

GRADJEVINSKI FAKULTET U BEOGRADU
INSTITUT ZA MATERIJALE I KONSTRUKCIJE

Vanja Alendar

PRETHODNO NAPREGNUTI BETON

VEŽBE NA IX-OM SEMESTRU
ODSEKA ZA KONSTRUKCIJE
ŠKOLSKE 2003/2004 GODINE

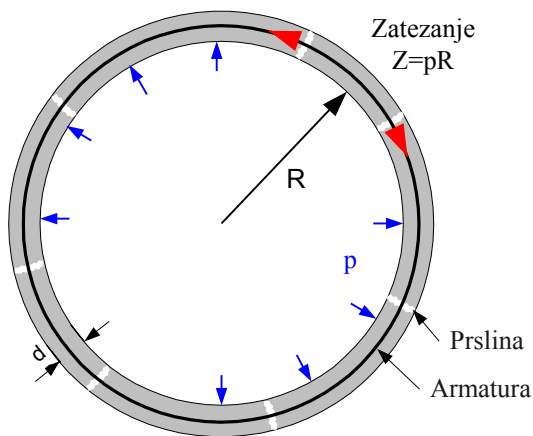
Beograd
Oktobar 2003.

1. UVOD

U ovom delu daje se prikaz osnovne ideje prethodnog napreznja, objašnjenje osnovnih pojmova, prikaz tehnologija izvodjenja kao i primeri primene prethodnog napreznja.

1.1 OSNOVNA IDEJA I POJMOVI PRETHODNOG NAPREZNJA

Pretpostavimo da je potrebno da se uradi projekat armiranobetonskog (AB) cilindričnog rezervoara za vodu, unutrašnjeg prečnika R , slika 1.1 Za analizu je izabran prsten cilindra na dubini h , visine 1,0m, koji je dovoljno udaljen od krajeva rezervoara tako da se stanje napreznja može analizirati na bazi 'membranskog rešenja', bez efekata savijanja usled eventualno sprečenih slobodnih deformacija krajeva cilindra. Radijalni pritisak vode na dubini h iznosi $p = \gamma h$.



Slika 1.1 Napreznje zida AB rezervoara

U horizontalnoj ravni, radijalni pritisak vode p izaziva sile zatezanja u segmentu zida rezervoara visine 1,0m, čiji je iznos, prema tzv. '**kotlovskoj formuli**' $Z = pR$ (kN/m).

Nije uobičajeno, ali zid cilindra može teorijski da se izradi i od **nearmiranog betona**. Za razliku od armiranobetonskih konstrukcija, u ovom slučaju karakteristično je da je pojava prslina ujedno i stanje loma preseka odnosno konstrukcije. Izborom marke betona MB i debljine zida cilindra d , potrebno je obezbediti da je:

$\gamma Z \leq F_b f_{bzm}$ (proračun prema '**graničnoj nosivosti**'), ili,

$Z \leq F_b \sigma_{zlop}$ (proračun prema '**dozvoljenim naponima**') gde su:

γ - koeficijent sigurnosti od loma (recimo 1,80); f_{bzm} - čvrstoća betona na aksijalno zatezanje (red veličine 3,0MPa); σ_{zlop} - dozvoljeni napon zatezanja (red veličine 0,5MPa); F_b - površina računskog preseka betona.

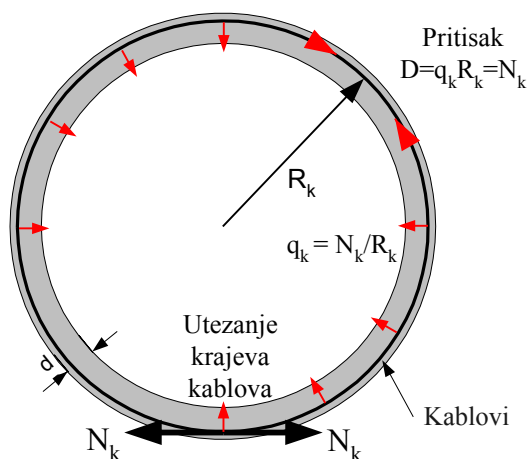
Ukoliko se konstrukcija izvodi od **armiranog betona**, potrebna 'prstenasta armatura' F_a (cm²/m) u horizontalnoj ravni može da se odredi iz uslova obezbedjenja granične nosivosti preseka zida: $\gamma Z \leq F_a \sigma_{02}$, gde je σ_{02} - granica velikih izduženja čelika (400MPa u slučaju rebraste armature RA400/500). Treba uočiti da debljina zida d kao i kvalitet betona MB prema primenjenom konceptu ne utiču na graničnu nosivost aksijalno zategnutog zida cilindra - osiguranje od loma obezbedjuje se samo zategnutom armaturom. Osim graničnog stanja nosivosti, u ovom slučaju je neophodno proveriti i **granično stanje upotrebljivosti** odnosno, treba proveriti **širinu prslina** u eksploataciji (pri 'radnim opterećenjima'). U ovom slučaju, za određivanje debljine zida, marke betona, količine, prečnika i rasporeda armature u preseku najčešće je merodavno upravo obezbedjenje **prihvatljive širine prslina**. Zid rezervoara ne bi trebalo da propušta vodu, a prihvatljiva širina prslina zavisi i od predviđene obrade zidova, da li se predviđja elastična izolacija na primer, koja se neće pocepati usled povećanih dilatacija na mestu prslina.

Za klasične armiranobetonske konstrukcije karakterističan je koncept tzv. **'pasivne armature'** - naprezanja armature pojaviće se tek sa razvojem deformacija betona: usled skupljanja betona pre oslobadjanja od skele, pri oslobadjanju od skele, pri daljem prirastu spoljnih opterećenja ili usled 'tečenja betona', na primer. Pri promeni spoljnih ili unutrašnjih opterećenja, deformacije konstrukcije pa i dilatacije/naponi armature se dodatno, praktično stalno menjaju, sve dok se u konstrukciji ne formira unutrašnje stanje napona/sila koje će biti u ravnoteži sa trenutnim opterećenjima. Očekivani konačni, ukupni ugibi greda/ploča mogu da budu preveliki, zbog čega se u takvim slučajevima grede/ploče izvode sa **nadvišenjem**, kako bi se obezbedio prihvatljiv rezultujući ugib, obično definisan propisima u zavisnosti od namene objekta. Nadvišavanje elemenata konstrukcije predstavlja izvodjenje konstrukcije u deformisanom obliku, bez unetih početnih napona. Ukoliko se pojave preveliki ugibi elementa konstrukcije, ponekad je moguće da se zatečeni ugibi potiskivanjem presa ma koriguju, da se potom u korigovanom položaju poveća krutost elementa, i da se onda otpuste prese i oslobodi konstrukcija - slučaj naknadne 'prinudne deformacije' konstrukcije.

Osnovna ideja tzv. **'prethodnog napreznja'** elemenata/konstrukcija je da se već pri gradjenju, unapred izazovu **prinudne deformacije elemenata/konstrukcije** i time obezbedi njeno povoljnije ponašanje u eksploataciji. Na primer, pri izradi drvenih buradi, vertikalni elementi se bočno 'utežu' navlačenjem čeličnih prstenova-obruča. Time se ostvaruje bočni pritisak na vertikalnim spojnicama elemenata i sprečava procurivanje usled unutrašnjih pritisaka tečnosti koji teže da razmaknu elemente - 'da otvore vertikalnu prslinu na spojnicama' (čuveni primer jednog od zaslužnih inženjera u ovoj oblasti - T.Y.Lin-a).

Načelno je moguće i zid rezervoara koji se razmatra utegnuti - 'prethodno napregnuti' na sličan način. U tom slučaju potrebno je umesto cilindričnog zida - sa vertikalnim spoljnim izvodnicama, izvesti konusnu spoljnu površinu, sa povećanjem spoljnog prečnika sa dubinom rezervoara. Navlačenjem čeličnih prstenova-obruča na konus, nasilno se povećava prečnik obruča i time izazivaju naponi zatezanja u čeliku, odnosno naponi pritiska u zidu rezervoara. Bilo bi poželjno da prethodno uneti naponi pritiska u betonu budu veći od očekivanih napona zatezanja usled unutrašnjih pritisaka vode, tako da u toku eksploatacije rezultujuće stanje napona u zidu rezervoara bude uvek neki minimalni pritisak, recimo oko 1,0MPa. Postupak prinudnog deformisanja konstrukcije, recimo presa ma, je jedan od

najstarijih postupaka 'prethodnog napreznja' i u različitim oblicima primenjuje se i danas.

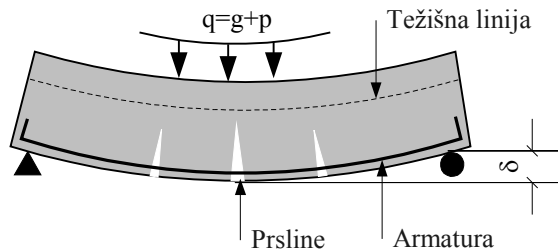


Slika 1.2 Uticaji usled prethodnog napreznja zida rezervoara

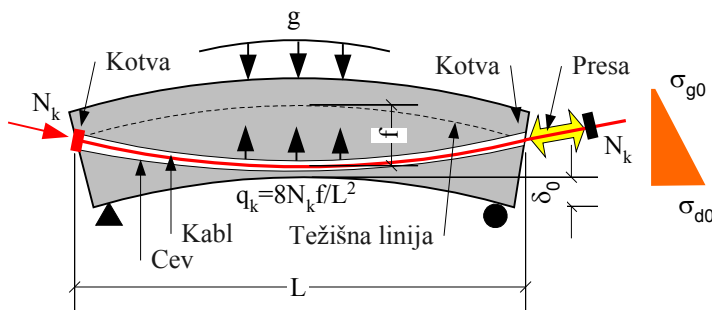
Pod 'prethodnim napreznjem' se u ovom kursu, a i u praksi, podrazumeva primena specijalnih čeličnih proizvoda (žica, šipki, užadi, kablova, sajli...) koji su već pri ugradjivanju na odgovarajući način unapred - prethodno zategnuti.

U slučaju razmatranog rezervoara, ukoliko uspemo da čeličnu žicu ugradimo i zategnemo do sile N_k , ostvariće se radijalni pritisci q_k , odnosno sila pritiska u zidu $D=N_k$, slika 1.2. Izborom veličine **sile prethodnog napreznja** N_k , moguće je u zidu rezervoara postići rezultujuće stanje sila $N=D-Z$, odnosno napona u betonu,

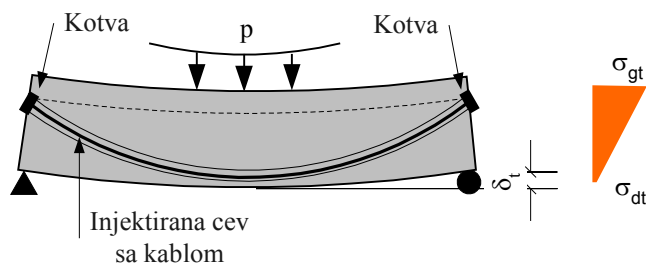
koji će i u najnepovoljnijem slučaju u eksploataciji još uvek da budu pritisci. Time se sprečava pojava prslina, povećava pouzdanost i trajnost objekta i otvara mogućnost uštede na izolacionim materijalima. Treba uočiti da sila pritiska u zidu ne zavisi od poluprečnika kabla R_k , kablovi mogu da budu i sa spoljašnje strane zida. Spiralno obmotavanje kružnih rezervoara specijalnim žicama visokih čvrstoća, sa određenim razmakom - hodom, uz istovremeno njihovo zatezanje je '50-tih godina prošlog veka patentirala američka firma 'Preload', i izvela na hiljade objekata.



Slika 1.3 Klasično armirana greda - koncept 'pasivne armature'



Slika 1.4 Prethodno naprezanje grede - koncept 'aktivne armature'



Slika 1.5 Prethodno naprezanje grede - rezultujuće stanje u eksploataciji

Raznolikost efekata prethodnog naprezanja prikazana je i na čestom primeru primene - prethodnom naprezanju nosača sistema proste grede opterećenog jednako podeljenim opterećenjem, slike 1.3-5. Pod dejstvom ukupnog opterećenja q , klasično armirana greda postigla bi ravnotežno stanje uz ugib δ , uz verovatnu pojavu prslina, slika 1.3.

Kako izvesti prethodno naprezanje ovog nosača? Pretpostavimo da je pre betoniranja elementa, u oplatu ugrađena parabolična **cev**, sa strelom f u odnosu na težišnu liniju elementa, slika 1.4. Cev, u ovom primeru, na krajevima prolazi kroz težište poprečnog preseka. Nakon što beton očvrstne, kroz cev se provlače čelična užad, tzv. **'kabl'**, koji se na jednom kraju fiksira tzv. **'kotvom'**. Dok je element još na skeli, sa drugog kraja se kabl zateže izvlači pomoću **'prese'**, do postizanja željene sile N_k u kابلu. Parabolično zakrivljena **'trasa'** kabla pri sili u kابلu N_k izaziva vertikalni potisak, tzv. **'skretno opterećenje'** q_k , slika 1.4. Kada potisak q_k nadvlada sopstvenu težinu g , element se odlepljuje i potom odiže od skele za iznos δ_0 - ugib u **'fazi prethodnog naprezanja'**. Zbog **'prinudnog deformisanja'** i odizanja nosača u fazi prethodnog naprezanja, **rezultujuće stanje napona** u preseku u sredini raspona je pritisak σ_{d0} na donjoj ivici, i znatno manji pritisak ili zatezanje σ_{g0} na gornjoj ivici preseka. Ukoliko se pretera sa silom zatezanja kabla, moguća je i pojava prslina sa gornje strane nosača, u krajnjem slučaju čak i lom preseka. Sile kojima kablovi deluju na beton u fazi prethodnog naprezanja nazivaju se **'ekvivalentno opterećenje'** i u ovom slučaju podrazumevaju: jednako podeljeno skretno opterećenjem q_k koje deluje na gore, kao i koncentrisane sile N_k na mestu kotvi koje deluju pod uglom, u pravcu ose kabla, slika 1.4. **Efekti prethodnog naprezanja** - sile,

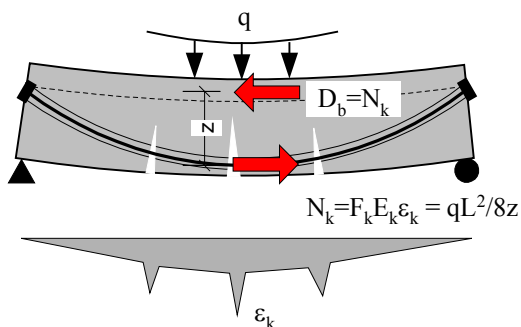
rezultujuće stanje napona u preseku u sredini raspona je pritisak σ_{d0} na donjoj ivici, i znatno manji pritisak ili zatezanje σ_{g0} na gornjoj ivici preseka. Ukoliko se pretera sa silom zatezanja kabla, moguća je i pojava prslina sa gornje strane nosača, u krajnjem slučaju čak i lom preseka. Sile kojima kablovi deluju na beton u fazi prethodnog naprezanja nazivaju se **'ekvivalentno opterećenje'** i u ovom slučaju podrazumevaju: jednako podeljeno skretno opterećenjem q_k koje deluje na gore, kao i koncentrisane sile N_k na mestu kotvi koje deluju pod uglom, u pravcu ose kabla, slika 1.4. **Efekti prethodnog naprezanja** - sile,

naponi i ugibi mogu da se analiziraju kao slučaj proste grede opterećene ekvivalentnim opterećenjem.

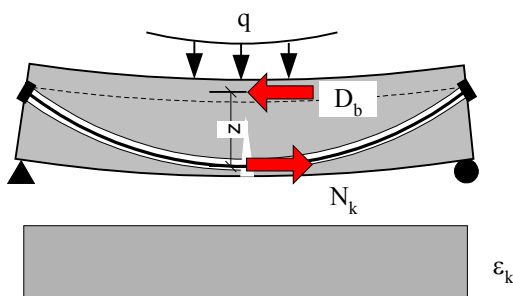
Po završetku utezanja kablova, formira se anker-kotva i na kraju sa koga je vršeno utezanje, i uklanja presa. Klasičan način prethodnog napreznja podrazumeva da se pre nanošenja ostalih opterećenja izvrši **'injektiranje'** cevi cementnom emulzijom, čime se ostvaruje kontinualni spoj kabla i betona - **'prethodno napreznje sa spojem'**. Pri daljem prirastu spoljnih opterećenja do iznosa p , kabl se ponaša kao klasična armatura, ali sa unetim početnim naponom - koncept **'aktivne armature'**. Pri ukupnom opterećenju $q=g+p$, prethodno napregnuti element imaće znatno manji ugib δ , napon pritiska σ_{gt} na gornjoj ivici odnosno napon pritiska ili napon zatezanja σ_{dt} na donjoj ivici preseka u sredini raspona, slika 1.5. Ukoliko se prethodnim napreznjem eliminišu naponi zatezanja u svim fazama života konstrukcije, sprečena je i pojava prslina u betonu. U većini slučajeva, prethodno napregnuti elementi se dodatno armiraju i bar minimalnom klasičnom, **'prethodno nezategnutom armaturom'** zbog kontrole napona zatezanja, prslina, regulisanja granične nosivosti itd.

Izneti primer ilustruje kako se primenom postupka prethodnog napreznja može izvršiti korekcija - **'balansiranje'** deformacija, prslina i napona konstrukcije. Zavisno od prihvatljivih minimalnih napona σ_{go} na gornjoj ivici u fazi prethodnog napreznja, odnosno napona σ_{dt} na donjoj ivici u fazi eksploatacije, razlikuju se tri koncepta - **'nivoa prethodnog napreznja'**:

- **'potpuno prethodno napreznje'** - ne dozvoljava se pojava napona zatezanja, osim eventualnih prolaznih, privremenih napona zatezanja u fazi prethodnog napreznja;
- **'ograničeno prethodno napreznje'** - dozvoljava se pojava limitiranih napona zatezanja u betonu, ali ne i pojava prslina;
- **'parcijalno prethodno napreznje'** - dozvoljava se i pojava prslina, ali limitirane širine.



Slika 1.6 Prethodno napreznje sa spojem kablova i betona



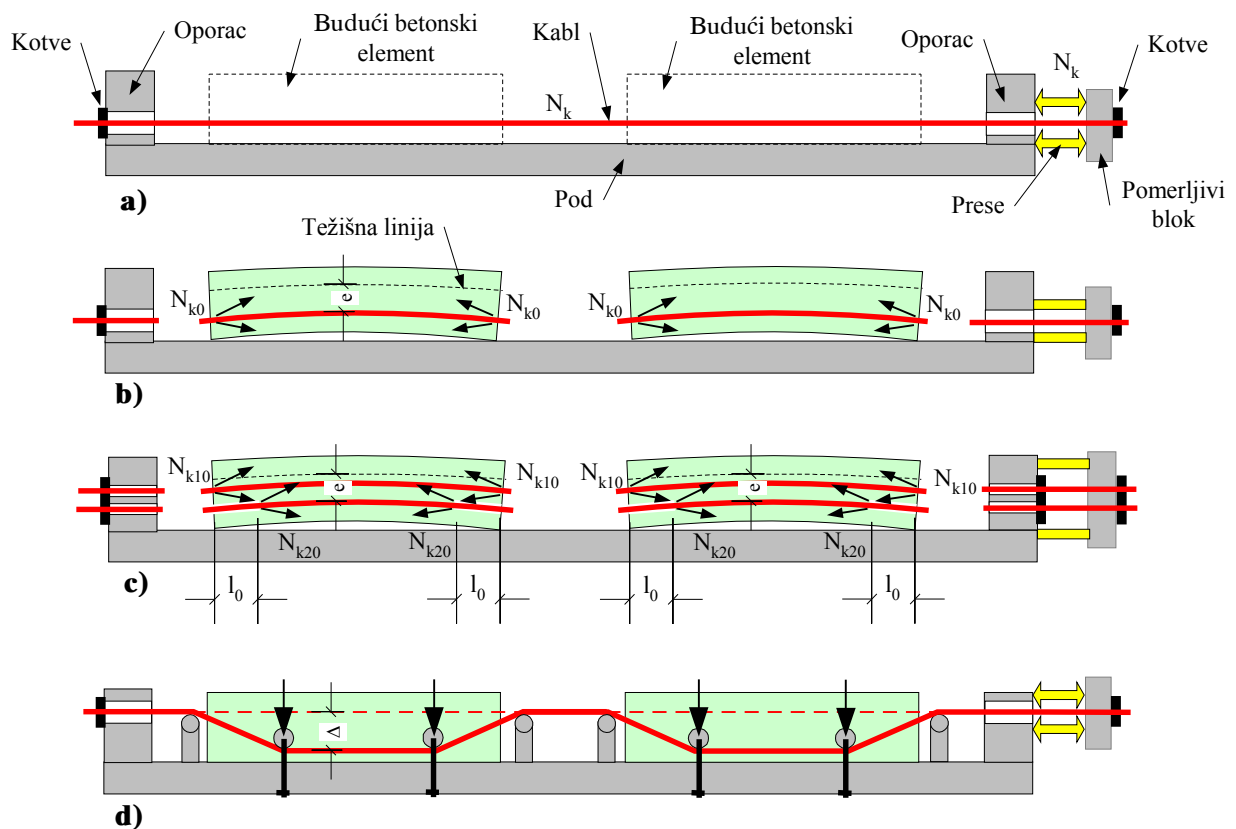
Slika 1.7 Prethodno napreznje bez spoja kablova i betona

Parcijalno prethodno napregnuti elementi mogu da se shvate i kao klasično armirani elementi 'potpomognuti delimičnim prethodnim napreznjem'. Pojavom prslina u prethodno napregnutom nosaču kod koga je ostvaren spoj kablova i betona, doći će do porasta-skoka dilatacija čelika kablova u zoni prslina, kao što je to slučaj i sa dilatacijama armature klasično armiranih nosača, slika 1.6. Dilatacija čelika koji prolazi kroz prslinu u sredini raspona će da raste do iznosa ϵ_k , potrebnog da se obezbedi ravnoteža preseka opterećenog na savijanje, putem sprega unutrašnjih sila u betonu D_b i kablovima N_k na kraku z , slika 1.6. Van zone prslina, promena dilatacija kabla prati promenu krivina preseka, odnosno tok dijagrama momenata savijanja.

Injektiranje cevi treba prvenstveno da obezbedi pouzdanu **zaštitu kablova od korozije**, što za posledicu ima opisani model zajedničkog rada čelika i betona. Danas se zaštita od korozije rešava i na druge načine, bez injektiranja, tako da

nema ni spoja kablova i betona. Kablovi mogu da klize kroz beton, i u ovom slučaju se govori o **'prethodnom naprezanju bez spoja'** kablova i betona. Budući da nema spoja, ni promene dilatacija kablova i betona u istom preseku pri promeni spoljnih opterećenja nisu više jednake. U idealnom slučaju bez trenja kablova i betona, dilatacije kablova bez spoja su jednake celom dužinom kablova, pa i nakon pojave prslina - dolazi do **'uprošćavanja-razmazivanja dilatacija'** čelika, slika 1.7. Kao i u prethodnom slučaju, da bi se obezbedila ravnoteža preseka u sredini raspona, dilatacija kablova nakon pojave prslina mora da poraste do približno iste vrednosti ε_k . Budući da su dilatacije kablova jednake celom dužinom, ukupno izduženje kablova bez spoja je veće nego u slučaju kablova sa spojem, a to znači da i ugibi nosača nakon pojave prslina moraju biti veći. Nevolja je što i širina prslina naglo raste, i vrlo brzo nakon pojave prslina dolazi i do loma preseka - ukoliko ne postoji i dodatna klasična armatura! Prethodno naprezanje bez spoja (ne zaboravimo - i bez zametnog injektiranja!) danas se najčešće primenjuje kod prethodnog naprezanja ploča, ali uz obavezno dodavanje klasične armature radi kontrole prslina i sigurnosti od loma.

Za do sada opisane primere karakteristično je da je utezanje kablova izvršeno nakon očvršćavanja betona, pa se ova tehnologija obično naziva **'naknadno prethodno naprezanje'** (engl. - *post-tensioning*). Za proizvodnju nekih elemenata konstrukcija razvijeni su posebni, racionalniji postupci prethodnog naprezanja, kod kojih se prvo izvrši zatezanje čelika, pa se tek nakon toga vrši betoniranje elementa. Koliko je engleski naziv za ovaj postupak dosledan - *'pre-tensioning'*, toliko bi naziv 'prethodno-prethodno naprezanje' bio čudan, pa se ovaj postupak kod nas najčešće naziva opisno - **'prethodno naprezanje na stazi'**, jer je potrebno izraditi tzv. **'stazu za prethodno naprezanje'**, slika 1.8.



Slika 1.8 Prethodno naprezanje na stazi - 'adheziono prethodno naprezanje'

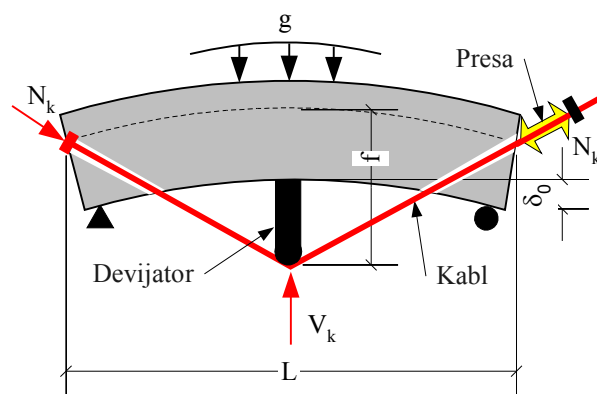
Postupak prethodnog naprezanja obuhvata sledeće operacije:

- zatezanje i ukotvljenje užadi izmedju dva oporca na krajevima staze, slika 1.8a;
- betoniranje elemenata oko prethodno zategnutih užadi. S obzirom da užad i staza mogu da budu velikih dužina, i preko 100m, obično se vrši serijsko prethodno naprezanje više elemenata u nizu, slika 1.8a;
- presecanje užadi nakon što beton dovoljno očvrstne. Užad imaju tendenciju da se skrate, vrata na prvobitnu dužinu, i time izazivaju sile pritiska N_{k0} u betonskom elementu koji se opire skraćanju užadi, slika 1.8b. Za ovaj postupak bitno je da postoji dobar spoj užadi i betona da užad nebi proklizala kroz beton, otuda i čest naziv **'adheziono prethodno naprezanje'**. S obzirom da je obično u pitanju serijska proizvodnja velikog broja elemenata, bilo bi neracionalno da se presecanje užadi vrši 28 dana nakon betoniranja, kada beton postiže svoje nominalne karakteristike, staza je u tom slučaju neupotrebljiva skoro mesec dana. Zbog toga se obično vrši **zaparivanje betona**, kako bi se ubrzalo njegovo očvršćavanje i što pre oslobodila staza za izradu novih elemenata.

Za ovaj način prethodnog naprezanja najlogičnija je pravolinijska trasa užadi kao i kontinualni spoj betona i užadi celom dužinom elementa, sa konstantnim ekscentricitetom e u odnosu na težišnu liniju elementa. Kod sistema prostih greda, bilo bi pak poželjno da je **ekscentricitet sile prethodnog naprezanja** najveći u sredini raspona, gde su i najveći momenti, i da se smanjuje ka osloncima, gde bi rezultantu prethodnog naprezanja trebalo uvesti u **jezgro preseka**, ukoliko želimo da izbegnemo napone zatezanja u zoni oslonaca. U okviru ove tehnologije, promenljiv ekscentricitet se može postići na dva načina:

- elementi obično imaju veći broj užadi, od kojih se jedan deo u zoni oslonaca na dužini l_0 može izolovati od betona, pomoću navučenih plastičnih cevi, na primer, slika 1.8c. S obzirom da je za **unošenje sile prethodnog naprezanja** neophodan spoj užadi i betona, neizolovana užad počćeće da unose silu N_{k10} na čelu nosača, dok će izolovana užad početi da unose svoj deo sile N_{k20} tek u preseku pomerenom za dužinu l_0 , slika 1.8c. Izolovanjem najnižeg reda užadi u zoni oslonaca, pomera se rezultanta naviše, ka jezgru preseka;

- nakon što se izvrši uobičajeno zatezanje pravolinijske trase užadi, vrši se potezanje užadi na dole za željeni iznos Δ posebnim uređajima, trasa se prelama preko medjuopora i prilagodjava statički povoljnijem obliku, slika 1.8d.

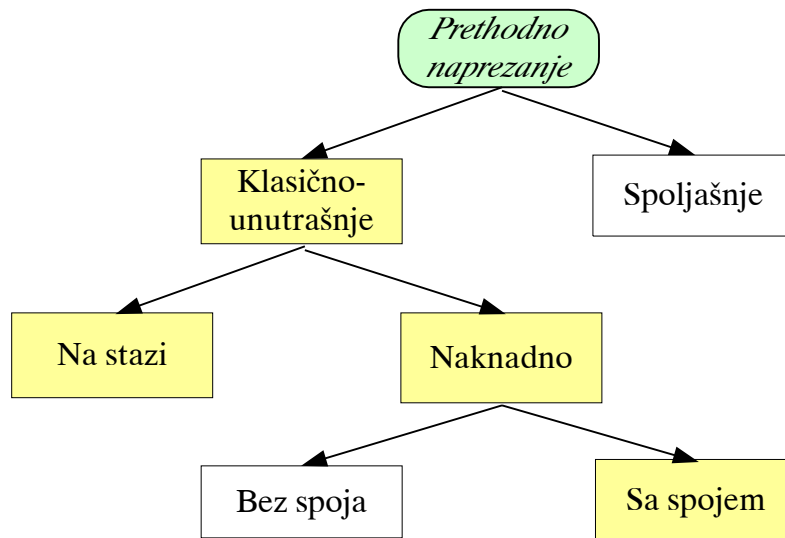


Slika 1.9 Koncept spoljašnjeg prethodnog naprezanja

Za sve do sada navedene tehnologije prethodnog naprezanja karakteristično je da se kablovi nalaze unutar preseka betona, tzv. **'unutrašnje prethodno naprezanje'**. Iako se očekuje da su time kablovi zaštićeni od korozije, praksa je pokazala da to ponekada i nije pouzdana zaštita, ukoliko su radovi izvedeni nekvalitetno, na primer. Sa druge strane, očigledno je da je **efekat prethodnog naprezanja** veći ukoliko se postigne veći ekscentricitet kablova. Da bi kablovi bili dostupni kontroli, pa i eventualnoj zameni, kao i da bi se postigao veći ekscentricitet sile

prethodnog naprezanja, danas se za određene tipove konstrukcija, posebno za mostove, sve više primenjuje tzv. **'spoljašnje prethodno naprezanje'**, slika 1.9. Kablovi se delom vode kroz beton ali bez spoja, delom slobodno-'kroz vazduh', uz prelamanje trase kablova preko tzv. **'devijatora'**, slika 1.9. U fazi prethodnog naprezanja, kablovi deluju na kon-

strukciju ekvivalentnim opterećenjem: silama N_k na mestu kotvi i skretnom silom V_k na mestu devijatora. S obzirom da je streha trase f veća nego kada su kablovi unutar preseka betona, to je i efekat prethodnog napreznja veći, sa manjom silom mogu se postići veći vertikalni potisci. Kada se kablovi nalaze unutar preseka betona, varijacije napreznja usled promene spoljnih opterećenja su obično do 5% inicijalne sile u kablu. S obzirom da kablovi imaju relativno malu površinu i ekscentricitet, doprinos kablova krutosti elementa na savijanje obično se zanemaruje. U slučaju spoljašnjeg prethodnog napreznja sa izraženijom strelom f , kablovi su deo konstrukcijskog sistema, kao neka vrsta donjeg pojasa u razmatranom primeru. Često se ovakvi sistemi i nazivaju '**dvopojasni sistemi**', za koje se statički proračun vrši modeliranjem svih elemenata konstrukcije: greda, devijatora i kablova.



Slika 1.10 Postupci prethodnog napreznja

Rezime savremenih postupaka prethodnog napreznja koji se najčešće primenjuju prikazan je na slici 1.10. Podsetimo i da se, zavisno od željenih minimalnih napona u betonu, nivoi prethodnog napreznja dele na: **potpuno, ograničeno i parcijalno** prethodno napreznje.

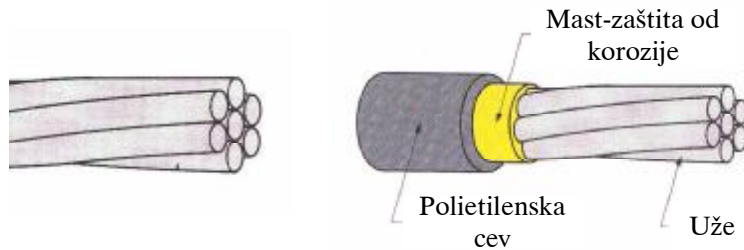
Već duže vreme istražuju se i druge mogućnosti, tzv. '**inteligentno prethodno napreznje**', na primer. Ideja je da se utezanje kablova ne izvrši odmah do neke konačne sile, već da se formira 'mehanizam'

koji čine: konstrukcija, kablovi, automatske prese, kompjuter i senzori. Senzori kontinualno prate promene deformacija konstrukcije, ugibe krova sportske dvorane, na primer. Ako ugibi počnu da rastu, znači da verovatno pada sneg, ili se povećava opterećenje usled kačenja neke opreme, zvučnika za koncert, na primer. Program na kompjuteru obradjuje podatke i, u jednom trenutku aktivira stalno prisutne prese koje počinju da dodatno zatežu kablove i koriguju deformacije ali i napreznja elemenata konstrukcije. Koncept je prost i racionalan: nije potrebno da je konstrukcija sve vreme 'nabildovana' zbog toga što će jednoga dana možda da se pojavi predviđeno merodavno računsko opterećenje. Ako se pak pojavi, pa obezbedićemo se da se 'slabija' ali racionalnija konstrukcija **adaptira** novonastaloj situaciji.

1.2 ČELIK ZA PRETHODNO NAPREZNJE

Postupak prethodnog napreznja podrazumeva da su na raspolaganju čelici i čelični proizvodi koji poseduju osobine potrebne za realizaciju racionalnog i pouzdanog prethodnog napreznja konstrukcija. Sa klasičnom armaturom, GA240/360 odnosno RA400/500 ne može ništa značajnije da se postigne, osim eventualnog pritezanja-'španovanja' putem dvostrukog navoja, kada je armatura postavljena van preseka kao zatega. Razvoj prethodnog napreznja praktično počinje uvođenjem u upotrebu **čelika visokih karakteristika**, sa granicama velikih izduženja od 1000MPa i više. Visokovredni čelici za prethodno napreznje primenjuju se u različitim oblicima: kao glatke žice, kao krute orebrene šipke (sa granicama veli-

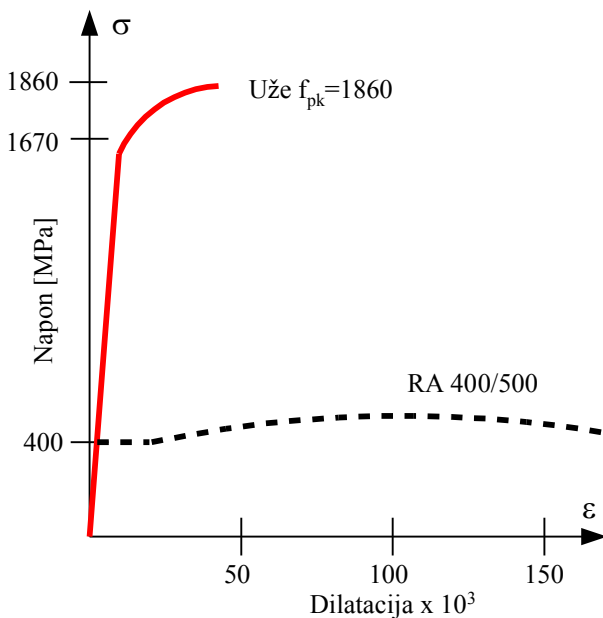
kih izduženja od oko 1000MPa), kao užad od upredenih, obično sedam glatkih žica mehanički međusobno spojenih, itd. Tipična užad za prethodno naprezanje su **nominalnog prečnika** $\phi 15,2$ i $\phi 15,8$ (ili 16)mm. Zbog bolje veze sa betonom, pri prethodnom naprezanju na stazi često se primenjuju nešto tanja užad, $\phi 12$ na primer.



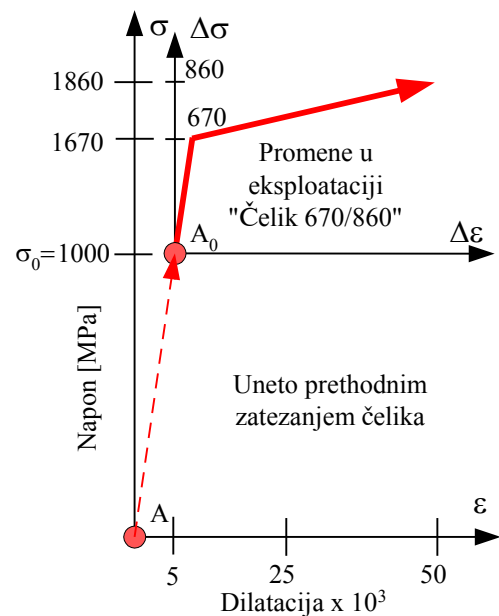
Slika 1.11 Užad za prethodno naprezanje sa/bez spoja

lja štiti polietilenskom cevi, kako bi se obezbedilo proklizavanje užeta, ali i zaštita od korozije. Često se čelik prethodno premaže još i epoxy-premazom. Najširu primenu danas imaju **kablovi za prethodno naprezanje** - snop paralelnih užadi (stariji kablovi formirali su se kao snop paralelnih glatkih žica, prečnika od oko 7mm) koja se utežu i ukotvljavaju kao celina, skupno.

Na slici 1.11 prikazano je standardno uže od upredenih glatkih žica, bez, i sa zaštitom od korozije. Ukoliko je u pitanju prethodno naprezanje **sa spojem** čelika i betona, primenjuju se 'gola' užad. U slučaju prethodnog naprezanja **bez spoja**, uže se premaže specijalnom mašću i spo-



Slika 1.12 Radni dijagrami čelika



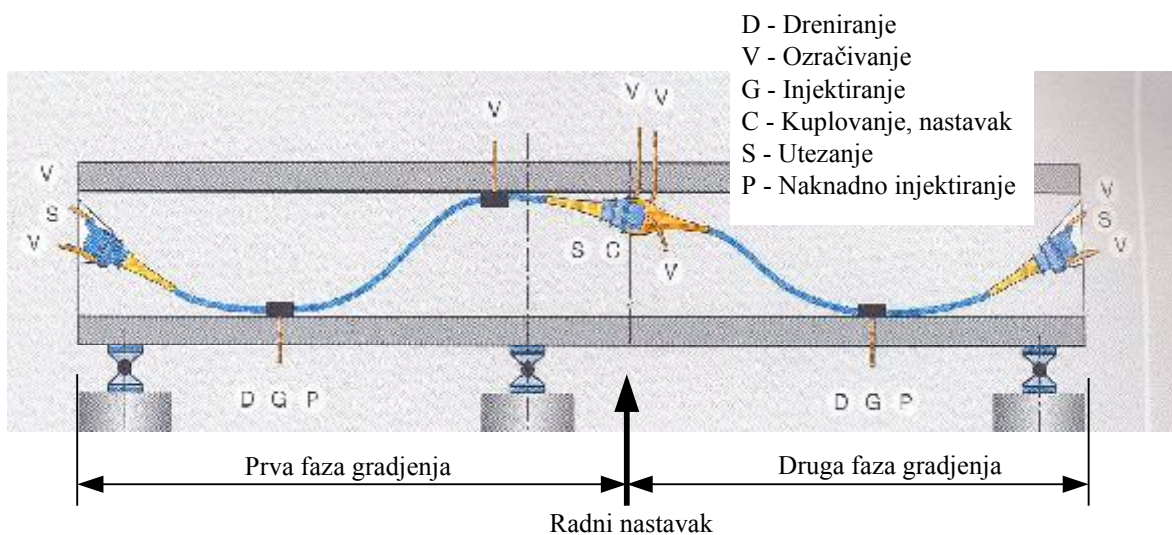
Slika 1.13 Idealizovani radni dijagram užadi za prethodno naprezanje

Na slici 1.12 prikazani su radni dijagrami klasične rebraste armature RA400/500, i tipičnog užeta za prethodno naprezanje sa granicom kidanja užeta od čak 1860MPa. Užad imaju znatno više čvrstoće od klasične armature, ali su i 'krtija', do prekida užeta dolazi pri nižim dilatacijama, reda veličine 50 ‰. Moduo elastičnosti užeta takodje je nešto niži, i obično iznosi oko 195 GPa. Ukoliko je uže prethodno zategnuto do napona od 1000MPa i dilatacije od oko 5 ‰, tada je za promene napona u eksploataciji do dostizanja granice velikih izduženja od oko 1670MPa ostalo još oko 670MPa, slika 1.13. U slučaju prethodnog naprezanja sa spojem betona i čelika, ponekada se prethodno uneti naponi užadi interpretiraju kao 'spoljašnje opterećenje', dok se promene napona, zaključno sa dostizanjem loma

preseka razmatraju kao slučaj klasično armiranog preseka sa 'fiktivnim čelikom' karakteristika 670/860 MPa, slika 1.13.

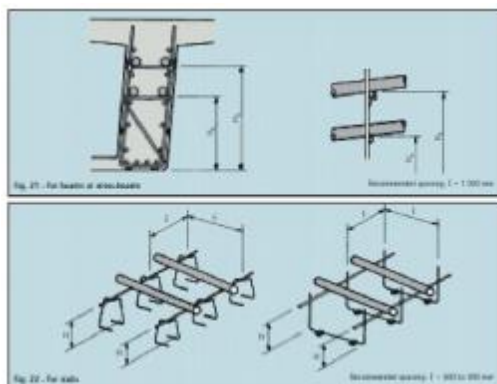
1.3 TEHNOLOŠKI DETALJI

U odnosu na klasično armirane konstrukcije, prethodno naprezanje je sofisticirana tehnologija. Kablovi i ostala oprema ne mogu da se nabave 'na otpadu', oprema za prethodno naprezanje nabavlja se od proverenih proizvođača. Na slici 1.14. prikazana je tipična trasa kablova jednog kontinualno nosača preko dva polja, **naknadno prethodno napregnutog** mosta uradjenog iz dve faze, na primer. U slučaju sandučastih preseka konstrukcije kao u ovom primeru, **kablovi** za naknadno prethodno naprezanje najčešće se vode kroz rebra preseka, kako bi se omogućilo njihovo krivolinijsko vodjenje sa promenljivim ekscentricitetom - racionalno **balansiranje** spoljnih opterećenja, deformacija, napona i prslina. Jedan kabl sastoji se obično od više užadi (1-50 i više) koja se vode kroz **zaštitnu cev** prethodno ubetoniranu.



Slika 1.14 Tipična trasa kablova za prethodno naprezanje

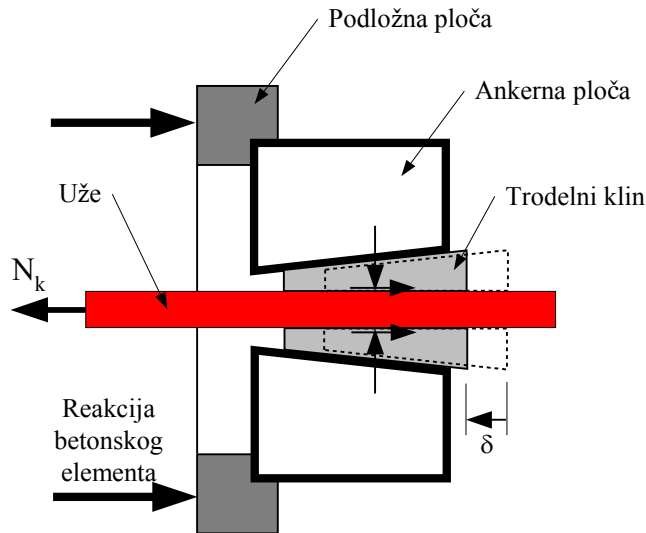
Zaštitna cev za vodjenje kablova za prethodno naprezanje postavlja se u oplatu zajedno sa klasičnom armaturom, i podupire se s mesta na mesto posebnim **držačima**, 'stolicama' od klasične armature, slika 1.15. Zavisno od broja užadi u kابلu, prečnik zaštitnih cevi je reda veličine 25-160mm. Cevi su obično čelične, a da bi se obezbedila njihova fleksibilnost, formiraju se od namotanih čeličnih traka, nalik metalnom crevu za tuš - tzv. **orebrene**



Slika 1.15 Držači cevi i kablova

zaštitne cevi. Zaštitne cevi mogu da imaju **cevčice za dreniranje** vode koja prodre u cev u fazi betoniranja, slika 1.14. Armaturni sklopovi kao i zaštitne cevi na svojim držačima moraju da budu dovoljno kruti, da ne dodje do prevelikog deformisanja ili čak njihovog obrušavanja pri betoniranju. Nakon očvršćavanja betona, kroz zaštitne cevi se provlače kablovi, ručno kod kraćih dužina, ili mašinski kod dugačkih trasa (i do 300m u slučaju mostova).

Na krajevima kablova postavljaju se ankeri -'kotve', dve kotve u prvoj fazi gradjenja, i još jedna kotva na kraju nosača i druge faze gradjenja, u primeru na slici 1.14. Tip kotve zavisi od usvojene tehnologije prethodnog napreznjanja: **normalna ili aktivna kotva**, ako se sa tog kraja vrši utezanje kablova; **nastavna kotva**, ako se predvidja nastavljjanje-'kuplovanje' kablova, **fiksna ili 'mrtva' kotva**, ako se taj kraj kabla samo sidri unutar betona.

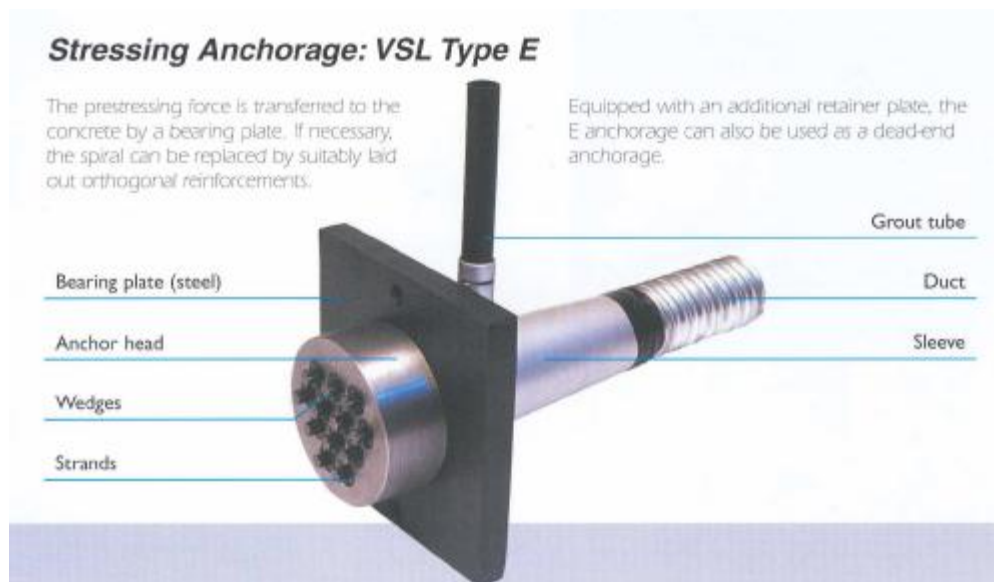


Slika 1.16 Princip konstrukcije aktivne kotve



Slika 1.17 Uže i rasklopljeni trodelni klin

Princip ukotvljenja jednog užeta, kao i delovi konstrukcije aktivne kotve prikazani su na slici 1.16 i 1.17. Uže vučeno silom N_k povlači za sobom tzv. **trodelni konusni klin** koji kliza i delimično se uvlači u ankerne ploče za iznos δ , dok svojim 'zubima' ne zarobi užeta i blokira njegovo dalje klizanje - **uvlačenje klina** praćeno **zaklinjavanjem užeta**. Uvlačenje klina izaziva skraćivanje kabla i pad prethodno unetih napona u užetu, o čemu se vodi računa pri projektovanju.



Slika 1.18 Aktivna kotva za kabl sa više užadi (VSL International)

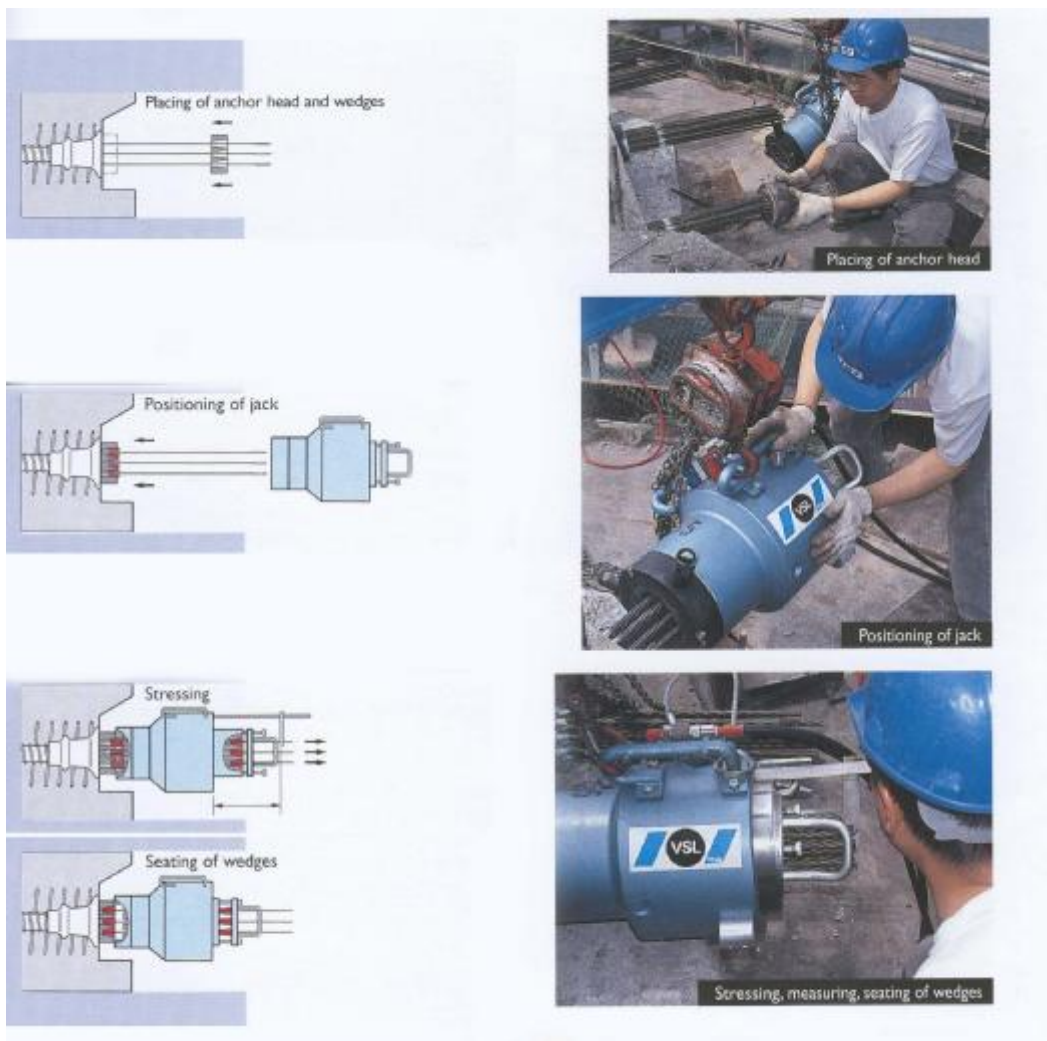
Veličina ankerne ploče zavisi od broja užadi u kablju, primer aktivne kotve sa dvanaest užadi na slici 1.18. Sila zatezanja kabla prenosi se na beton konstrukcije preko **podložne ploče**, obično kvadratnog ili pravougaonog oblika, slika 1.16 i 1.18. Na **mestu uvođenja**

sile prethodnog napreznja, ispod podložne ploče, dozvoljavaju se veliki lokalni naponi pritiska, koji opet izazivaju značajne lokalne poprečne napone zatezanja - 'cepanja betona'. Zbog toga je sastavni deo kotve i posebna, obično spiralno formirana armatura, tzv. '**spira-la**', koja se navlači na kabl, sa ciljem da utegne beton u zoni kotve, i time poveća nosivost betona na pritisak kao i da spreči bočno cepanje betona ispod kotve. Na slici 1.18 ova armatura nije prikazana, ali treba pogledati i sliku 1.20, gde je ova armatura prikazana.

U primeru sa slike 1.14, sve tri kotve su aktivne, omogućavaju utezanje kablova. Specifična je **nastavna kotva** nad srednjim osloncem, jer dozvoljava da se putem nje izvrši utezanje prve faze konstrukcije, da se potom kabl nastavi, i da se na kraju utegne sa desnog kraja kompletne konstrukcije, sa ili bez promene sile u delu kabla u prvom polju. **Aktivne kotve** postavljene na oba kraja kabla omogućavaju različite redoslede utezanja:

- utezanje samo sa jednoga kraja;
- istovremeno utezanje sa oba kraja sa dve prese;
- utezanje prvo sa jedne strane, pri čemu kotva na drugom kraju trenutno ima ulogu

fiksne kotve, i potom se presa prenosi na drugi kraj kabla. S obzirom da su se, pri utezanju kabla sa jednoga kraja užad na drugom kraju zaklinila, potrebno je prvo presom izvršiti **rasklinjavanje** užadi - njihovo izvlačenje zajedno sa klinom iz ankerne ploče, i tek potom nastaviti utezanje do željene sile, koje je praćeno izduženjem, **izvlačenjem kabla** u okviru prese. Pri vršenju utezanja kablova, obično se vrši i merenje **izduženja kabla** - hoda prese, jer je to indikator ispravnosti utezanja.



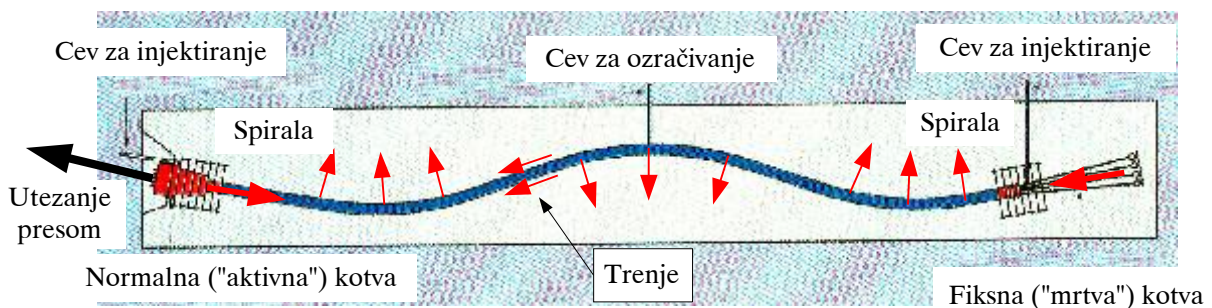
Slika 1.19 Faze utezanja kablova presama (VSL International)

Postupak utezanja kablova prikazan je na slici 1.19 i obuhvata sledeće operacije:

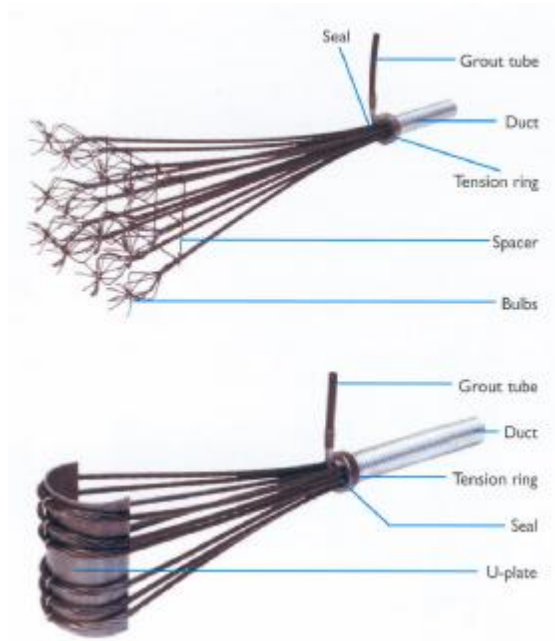
- navlačenje ankerne ploče i klinova na užad, koja moraju da imaju potrebnu slobodnu dužinu, da bi čeljust prese mogla da ih uhvati (podložna ploča je već ubetonirana);
- navlačenje prese na užad do kontakta - oslanjanja prese na ankernu ploču;
- hvatanje užadi čeljustima prese i izvlačenje, zatezanje užadi do željene sile ili željenog izduženja - izvlačenja kabla;
- održavanje postignutog izduženja kablova uz utiskivanje svih klinova posebnim klipom prese-zaklinjavanje;
- otpuštanje i skidanje prese sa užadi;
- sečenje, skraćenje užadi, ako se ne planira **naknadno-dodatno utezanje** u nekoj od narednih faza gradjenja;

Prese su hidrauličke, vezane za **pumpe**. Merenje ostvarene sile obično vrši se indirektno, putem merenja ostvarenog **pritiska u presi**. Na osnovu poznatog pritiska i površine klipa prese, može da se izračuna trenutna **sila na presi**. Obično se pre utezanja vrši **baždarenje prese** u laboratorijskim uslovima, direktnim merenjem sile pomoću umetnutog pouzdanog **dinamometra**. Za svaki sparni komplet pumpa-presa, formira se dijagram pritisak-sila, tzv. **dijagram baždarenja prese**, koji je merodavan za ocenu uspešnosti izvršenog prethodnog naprezanja. Ako se pri utezanju konstatuje da je željena sila ostvarena, ali je istovremeno registrovano i neočekivano malo izduženje kabla-hod prese, to je indikacija da su otpori izvlačenju - **trenje kabla** o zidove zaštitne cevi preveliki, ili da je čak došlo do zaglavljivanja-blokiranja kabla. Treba imati na umu da je prethodno naprezanje **prinudna deformacija konstrukcije i kabla**, i da ako se ne ostvare očekivane deformacije, to znači da u sistemu postoje **nepredvidjeni otpori**. Osim izduženja kablova, pri prethodnom naprezanju kompleksnih konstrukcija obično se mere i **promene deformacija** konstrukcije. Ako se konstatuje značajnije odstupanje u odnosu na očekivane deformacije, tada, ili je greška u proceni sopstvene težine konstrukcije, ili u proceni i modeliranju njene krutosti ili se konstrukcija jednostavno negde nepredvidjeno zakačila-zapela. Da bi se ostvarili željeni efekti prethodnog naprezanja, neophodno je da se obezbedi **neometana deformacija konstrukcije!** U suprotnom, može doći i do havarije, do oštećenja objekta-prepreke koja sprečava slobodnu deformaciju, ali i do oštećenja konstrukcije koja se 'neprirodno' deformiše.

Po završetku prethodnog naprezanja kabla, vrši se **injektiranje zaštitnih cevi**, utiskivanjem obično cementne emulzije pod pritiskom, kroz prethodno ostavljene **cevčice za injektiranje**, slika 1.14. Injektiranje se obično vrši sa najnižih tačaka zaštitnih cevi ili kroz same kotve, čime se potiskuje naviše zaostala voda, vazduh i nečistoće nakupljene u cevi, čije se izbacivanje van cevi vrši kroz **cevčice za ozračivanje**, slika 1.14.



Slika 1.20 Tipična trasa kabla za prethodno naprezanje sa fiksnom kotvom na jednom kraju



Slika 1.21 Dva tipa fiksnih kotvi (VSL International)

Još jedan primer **trase kablova** kontinualne konstrukcije preko dva polja, izvedene monolitno, bez nastavaka, prikazan je na slici 1.20. Utezanje kablova predviđeno je samo sa levog kraja, ne kome je ugradjena 'aktivna kotva' dok je na desnom kraju postavljena 'fiksna kotva'. Dva primera tipičnih konstrukcija fiksnih kotvi prikazani su na slici 1.21. Zbog problema sa održavanjem i zaštitom konstrukcija, danas je trend da se koristi što manje aktivnih kotvi, koje nakon prethodnog napreznja treba zaštititi, plombirati. Otuda i trend primene dugačkih kablova, sa što više ubetoniranih fiksnih kotvi, kao na slici 1.20. Obe kotve prikazane su sa dodatnom **spiralnom armaturom** za osiguranje zone unošenja sile prethodnog napreznja, o čemu je prethodno bilo reči. Na istoj slici prikazani su i vektori **skretnog opterećenja**, sile kojima kablovi deluju na beton konstrukcije, ali

ovaj put uključujući i **sile trenja** pri utezanju kabla, o čemu do sada nije bilo reči. Uvek prisutno trenje pri utezanju smanjuje **efekte prethodnog napreznja**, o čemu se vodi računa pri projektovanju.



Slika 1.22 Kotve kablova bez spoja za prethodno napreznje ploča (VSL International)



Slika 1.23 Detalj kotvi u ploči, sa armaturom za obezbeđenje lokalnih napona

Pri **prethodnom napreznju ploča**, takodje mogu da se koriste prikazani sistemi kablova za prethodno napreznje **sa spojem** uz injektiranje zaštitnih cevi. Medjutim, u svetu se danas češće koristi postupak sa kablovima **bez spoja**, čime se isbegava injektiranje. S obzirom da su ploče malih debljina, svi vodeći proizvođači sistema za prethodno napreznje nude posebno dizajnirane kotve, sa manjim brojem užadi rasporedjenih u horizontalnoj ravni, tako da i podložna ploča dobija izduženi oblik, pogodniji za ugradjivanje u tanke elemente, slika 1.22. Detalj kotve kablova ploče prikazan je na slici 1.23.

SPB SUPER

SISTEM ZA PREDNAPREZANJE UŽADIMA

Sistem za prednaprezanje **SPB SUPER** predstavlja rezultat daljeg razvoja sistema SPB koji se uspešno primenjuje više od dvadeset godina. Osnovni razlog izmena sistema SPB su promene nastale uvođenjem novih standarda za užad (prema prEN 10138) i prihvatanja Evrokoda kao jugoslovenske norme.

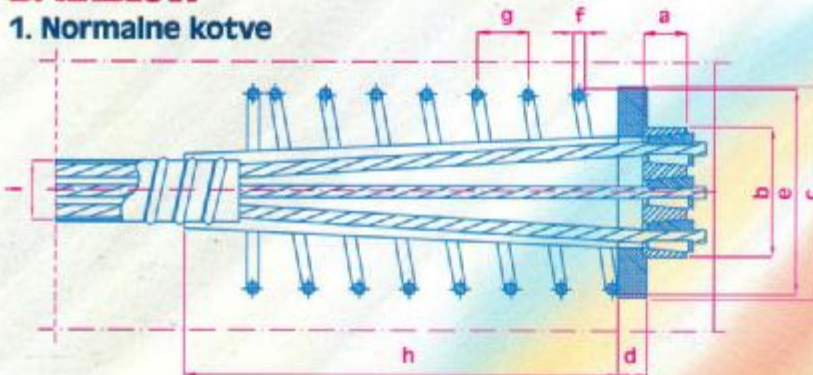
A. ČELIK ZA PREDNAPREZANJE

Karakteristike užadi (prema prEN 10138 - 3) koja se primenjuju u sistemu **SPB SUPER**

KLASA	Nazivni prečnik	Nazivna čvrstoća	Površina preseka	Karakteristična prekidna sila F_k	Karakteristična sila pri izduženju 0,1% $F_{0,1}$
	mm	N/mm ²	mm ²	kN	kN
A	15,2	1770	140	248	213
B	15,2	1860	140	260	224
A	16	1770	150	265	228
B	16	1860	150	279	240

B. KABLOVI

1. Normalne kotve



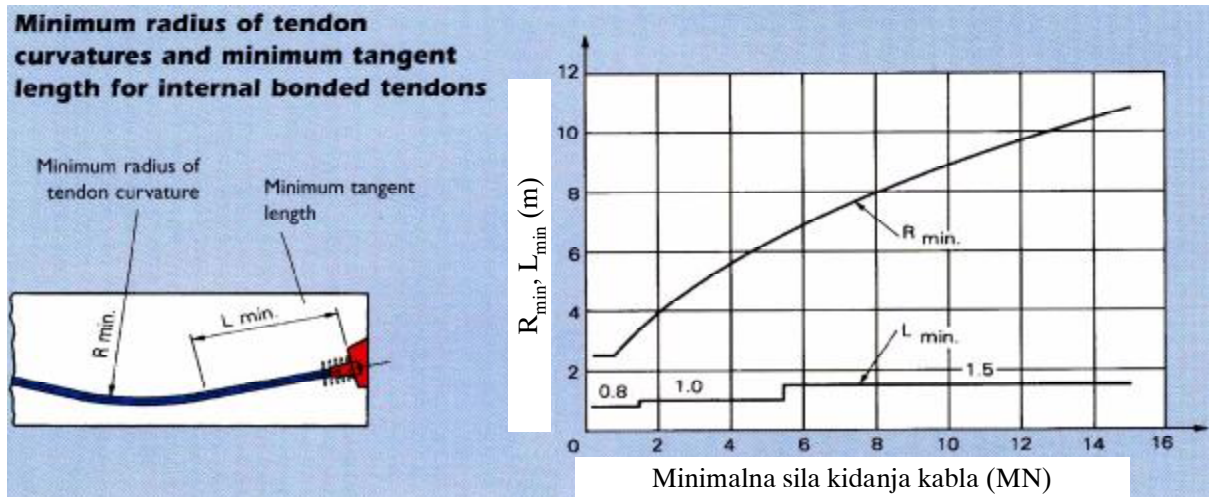
1.1 Osnovni podaci za normalne kotve

TIP KOTVE	Broj užadi	Prečnik i klasa užeta	Maksimalna sila *) u kablovima	a	b	c	d	e	f	g	h	i	TIP PRESE
	mm	mm	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
S 1/16	1	∅15,2	223	50	50	100	15	100	6	4 x 40	-	26	S-25
S 2/16	2		446	50	85	120	15	120	8	4 x 40	150	42	
S 3/16	3		670	50	90	150	20	140	10	4 x 50	200	48	
S 4/16	4	A, B	893	50	100	170	20	160	12	4 x 50	250	50	S-160
S 7/16	5-7		1116 - 1562	55	135	220	30	210	14	7 x 60	500	65	
S 12/16	8-12		1786 - 2678	60	180	290	40	280	16	8 x 70	600	80	
S 19/15	15-19	∅15,2	2788 - 3531	65	235	400	45	400	18	9 x 70	800	100	S-350
S 37/15	25-37	A	4646 - 6076	110	320	500	60	500	20	10 x 80	1000	150	S-700

*) Maksimalna sila u kablovima podrazumeva silu u trenutku prednaprezanja (sila u presi), pre prenošenja sile na kotvu.

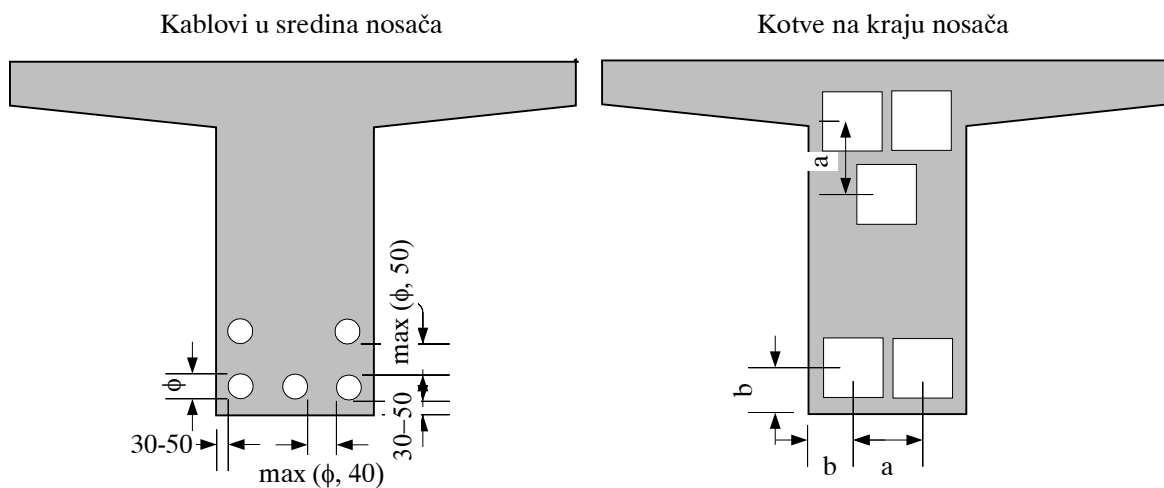
Slika 1.24 Deo kataloga domaćeg sistema za prethodno naprezanje IMS sa podacima o normalnim-aktivnim kotvama

Deo kataloga domaćeg sistema za prethodno naprezanje- 'IMS' prikazan je na slici 1.24, sa podacima o užadima i aktivnim-normalnim kotvama.



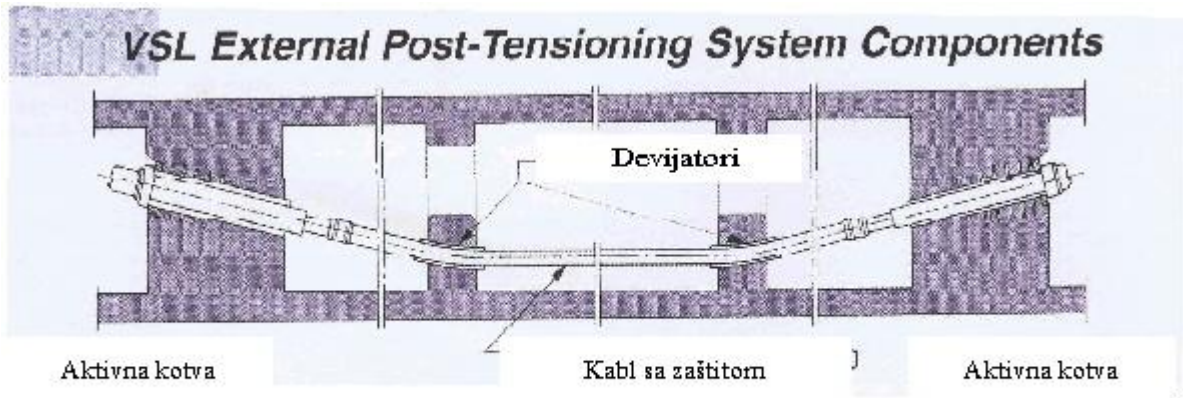
Slika 1.25 Minimalni poluprečnici krivljenja R i minimalne dužine pravog dela kabla u zoni kotve L (VSL International)

Krivolinijsko vodjenje trase kablova ne može da se vrši naglim, oštrim prelomima cevi i kablova. Proizvođači kablova definišu minimalne dozvoljene radijuse krivina kablova R_{min} u zavisnosti od njihove krutosti, tj. broja užadi odnosno sile kidanja-nosivosti kabla, slika 1.26. S obzirom da je neophodno da kabl izađe upravno na kotvu, definišu se i minimalne dužine L_{min} pravog dela na ulasku kabla u kotvu, slika 1.25.



Slika 1.26 Minimalni dozvoljeni razmaci (mm) cevi odnosno kotvi kablova (IMS)

Raspored kablova i kotvi u okviru preseka takodje je definisan ili propisima, ili posebnim uputstvima proizvođača, da bi se obezbedio smeštaj elemenata i **kvalitetno betoniranje**. Dozvoljeni osovinski razmak cevi je naravno manji nego u slučaju kotvi, jer kotve imaju veće dimenzije, slika 1.26. Ukoliko je debljina rebra grede taman dovoljna da se zaštitne cevi smeste na minimalnim međusobnim razmacima, tada je neophodno da se nosač na krajevima proširi, kako bi mogle da se smeste kotve. To za posledicu ima i delimično bočno krivolinijsko vodjenje trase pojedinih kablova, kako se kablovi približavaju kotvama.

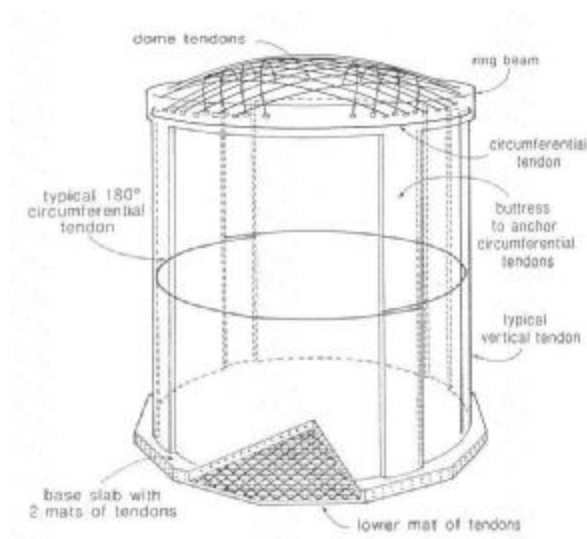


Slika 1.27 Elementi sistema za spoljašnje prethodno naprezanje (prema VSL)

Osim što su užad za prethodno naprezanje ista, sistemi za **spoljašnje prethodno naprezanje** imaju posebno razradjene sve ostale detalje, kao i odgovarajuća uputstva za projektovanje. Na slici 1.27 shematski su prikazani osnovni elementi sistema *VSL International*. Svi elementi su tako koncipirani da se kabl, u slučaju potrebe može jednoga dana zameniti. Užad za prethodno naprezanje obično se na pravcima vode kroz polietilenske cevi, dok se na krivinama-devijatorima, kao i u zoni ukotvljenja koriste čelične cevi.

1.4 PRIMERI PRIMENE PRETHODNOG NAPREZANJA

Prethodno naprezanje danas se primenjuje kako u proizvodnji velikih serija jednostavnih montažnih elemenata (tavanice, krovni nosači, železnički pragovi, šipovi itd.), tako i za gradjenje nesvakidašnjih konstrukcija (veliki rasponi, specijalne tehnologije gradjenja, rezervoari, vodotornjevi, posebni uslovi zaštite kao u slučaju posuda nuklearnih reaktora, mostovi, tavanice poslovnih zgrada velikih površina, konstrukcije krovova velikih raspona, aerodromske piste itd.). Za primenu u geotehnici razvijeni su posebni sistemi ankeri za osiguranje i stabilizaciju kosina, ankerovanje objekata koji mogu da isplivaju zbog hidrostatičkog potiska itd.



Slika 1.28 Prethodno naprezanje rezervoara



Slika 1.29 Prethodno napregnuta konstrukcija 'mostovskih' etaža

OPREMA ZA PROIZVODNJU

Technology by



EXTRUDER



TESTERA

ASPIRATOR



TEHNIČKE KARAKTERISTIKE

Opterećenje kg/m	Maksimalna dužina ploče (m)		
	MP-15 (h=15cm)	MP-20 (h=20cm)	MP-25 (h=25cm)
150	8,00	11,50	13,50
200	8,00	10,50	13,00
300	7,00	9,20	11,40
350	6,70	8,70	10,80
400	6,40	8,30	10,40
500	5,90	7,70	9,60
600	5,60	7,30	9,00
700	5,30	6,90	8,60
800	5,10	6,60	8,20
900	4,90	6,40	7,90
1000	4,70	6,10	7,60

Tip ploče	Širina	Debljina	Max. dužina	Težina	
MP-15	30,0 cm	15,0 cm	8,00 m	72 kg/m (241 kg/m ³)	19,00 l/m ²
	60,0 cm	15,0 cm	8,00 m	151 kg/m (251 kg/m ³)	9,50 l/m ²
	120,0 cm	15,0 cm	8,00 m	302 kg/m (252 kg/m ³)	4,75 l/m ²
MP-20	30,0 cm	20,0 cm	11,50 m	91 kg/m (302 kg/m ³)	27,09 l/m ²
	60,0 cm	20,0 cm	11,50 m	187 kg/m (312 kg/m ³)	13,55 l/m ²
	120,0 cm	20,0 cm	11,50 m	373 kg/m (311 kg/m ³)	6,77 l/m ²
MP-25	60,0 cm	25,0 cm	13,50 m	222 kg/m (370 kg/m ³)	17,72 l/m ²
	120,0 cm	25,0 cm	13,50 m	451 kg/m (376 kg/m ³)	8,86 l/m ²
FP-15	120,0 cm	15,0 cm	8,00 m	332 kg/m (277 kg/m ³)	



Građevinsko Industrijsko Preduzeće
"MORAVA" A.D. Krušće

GIP "MORAVA" AD Krušće
18251 Mramor, Niš, Yugoslavia
tel/fax +381 (0) 18 560-672
560-671
694-053
694-277
694-113
694-290
e-mail: morkr@eunet.yu
www.moravagip.co.yu

MP-15, MP-20 i MP-25 primenjuju se kao međuspratni, krovni i fasadni elementi.

MP-15

h=15 cm l=30, 60 i 120 cm



MP-20

h=20 cm l=30, 60 i 120 cm



MP-25

h=25 cm l=60 i 120 cm



FP-15

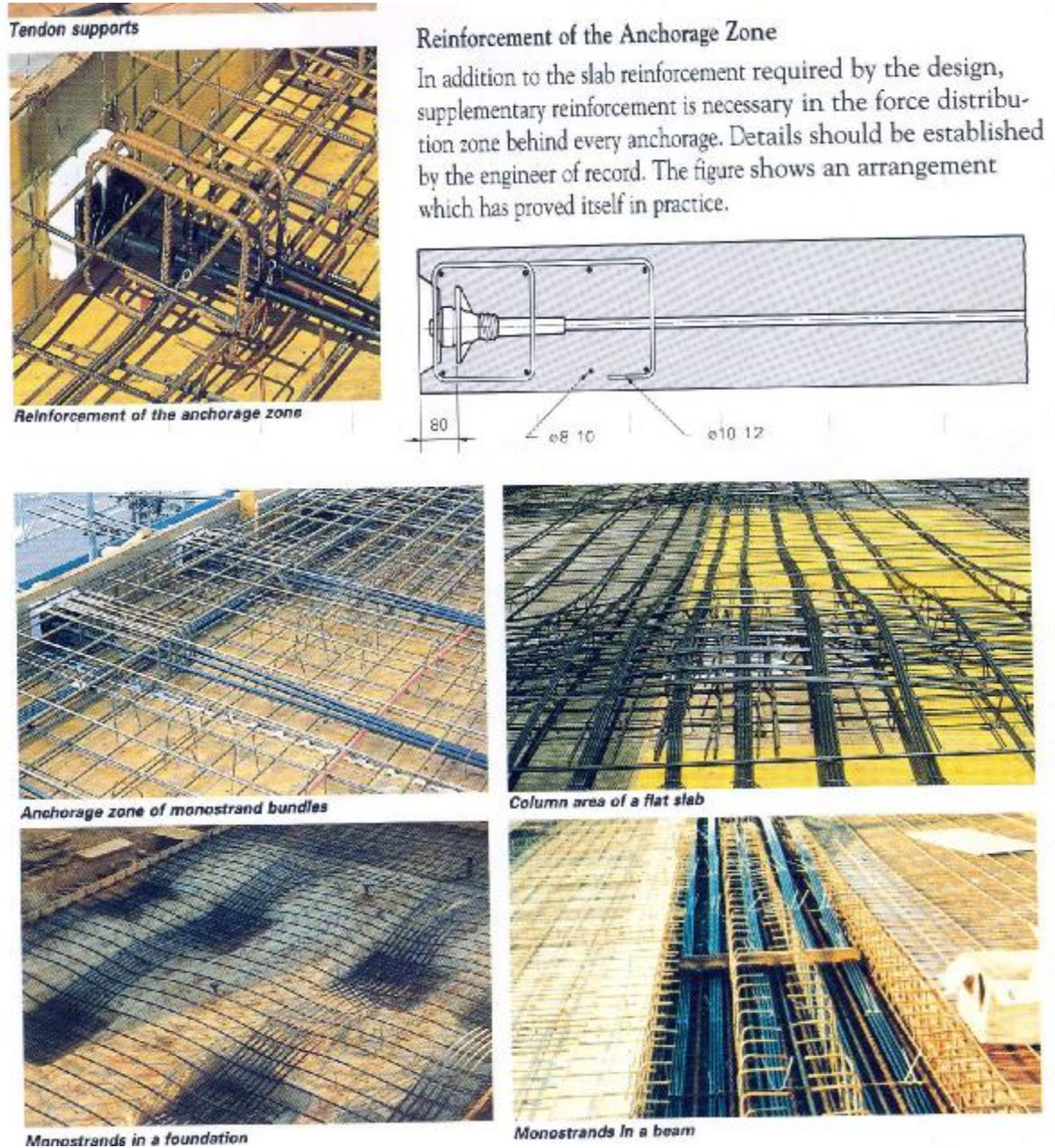
h=120 cm d=15 cm



FP-15 je fasadni sendvič element sa različitim finalnim obradama. Toplotna izolacija od Stiropora debljine 5-10 cm u saradnji sa

Delta matic
STIROPOR

Slika 1.30 Sistem prethodno napregnutih ošupljenih tavanica/panela - 'Morava-Krušće'



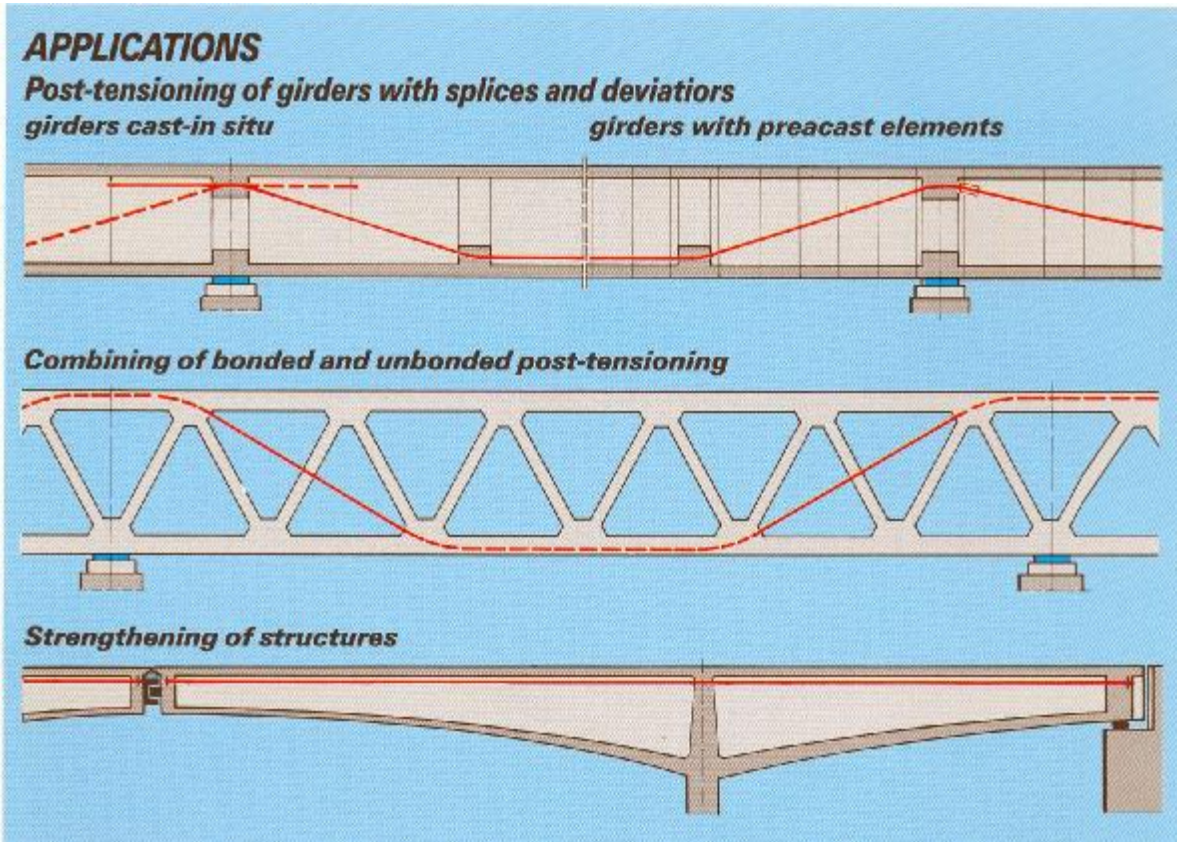
Slika 1.31 Prethodno naprezanje medjuspratnih i temeljnih ploča kablovima bez spoja



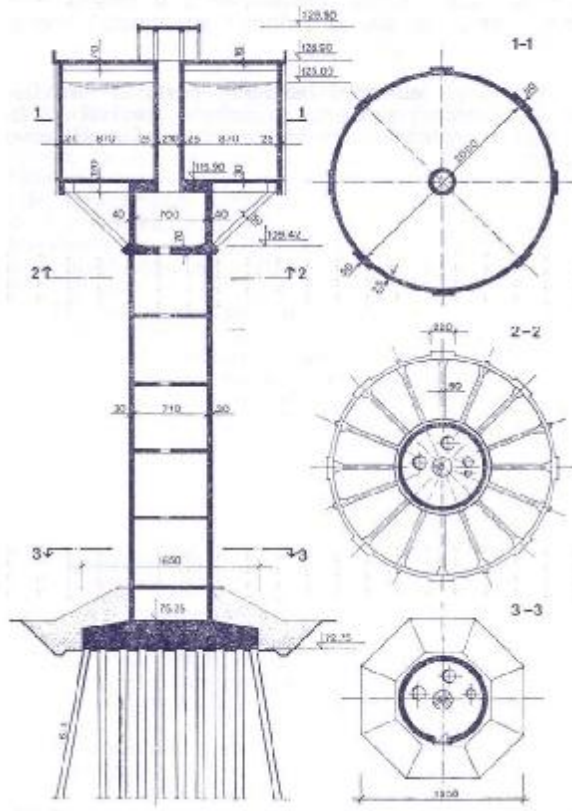
Slika 1.32 Segmentno gradjenje mosta



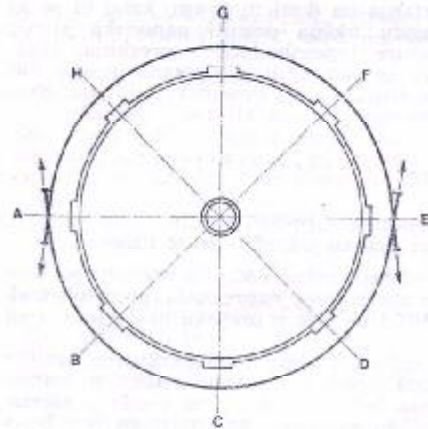
Slika 1.33 Spoljašnje prethodno naprezanje mosta



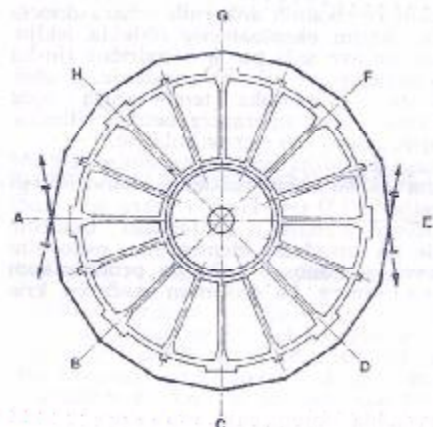
Slika 1.34 Spoljašnje prethodno naprezanje konstrukcija (prema Dywidag)



Slika 1.35 Prethodno napregnuti cilindar i platforma vodotornja 'Progar'



Slika 1.36 Trasa kablova cilindra



Slika 1.37 Trasa kablova platforme

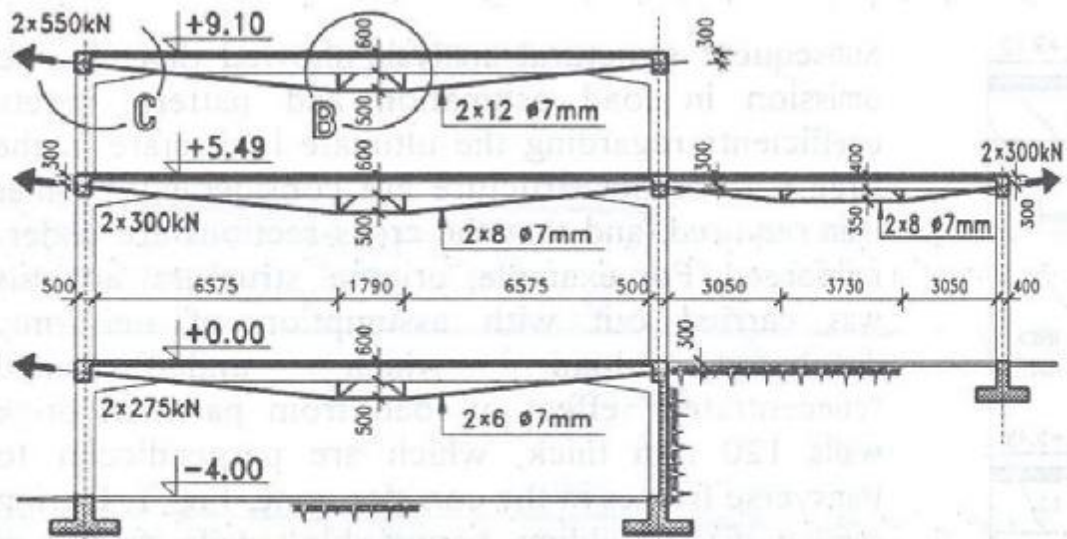


Fig. 3 Tendon layout

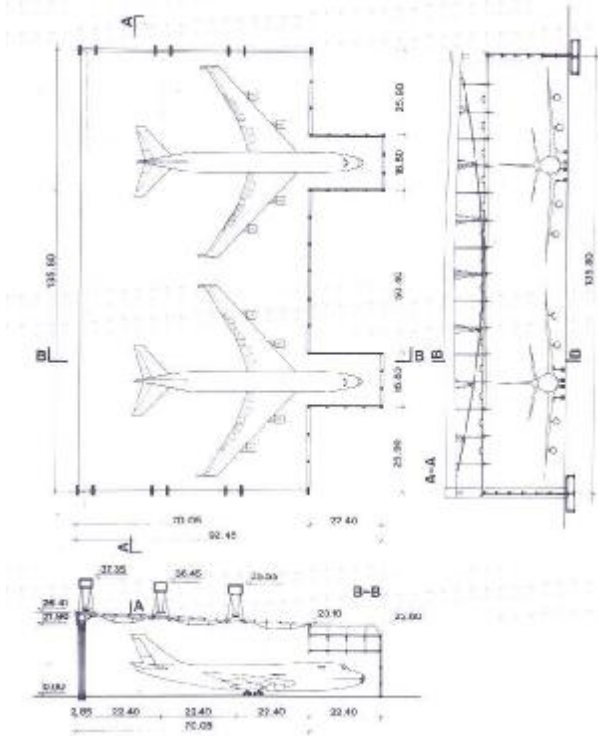
Slika 1.38 Sanacija ramova poduhvatanjem greda-spoljašnje prethodno naprezanje



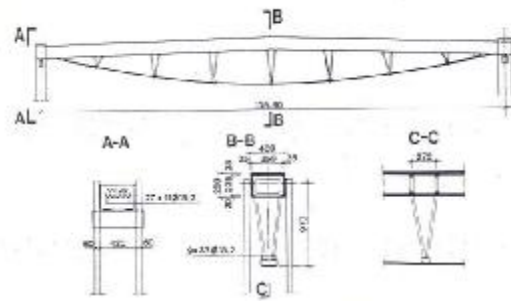
Slika 1.39 Spoljašnje prethodno naprezanje mosta



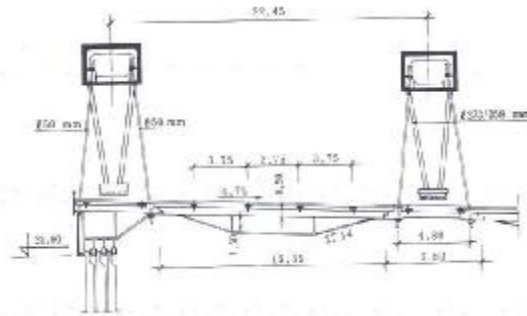
Slika 1.40 Prethodno napregnute liftovane tavanice, sistem Trudbenik



Slika 1.41 Spoljašnje prethodno naprezanje glavnih nosača krova raspona 136m - hangar JAT-a u Surčinu



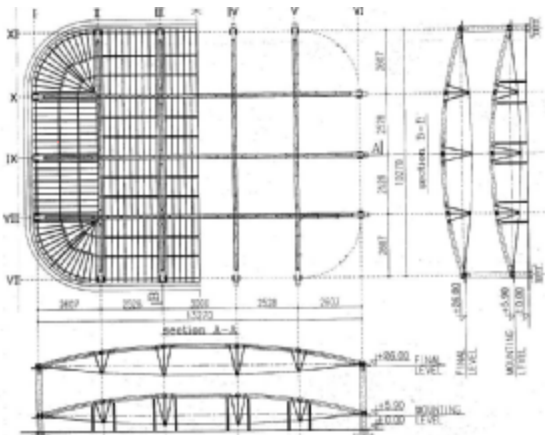
Slika 21. Glavni krovni nosači novog hangara JAT na Aerodromu Surčin, Beograd



Slika 1.42 Krovni nosač hangara JAT-a u Surčinu



Slika 1.43 Glavni nosači hangara JAT-a u Surčinu u fazi gradjenja



Slika 1.44 Dispozicija 'Beogradske Arene'



Slika 1.45 Spoljašnje prethodno napregnuta konstrukcija krova 'Beogradske Arene'



Slika 1.46 Detalj gornjeg pojasa, kablova, stolica i devijatora 'Beogradske Arene'