš koji pogoduje KRUN vlažan, ali moraju postojati i posebni uvjeti da ona nastane kao npr.: temperatura, pH (kisela sredina s pH=3-4 pogoduje KRUN), elektrokemijski potencijal, koncentracija određenih kemijskih otopina, koncentracija kisika. Promjena nekih od navedenih okolišnih parametara može znatno utjecati na nastajanje raspucavanja ili na brzinu širenja pukotine.

Tablica 15.1 - Okolišni parametri koji pogoduju KRUN

Ugljični čelik	vrući nitrati otopine hidroksida i karbonata
Visokovrijedni čelik	otopine elektrolita, posebno H ₂ S
Nehrđajući čelik	vruće koncentrirane otopine klorida para obogaćena kloridima

KRUN se sastoji od dva dijela: a) stvaranja pukotine (nucleation) i b) širenja pukotine (propagation). Vrlo je malo poznato o procesu stvaranja pukotine osim da moraju postojati uvjeti koji tome pogoduju. Npr. za anodnu KRUN mora biti moguće stvaranje zaštitnog sloja oksida na površini metala.

Mehanički parametri

Na pojavu KRUN utječu veličina naprezanja u elementu, brzina porasta naprezanja (npr. pri dinamičkom opterećenju). Granica naprezanja koja uzrokuje KRUN obično se utvrđuje ispitivanjem sa statičkim naprezanjem stalne veličine čija se veličina mijenja od uzorka do uzorka i tako utvrđuje ispod koje granice naprezanja KRUN ne nastupa.

Mehanizmi nastanka KRUN

Vjerojatno je da postoji više mehanizama. Koji će se od njih aktivirati ovisi o materijalu, okolišu i stanju naprezanja.

a) Model anodnog raspadanja

Prema ovom modelu KRUN se tumači time da mora postojati aktivan put korozije između zrna različitih materijala koji je rezultat razlika u sastavu legure na granici zrna i brzine širenja pukotine.

b) Model mehaničkog sloma

Prvi model koji tumači KRUN je **model tunelske korozije** prema kojem se od trenutka stvaranja početne površinske korozije na mjestu zarezavanja stvaraju točkasti ili ovalni tuneli prema dubini materijala zbog kojih se početna pukotina produbljuje uzrokujući s vremenom krhki slom.

Drugi model je **model pucanja površinskog filma**. Pretpostavlja se da na površini materijala postoji tanak film "slijepljen" s osnovnim materijalom. Ako taj film krhko pukne pukotina se kroz film proširi na osnovni materijal koji je još duktilan. Pukotina koja je nastala u tom materijalu nastavlja se širiti do neke mjere kada se zaustavi. No, nakon toga se na površini te pukotine ponovno stvori film i proces krhkoga sloma se ponavlja.

Treći model pretpostavlja da je krhki slom uzrokovan **adsorpcijom tvari iz okoliša** koje smanjuju međuatomske veze prionljivosti i veze koja inače sprečava kalanje materijala. Ovako se tumači KRUN prouzročena prodorom atoma vodika u čelik ("vodikova krhkost"). Smatra se da vodik može prodrijeti u kristalnu rešetku legure iz svog plinovitog ili tekućeg stanja. Moguće je da nastane anodna ili katodna reakcija. Zbog visokog tlaka vodika na površini čelika (više desetina MPa) postoji aktivna sila kojom se atomi vodika ugaravaju (uvlače) u međuprostore kristalne rešetke te ih razdvajaju umanjujući (razarajući) njihovu međusobnu posmičnu čvrstoću. Ovako se najčešće tumači KRUN kod betonskog čelika i čelika za prednapinjanje.

KRUN predstavlja problem u konstrukcijama u nekim industrijama, npr. u energanama (para), pri proizvodnji nafte i plina, prijenosu plina, rafinerijama nafte i industriji papira. Kao opasan okoliš koji može prouzročiti KRUN je prisustvo otopina klorida, sumporovodika, sumporaste kiseline, vodikovih plinova, natrijevih otopina, amonijaka, otopina karbonata i bikarbonata (H_2CO_3), zatim otopine sulfata, fosfata i nitrata i neki organski spojevi. Elektrokemijski potencijal i pH otopine imaju znatan učinak na KRUN visokovrijednih čelika jer bitno povećavaju brzinu širenja pukotine. Vrlo kiseli okoliš ubrzava, a bazični okoliš smanjuje ili čak sprečava KRUN.

Visokovrijedni čelici koje se upotrebljavaju za prednapinjanje betonskih konstrukcija ($f_y > 1200 \text{ MPa}$) posebno su osjetljivi na KRUN već i u tzv. "benignim" uvjetima kao što je prisustvo vodene pare, koja bi inače uzrokovala neznatnu koroziju. Pozornost treba obratiti na prijevoz čelika za prednapinjanje. Prevoziti ga treba u čistim vozilima ili vagonima koji nisu prethodno prevozili kemikalije (npr. umjetno gnojivo). Bitno je ne dopustiti skladištenje čelika za prednapinjanje u blizini kiselih medija bilo koje vrste kao i kemikalija koje pri djelovanju vlage mogu otpuštati kiseline.

Ispitivanje osjetljivosti na KRUN određeno je američkim normama ASTM G1 (1979), ASTM G30 (1979), ASTM G39 (1979), ASTM G338 (1979).

Napomena:

Ovo poglavlje obrađeno je prema poglavlju *Stress-Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement*, G.H.Kocha, str. 483-506, u knjizi ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and Fracture, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1996, ISBN 0-87170-385-8. Literatura uz to poglavlje sadrži 249 naslova.

16 LITERATURA

1. Tomičić, Ivan, Betonske konstrukcije, odabrana poglavlja , str. 231-324, Ivan Tomičić, Zagreb, 1996
2. Nawy, Edward, G., Prestressed Concrete - A Fundamental Approach, second edition, Prentice Hall Int., London, 1996, ISBN 0-13-123480-3
3. ENV 1991-1:1994, Osnove proračuna i djelovanja na konstrukcije, 1. dio: Osnove proračuna
4. ENV 1992-1-1, Proračun konstrukcija od armiranoga i prednapetoga betona, 1-1 dio: Osnove i pravila primjene za zgrade
5. ENV 1992-1-5:1994, Proračun konstrukcija od armiranoga i prednapetoga betona, 1-5 dio: Opća pravila. Konstrukcije sa slobodnim i vanjskim nategama
6. prENV 10080-1:1999 Čelik za armiranje betona. Zavarivi betonski čelik, 1. dio: Opći zahtjevi
7. prEN 10080-2:1999 Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - Part 2: Technical delivery conditions for class A
8. prEN 10080-3:1999 Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - Part 3: Technical delivery conditions for class B
9. prEN 10080-4:1999 Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - Part 4: Technical delivery conditions for class C
10. prEN 10138-1:2000 Čelik za prednapinjanje, 1. dio: Opći zahtjevi
11. prEN 10138-2:2000 Prestressing steel - Part 2: Wire
12. prEN 10138-3:2000 Prestressing steel - Part 3: Strand
13. prEN 10138-4:2000 Prestressing steel - Part 4: Bars

IZVADAK IZ EUROPSKE NORME ENV 1991-1
OSNOVE PRORAČUNA I DJELOVANJA NA KONSTRUKCIJE
1. DIO: OSNOVE PRORAČUNA

1.5 Definicije

1.5.1.1 Građevina: Građevina je sve sagrađeno ili što je rezultat građevnih radova.

1.5.1.6 Konstrukcija: Osmišljeni sustav povezanih dijelova proračunanih tako da imaju određenu krutost.

1.5.2.2 Proračunska situacija: Takav skup fizikalnih uvjeta koji prikazuje određeno razdoblje za koje će se proračunom pokazati da odgovarajuća granična stanja nisu premašena

1.5.2.3 Prolazna proračunska situacija: Proračunska situacija koja se primjenjuje na razdoblje koje je mnogo kraće od proračunskoga radnog vijeka konstrukcije i koja ima veliku vjerojatnost pojavljivanja.

Napomena: Odnosi se na privremene uvjete konstrukcije, uporabe ili izloženosti, npr. tijekom gradnje ili popravka.

1.5.2.4 Trajna proračunska situacija: Proračunska situacija koja je mjerodavna u razdoblju istog reda veličine kao i razdoblje proračunskoga radnog vijeka konstrukcije.

1.5.2.5 Izvanredna proračunska situacija: Proračunska situacija koja uključuje iznimne uvjete za konstrukciju ili njezinu izloženost, npr. požar, eksplozija, udar ili mjesni slom.

1.5.2.6 Proračunski radni vijek: Pretpostavljeno razdoblje u kojemu će se konstrukcija upotrebljavati za predviđenu namjenu uz predviđeno održavanje, ali bez potrebe za važnijim popravkom.

1.5.2.10 Granična stanja: Stanja nakon kojih konstrukcija više ne zadovoljava proračunom zahtijevana svojstva.

1.5.2.11 Granična stanja nosivosti: Stanja koja prate slom ili koji drugi sličan oblik otkazivanja konstrukcije.

1.5.2.12 Granična stanja uporabljivosti: Stanja koja odgovaraju uvjetima nakon kojih više nisu udovoljeni određeni uporabni zahtjevi za konstrukciju ili konstrukcijski element.

1.5.3.1 Djelovanje

a) sila (opterećenje) koja djeluje na konstrukciju (izravno djelovanje)

b) prisilno ili spriječeno deformiranje ili prisilna akceleracija, npr. uzrokovana promjenom temperature, promjenom vlage ili nejednolikim slijeganjem ili potresima (neizravno djelovanje).

1.5.3.2 Učinak djelovanja (unutarnje sile): Učinak djelovanja na konstrukcijske elemente, npr. unutarnja sila, moment, naprezanje, deformacija.

1.5.3.3 Stalno djelovanje (G): Djelovanje koje će vjerojatno trajati u cijelome razdoblju proračunske situacije i za koje je promjena veličine u vremenu zanemariva u odnosu na srednju vrijednost, ili čija je promjena uvijek u istome smjeru (monotona) dok djelovanje ne poprimi graničnu vrijednost.

1.5.3.4 Promjenljivo djelovanje (Q): Djelovanje za koje nije vjerojatno da će trajati cijelo razdoblje proračunske situacije ili za koje promjena veličine u vremenu nije zanemariva u odnosu na srednju vrijednost, a ta veličina se ne mijenja monotono.

1.5.3.5 Izvanredno djelovanje (A): Djelovanje, obično kratkotrajno, za koje nije vjerojatno da će se dogoditi u znatnoj veličini u razdoblju projektiranoga (proračunskoga) radnog vijeka konstrukcije.

1.5.3.14 Karakteristična vrijednost djelovanja: Glavna reprezentativna vrijednost nekoga djelovanja. Ako se ta karakteristična vrijednost može odrediti statistički, ona se odabire tako da odgovara propisanoj vjerojatnosti da neće biti premašena na strani nesigurnosti tijekom "referentnog razdoblja", uzimajući u obzir proračunski radni vijek konstrukcije i trajanje proračunske situacije.

1.5.3.16 Kombinacijske vrijednosti: Vrijednosti koje su povezane s kombinacijama djelovanja, kako bi se uzela u obzir smanjena vjerojatnost da će se istodobno pojavljivati najnepovoljnije vrijednosti nekoliko neovisnih djelovanja.

1.5.3.17 Učestala vrijednost promjenljivog djelovanja: Vrijednost je određena tako da su:

- ukupno vrijeme unutar izabranog razdoblja, kad je ta vrijednost premašena u specificiranom dijelu ili
 - učestalost premašaja
- ograničeni na zadanu vrijednost.

1.5.3.18 Kvazistalna (nazovistalna) vrijednost promjenljivog djelovanja: Vrijednost određena tako da ukupno vrijeme unutar izabranog razdoblja, u kojem je premašena, čini znatan dio odabranoga vremenskog razdoblja.

1.5.3.19 Proračunska vrijednost djelovanja F_d : Vrijednost dobivena množenjem reprezentativne vrijednosti s parcijalnim koeficijentom sigurnosti γ_F .

1.5.3.20 Kombinacija djelovanja: Skup proračunskih vrijednosti koje se upotrebljavaju pri provjeri pouzdanosti konstrukcije za granična stanja pri istodobnome utjecaju raznih djelovanja.

1.5.4.1 Karakteristična vrijednost X_k : Vrijednost svojstva gradiva s propisanom vjerojatnošću da neće biti dosegnuta u pretpostavljenome neograničenom nizu ispitivanja. Općenito ta vrijednost odgovara utvrđenoj fraktili pretpostavljene statističke raspodjele kojeg posebnog svojstva gradiva. Nazivna vrijednost uzeta je kao karakteristična vrijednost u određenim okolnostima.

1.5.4.2 Proračunska vrijednost svojstva gradiva X_d : Vrijednost dobivena kad se karakteristična vrijednost podijeli parcijalnim koeficijentom γ_M ili, u posebnim okolnostima, izravnim određivanjem.

9.4.4 Koeficijenti ψ

Koeficijenti ψ za zgrade dani su u tablici 9.3. Za ostale primjene treba pogledati mjerodavne dijelove ENV-a 1991.

Tablica 9.3 - Koeficijenti ψ za zgrade

Djelovanje	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Uporabno opterećenje u zgradama ¹⁾			
Kategorija A: stambena	[0,7]	[0,5]	[0,3]
Kategorija B: uredi	[0,7]	[0,5]	[0,3]
Kategorija C: prostori za veće skupove ljudi	[0,7]	[0,7]	[0,6]
Kategorija D: trgovine	[0,7]	[0,7]	[0,6]
Kategorija E: skladišta	[1,0]	[0,9]	[0,8]
Prometna opterećenja u zgradama			
Kategorija F: težina vozila ≤ 30 kN	[0,7]	[0,7]	[0,6]
Kategorija G: $30 \text{ kN} < \text{težina vozila} \leq 160 \text{ kN}$	[0,7]	[0,5]	[0,3]
Kategorija H: krovovi	[0]	[0]	[0]
Snijeg	[0,6] ²⁾	[0,2] ²⁾	[0] ²⁾
Vjetar	[0,6] ²⁾	[0,5] ²⁾	[0] ²⁾
Temperatura u građevini (ne požar) ³⁾	[0,6] ²⁾	[0,5] ²⁾	[0] ²⁾
1) Za kombinaciju uporabnog opterećenja u višekatnim zgradama vidi ENV 1991-2-1. 2) Može se zahtijevati prilagodba za različita zemljopisna područja. 3) Vidi ENV 1991-2-5.			

9.4.5 Pojednostavnjena provjera konstrukcija zgrada

(1) Proračun za trajne i prolazne situacije opisan u točki 9.4.2 može se pojednostavniti uzimajući u obzir najnepovoljnije od ovih kombinacija:

- a) proračunske situacije sa samo jednim promjenljivim djelovanjem Q_{k1}

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} "+" [1,5] Q_{01} \quad (9.13)$$

- b) proračunske situacije s dva ili više promjenljivih djelovanja $Q_{k,i}$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} "+" [1,35] \sum_{i \geq 1} Q_{ki} \quad (9.14)$$

U tom slučaju učinak djelovanja treba provjeriti i za prevladavajuća promjenljiva djelovanja po formuli (9.13).

- (2) Vrijednosti γ_G dane su u tablici 9.2.

9.5.2 Kombinacija djelovanja

(1) Kombinaciju djelovanja koju treba uzeti u obzir za granična stanja uporabljivosti ovisi o prirodi učinka koji se provjeravaju, npr. nepovratni, povratni ili dugotrajni. Tri kombinacije označene reprezentativnom vrijednošću prevladavajućega djelovanja dane su u tablici 9.4.

Tablica 9.4 - Proračunske vrijednosti djelovanja za upotrebu u kombinaciji djelovanja

Kombinacija	Stalna djelovanja G_d	Promjenljiva djelovanja Q_d	
		Dominantna	Ostala
Karakteristična (rijetka)	$G_k (P_k)$	Q_{k1}	$\psi_{0i} Q_{ki}$
Česta	$G_k (P_k)$	$\psi_{11} Q_{k1}$	$\psi_{2i} Q_{ki}$
Nazovistalna	$G_k (P_k)$	$\psi_{21} Q_{k1}$	$\psi_{2i} Q_{ki}$
Napomena: Za granična stanja uporabljivosti, parcijalni koeficijenti (uporabljivosti) γ_G i γ_Q uzimaju se kao 1,0 osim ako nije drukčije određeno.			

- (2) Tri kombinacije djelovanja za granična stanja uporabljivosti definirane su simbolično ovim formulama:

- a) karakteristična (rijetka) kombinacija

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} "+" P_k "+" Q_{k1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{0i} Q_{ki} \quad (9.16)$$

- b) česta kombinacija

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} "+" P_k "+" \psi_{11} Q_{k1} "+" \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki} \quad (9.17)$$

- c) nazovistalna kombinacija

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} "+" P_k "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} Q_{ki} \quad (9.18)$$

9.5.3 Parcijalni koeficijenti

(1) Parcijalni koeficijenti za granična stanja uporabljivosti jednaki su [1,0], osim ako je drukčije određeno, primjerice u ENV-ima 1992 - 1999.

.....

9.5.5 Pojednostavnjena provjera konstrukcija zgrada

(1) Za konstrukcije zgrada karakteristična (rijetka) kombinacija može se pojednostavniti izrazima koji sljede, koji mogu biti upotrebljeni i kao nadomjestak za čestu kombinaciju.

a) proračunske situacije sa samo jednim promjenljivim djelovanjem, Q_{k1} .

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } Q_{k1} \quad (9.19)$$

b) proračunske situacije sa dva ili više promjenljivih djelovanja, Q_{k1}

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} \text{ "+" } [0,9] \sum_{i \geq 1} Q_{ki} \quad (9.20)$$

U tome slučaju učinak djelovanja treba također provjeriti za prevladavajuće promjenljivo djelovanje uporabom formule (9.19).

(2) Tamo gdje su pojednostavnjena propisana pravila dana za granična stanja uporabljivosti ne zahtijevaju se detaljni proračuni kombinacija djelovanja.
