PREDNAPETI BETON

Predavanja

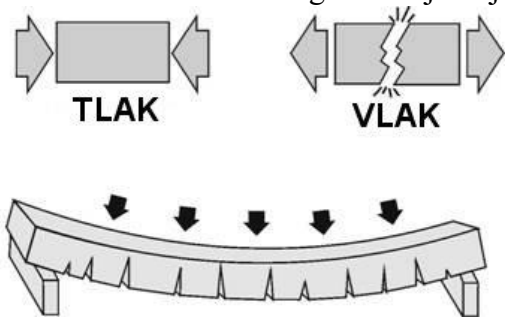
Zagreb, 2007. **Igor Gukov**

SADRŽAJ

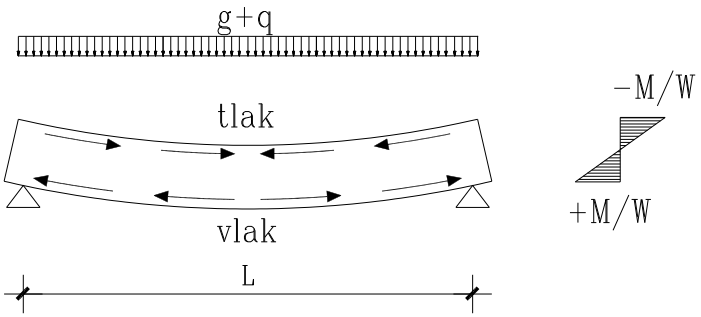
1. UVOD 3
2. SVOJSTVA MATERIJALA 7
2.1. Čelik za prednapinjanje 7
2.2. Beton 9
2.3. Mort za injektiranje 10
3. SUSTAVI ZA PREDNAPINJANJE 13
3.1. Uvod 13
3.2. Sustav BBRV 18
3.3. Sustav Vorspann-Technik 18
3.4. Sustav Dywidag 18
3.5. Sustav VSL 18
4. GUBICI I PADOVI SILE PREDNAPINJANJA 19
4.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja 20
4.2. Gubitak naprezanja zbog prokliznuća klina 21
4.3. Gubitak naprezanja zbog elastičnih deformacija betona 21
4.4. Pad naprezanja zbog skupljanja i puzanja betona te relaksacije čelika 22
5. IZBOR PRESJEKA I PRELIMINARNIH DIMENZIJA 23
6. KONTROLA NAPREZANJA 24
7. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI 27
7.1. Proračun uzdužne armature 27
7.2. Proračun poprečne armature 28
8. GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI 28
9. PROTOKOL PREDNAPINJANJA 30
10. KONSTRUKCIJSKA PRAVILA PREDNAPETIH KONSTRUKCIJA 31
10.1. Najmanje udaljenosti užadi i natega 31
10.2. Armatura prednapetih konstrukcijskih elemenata 32
10.3. Najmanji razred čvrstoće betona u trenutku prednapinjanja 33
10.4. Vođenje natega 34
10.5. Dodatna načela za vanjsko prednapinjanje betonskih mostova 36
10.5.1 Ojačanje konstrukcije vanjskim nategama 37
10.5.2 Sidreni i skretni elementi 37
10.5.3 Nadzor konstrukcije s vanjskim nategama 37
10.6. Područje sidrenja pri naknadnom napinjanju 38
10.7. Položaj i raspored spojki 38
10.8. Zaštitne cijevi natega 40

1. UVOD

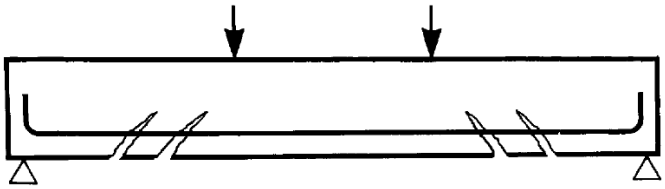
Beton je umjetni kamen to je materijal velike tlačne a male vlačne čvrstoće. Vlačna naprezanja izazvana skupljanjem, temperaturom i vanjskim opterećenjem vrlo brzo dostižu vlačnu čvrstoću betona te dolazi do raspucavanja u armiranobetonskim konstrukcijama. Nakon pojave pukotina sva vlačna naprezanja prihvaćaju se armaturom. Širine pukotina se ograničavaju ovisno o trajanju opterećenja i agresivnosti sredine kako ne bi došlo do ugrožavanja trajnosti konstrukcije.



Slika 1.1 Betonska greda.



Slika 1.2 Dijagram normalnih naprezanja u betonskoj gredi.



Slika 1.3 Armiranobetonska greda.

Cilj prednapinjanja je eliminirati ili barem smanjiti vlačna normalna naprezanja u svim presjecima i to djelovanjem umjetno izazvanim silama. Te sile nazivamo silama prednapinjanja. Tako dobivena naprezanja moraju biti manja od dopustivih vrijednosti u svima fazama izvedbe i uporabe građevine.

Povijest prednapetog betona:

- oko 1890. god. prvi zabilježeni patent prednapetog betona registrirao je američki inženjer iz San Francisca imenom Henry Jackson izgradivši betonski nadvoj s prednapetim zategama. No, nakon godinu dana nadvoj se srušio. H. Jackson nije znao za fenomen puzanja betona i opuštanja mekog čelika, što je u konačnici rezultiralo "nestankom" prednapinjanja.
- 1928. Eugene Freyssinet patentira prethodno prednapinjanje betona čelikom velike čvrstoće
- Mörsch, prva knjiga o prednapetom betonu
- Osnovana Međunarodna federacija za prednapinjanje (FIP - Fédération Internationale de la Précontrainte)
- Osnovan Europski odbor za beton (CEB - Comité Européen du Béton)

- Udruživanjem CEB i FIP nastaje organizacija FIB.

Prednosti prednapetih konstrukcija:
- savladavanje velikih raspona uz veću vitkost i manju masu,
- povećana trajnost zbog izostanka pukotina,
- smanjeni progibi,
- velika otpornost na zamor (posljedica male promjene naprezanja u čeliku za prednapinjanje,
- sposobnost zatvaranja pukotina nakon djelovanja promjenljivih i izvanrednih djelovanja,
- ubrzanje i racionalizacija montažnog građenja.

Nedostaci prednapetih konstrukcija:
- potrebna je stručna radna snaga zbog zahtjevnijih radova,
- potrebna je posebna oprema,
- velika preciznost u projektiranju i izvođenju i
- skuplje gradivo.

Prednapete konstrukcije upotrebljavaju se kod građevina s elementima velikih raspona kao što su mostovi, zgrade, montažne građevine, hale, krovne konstrukcije, silosi, bunkeri, te za potrebe sanacije postojećih građevina...

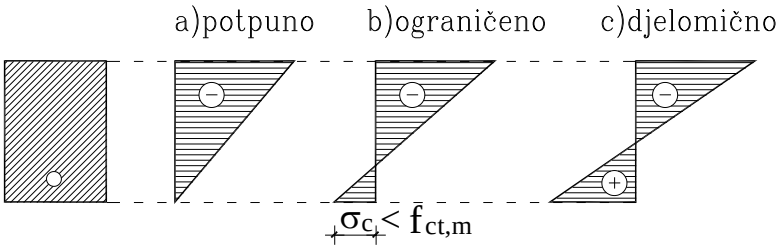


Slika 1.4 Sanacija naglavne grede stupa vanjskim prednapinjanjem.

Ideja da se napinjanjem armature u betonu unesu tlačna naprezanja kako bi se sva naprezanja u eksploataciji mogli preuzeti sudjelovanjem čitavog presjeka dovela je do ***potpunog prednapinjanja***. Nedostaci ovakvih konstrukcija su:
- velika potrošnja čelika za prednapinjanje
- pojava nepredviđenih pukotina
- nepotrebna velika sigurnost
- nemogućnost korištenja duktilnosti.

Pukotine koje se otvaraju djelovanjem i pokretnog opterećenja ne utječu na trajnost konstrukcije zbog njihovog kraćeg trajanja pa nije potrebno prednapinjanje za ukupno opterećenje. Takvo prednapinjanje nazivamo ***djelomično prednapregnuti beton***, kada se dopuštaju pukotine ograničenih širina. Nakon prestanka djelovanja pokretnog opterećenja pukotine se zatvaraju pa su takve konstrukcije dovoljno sigurne od korozije i drugih štetnih utjecaja.

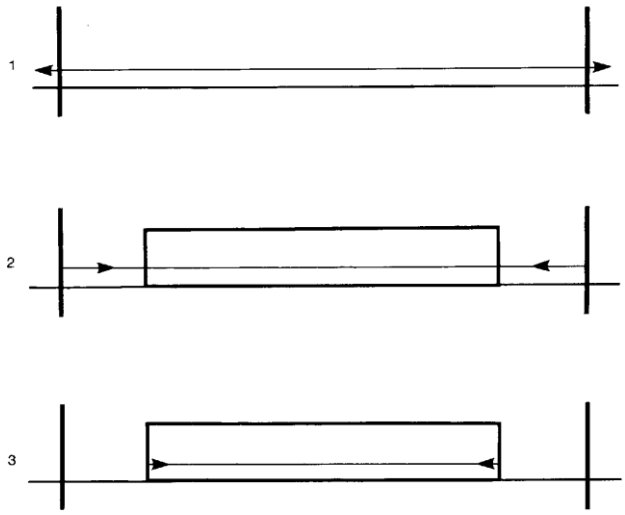
Između djelomično i potpuno prednapregnutog betona nalazi se ***ograničeno prednapeti beton***. Kod kojeg se za najnepovoljnije kombinacije opterećenja u tijeku građenja i eksploatacije dopuštaju vlačna naprezanja ograničenih veličina, odnosno manjih od dopuštenih.



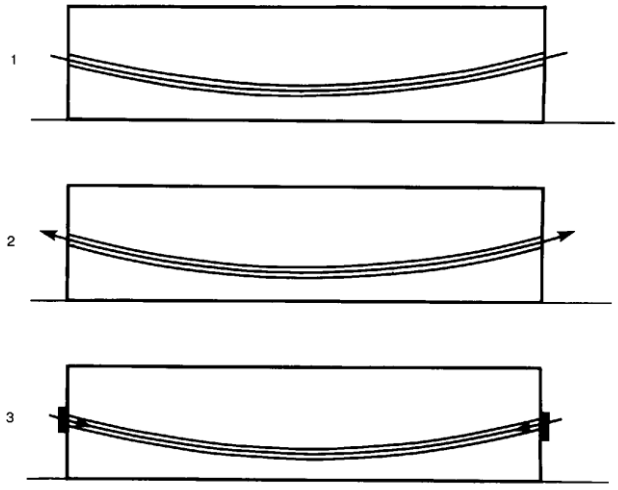
Slika 1.5 Naprezanja na gornjem i donjem rubu za potpuno, ograničeno i djelomično prednapeti beton.

Prema načinu prednapinjanja razlikujemo:

- *prethodno ili adhezijsko prednapinjanje* (prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona)
- *naknadno ili kablovsko prednapinjanje* (prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona)



*Slika 1.6 Prethodno ili a*dhezijsko prednapinjanje *(prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona).*



*Slika 1.7 Naknadno ili k*ablovsko prednapinjanje *(prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona).*

Prema stupnju prednapinjanja razlikujemo:

- *potpuno prednapeti beton k=1*
- *armirani beton k=0*
- *ograničeno i djelomično prednapeti beton 0<k<1*

gdje je k odnos momenta dekompresije i ukupnog momenta:

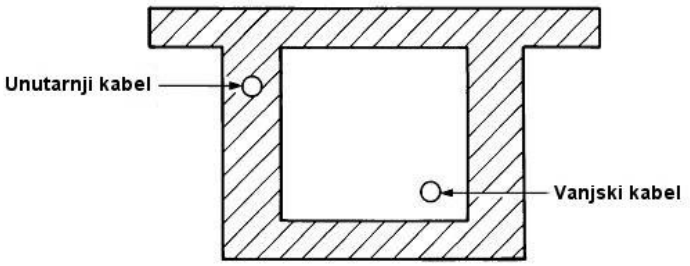
$$k = \frac{M_{dek}}{M_{g+\Delta g+q}} \qquad (1.1)$$

Moment dekompresije je moment savijanja izazvan vanjskim opterećenjem koji je po veličini i smjeru takav da na vlačnom rubu poništi naprezanja izazvana silom prednapinjanja.

Potpuno prednapeti elementi su oni u kojima pri najnepovoljnijoj kombinaciji djelovanja u betonu nema vlačnih naprezanja. Za njih je stupanj prednapinjanja 1.0.
U ograničeno prednapetim elementima mogu nastati vlačna naprezanja, ali manja od dopuštenih. Kod njih je stupanj prednapinjanja manji od 1.0.
Kod djelomično prednapetih elemenata pri određenoj kombinaciji djelovanja mogu se pojaviti pukotine, ali njihove karakteristične širine moraju biti manje od propisanih. Stupanj prednapinjanja im je između 0.4 i 0.7.

Naknadno kabelsko prednapinjanje može biti :

- unutarnje (kabel se nalazi u presjeku) ili
- vanjsko (kabel se nalazi izvan presjeka).



Slika 1.8 Unutarnje i vanjsko prednapinjanje.

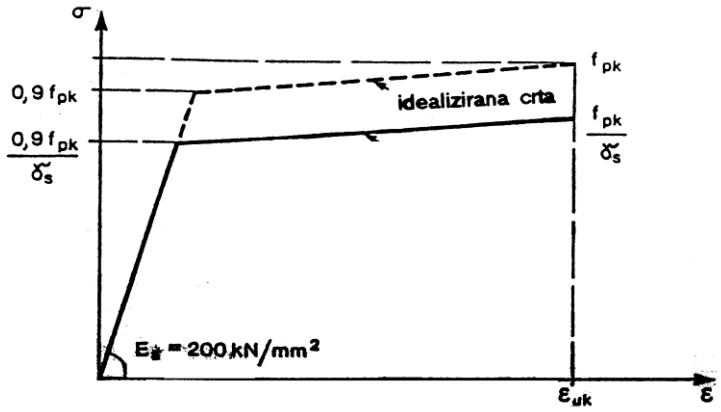


*Slika 1.9 Primjer v*anjskog prednapinjanja.

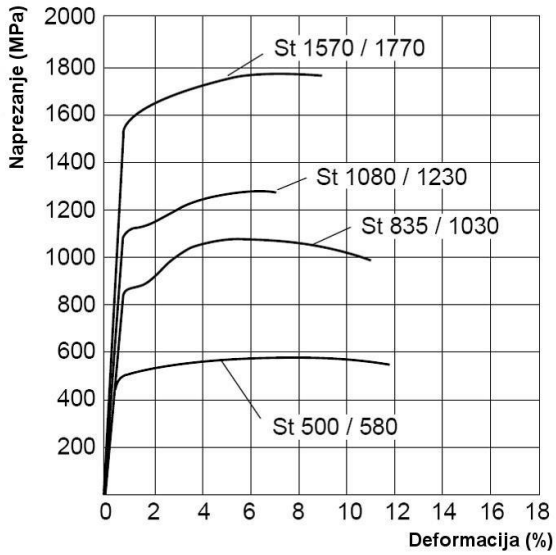
2. SVOJSTVA MATERIJALA

2.1. Čelik za prednapinjanje

Kvaliteta čelika može se opisati preko karakteristične vlačne čvrstoće f_{pk} i karakteristične granice naprezanja $f_{p0.1,k}$ koja odgovara naprezanju s nepovratnom deformacijom 0.1%. Dijagram naprezanje-deformacija dan je na slici 2.1. Duktilnost čelika ocjenjuje se preko minimalne postignute ukupne deformacije $\varepsilon_{pu,k}$ i odnosa $(f_p/f_{p0.1})_k$.



Slika 2.1 Računski dijagram čelika za prednapinjanje.



Slika 2.2 Radni dijagrami armature i čelika za prednapinjanje.

Vrijednosti $f_{p0.1,k}$, f_{pk} i $\varepsilon_{pu,k}$ za pojedine vrste čelika (žice, užad, šipke), koje se koriste u europskoj zajednici, dane su tablično. Traži se da čelik za prednapinjanje bude zavarljiv.

Maksimalni dopušteno naprezanje registrirano na preši σ_{po} za postizanje početne sile prednapinjanja P_o ne smije prijeći:

$$\sigma_{p0} \le \begin{cases} 0.80 \cdot f_{pk} \\ 0.90 \cdot f_{p0.1,k} \end{cases} \qquad (2.1)$$

Neposredno nakon uklanjanja preše i unošenja sile u beton maksimalno dopušteno naprezanje, kod prednapinjanja poslije stvrdnjavanja, odnosno kod prednapinjanja prije stvrdnjavanja nakon gubitaka sidrenjem, ne smije prijeći:

$$\sigma_{pm,0} \le \begin{cases} 0.75 \cdot f_{pk} \\ 0.85 \cdot f_{p0.1,k} \end{cases} \qquad (2.2)$$

Sila unošenja proračunava se po izrazu:

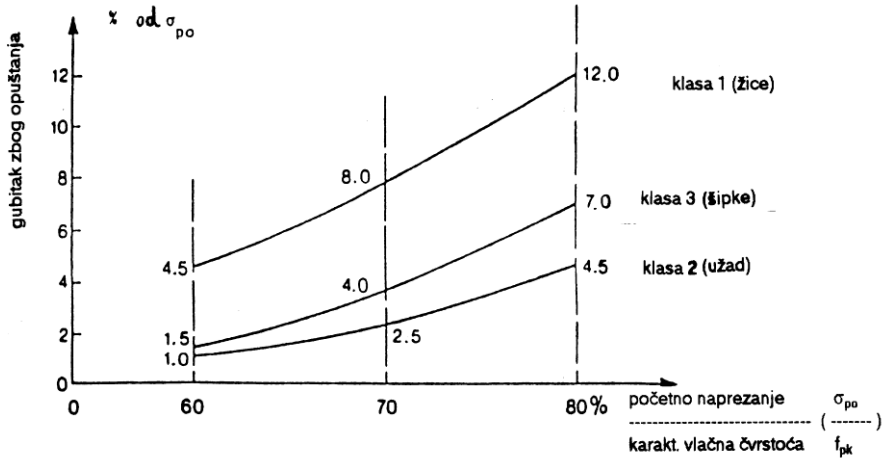
$$P_{m,o} = \sigma_{pm,o} \times A_p \qquad (2.3)$$

gdje je A_p nazivna površina kabela.

Čelik za prednapinjanje dijeli se, ovisno o veličini relaksacije, na 3 klase:

- Klasa 1: žice i užad s visokom relaksacijom
- Klasa 2: žice i užad s niskom relaksacijom
- Klasa 3: šipke.

Ovisno o naprezanju u čeliku i klasama relaksacije može se na dijagramu naprezanje – relaksacija (sl. 2.3) pronaći relaksacija čelika nakon 1000 h.



Slika 2.3 Relaksacija čelika prema EC2 nakon 1000 h kod 20^{o}C u funkciji naprezanja σ_p

Ako nema drugih podataka za modul elastičnosti čelika uzima se 195000 N/mm^2.

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

Tablica 2.1 Hrvatske norme za čelik za prednapinjanje



Slika 2.4 Čelik za prednapinjanje

Zahtjevi na čelik za prednapinjanje:

- Visoka čvrstoća
- Niska relaksacija
- Mogućnost oblikovanja savijanjem na hladno
- Zavarljivost
- Niska osjetljivost na koroziju (posebno naponsku)
- Geometrijska pravilnost
- Velike dužine pri isporuci
- Ponekad dobra prionjivost
- Ponekad otpornost na zamor

Vrsta nategе	Najmanji broj
Pojedinačna šipka ili žica	**3**
Šipke i žice, skupljene u nategu ili uže	**7**
Nategе osim užadi **	**3**

Tablica 2.2 Najmanji broj natega.

Tablica vrijedi ako se pretpostavi jednak promjer svih žica, šipki ili natega;
**Taj zahtjev može se također smatrati ispunjenim ako element sadrži najmanje jedno uže sa sedam ili više žica (promjer žice ≥ 4,0 mm).

2.2. Beton

Zahtjevi na beton u prednapetim konstrukcijama:

- Visoka tlačna čvrstoća,
- Mali iznos skupljanja i puzanja,
- Trajnost

Tip prednapinjanja	Najniži razred tlačne čvrstoće betona
Prethodno prednapinjanje (adheziono)	C30/37
Naknadno prednapinjanje	C25/30

Tablica 2.3 Najniži razredi betona za prednapeti beton.

Razred betona	C30/37	C35/45	C40/50	C50/60
$f$ck, N/mm2	30.0	35.0	40.0	50.0
Dupušteno tlačno naprezanje u uporabi, N/mm^2	18.0	21.0	24.0	30.0
Dupušteno tlačno naprezanje u fazi transporta, N/mm^2	13.5	15.8	18.0	22.5
$f$ctm, N/mm^2	2.9	3.2	3.5	4.1

Tablica 2.4 Dopuštena tlačna i vlačna naprezanja u betonu.

Modul elastičnosti betona:

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

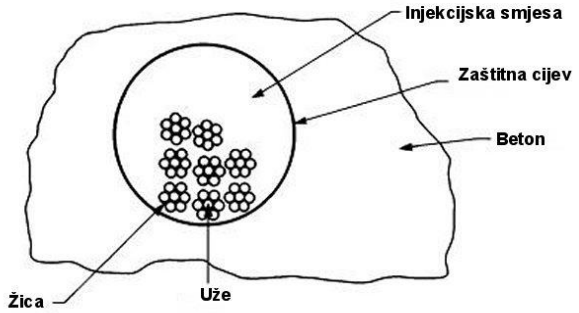
2.3. Mort za injektiranje

Injektiranje cijevi natega se izvodi normiranim postupcima s mortovima čija su svojstva propisana normama:

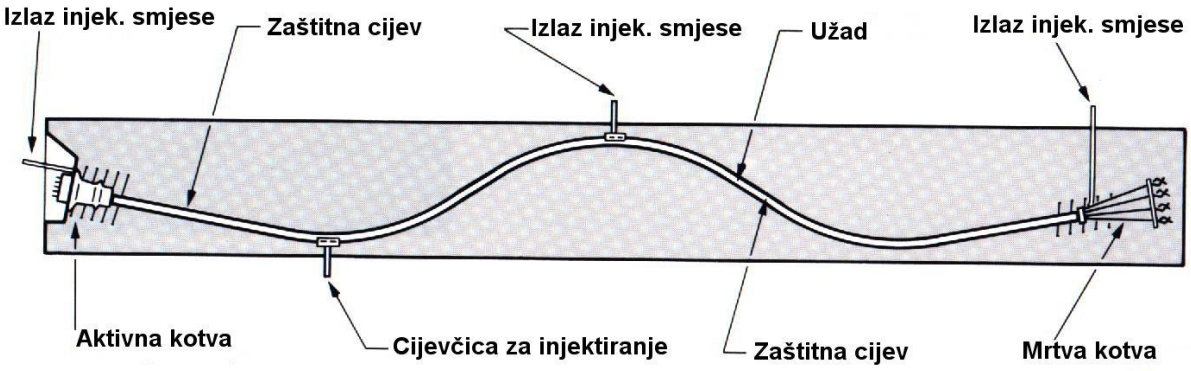
HRN EN 446	Mort za injektiranje kabela za prednapinjanje – Postupci injektiranja
HRN EN 447	Mort za injektiranje kabela za prednapinjanje – Svojstva uobičajenih mortova za injektiranje

Tablica 2.5 Hrvatske norme za svojstva morta za injektiranje kabela.

Prostor između kabela i zaštitnih cijevi potrebno je ispuniti mortom za injektiranje ili uljem (ne smije biti zraka ni vode). Mort za injektiranje se pod pritiskom ubrizgava u najnižoj točki kabela a odzračivanje i izlaz morta se događaju u najvišoj točki.



Slika 2.5 Poprečni presjek kabela za prednapinjanje.



Slika 2.6 Uzdužni presjek prednapete grede.

Cementni mort za injektiranje ima dvije zadaće. Štiti nateg od korozije. Kako bi se ostvarila dobra zaštita od korozije, čelik mora biti potpuno obavijen cementnim mortom dostatne gustoće. Ne smiju

se pojavljivati nezapunjeni dijelovi gdje se zadržao zrak ili voda. Voda se zimi može zaleditи i izazvati odlamanje zaštitnog sloja betona. Druga zadaća cementnog morta za injektiranje je osiguranje sprezanja natege i konstruktivnog elementa. Za to je potrebna dostatna čvrstoća.

Izvedba ukazuje na činjenicu da je problematično osiguranje potpune ispunjenosti zaštitne cijevi cementnim mortom bez šupljina. Najmanje šupljine mogu dovesti do korozije čelika.
Cementni mort se ne smije injektirati pod velikim tlakom (2 MPa ili druga vrijednost određena postupkom injektiranja) niti velikom brzinom jer se tako onemogućuje stvaranje zračnih čepova, segregacija, oštećivanje konstrukcije, opreme i ventila, štite se radnici te se omogućuje kontrola protoka morta.

Cementni mort za injektiranje mora ispunjavati posebne zahtjeve:
- malo izlučivanje vode, sedimentacija:
Cementni mort ne smije biti proizveden s previše vode jer se ona ne može upiti u okolni beton zbog zaštitne cijevi. Izlučena zaostala voda povećava opasnost od korozije i pri niskim temperaturama može se zamrzavati. Ispitivanja su pokazala da se u zaštitnim cijevima s gornje strane u prvim satima, zbog sedimentacije, može stvoriti tanka mješavina cementa i vode ili mjehurići zraka. Zbog toga se kod velikih natega treba naknadno injektirati. Najveće izlučivanje u pravilu nastupa nakon 3-4 sata. Mjerenja treba provesti u tom vremenskom razmaku. S druge strane, cementni mort ne smije biti previše suh jer se zaštitna cijev može začepiti.
Ispitivanja su pokazala da poteškoće s vodom rastu sa starošću cementa. Stoga je potrebno ograničiti starost cementa u proizvodnji cementnog morta za injektiranje. Cement ne smije biti mlađi od 2 do 3 dana kako bi se dostatno ohladio niti stariji od tri tjedna.

- kohezija u plastičnom stanju do završetka postupka injektiranja:
Očvršćivanje cementnog morta za injektiranje može početi tek nakon potpunog injektiranja zaštitne cijevi. U nekim slučajevima može biti potrebno i nekoliko sati za dovršenje postupka injektiranja. Dulji vremenski periodi postižu se dodacima koji ne smiju sadržavati kloride. Kod dodataka treba paziti na činjenicu da njihovo djelovanje ovisi o temperaturi.
Konzistencija jako ovisi i o temperaturi morta. Najbolje vrijednosti bez dodataka postižu se pri temperaturi morta od oko 15 °C.
Cementni se mort injektira uz ispunjene uvjete navedene u tablici 2.6 za temperaturu zraka, konstrukcijski element i cementni mort.

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

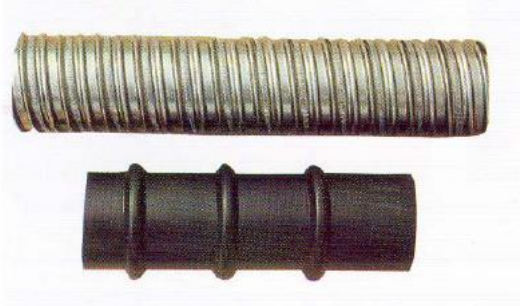
Tablica 2.6 Rasponi temperature pri injektiranju.

Kada su temperature veće ili manje od navedenih u tablici, potrebne su posebne mjere koje osiguravaju uspješnost postupka injektiranja.
- malo izdvajanje cementnog morta:
Kod izdvajanja cementnog morta može doći do zarobljene vode ili velikih promjena volumena tijekom perioda očvršćivanja. Stoga je potrebno birati malu vrijednost vodocementnog omjera v/c. U isto vrijeme mort mora biti i dostatno plastičan te se stoga v/c omjer treba birati u rasponu 0,40 do 0,44.
- mala deformacija zbog skupljanja:
Skupljanje morta je uglavnom vrlo malo jer on ne može izgubiti vodu unutar zaštitne cijevi.
- povećanje volumena stvaranjem mikropora:

Mort se do ukrućenja treba širiti kako bi ispunio eventualne praznine. Tlačna sila zbog povećanja volumena ne smije biti prevelika.
- dostatna tlačna čvrstoća i prionljivost
- dostatna otpornost na zamrzavanje.

Svojstva cementnog morta za injektiranje u postupku potvrđivanja sukladnosti ispituju se normiranim postupcima (HRN EN 446). Ispituju se:

- kohezija,
- izlučivanje vode,
- promjena volumena,
- čvrstoća.



Slika 2.7 Zaštitne cijevi u kojima se nalaze natege kod naknadnog prednapinjanja mogu biti čelične ili plastične.

Promjer zaštitne cijevi kabela ovisi o broju užadi. Na slici 2.8 prikazana je tablica za sustav Dywidag. Zadnja dva broja kod oznake kabela odnose se na broj užadi. Npr. oznaka kabela 6812 znači da kabel ima 12 užadi. Zaštitna cijev je čelična rebrasta i ima dva promjera unutarnji i vanjski.

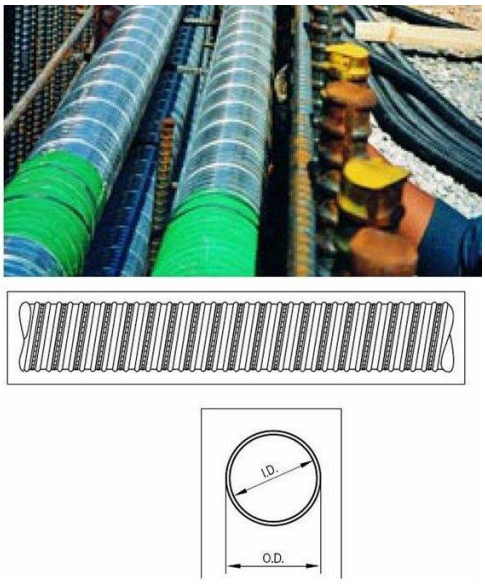
Prostor između natege i zaštitine cijevi može se ispuniti i s drugim materijalima:

- mast,
- ulje,
- vosak.

Takva natega (unbonded) nije spojena s presjekom i kod nje postoji drugačiji tretman kod dokaza na slom (proračun uzdužne armature). Kod natege injektirane injekcijskom smjesom na bazi cementa (bonded) dolazi do promjene deformacija od djelovanja ostalih opterećenja. Kod bonded natege iz tog razloga dobivamo manje armature iz dokaza na slom.

Promjeri zaštitinih cijevi

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



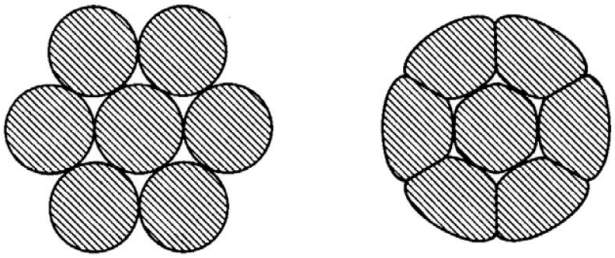
Slika 2.8 Podaci o zaštitnim cijevima.

3. SUSTAVI ZA PREDNAPINJANJE

3.1. Uvod

Sastavni dijelovi natege jesu:

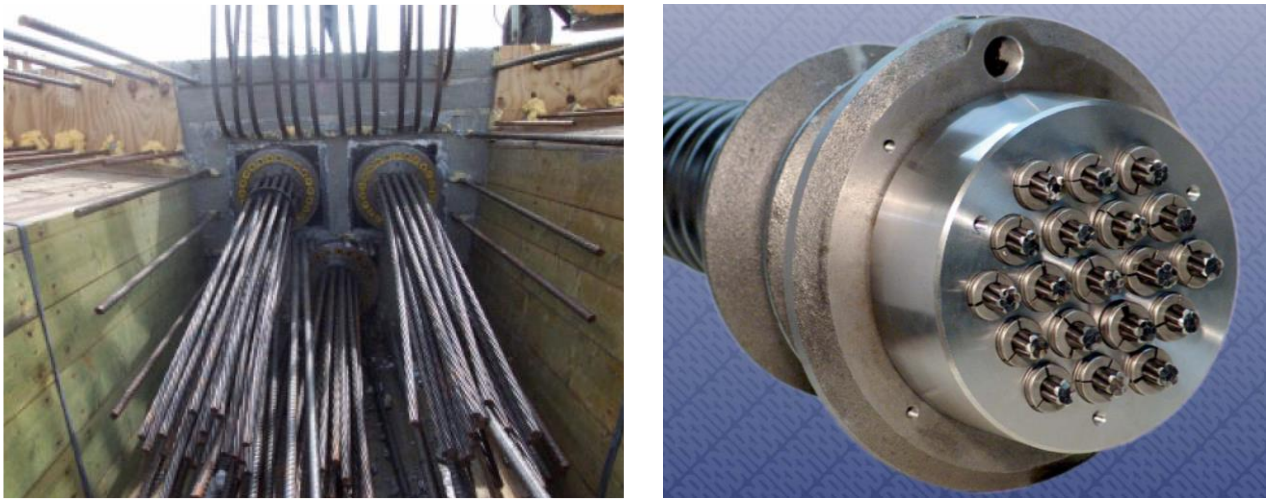
- žice, snopovi žica
- užad, snopovi užadi
- šipke.



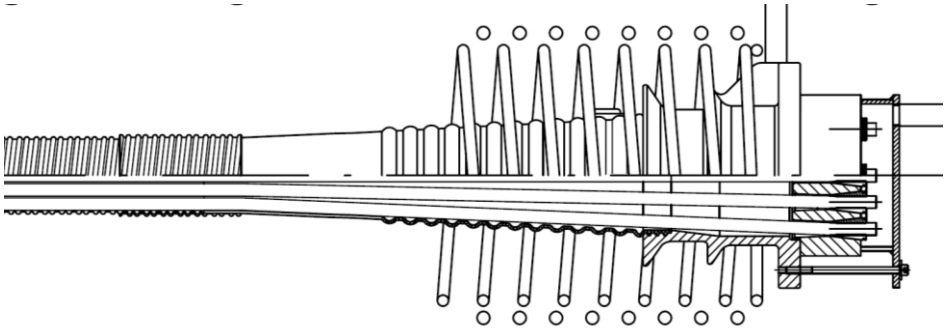
Slika 3.1 Poprečni presjek užeta za prednapinjanje. a) standardni i b) kompaktni 7-žični presjek.

Sidrene glave ili usidrenja ovisno o sustavu prednapinjanja čine:

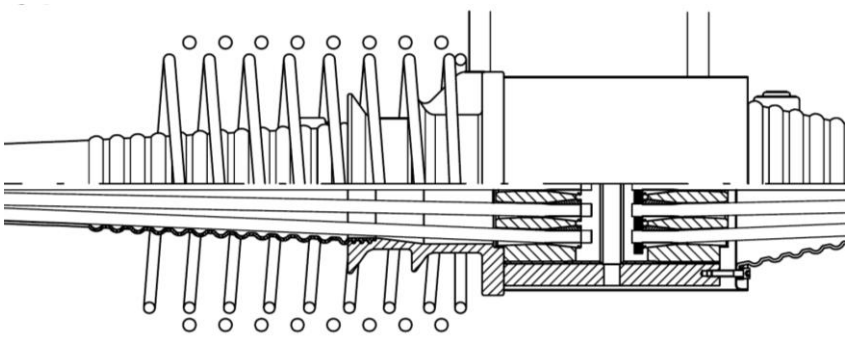
- adhezijska sidra na osnovi prianjanja
- sidra s navojem
- sidra na osnovi klina i čahure
- sidra na osnovi glavice.



Slika 3.2 Sidro kabela za prednapinjanje



Slika 3.3 Aktivno sidro kabela za prednapinjanje.



Slika 3.4 Privremeno sidro (kod radne reške) za nastavak kabela za prednapinjanje.



Slika 3.5 Klinovi za sidrenje užadi.

Opremu za prednapinjanje sačinjavaju:

- preše za napinjanje natega
- oprema za injektiranje natega
- naprave za uvlačenje užadi
- hidrauličke pumpe



Slika 3.6 Preša za prednapinjanje kabela.



Slika 3.7 Oprema za injektiranje.



Slika 3.8 Hidrauličke pumpe.

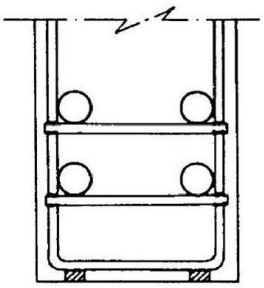


Slika 3.9 Uređaj za uvlačenje užadi u zaštitnu cijev. (Tendon Pulling Machine).

Kako ne bi došlo do pomicanja kabela (tj. zaštitnih cijevi) za vrijeme betoniranja, zaštitnu cijev je potrebno vezati za podupirače ili postavljenu armaturu. Na taj način će se osigurati projektirana geometrija kabela.

Podupirači kabela:

- ne smiju štetno djelovati ni na čelik ni na beton,
- trebaju biti dovoljno čvrsti da osiguraju stabilni položaj kabela u projektiranoj poziciji,
- ne smiju oštetiti zaštitu.

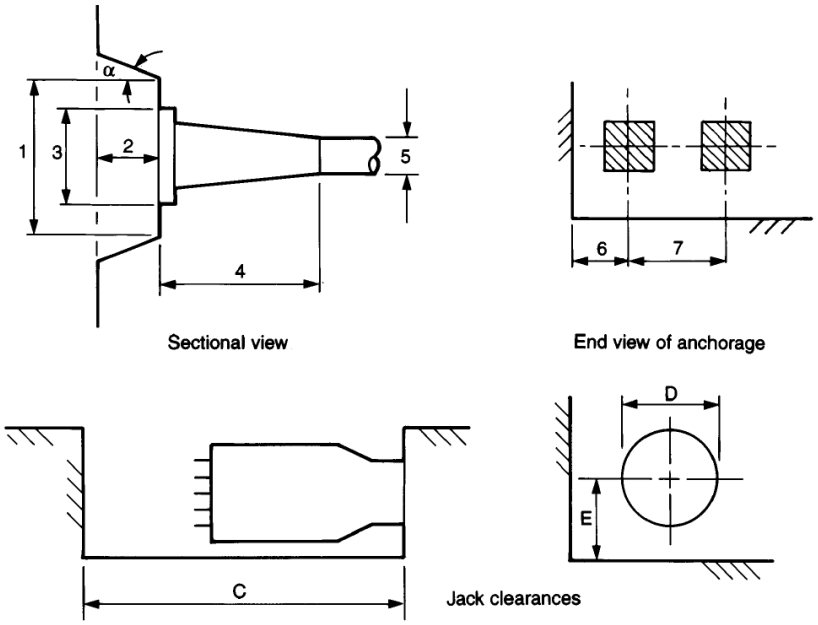


Slika 3.10 Podupirači kabela.



Slika 3.11 Prije betoniranja potrebno je napraviti kontrolu geometrije kabela.

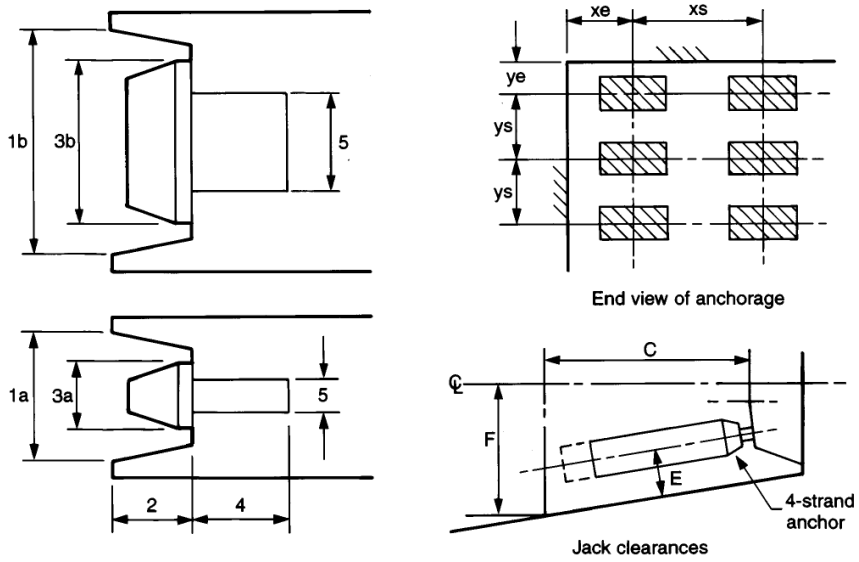
Kod proračuna ovakvih konstrukcija potrebno je voditi računa o dopuštenim razmacima kabela, sidara kabela i prostoru potrebnom za prešu jer ovi podaci također određuju dimenzije pojedinih dijelova poprečnog presjeka. Na slici 3.12 i u tablici 3.1 dane su standardne vrijednosti koje se upotrebljavaju u većini sustava za prednapinjanje. Svaki sustav za prednapinjanje ima svoje podatke o ovim vrijednostima, a koje ovise o sili u kabelu odnosno broju užadi.



Slika 3.12. Varijable za kabelsko prednapinjanje.

Promjer i broj užadi	Utori u betonu mm			Sidro dimenzije, mm		Zaštitna cijev mm	Razmak sidara, mm		Preša mm		
	1	2	α	3	4	5	6	7	C	D	E
13–1	130	110	30°	70	85	25/30	80	90	1200	140	100
13–3	180	115	30°	120	210	40/45	115	155	1100	200	150
13–4	240	115	30°	135	210	45/50	125	180	1100	248	175
13–7	240	120	30°	175	215	55/60	155	235	1200	342	220
13–12	330	125	30°	230	405	75/82	195	305	1300	405	250
13–19	390	140	30°	290	510	80/87	230	385	2100	490	295
15–1	135	115	30°	75	85	30/35	95	105	1200	140	100
15–3	200	115	30°	150	210	45/50	130	185	1100	210	140
15–4	240	120	30°	157	215	50/55	140	210	1200	342	220
15–7	305	125	30°	191	325	60/67	175	280	1300	405	250
15–12	350	140	30°	270	510	80/87	220	365	1500	490	295
15–19	470	160	30°	340	640	100/107	265	460	2000	585	300

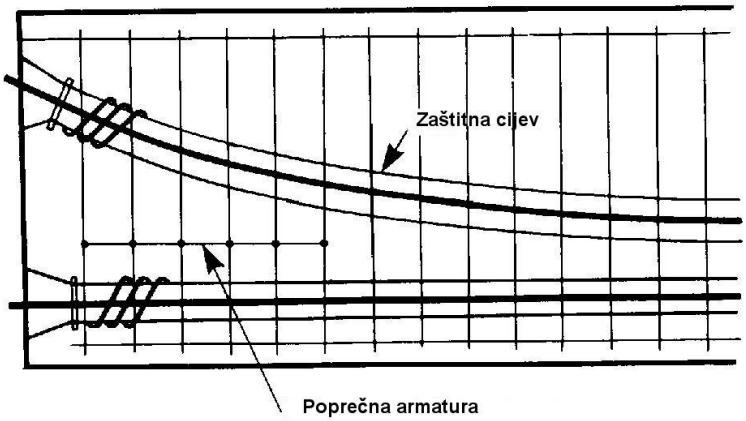
Tablica 3.1 Standardne dimenzije za kabelsko prednapinjanje.



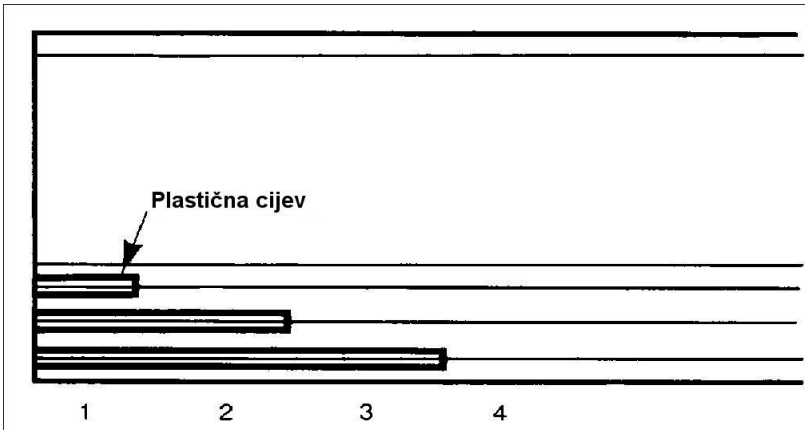
Slika 3.13. Varijable za kabelsko prednapinjanje ploča.

Promjer i broj užadi	Utori u betonu mm			Sidro dimenzije, mm			Zaštitna cijev mm	Razmak sidara, mm		Preša mm		
	1a	1b	2	3a	3b	4	5	*xe, ye*	*xs, ys*	C	E	F
13–1	130	130	110	70	110	70	30 dia.	125, 80	150, 100	1390	100	–
13–4	144	310	103	96	250	130	75 × 20	220, 140	370, 220	1200	90	280
15–1	150	150	115	130	130	95	35 dia.	145, 100	175, 125	1450	100	–
15–4	168	335	127	115	280	240	75 × 20	235, 160	400, 230	1450	70	327

Tablica 3.2 Standardne dimenzije za kabelsko prednapinjanje ploča.



Slika 3.14. Sidra kabela kod naknadnog prednapinjanja.



Slika 3.15. Završetak prednapetih žica kod adhezijskog prednapinjanja.

3.2. Sustav BBRV

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

3.3. Sustav Vorspann-Technik

Na osnovi Freyssinetova patenta razrađen je i proširen sustav Vorspann–Technik. Koriste se pojedinačne žice, šipke, užad te snopovi žica i užadi. Kako se najčešće koristi užad, ovdje će se dati potrebni podaci za njihovo korištenje prema prospektima Vorspann– Technik-sustava.

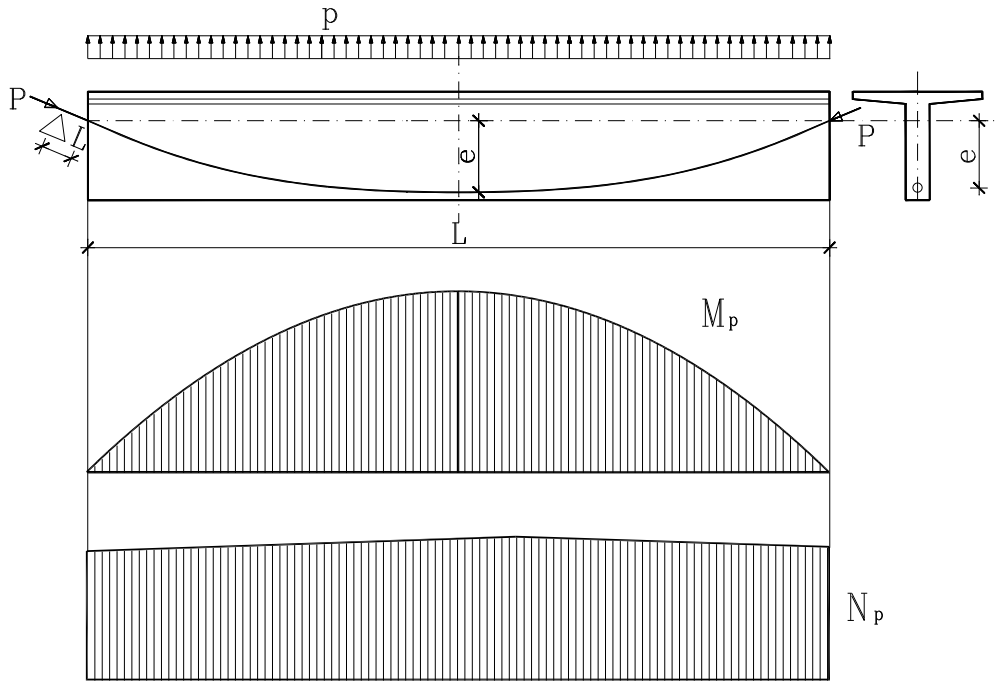
3.4. Sustav Dywidag

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

3.5. Sustav VSL

Švicarska tvrtaka sa sjedištem u Bernu. Vidi link: www.vsl-itrafor.com ili www.vsl.net

4. GUBICI I PADOVI SILE PREDNAPINJANJA



Slika 4.1 Dijagrami unutarnjih sila od prednapinjanja na statički određenom sustavu.

Moment od prednapinjanja na statički određenom sustavu određuje se prema:

$$M_p = P \cdot e$$

Gdje je:

P- sila u kabelu

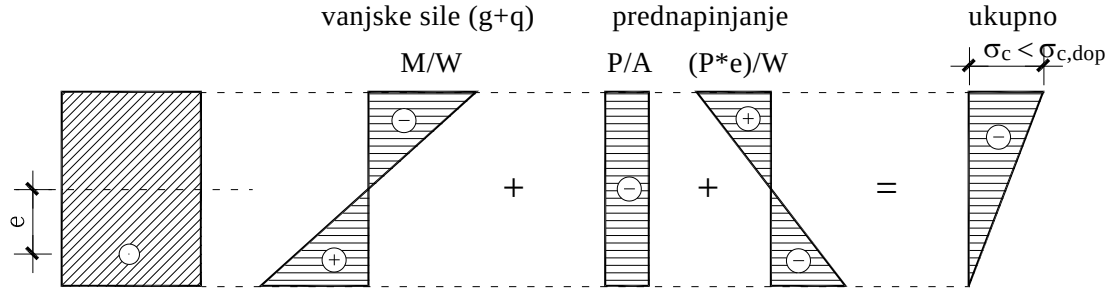
e- udaljenost težišta kabela od težišta idealnog poprečnog presjeka.

Kabel možemo promatrati kao vanjsko opterećenje. On djeluje na nosač preko skretnih sila i preko sila na sidru.

$$M_p = P \cdot e = \frac{p \cdot L^2}{8}$$

Skretna sila:

$$p = \frac{8 \cdot P \cdot e}{L^2}$$



Slika 4.2 Dijagram normalnih naprezanja u poprečnom presjeku određuje se metodom superpozicije.

Sila prednapinjanja ostvarena istezanjem čelika mijenja se u tijeku vremena i uzduž elementa (slika 4.3), a time se mijenjaju i naprezanja u betonu i čeliku.

Do gubitaka sile prednapinjanja dolazi prije i u tijeku unošenja tlačnog naprezanja u beton, a do padova, zbog relaksacije čelika i viskoznih deformacija betona, nakon uvođenja.



Slika 4.3 Dijagram sile u kabelu za slučaj prednapinjanja s jedne strane.

4.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

Prednapete konstrukcije poslije stvrdnjavanja izvode se tako da se kabeli prije montaže postavljaju u zaštitne cijevi. Poslije betoniranja i očvršćavanja betona kabeli se napinju pri čemu dolazi do njihova izduženja u odnosu na zaštitne cijevi, koje su već u ovom trenutku čvrsto vezane uz beton. Na spoju kabela i cijevi pri pomicanju prednapete armature javlja se trenje koje se suprotstavlja istezanju.

Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0\left(1 - e^{-\mu(\Theta + k\cdot x)}\right) \qquad (4.1)$$

P_0 – početna sila prednapinjanja koja ne smije prekoračiti veličinu $A_p \cdot \sigma_{p0}$

$\sigma_{p0} \le \begin{cases} 0{,}80 f_{pk} \\ 0{,}9 f_{p0.1,k} \end{cases}$ - maksimalni dopušteno naprezanje na preši, mjerodavan je manji

μ - koeficijent trenja između kabela i zaštitne cijevi
Θ -suma kutova skretanja kabela na duljini x u lučnoj mjeri
k – valovitost kabela
Vrijednosti koeficijenata μ i k mogu se naći u dokumentaciji proizvođača sustava prednapinjanja.

Eurocode 2 predlaže slijedeće vrijednosti za koeficijent trenja μ za kabele koji popunjavaju 50% zaštitne cijevi:

hladno obrađene žice	0.17
užad	0.19
rebrasti čelik	0.65
glatke šipke	0.33

Tablica 4.1 Vrijednosti za koeficijent trenja μ.

Za vrijednost k navode se granice:
$0.005 < k < 0.01$ po dužnom metru (1/m)
Koeficijenti k i μ mogu se također naći u dokumentaciji sustava prednapinjanja.

Kod skretanja kabela u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, za ukupno se skretanje uzima:
$\overline{\Theta} = \overline{\alpha} + \overline{\gamma}$ – kada skretanje slijedi jedno iza drugog ili
$\text{tg}\ \overline{\Theta} = \sqrt{tg^2\overline{\alpha} + tg^2\overline{\gamma}}$ – kada se skretanje javlja na istoj dionici,
gdje je $\overline{\alpha}$ ukupni kut skretanja u vertikalnoj, a $\overline{\gamma}$ u horizontalnoj ravnini.

4.2. Gubitak naprezanja zbog prokliznuća klina

U trenutku predavanja sile prednapinjanja od preše sidru, zbog prokliznuća klina, dolazi do gubitka postignutog izduženja.

Proizvođač sustava za prednapinjanje daje vrijednost prokliznuća klina (Δl) ovisno o tipu sidra.
Kada se sidrenje ostvaruje pomoću hladno obrađenih glavica (sustav BBRV) takvih gubitaka nema.

Odnos duljine prokliznuća klina i gubitka naprezanja bit će:

$$\Delta l = \frac{1}{E_z}\int_o^{x_1} \Delta\sigma_{zl} \cdot dx \tag{4.2}$$

Gubitak sile prednapinjanja prokliznućem klina:

$$\Delta P_{sl} = 2P_0 \cdot x_1 \cdot \mu\left(\frac{\Theta}{l}\right) + k \tag{4.3}$$

Duljina utjecaja prokliznuća klina

$$x_1 = \sqrt{\frac{\Delta l \cdot E_s}{\sigma_{p0} \cdot \mu(\Theta / l + k)}} \tag{4.4}$$

4.3. Gubitak naprezanja zbog elastičnih deformacija betona

Pri adhezijskom prednapinjanju dolazi do elastičnog skraćenja elementa pri prijenosu sile s čelika na beton. Gubitak naprezanja je proporcionalan naprezanju koje se unosi u beton:

Gubitak sile prednapinjanja zbog elastičnih deformacija betona za prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona:

$$\Delta P_c = \sigma_{c0}^{\bullet} \cdot \frac{\alpha_e}{1 + \rho_1 \cdot \alpha_e} \cdot A_p \tag{4.5}$$

početno naprezanje u betonu u visini težišta čelika umanjen za gubitke trenjem i prokliznućem klina

$$\sigma_{c0}^{\bullet} = P_0^{\bullet} \cdot \rho_1 / A_c \tag{4.6}$$

$\rho_1 = 1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot y_{cp}$ - utjecaj ekscentriciteta sile P_0

y_{cp} - udaljenost težišta betonskog presjeka i kabela
A_c - površina betonskog presjeka
I_c - moment tromost betonskog presjeka
$\alpha_e = E_s / E_{cm}$ - omjer modula elastičnosti

Gubitak sile prednapinjanja zbog elastičnih deformacija betona za prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona:

$$\Delta P_c = 0{,}5 \frac{n-1}{n} \alpha_e \cdot \sigma_{c0}^{\bullet} \cdot A_p \qquad (4.7)$$

n – broj kabela koji se sukcesivno prednapinju

4.4. Pad naprezanja zbog skupljanja i puzanja betona te relaksacije čelika

Korištenjem algebarske veze naprezanje-deformacija prema Trostu, te pretpostavke da se težište meke i prednapete armature poklapa, dolazi se do izraza za pad naprezanja u prednapetom čeliku u obliku:

Vremenski gubici zbog skupljanja, puzanja i relaksacije čelika u vrijeme t:

$$\Delta P_t(t) = \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = \frac{\varepsilon_s(t,t_0) E_s + \Delta\sigma_{pr} + \alpha_e \cdot \varphi(t,t_0)\left(\sigma_{cg} + \sigma_{cp0}\right)}{1 + \alpha_e \frac{A_p}{A_c}\left(1 + \frac{A_c}{I_c} y_{cp}^2\right)\left[1 + 0{,}8\varphi(t,t_0)\right]} \cdot A_p \qquad (4.8)$$

$\varepsilon_s(t,t_0)$ - procijenjena deformacija skupljanja
$\Delta\sigma_{pr}$ - promjena naprezanja u kabelu zbog relaksacije, a dobije se prema slici na osnovu omjera $\left(\sigma_p / f_{pk}\right)$ uz $\sigma_p \approx 0{,}85\sigma_{pg0}$

σ_{pg0} - početno naprezanje od prednapinjanja i stalnog opterećenja
$\varphi(t,t_0)$ - prognozirana vrijednost za koeficijent puzanja
σ_{cg} - naprezanje u betonu u visini kabela od stalnog opterećenja (-)
σ_{pg0} - početna vrijednost naprezanja od prednapinjanja u betonu u visini kabela

Uz poznate gubitke srednja vrijednost sile prednapinjanja u vrijeme t na udaljenosti x od kraja uzduž prednapetog elementa određuje se prema izrazima:

Za prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_{sl} - \Delta P_c - \Delta P_t(t) \qquad (4.9)$$

Za prednapinjanje nakon stvrdnjavanja betona

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_\mu(x) - \Delta P_{sl} - \Delta P_c - \Delta P_t(t) \qquad (4.10)$$

gdje je:

$P_{m,t}$ srednja vrijednost sile prednapinjanja u vremenu t na mjestu x uzduž elementa
P_o sila prednapinjanja na sidru neposredno nakon napinjanja
$\Delta P_\mu(x)$ gubitak zbog trenja
ΔP_{sl} gubitak zbog prokliznuća klina

ΔP_c gubitak zbog elastičnog deformiranja elementa

$\Delta P_t(t)$ gubitak zbog puzanja, skupljanja i opuštanja u vremenu t.

Sila prednapinjanja u vrijeme t=0 je P_{m0} određuje se smanjenjem početne sile za trenutne gubitke, dakle prema istim izrazima u kojima je $\Delta P_t(t)=0$. Ova sila ne smije prekoračiti veličinu $A_p \cdot \sigma_{pm,0}$.

$\sigma_{pm,0}$ je maksimalno dopušteno naprezanje nakon gubitaka sidrenjem kod prednapinjanja prije stvrdnjavanja betona, odnosno maksimalno dopušteno naprezanje nakon uklanjanja preše kod kabelskog prednapinjanja. Mjerodavna je manja vrijednost od slijedećih:

$$\sigma_{pm,0} \le \begin{cases} 0{,}75\, f_{pk} \\ 0{,}85\, f_{p0.1,k} \end{cases} \qquad (4.11)$$

Konačna sila prednapinjanja $P_{m\infty}$ je sila nakon svih gubitaka i trenutnih i vremenskih u t=∞.

Oznaka čelika	Y 1080/1230	Y 1375/1570	Y 1470/1670	Y 1570/1770	Y 1600/1860
f_{pk}	1080	1375	1470	1570	1600
$f_{p0.1,k}$	1230	1570	1670	1770	1860
0.8 f_{pk}	984	1256	1336	1416	1488
0.9 $f_{p0.1,k}$	972	1238	1323	1413	1440
σ_{p0} Max sigma na preši	**972**	**1238**	**1323**	**1413**	**1440**
0.75 f_{pk}	923	1178	1253	1328	1395
0.85 $f_{p0.1,k}$	918	1169	1250	1335	1360
$\sigma_{pm,0}$ Max sigma na sidru t=0	**918**	**1169**	**1250**	**1328**	**1360**
$\sigma_{pm,\infty}$ Max sigma na sidru t=∞	**800**	**1021**	**1086**	**1151**	**1209**

Tablica 4.2 Maksimalna naprezanja u čeliku za vrijeme i nakon napinjanja i u beskonačnosti.

5. IZBOR PRESJEKA I PRELIMINARNIH DIMENZIJA

Visine prednapetih nosača najčešće su manje od odgovarajućih armiranobetonskih greda. Ekonomične visine prednapetih nosača kreću se od l/15 do l/20, a minimalna je l/30 za mostove i l/40 za krovne nosače s lakšim pokrovom (l-raspon nosača). Koristi se više formula za preliminarnu visinu prednapetog nosača, a jedna je od njih:

$h = (3 \text{ do } 4)\sqrt{M_{g+q}}$ (h u cm, M_{g+q} u kNm) (5.1)

Oblik presjeka vrlo je važan kod prednapetih sustava. Racionalnost presjeka cijeni se prema udaljenostima gornjeg i donjeg ruba jezgre. Kao primjer ekonomičnosti uzima se relacija visina jezgre i polovice visine presjeka: $k_g + k_d = 0.5\ d$.

Općenito, racionalan presjek može se dobiti koncentracijom površine prema rubovima, odnosno što dalje od težišta presjeka.

Površina vlačnog pojasa ovisi o visini presjeka i odnosa g/q. Ako je visina velika i odnos g/q velik, donji pojas može izostati (T-presjek). Veličina gornjeg pojasa ovisi o sumi tereta (g+q). Što je ovaj zbroj veći to je potrebna veća širina pojasa. Ako je naprotiv q/g velik, a visina mala, onda vlačni pojas treba imati veću širinu (I-presjek ili još bolje sandučasti presjek).

6. KONTROLA NAPREZANJA

Prednapeti elementi proračunavaju se prema metodi dopuštenih naprezanja i po metodi graničnih stanja. Naprezanja u betonu, armaturi i čeliku za prednapinjanje u presjecima elemenata, pri najnepovoljnijoj kombinaciji opterećenja u toku prednapinjanja, građenja i korištenja, ne smiju prekoračiti dopuštene vrijednosti dane propisima. Isto tako mora se dokazati da elementi i konstrukcije zadovoljavaju uvjete nosivosti i upotrebljivosti.

Granično stanje naprezanja ograničava naprezanja za proračunsko opterećenje.
Naprezanje u betonu, σ_c, za rijetku kombinaciju opterećenja, treba biti:

$$\sigma_c \leq 0,6 \cdot f_{ck} \quad (6.1)$$

a za nazovistalnu kombinaciju:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck} \quad (6.2)$$

Naprezanje u čeliku, za rijetku kombinaciju opterećenja, treba biti:

$$\sigma_s \leq 0,8 \cdot f_{yk} \quad (6.3)$$

Naprezanje u prednapetom čeliku za t=0, treba biti:

$$\sigma_s \leq 0,75 \cdot f_{pk} \; i \; \leq 0,85 f_{p0.1,k} \quad (6.4)$$

Naprezanje u prednapetom čeliku za t=∞, treba biti:

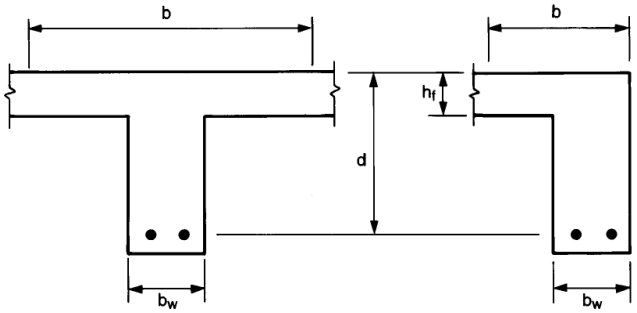
$$\sigma_{s\infty} \leq 0,65 \cdot f_{pk} \quad (6.5)$$

Klasa betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ct,m}$	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

Tablica 6.1 Vlačne čvrstoće betona.

Za razvedene presjeke kao što su T, I i sandučasti presjeci kojima su ploče tanje od 10 cm, dopušteno naprezanje umanjuju se za 10%. U montažnim spojevima, bez posebne armature u spoju, najmanje naprezanje tlaka mora iznositi 1.5 N/mm^2.

Prilikom proračuna naprezanja potrebno je odrediti sudjelujuću širinu. Jedan od uvjeta za njeno određivanje s obzirom na raspon dan je u tablici 6.2.



Slika 6.1 Sudjelujuća šrina b

	T-presjek	Polu T-presjek
Prvo polje	$b_w + 0.17L$	$b_w + 0.085L$
Srednje polje	$b_w + 0.14L$	$b_w + 0.07L$
Konzola	$b_w + 0.20L$	$b_w + 0.10L$

Tablica 6.2 Sudjelujuća širina b

Izrazi za sudjelujuću širinu vrijede uz sljedeće uvjete:

- Odnos susjednih raspona mora biti između 1.0 i 1.5.
- Duljina konzole mora biti manja od polovice susjednog raspona.
- Izrazi iz tablice se vrijede samo ako su manji od stvarne širine gornje pojasnice.

Kontrolu naprezanje potrebno je provesti za dva slučaja:

- u fazi napinjanja i
- u fazi korištenja.

Iz uvjeta dopustivih naprezanja na donjem i gornjem rubu poprečnog presjeka u fazi napinjanja i u fazi korištenja određuje se oblik poprečnog presjeka ili broj kabela. Za proračun naprezanja u betonu i armaturi koriste se formule teorije elastičnosti.

$$f_{ct} < \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} < f_c$$

Naprezanje na donjem i gornjem rubu za djelovanje pozitivnog momenta savijanja od vlastite težine (M_g) za fazu napinjanja (ako je sustav statički određen).

$$\sigma_c^d = -\frac{P_0}{0.95 \cdot A_c} - \frac{P_0 \cdot e}{0.95 \cdot W_d} + \frac{M_{\max}}{0.95 \cdot W_d} \le \sigma_{ct,dop}$$

$$\sigma_c^g = \frac{P_0}{0.95 \cdot A_c} + \frac{P_0 \cdot e}{0.95 \cdot W_d} - \frac{M_{\max}}{0.95 \cdot W_d} \le \sigma_{c,dop}$$

Naprezanje na donjem i gornjem rubu za djelovanje pozitivnog momenta savijanja od vanjskih opterećenja (M_{max}) za fazu eksploatacije (ako je sustav statički određen).

$$\sigma_c^d = -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,id}} - \frac{P_{m\infty} \cdot e}{W_{d,id}} + \frac{M_{\max}}{W_{d,id}} \le \sigma_{ct,dop}$$

$$\sigma_c^g = \frac{P_{m\infty}}{A_{c,id}} + \frac{P_{m\infty} \cdot e}{W_{d,id}} - \frac{M_{\max}}{W_{d,id}} \le \sigma_{c,dop}$$

Idealna površina presjeka:

$$A_{c,id} = A_c + (n - 1)(A_z + A_s)$$

Naprezanje na donjem rubu za djelovanje pozitivnog momenta savijanja od vanjskih opterećenja (M_{max}) za fazu eksploatacije (ako je sustav statički određen).

$$\sigma_c^d = \sigma_{ct,dop} = \frac{P_{m\infty}}{A_c} + \frac{P_{m\infty} \cdot e}{W_d} - \frac{M_{\max}}{W_d}$$

$$\sigma_c^d = \frac{P_{m\infty}}{A_c} + \frac{P_{m\infty} \cdot e}{W_d} - \frac{M_{\max}}{W_d} - \sigma_{ct,dop} = 0$$

$$\sigma_c^d = \frac{P_{m\infty}}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e}{k_g}\right) - \frac{M_{\max}}{W_d} - \sigma_{ct,dop} = 0$$

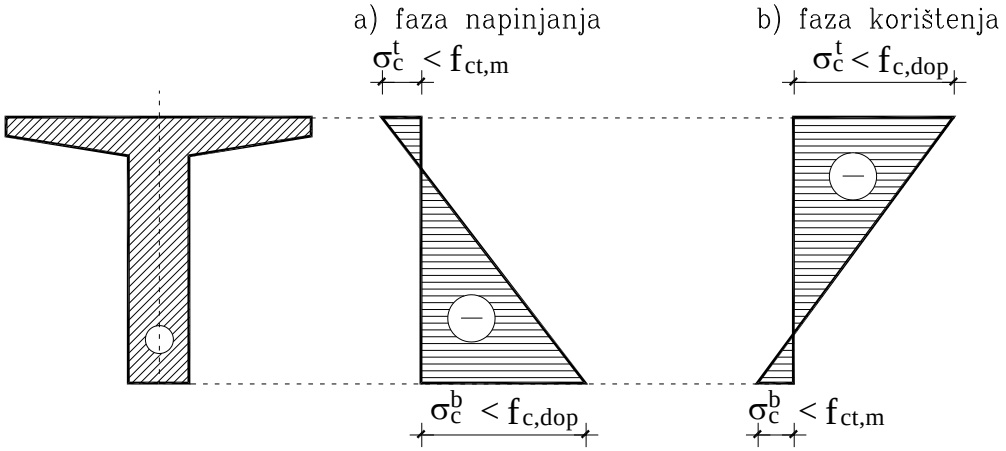
$k_d = \frac{W_g}{A_c}$ - jezgra dolje

$k_g = \frac{W_d}{A_c}$ - jezgra gore

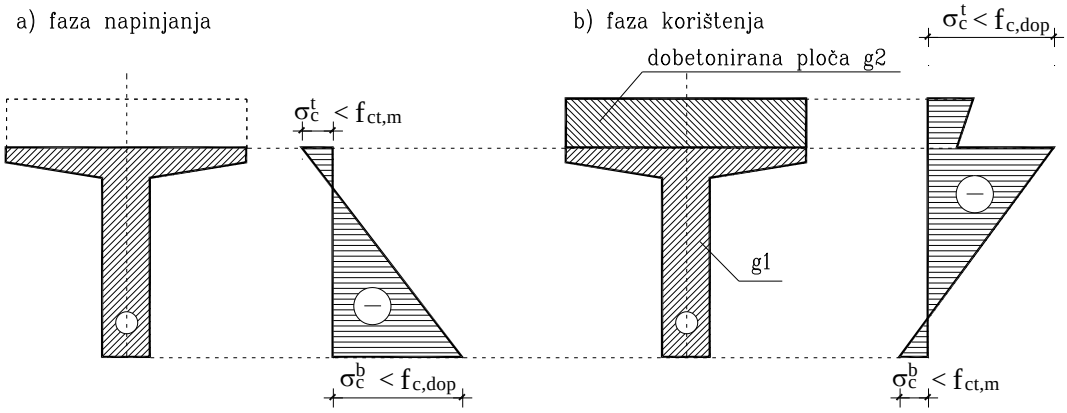
e –udaljenost težišta kabela od težišta neto idealnog presjeka.

Za fazu napinjanja za djelovanje pozitivnog momenta savijanja od vlastite težine potrebno je na donjem rubu kontrolirati tlačna naprezanja, stoga izraz glasi:

$$\sigma_d = \frac{P_{mo}}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e}{k_g}\right) - \frac{M_g}{W_d} - \sigma_{c,dop} = 0$$

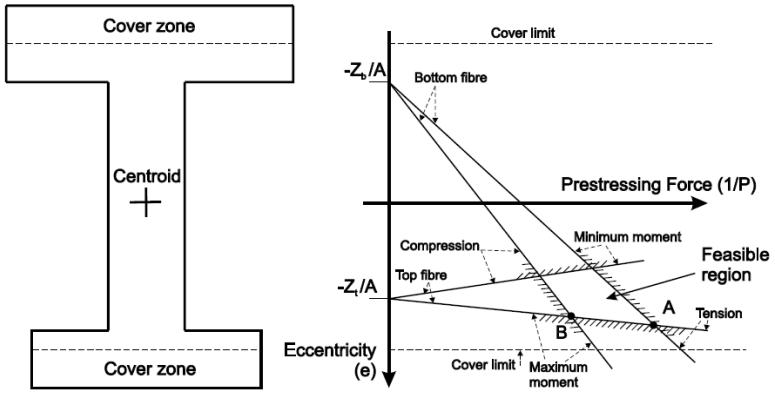


Slika 6.2 Naprezanje u fazi napinjanja i eksploatacije.



Slika 6.3 Naprezanje u fazi napinjanja i eksploatacije za presjek betoniran u dvije faze.

Iz ta četiri uvjeta dopustivih naprezanja može se grafički konstruirati područje u kojem se smije nalaziti prednapeti čelik.

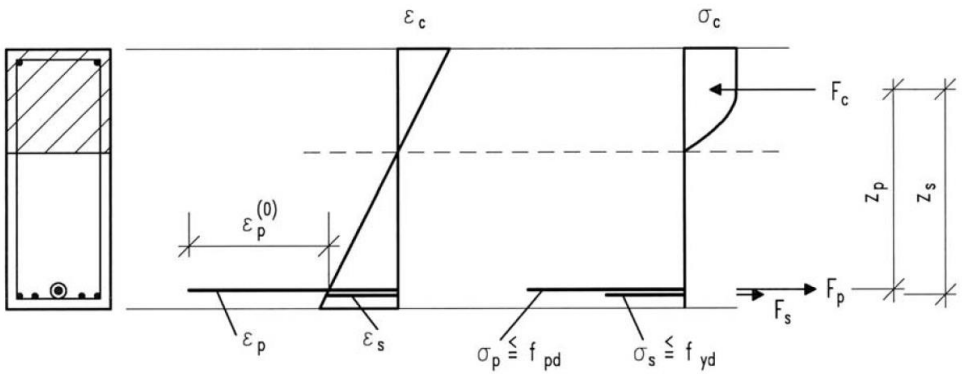


Slika 6.4 Magnel-ovi pravci.

7. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Nakon što se napravi kontrola naprezanja na osnovu koje se određuje količina prednapetog čelika, potrebno je odrediti potrebu količinu armature prema kriterijima graničnog stanja nosivosti. Potrebno je dokazati da su računske veličine izazvane vanjskim djelovanjem manje od vrijednosti otpora poprečnog presjeka.

7.1. Proračun uzdužne armature



Slika 7.1 Granično stanje nosivosti prednapete grede.

$$M_{Sd} \le M_{Rd}$$

Potrebna površina nenapete armature:

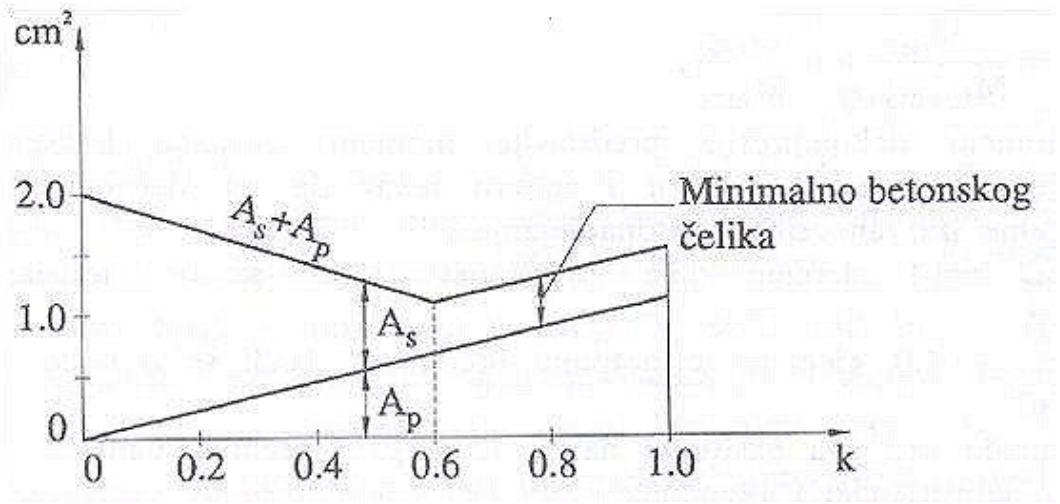
$$A_{s1} = \frac{M_{Sd} - A_p \cdot \sigma_p \cdot z_p}{z_s \cdot f_{yd}}$$

Računska čvrstoća armature

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

Računska čvrstoča čelika za prednapinjanje: 1660/1860

$$\sigma_{pd} = 0.9 \cdot f_{pk} / \gamma_s = 0.9 \cdot 1860 / 1.15 = 1455.7 N/mm^2 = 145.57 kN/cm^2$$



Slika 7.2 Količina armature s obzirom na stupanj prednapinjanja.

7.2. Proračun poprečne armature

Prednapeti elementi, osobito oni s povijenim kabelima, imaju povećanu nosivost na poprečne sile u odnosu na konvencionalno armirane nosače. Poprečne sile mogu biti znatno umanjene vertikalnom komponentom sile prednapinjanja, a glavna kosa vlačna naprezanja djelovanjem horizontalne komponente sila u kabelima.

Proračun prednapetih elemenata naprezanih glavnim kosim naponima provodi se prema Proširenoj Mörschovoj analogiji s rešetkom.

U nosačima s povijenim kabelima prema gore računska poprečna sila bit će:

$$V_{Sd} = \gamma_g \cdot V_g + \gamma_q \cdot V_q - \gamma_p \cdot (P \cdot \sin\alpha)$$

α - kut nagiba osi rezultantnoga kabela prema osi nosača u promatranom presjeku.

Posmično naprezanje u presjeku dobiva se prema izrazu:

$$\tau_{Sd} = \frac{V_{Sd} \cdot S_{id}}{I_{id} \cdot b_w}$$

Ako se u rebru nalaze šipke ili kabeli kod kojih je promjer zaštitne cijevi $\phi_n > b_w/8$, posmična naprezanja se proračunavaju s reduciranom širinom:

$$b_{w,red} = b_w - 0.5\sum\phi$$

Kontinuirano opterećenje na duljini 0.75 h uz ležaj ne uključuje se u poprečnu silu iz istih razloga kao kod armiranobetonskih nosača.

8. GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI

Za razliku od graničnih stanja nosivosti koeficijenti sigurnosti za opterećenje i za materijal u graničnim stanjima uporabljivosti iznose ukoliko nije drugačije određeno:

$\gamma_{G,j}=\gamma_{Q,j}=1,0$

$\gamma_M = 1,0$

Treba dokazati da je: $E_d \le C_d$

Tri osnovne kontrole koje se provode u graničnom stanja uporabljivosti su:

- kontrola naprezanja,
- kontrola pukotina i
- kontrola progiba.

Kod djelomično prednapetih konstrukcija predviđa se otvaranje pukotina samo nadolaskom pokretnog opterećenja i njihovo zatvaranje nakon prestanka djelovanja tog opterećenja. Karakteristične širine pukotina moraju biti manje od graničnih veličina danih propisima, a koje ovise o agresivnosti okoline i trajanja opterećenja. Za karakterističnu širinu pukotina uzeta je 70% veća vrijednost od srednje širine pukotina.

Betonski mostovi dijeli mostove u razrede od A do E. Konstruktivnom elementu moraju biti dodijeljeni razredi agresivnog djelovanja okoliša.

Razred	Kombinacija djelovanja za dokaz		računska vrijednost širine pukotine w_k [mm]
	dekompresije ($\sigma_c \leq 0$)	širine pukotina	
A	rijetka	-	0,2
B	učestala	rijetka	
C	nazovistalna	učestala	
D		učestala	
E		nazovistalna	0,3
F		nazovistalna	0,4

Tablica 8.1 Zahtjevi za ograničenje širina pukotina i dekompresiju.

	najmanji razred širine pukotina i dekompresije			
	način prednapinjanja			
razred agresivnog djelovanja okoliša	prednapinjanje sa sprezanjem ostvarenim naknadnim injektiranjem	prethodno prednapinjanje	prednapinjanje bez sprezanja ostvarena injektiranjem	AB elementi
XC1	D	D	F	F
XC2, XC3, XC4	C[a]	C	E	E
XD1, XD2, XD3,[b] XS1, XS2,XS3	C[a]	B	E	E
[a] ukoliko je zaštita od korozije osigurana drugim mjerama, dopušten je razred D				
[b] u pojedinim slučajevima postoji mogućnost da su potrebne posebne mjere za zaštitu od korozije				

Tablica 8.2 Najmanji razred širine pukotina i dekompresije u ovisnosti o razredu agresivnog djelovanja okoliša.

Ukoliko su zadovoljeni uvjeti prema tablicama, smatra se da su zadovoljeni uvjeti trajnosti i kakvoće mosta u smislu graničnog stanja uporabe. Za konstruktivne elemente s posebnim zahtjevima (npr. posude za vodu) mogući su stroži uvjeti za širinu pukotina.

Zadovoljavanje graničnog stanja dekompresije znači da je betonski presjek za mjerodavnu kombinaciju opterećenja u fazi građenja, na rubu, a u konačnom stanju u potpunosti u tlaku od prednapete sile u vlačnom području.

Kada se dimenzionira prema razredima širine pukotina i dekompresije, A, B i C za mjerodavnu kombinaciju djelovanja na natezi bližem rubu presjeka ne smiju nastupiti vlačna naprezanja.

Kod dokaza dekompresije u fazama građenja dopušteni su sljedeći koeficijenti za karakterističnu vrijednost prednapinjanja:

- ubetonirane natege, vođene ravno ili približno ravno (npr. centrično prednapinjanje kod uzdužnog potiskivanja): $r_{inf} = 1{,}00$, $r_{sup} = 1{,}10$;
- ubetonirane zakrivljeno vođene natege: $r_{inf} = 0{,}95$, $r_{sup} = 1{,}10$;
- vanjske natege: $r_{inf} = 1{,}00$, $r_{sup} = 1{,}00$.

Dokaz dekompresije provodi se uzimajući u obzir linearne promjene temperature ΔT_M.

Puno prednapinjanje odgovara razredima A i B, ograničeno prednapinjanje razredu C, a armirani beton razredima D i E (tablica 6.15).

prednapinjanje	puno	ograničeno	Djelomično
razred	A i B	B i C	C, D i E

Tablica 8.3 Približna usporedba razreda širine pukotina i dekompresije i starih naziva

Dokazi za granično stanje uporabe sadrže:
- ograničenje naprezanja;
- ograničenje pukotina i dokaze dekompresije;
- ograničenje deformacija;
- ograničenje vibracija i dinamičkih utjecaja.

Ukoliko se most prednapinje u uzdužnom smjeru, a u poprečnom ne, potrebno je tako odrediti dimenzije poprečnog presjeka da su na rubu poprečnog presjeka za rijetku kombinaciju djelovanja vlačna naprezanja betona u naponskom stanju I manja od vrijednosti u tablici 6.16. Dokaz ograničenja širina pukotina u poprečnom smjeru provodi se uz iste uvjete kao i u uzdužnome smjeru.

razred tlačne čvrstoće betona	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
dop $\sigma_{c,rub}$ [N/mm^2]	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5

Tablica 8.4 Dopuštena rubna vlačna naprezanja betona u poprečnom smjeru kada se ne prednapinje u poprečnom smjeru

9. PROTOKOL PREDNAPINJANJA

Prednapinjanje prednapetog čelika izvode specijalizirane osobe prema protokolu prednapinjanja. Kako bi bili sigurni da je čelik doista prednapet prema proračunskoj sili potrebno je kontrolirati dvije osnovne vrijednosti:

- pritisak na preši u barima i
- izduženje čelika u milimetrima.

DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL — DSI

STRESSING VALUES and STRESSING RECORD

DYWIDAG MULTISTRAND TENDON

Page :

Structure			Tendon type						Jack type						Date of partial stressing									
Section			Cross section area of tendon Ap			mm²			Ram area stressing Ak			cm²			Date of full stressing									
Structural element			Required min.		partial stressing		N/mm²		Jack no.						Stressing engineer									
Drawing No.		Structural Analysis No.	concr. strength at		full stressing		N/mm²		Gauge no.						Owner's representative									
Stressing values established on		by							Jack friction (at P)			%												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Stressing sequence	Tendon designation	Stressing end	Tendon length	Steel elongation	Concrete shortening	Slip + steel elongation within jack	Elongation (5)+(6)+(7)	Additional concrete shortening	Steel elongation required (8)+(9)	Prestressing force specified	required (11)x(10) / (8)	partial unloading	2nd phase stressing	Gauge pressure incl. jack friction at inter-mediate state	at prestr. force (12)	partial unloading	2nd phase stressing	Partial elongation required * (10)x(16-15) / (15)	Strand protusion at pressure (15)	at pressure (16) required (20)+(19)	at pressure (16) actual	elongation actual (22)-(20)	Elongation actual (23)x(16) / (16)-(15)	Elongation deviation 100% (24)-(10) / (10)
i			l	Δl_E	Δl_D	Δl_S	Δl_G	Δl^*_D	Δl	Po	P1	P2	P3	p_X	p_1	p_2	p_3	Δl_E	l_X	l_p	$l_{p'}$	Δl_E	$\Delta l'$	
	No.		m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN	kN	kN	bar	bar	bar	bar	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%
Remarks:														▲	▲	▲	▲	* in case of curved jack characteristics				Total		
														According to jack calibration report				a proper mean inclination shall be de-				In average		
														No.:				termined and introduced into formula						

Slika 9.1 Protokol prednapinjanja.

Ako se tijekom unošenja sile u naknadno napete kabele računsko izduženje ne dobiva u granicama ± 5 % uvjetovane ukupne sile ili unutar ± 10 % uvjetovane sile za jedan kabel, treba poduzeti mjere predviđene projektnim specifikacijama. Jednako treba postupiti i ako se tijekom unošenja sile u prethodno napete kabele računsko izduženje ne dobiva u granicama ± 3 % uvjetovane ukupne sile ili unutar ± 5 % uvjetovane sile za jedan kabel.

10. KONSTRUKCIJSKA PRAVILA PREDNAPETIH KONSTRUKCIJA

10.1. Najmanje udaljenosti užadi i natega

Svijetli razmak natega prethodnog prednapinjanja prema DIN 1045-1, 12.10.2. iznosi:

- horizontalno: $\geq d_p \geq 20$ mm $\geq d_g + 5$mm (d_p – promjer natege)
- vertikalno: $\geq d_p \geq 10$ mm $\geq d_g$ (d_g – promjer najvećeg zrna agregata)

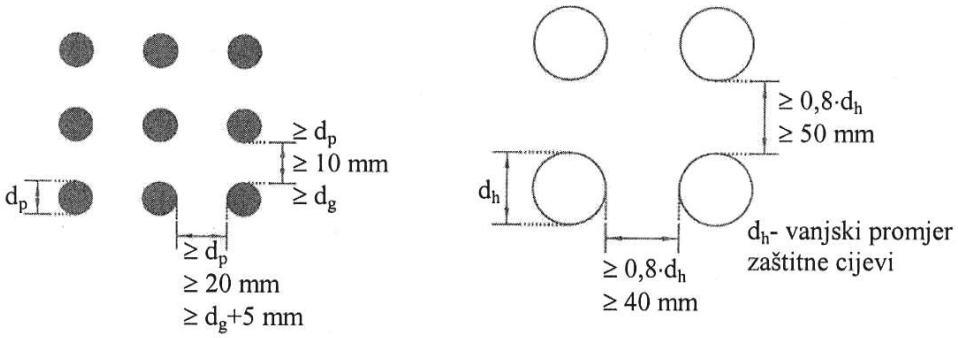
Minimalni razmaci prednapete armature prema EC2:

$$s_h \geq \begin{cases} d_g + 5 \\ \phi \\ 20mm \end{cases}, \qquad s_v \geq \begin{cases} d_g \\ \phi \\ 10mm \end{cases}$$

Svijetli razmak natege sa sprezanjem ostvarenim naknadnim injektiranjem cementnog morta prema DIN 1045-1, 12.10.2. iznosi:

- horizontalno: $\geq 0{,}8 \cdot d_{h,vanjski} \geq 40$ mm (d_h – promjer zaštitne cijevi natege)
- vertikalno: $\geq 0{,}8 \cdot d_{h,vanjski} \geq 50$ mm

HRN ENV 1992-1-1:2004 ne dopušta smanjenje na $0,8 \cdot d_{h,vanjski}$ (odnosno d_p).



Slika 10.1 Najmanje udaljenosti natega (zaštitnih cijevi) prema DIN 1045-1, 12.10.

Navedene vrijednosti svijetlih razmaka natega vrijede samo ukoliko u tehničkim dopuštenjima ili uputama proizvođača nisu navedene strože vrijednosti.

Prilikom određivanja najmanjih razmaka natega potrebno je obratiti pažnju i na najmanje potrebne razmake za ugradnju i vibriranje betona. Podrobniju provjeru zahtijevaju gusto armirana područja oko sidara i spojki. Spojke su mehanički elementi koji služe za nastavljanje natega, kada je prethodna natega napeta. Kritični su i vitki elementi, kao što su hrptovi sandučastih nosača. Ne bi trebalo izvoditi više od tri natege jednu do druge u horizontalnom smjeru bez razmaka za vibriranje. Širina otvora za vibriranje ovisi o opremi, a najmanje iznosi 10 cm kod elemenata viših od 2 m. Kod visokih i/ili nagnutih otvora za injektiranje potrebno je rabiti cijev za ugradnju betona kako bi se spriječila segregacija betona (kontraktor postupak).

Kod rebrastih i sandučastih nosača, sukladno koncentraciji naprezanja, natege se koncentriraju uz hrptove i nisu raspodijeljene po cijeloj širini ploče.

Razmak natega ugrađenih u betonski presjek do pocinčanih elemenata, koji se ugrađuju u presjek, ili do pocinčane armature, mora biti najmanje 20 mm i ne smije postojati nikakva metalna veza između pocinčanog elementa i natege.

Između prethodno napetih natega i ugrađenih elemenata (npr. slivnjaka) mora se zadržati najmanje 10 cm svijetlog razmaka.

10.2. Armatura prednapetih konstrukcijskih elemenata

Kod prednapetih konstrukcijskih elemenata uvijek se preporučuje ugrađivanje najmanje konstrukcijske armature prema tablici 10.1. U tablici su dane vrijednosti koeficijenta armiranja ρ za proračun minimalne armature.

	Karakteristična tlačna čvrstoća betona f_{ck} [N/mm^2]								
	12	16	20	25	30	35	40	45	50
ρ [a)] [‰]	0,51	0,61	0,70	0,83	0,93	1,02	1,12	1,21	1,31
	Karakteristična tlačna čvrstoća betona f_{ck} [N/mm^2]								
	55	60	70	80	90	100			
ρ [a)] [‰]	1,34	1,41	1,47	1,54	1,60	1,66			
[a)] ove vrijednosti proizlaze iz $\rho = 0,16 \cdot f_{ctm}/f_{yk}$									

Tablica 10.1 Osnovne vrijednosti koeficijenta armiranja ρ *za proračun minimalne armature.*

Kod prethodnog prednapinjanja dopušteno je uzeti u obzir (pribrojiti u punom iznosu) nategе koji se nalaze unutar dvostruke debljine zaštitnog sloja prilikom odabira najmanje konstrukcijske armature.

Najmanje vrijednosti konstrukcijske armature prema formulama za najveću i najmanju armaturu, za ograničavanje širine pukotina i za prednapete elemente prema tablici 6.18 ne zbrajaju se, mjerodavna je najveća vrijednost.

Konstrukcijska armatura ugrađuje se kao približno ortogonalna mreža u vlačno i tlačno područje konstrukcijskog elementa. Najveći razmak šipki armature je 200 mm.

	Ploče, pojasne lamele i široke grede ($b_w > h$) po m'		Grede sa $b_w \leq h$, hrptovi T- ili sandučastih nosača	
	Konstrukcijski elementi u razredu agresivnog djelovanja okoliša XC1 do XC4	Konstrukcijski elementi u ostalim razredima agresivnog djelovanja okoliša	Konstrukcijski elementi u razredu agresivnog djelovanja okoliša XC1 do XC4	Konstrukcijski elementi u ostalim razredima agresivnog djelovanja okoliša
- bočne plohe greda - ploče sa $h \geq 1{,}0$ m na svakom rubu[a] (oslonjeni i slobodni)	$0{,}5 \cdot \rho \cdot h$ odnosno $0{,}5 \cdot \rho \cdot h_f$	$1{,}0 \cdot \rho \cdot h$ odnosno $1{,}0 \cdot \rho \cdot h_f$	$1{,}0 \cdot \rho \cdot b_w$ po m^1	$1{,}0 \cdot \rho \cdot b_w$ po m^1
- vanjski rub[b] tlačnih područja greda i ploča - u stlačenom vlačnom području ploča[a,b]	$0{,}5 \cdot \rho \cdot h$ odnosno $0{,}5 \cdot \rho \cdot h_f$	$1{,}0 \cdot \rho \cdot h$ odnosno $1{,}0 \cdot \rho \cdot h_f$	---	$1{,}0 \cdot \rho \cdot h \cdot b_w$
- tlačni pojas nosača sa $h > 12$ cm (gornje i donje područje - u svako)[a]	---	$1{,}0 \cdot \rho \cdot h_f$	---	---
gdje je: h visina grede ili debljina ploče h_f debljina tlačnog ili vlačnog pojasa ploče razgranatog presjeka b_w debljina hrpta grede ρ osnovna vrijednost koeficijenta armiranja				
[a] Nije potrebna veća armatura od 3,4 cm^2/m^1 u svakome smjeru. [b] U konstrukcijskim elementima u razredu agresivnog djelovanja okoliša XC1 dopušteno je izostaviti armaturu predviđenu prema ovoj tablici za razrede XC1 do XC4. Za ploče od predgotovljenih elemenata manje širine 1,20 m dopušteno je izostaviti poprečnu armaturu predviđenu prema ovoj tablici u svim navedenim slučajevima.				

Tablica 10.2 Najmanja konstrukcijska armatura ovisno o području prednapetog konstrukcijskog elementa

10.3. Najmanji razred čvrstoće betona u trenutku prednapinjanja

Kod prethodnog ili naknadnog prednapinjanja natega beton u trenutku prednapinjanja t_j mora imati najmanju potrebnu tlačnu čvrstoću f_{cmj}. U tablici 10.3 dane su vrijednosti najmanjih tlačnih čvrstoća za prednapinjanje na dio sile te za konačno prednapinjanje.

	Čvrstoća f_{cmj} [N/mm^2][a]	
Razred tlačne čvrstoće betona	Prednapinjanje na dio sile (do 30 % sile prema tehničkom dopuštenju)	Prednapinjanje na konačnu silu
C25/30	13	26
C30/37	15	30
C35/45	17	34
C40/50	19	38
C45/55	21	42

C50/60	23	46
C55/67	25	50
C60/75	27	54
C70/85	31	62
C80/95	35	70
C90/105	39	78
C100/115	43	86
[a] Vrijedi srednja vrijednost tlačne čvrstoće valjka (kod primjene kocaka potrebno je čvrstoće preračunati).		

Tablica 10.3 Najmanji razred tlačne čvrstoće betona f_{cmj} u trenutku ($t = t_j$) prednapinjanja natega

Za prednapinjanje na dio sile vrijede vrijednosti u prvome stupcu, pri čemu sila prednapinjanja u svakoj natezi ne smije premašiti 30 % najveće dopuštene sile za tu nategu. Ukoliko se ispitivanjima dokaže da u trenutku prednapinjanja tlačna čvrstoća daje vrijednost koja se nalazi između vrijednosti navedenih u tablici, dopušteno je silu prednapinjanja linearno interpolirati između 30 % najveće sile i 100 % sile na koju se prednapinje.

10.4. Vođenje natega

Kod definiranja vođenja natega uz statička ograničenja potrebno je uzeti u obzir i ova konstrukcijska pravila:

- zaštitni sloj betona:

  Dostatna debljina zaštitnog sloja potrebna je zbog zaštite čelika za prednapinjanje od korozije kao i za prijenos sila.

- potrebno je osigurati neosjetljivost konstrukcije na dimenzijska odstupanja:

  Osnovni kriterij dobrog vođenja natega je jasno prepoznavanje odstupanja predviđenih vrijednosti i stvarno izmjerenih. Kada je koeficijent trenja znatno veći od proračunom predviđenog, očekuju se i znatnije promjene duljine izduljenja natega.

- armatura i položaj sidara (spojki):

  Spojke treba smjestiti u područja malih naprezanja zbog njihove male čvrstoće na zamor, a to su područja nul-momenata savijanja. Za pravilno razmještanje spojki potrebna je velika površina, jer na mjestu nastavka spojke razmiču natege i takvo vođenje često može prouzrokovati skoro centrično vođenje natega. Važno je u području oko spojke, koje treba biti gusto armirano, predvidjeti dostatne razmake za ugradnju i vibriranje betona.

- momenti od prednapinjanja trebaju djelovati suprotno od opterećenja vlastitom težinom i prometom:

- potrebno je pridržavati se najmanjih radijusa vođenja natega. Oštri lomovi u vođenju natega nisu mogući:

- u područjima najvećih momenata, natege se smještaju što je moguće dalje uz rub poprečnog presjeka. Ovakav položaj natega osigurava sudjelovanje natega u ograničavanju širina pukotina, čak i u područjima s manjim naprezanjima, kada je ostvareno sprezanje natega s presjekom uz pomoć injektiranja cementnim mortom:

- natege se najčešće polažu tako da slijede liniju parabole ili kružnice. Kod kompjutorskog proračuna moguće su i složenije krivulje. Posljednjih 90 do 100 cm natege do sidra (spojki) treba voditi u pravcu:

- smanjenje sile prednapinjanja u uzdužnome smjeru slijedi iz naprezanja konstrukcijskog elementa. Preporučuje se provesti barem 2/3 potrebnih natega za preuzimanje momenta u polju preko obje ležajne osi.

Za neka od navedenih konstrukcijskih pravila daju se podrobnija objašnjenja. Sva navedena pravila vrijede u slučaju kada u tehničkom dopuštenju nisu navedeni stroži kriteriji.

Kod sandučastih nosača i rebrastih poprečnih presjeka natege možemo voditi zakrivljeno kroz hrptove ili ravno kroz ploče (slika 10.2). Ovdje se navode prednosti i nedostaci oba rješenja.

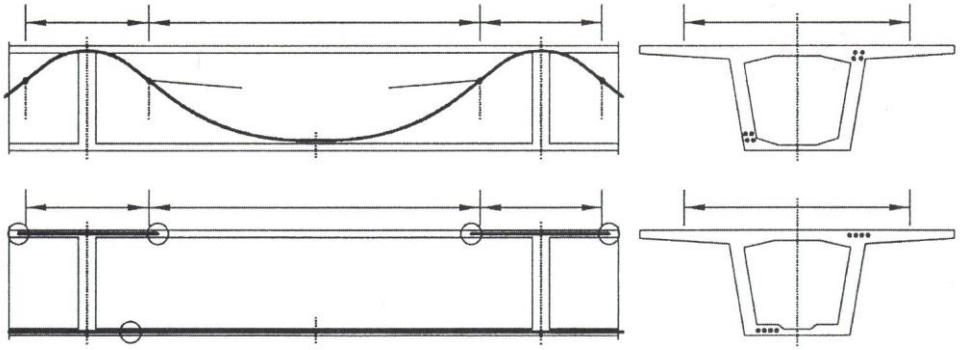
Zakrivljeno vođenje natega

Prednosti:

- zakrivljeno vođenje natega po paraboli proizvodi konstantne skretne sile koje se izravno suprotstavljaju vanjskome kontinuiranom djelovanju
- oblik vođenja natege možemo prilagoditi vanjskom djelovanju, čime je moguće ekonomičnije iskorištavanje čelika
- moguće je polaganje duljih natega koji se protežu kroz više polja, čime se može smanjiti broj zahtjevnih sidrenih mjesta.

Nedostaci:

- potrebne su veće debljine hrptova, posebno u područjima sidrenja i spajanja natega
- trenje uzrokuje relativno velike gubitke sile prednapinjanja na zakrivljenim mjestima natega.



Slika 10.2 Vođenje natega zakrivljeno i ravno

Ravno vođenje natega u pojasnim pločama

Prednosti:

- natege su jednostavne pa se brže postavljaju
- hrptovi su oslobođeni natega te se mogu prema statičkim ili konstrukcijskim razlozima izvesti tanji, što smanjuje vlastitu težinu i naprezanja od prisila
- za razliku od vanjskog prednapinjanja može se iskoristiti maksimalni krak sila
- minimalni su gubici zbog trenja zbog ravnog vođenja natega
- smanjivanje broja aktivnih natega prema potrebi jednostavno je izvedivo.

Nedostaci:

- ne mogu se iskoristiti skretne sile za preuzimanje dijela kontinuiranog djelovanja

- ravnim nategama ne stvaraju se rasterećujuće poprečne sile
- zbog velikih duljina nastavljanja, kod kontinuiranih nosača, povećava se utrošak čelika za prednapinjanje.

10.5. Dodatna načela za vanjsko prednapinjanje betonskih mostova

Kod sandučastih nosača ravno vođenje naknadno napetih natega dopušteno je samo u pločama, i to u kolničkoj ploči i donjoj ploči sanduka. Kod tzv. mješovite gradnje natege se unutar presjeka vode ravno (s ostvarenim sprezanjem) i poligonalno s nategama postavljenim izvan presjeka. Najveća prednost vanjskih natega je bolja korozivna zaštita, mogućnost dotezanja, izmjene natega i kontrola.

Sidrena i skretna mjesta vanjskih natega moraju se izvesti tako da omogućavaju izmjenu natega bez oštećivanja ostalih elemenata konstrukcije. Poprečne vibracije vanjskih natega od prometnih opterećenja, vjetra ili drugih učinaka moraju se onemogućiti odgovarajućim rješenjima.

Razmaci vanjskih natega određuju se prema mogućnosti zamjene i kontrole.

Skretanja natega sve do kuta od 0,0175 *rad* (= 1,0°) mogu se predvidjeti bez skretnika ukoliko takav postupak nije izričito isključen u tehničkom dopuštenju postupka prednapinjanja (vidi HRN ENV 1992-1-5, točka 3.4.5.1(104) – 0,02 *rad* = 1,15°).

Skretnici moraju biti tako izrađeni da omogućuju kutne netočnosti u bilo kojem smjeru od najmanje 0,055 *rad* u oba svoja smjera bez vidljivog smanjenja učinkovitosti sidrenja.

Najmanji radijusi zakrivljenosti vanjskih natega su:

- užad promjera 13 mm: 1,70 m
- užad promjera 15 mm: 2,50 m.

Kod ploča s dostatno učvršćenim gornjim i donjim područjem armature, debljine $h \leq 450$ mm, prednapetih vanjskim nategama, dovoljno je nategu pričvrstiti na dva mjesta za jedno od područja armature i pridržavati se potrebnih udaljenosti prema sljedećem:

- između dva pričvršćenja u području oslonaca 300 mm $\leq a \leq$ 1000 mm
- između sidra natega i veze s gornjim područjem armature $a \leq$ 1500 mm
- između sidra natega i veze s donjim područjem armature ili između veze s gornjim i donjim područjem armature $a \leq$ 3000 mm.

U područjima pričvršćenja vanjske natege za gornje ili donje područje armature potrebno je da gornja ili donja ploha ploče bude ravna.

Sila prednapinjanja vanjske natege ne treba premašiti 3 MN.

Ukupna duljina vanjske natege između sidara ne smije biti dulja od 200 m.

Potrebno je posvetiti veliku pažnju ugradnji sidara, skretnika i otvora. Kod izvedbe treba provjerati visinu i položaj. Vodi se zapisnik o odstupanjima izmjerenih vrijednosti i projektom predviđenih. Ugrađene natege ne smiju nalijegati na rubove na izlasku iz presjeka.

U području sidrenja vanjske natege, najmanje se na duljini od 1,00 m, vode u pravcu, ukoliko tehničkim rješenjem nije navedena druga veća duljina.

Svijetli razmak paralelnih vanjskih natega ili natega do susjednih konstrukcijskih elemenata iznosi najmanje 8 cm zbog mogućnosti kontrole.

Kako bi se izbjeglo titranje natega, potrebno ih je na najvećem razmaku do 35 m pričvrstiti. Skretna i sidrena mjesta vrijede kao pričvršćenja u smislu titranja natega. Na ostalim potrebnim mjestima za pričvršćenje, rješenja su slična pridržavanju cijevi odvodnje ili sl.

Kod mješovite gradnje (vanjske natege i natege unutar presjeka) udio vanjskih natega u konačnoj sili prednapinjanja u svakom presjeku treba iznositi najmanje 20 % ukupne sile prednapinjanja.

Ukoliko je potrebno ugraditi i natege za poprečno prednapinjanje kolničke ploče mostova dopuštene su samo natege unutar betonskog presjeka bez sprezanja ostvarenog injektiranjem koje je moguće i zamijeniti.

10.5.1 Ojačanje konstrukcije vanjskim nategama

Kod mostova je potrebno predvidjeti mogućnost naknadnog ojačanja sandučastog nosača dodatnim vanjskim nategama za sile prednapinjanja od oko 3,0 MN, po svakom hrptu jednu. Kod mješovite gradnje potrebno je predvidjeti po dvije dodatne natege po hrptu.

Za ugradnju dodatnih natega potrebno je predvidjeti otvore i slobodne profile. Vođenje odvodnje ili drugih instalacija potrebno je prilagoditi kasnijoj ugradnji dodatnih vanjskih natega. Potrebno je osigurati preklapanje nad ležajnim osloncima i na taj način ojačati polje po polje.

Dodatne natege ne smiju smanjivati najmanje veličine potrebnih otvora za prolaz u poprečnim nosačima.

U sandučastim nosačima potrebno je predvidjeti otvore u donjim pločama. Najmanje jedan veličine 1,20 m do 2,50 m uz prometnu površinu i po jedan veličine 1,00 m do 1,50 m uz upornjake. Nad otvorima mora se omogućiti postavljanje kuke s dopuštenim opterećenjem od 15 kN.

10.5.2 Sidreni i skretni elementi

Sidra, skretni elementi i otvori moraju se tako oblikovati da dodatno uz dopušteni kut skretanja dopuštaju odstupanje u svim smjerovima od najmanje $\Delta\alpha = \pm 0{,}055$ rad. Dopušteno odstupanje na sidrenom elementu vrijedi samo na izlazu iz betonskog presjeka.

Sidreni i skretni elementi dimenzioniraju se na sva djelovanja faza izvedbe, redoslijeda prednapinjanja, zamjene natega ili ugradnje dodatnih natega.

Kod dimenzioniranja susjednih elemenata sidrenim i skretnim elementima potrebno je uzeti u obzir njihov utjecaj. Sila u proračunu je srednja vrijednost sile prednapinjanja $P_{m,t}$.

10.5.3 Nadzor konstrukcije s vanjskim nategama

Potrebno je podrobno razraditi izvedbene nacrte, koji obavezno moraju sadržavati:

- podrobno razrađene izmjere otvora
- položaj i ugradnju otvora u oplatu
- osiguranje položaja
- ugradnju, napinjanje i zamjenu natega.

Potrebno je razraditi podrobni program mjerenja prema kojem će se utvrđivati točnost izvedbe i nadzor pojedinih faza izvedbe i konačnog stanja.

Točnost izvedbe sidrenih i skretnih elemenata te otvora treba odgovarajućim mjerama utvrditi neposredno nakon njihove izvedbe. To se može učiniti npr. napinjanjem tanke žice kroz te elemente.

10.6. Područje sidrenja pri naknadnom napinjanju

Područje sidrenja treba po vanjskim plohama uvijek imati raspoređenu ortogonalnu mrežu armature. Potrebna armatura preuzima se iz tehničkog dopuštenja za postupak prednapinjanja. Dokaz preuzimanja sila i daljnjeg unošenja u konstrukciju provodi se odgovarajućim postupcima.

Kada se ugrađuje skupina natega koje se naknadno napinju, potrebno je na krajevima natega na određenim razmacima predvidjeti odgovarajuće spone za preuzimanje sila cijepanja.

U svakom dijelu područja sidrenja postotak armiranja, sa svake strane skupine natega, treba iznositi najmanje 0,15 % u oba (poprečna) smjera.

Sva armatura mora biti potpuno sidrena.

Ukoliko se za određivanje poprečnih vlačnih sila rabi štapni model, potrebno je primijeniti sljedeća konstrukcijska pravila:

- proračunate ploštine presjeka armature za preuzimanje vlačnih sila potrebno je razmjestiti odgovarajuće raspodjeli vlačnih naprezanja
- za osiguranje sidrenja rabe se zatvorene spone
- svaki sustav armature u području sidrenja treba oblikovati kao prostorno ortogonalnu mrežu armature.

Posebnu pažnju treba posvetiti područjima sidrenja poprečnih presjeka koji odstupaju od uobičajenih oblika poprečnih presjeka greda.

10.7. Položaj i raspored spojki

Sidra natega i spojke na radnim spojnicama područja su u kojima se javljaju poteškoće i često oštećenja (pukotine u betonu, slomovi čelika za prednapinjanje). Iz tog razloga ograničen je broj nastavaka natega (spojki) u jednome presjeku.
Prema DIN 1045-1 nije dopušteno nastavljanje svih natega u jednom presjeku te je potrebno:

- Izbjegavati više od 70% spojki u jednome presjeku i
- potrebno je najmanje 30% svih natega u jednome presjeku voditi bez nastavljanja.

Raspored više od 50% spojki natega u jednome presjeku trebalo bi izbjegavati ako ne postoji kontinuirana (ne u tom presjeku nastavljena) najmanja armatura ili barem stalno tlačno naprezanje od 3 N/mm^2, za čestu kombinaciju opterećenja, kojim će se preuzeti lokalna vlačna naprezanja (HRN ENV 1992-2:2004).

Visina konstrukcijskog elementa *h*	Razmak *a* [m]
≤ 2,0 m	1,5·h
> 2,0 m	3

Tablica 10.4 Razmak spojki natega koje nisu nastavljane u jednome presjeku

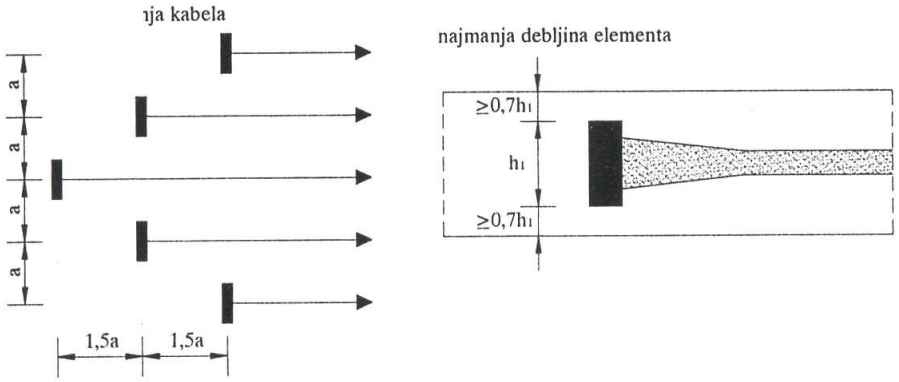
Za preuzimanje sila prisile potrebno je predvidjeti povećanu najmanju armaturu.

U jednome presjeku, ograničen je broj nastavaka (spojki), a ne veličina sile prednapinjanja u spojki.

Spojnice u kojima se nastavljaju nategе predstavljaju slaba mjesta u konstrukciji iz sljedećih razloga:

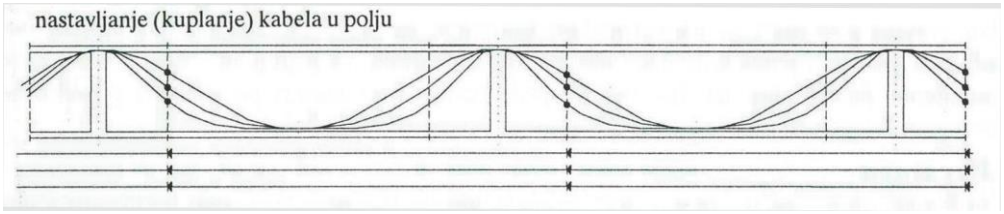
- kvaliteta betona u spojnici gdje se nategе nastavljaju često je slabija od kvalitete betona u ostalim područjima. Kvaliteta betona između ostalog ovisi i o izvedbi, npr. o smjeru betoniranja. U spojnici se posebno smanjuje vlačna čvrstoća betona u odnosu na onu u ostatku konstrukcije. Iz tog razloga će se na tim mjestima prvo pojaviti pukotine u betonu od proračunski predviđenih djelovanja sila prisile
- kod hidratacije nastaju temperaturne razlike između već očvrsnulog betona i "novog" betona, što dovodi do vlastitih (vlačnih) naprezanja u radnoj spojnici
- nelinearni raspored deformacija; Prvo se sila prednapinjanja unosi u beton u punome iznosu na očvrsnuli beton prethodno betoniranog odsječka. Kod nastavljanja natega, kod napinjanja sljedećeg odsječka prethodni nastavak se gotovo potpuno rastereti. Zbog toga se unutar betonskog presjeka mogu pojaviti vlačna naprezanja
- puzanje prednapetog betona uzrokuje preraspodjelu naprezanja
- zbog skretanja (vitoperenja) natega u području nastavka (spojke) dolazi do povećanih gubitaka sile prednapinjanja zbog trenja koji se moraju uzeti u obzir u proračunu. Taj gubitak uzrokuje smanjenje sile prednapinjanja u radnoj spojnici
- u području radne spojnice nastupaju povećani gubici zbog puzanja i skupljanja, uvjetovani visokom krutošću spojke na izduljenje
- kod izvedbe u odsječcima može doći do vlastitih naprezanja od neravnomjernog skupljanja pojedinih dijelova konstrukcije.

Sidra natega potrebno je smjestiti u stlačena područja kako bi se opasnost od pojave pukotina smanjila na najmanju moguću mjeru. Sidra je potrebno izmaknuti kako bi stražnja sidra mogla tlačiti eventualna vlačna naprezanja nastala od sidara ispred njih.



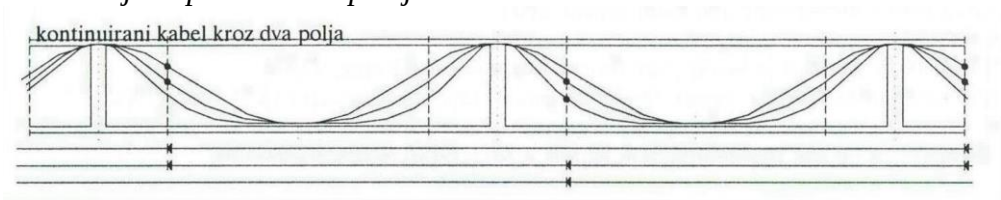
Slika 10.3 Raspored sidara natega

Kada se u području nastavka (spojke) natega otvore pukotine u betonu, pojačava se naprezanje natega stalnom promjenom naprezanja, što može dovesti do sloma zamorom. Stoga se u područjima nastavaka mora provesti dokaz čvrstoće betona gdje je potrebno ugraditi i povećanu najmanju armaturu za ograničenje širina pukotina.



Slika 10.4 Nastavljanje svih natega u jednome presjeku

Dio natega nenastavljeno prolazi kroz presjek



Slika 10.5 Dio natega nenastavljeno prolazi kroz presjek

10.8. Zaštitne cijevi natega

Kod naknadnog prednapinjanja u betonski se presjek polažu zaštitne cijevi kako bi se omogućilo ugrađivanje natega nakon očvršćivanja betona. Zaštitne cijevi se uglavnom proizvode od profiliranog lima različitih promjera i debljine lima (HRN ENV 13670-1:2002, HRN EN 523, HRN EN 524). Uobičajena je proizvodnja u odsječcima duljine 5 m ili 6 m. Zaštitne cijevi bi se međusobno trebale spajati kratkim odsječcima cijevi nešto većeg promjera tako da se mogu navinuti ili nataknuti po pola na svaku cijev te zabrtviti. Cijevi su profilirane kako bi im se povećala krutost i sprezanje s betonskim presjekom te injektiranim cementnim mortom.

Kod naknadnog prednapinjanja bez sprezanja ostvarenog injektiranjem cementnog morta ili kod vanjskog prednapinjanja, zaštitne cijevi su od polietilena velike gustoće (engl. HDPE - **h**igh **d**ensity **p**oly**e**thylen).

Suvremeno rješenje je primjena profiliranih zaštitnih cijevi od umjetnog (polimernog) materijala i za naknadno prednapinjanje sa sprezanjem. Postoje određene prednosti primjene zaštitnih cijevi od umjetnog materijala. Prvenstveno zaštitne cijevi od ovog materijala omogućuju bolju zaštitu od korozije natega. Poboljšanje zaštite od korozije iznimno je važno kod poprečnog prednapinjanja rasponskih sklopova mostova ili kod građevina u morskome okolišu. Zaštitne cijevi od umjetnih materijala imaju veću čvrstoću na zamor od čeličnih. Veća čvrstoća na zamor je prednost kod djelomičnog prednapinjanja, gdje se predviđa cikličko pojavljivanje pukotina u betonu. Korozija trenjem je manja nego kod čeličnih cijevi.

Koeficijent trenja za čelik i polipropilen razlikuje se za oko 30 % ($\mu \approx 1{,}4$), što je velika prednost kod natega položenih s velikim kutovima skretanja. Koeficijent trenja je približno stalan dok se kod čeličnih cijevi uvelike razlikuje između nezahrđalih i hrđavih dijelova.

Nedostatak zaštitnih cijevi od umjetnih materijala predstavljaju visoki troškovi proizvodnje i ugradnje te veliki najmanji mogući radijusi ugradnje. Zaštitne cijevi moraju biti dostatno krute na opterećenje i progibanje između dvaju oslonaca u armaturnom košu do očvršćivanja ugrađenog betona. Na njima se ne smiju pojaviti udubljenja ili izbočenja. Debljina zaštitne cijevi mora biti takva da se prednapinjanjem natege ne probije trenjem.

Proizvode se zaštitne cijevi ovalnog, pravokutnog i okruglog poprečnog presjeka. Najčešće se primjenjuju zaštitne cijevi okrugloga poprečnog presjeka jer se mogu jednako savijati u svim smjerovima. Kod plitkog polaganja natega, npr. u tankim pločama ovalne zaštitne cijevi omogućuju zadovoljavanje najmanjih debljina zaštitnog sloja betona i veći krak sila. Nedostatak poprečnih presjeka, različitog od okruglog, predstavlja nešto složenije povezivanje odsječaka cijevi.

Sve veze odsječaka cijevi moraju biti dobro zabrtvljene kako prilikom betoniranja ne bi u njih prodirala vlaga ili cementna isplaka. U protivnom može doći do značajnog povećanja trenja između natege i zaštitne cijevi ili do korozije natege.

Na najvišim točkama položenih zaštitnih cijevi ugrađuju se odušci kako bi prilikom injektiranja cementnog morta zrak mogao izići te kako bi se nadzirao postupak injektiranja. Odušci se zatvaraju u trenutku kada iz njih istječe cementni mort bez vidljivih mjehurića zraka, jednolike i dobre konzistencije. Važno je da na odušku cementni mort neko vrijeme istječe, a ne da se pri pojavi cementnog morta odmah zabrtvljuje. Radi odvođenja nakupljene vode dobro je predvidjeti oduške i u najnižim točkama položene zaštitne cijevi natege. Svaki sustav prednapinjanja u uputama proizvođača daje sva potrebna mjesta na kojima se odušci ugrađuju.

Trenje između užadi natega u jednoj zaštitnoj cijevi mora biti veće nego trenje natege uza zaštitnu cijev. U protivnom može doći do neravnomjerne raspodjele naprezanja u jednoj natezi. Tijekom prednapinjanja natege vanjsko uže će ostati priljubljeno uza zaštitnu cijev dok će unutarnja i dalje kliziti. Na kraju natege preša prisiljava svu užad natege na jednako izduljenje.

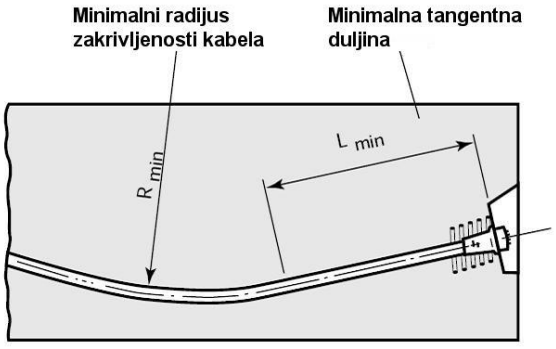
Koeficijent trenja između natege i zaštitne cijevi nije stalna vrijednost. Veliki je broj čimbenika koji imaju utjecaj na koeficijent trenja, kao npr.:

- stanje površine kliznih ploha
- prisutnost podmazivača ili vode
- brzina pomicanja
- strana tijela u zaštitnoj cijevi (mort)
- duljina izduljenja prilikom prednapinjanja (s velikim izduljenjem klizne plohe se mogu izlizati, itd.)

Navedeni koeficijent trenja u tehničkom dopuštenju ne može obuhvatiti sve mnogobrojne utjecaje. Navedene su srednje vrijednosti utvrđene ispitivanjima koje mjerenjima na stvarnim građevinama treba potvrditi. Ispitivanje koeficijenta trenja provodi se napinjanjem natege preko kružne izbočine te se mjeri razlika sile na krajevima.

Prilikom proračuna sile prednapinjanja treba biti svjestan rasipanja vrijednosti koeficijenta trenja. Eventualno je moguće razmatranje rubnih vrijednosti s najvećim i najmanjim μ.

Radi smanjenja trenja mogu se primijeniti masti ili ulja. Ti materijali moraju se nakon postupka prednapinjanja potpuno ukloniti iz zaštitne cijevi, što predstavlja veliki dodatni posao. Smanjenje gubitaka zbog trenja moguće je i zagrijavanjem natege npr. parom ili vibriranjem.



Slika 10.6 Minimalni radijus i minimalna tangentna duljina.

Kabel	R_{min} (m)	L_{min} (m)
6-7	3.9	1.0
6-12	5.0	1.0
6-19	6.3	1.5
6-22	6.9	1.5
6-31	8.1	1.5
6-37	8.6	1.5
6-43	9.4	1.5
6-55	10.6	1.5

Tablica 10.5 Vrijednosti za minimalni radijus i minimalnu tangentnu duljinu prema VSL preporukama.