Prethodno prednapinjanje ab greda u industrijskom pogonu

Bušnja, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:134739

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 236/GR/2015

Prethodno prednapinjanje ab greda u industrijskom pogonu

David Bušnja, 3395/601

Varaždin, rujan 2015. godine



Sveučilište
Sjever

Odjel za Ime odjela

Završni rad br. 236/GR/2015

Prethodno prednapinjanje ab greda u industrijskom pogonu

Student

David Bušnja, 3395/601

Mentor

Matija Orešković, dipl.ing.građ., predavač

Varaždin, rujan 2015. godine

Predgovor

U svom radu iznosit ću podatke o prednapregnutim gredama u industrijskom pogonu. Rad se odnosi samo na grede koje su prednapete na stazi, prije stvrdnjavanja betona. U četvrtom semestru svoju stručnu praksu odradio sam u industrijskom pogonu tvrtke „Zagorje – Tehnobeton“. Upisivao sam dnevnike prednaprezanja za prednapete grede te promatrao na koji se način izrađuju. Zadovoljan svojom praksom, nastavio sam proučavati prednapeti beton. Zbog toga sam odabrao da mi tema za završni rad bude prethodno prednapinjanje ab greda u industrijskom pogonu.

U prvom djelu završnog rada obradio sam teorijski dio. Općenito o prednapregnutom betonu, postupak prednaprezanja prethodno prednapete grede i opis sile prednaprezanja nakon što se užad presjeće. Nakon toga grafički sam prikazao odnose sile kojom su zategnuta užad i njihovog izduženja. Podatke sam prikupio na stručnoj praksi.



Slika 1. Industrijski pogon tvrtke „Zagorje – Tehnobeton“

Sažetak

Osnovna ideja prednaprezanja sastoji se u tome da se konstrukcijskim mjerama u beton unese takvo stanje naprezanja kako bi se sva naprezanja u eksploataciji mogla preuzeti sudjelovanjem cijelog betonskog presjeka. Pri tome su vlačna naprezanja betona potpuno isključena, ili su dopuštena, ali u malim vrijednostima. Nosivost se elementa povećava u usporedbi s klasičnim armiranim betonom uz nešto veću cijenu. Materijali kojima se izrađuje prednapregnuti beton su beton i čelik, oba materijala moraju biti visoke čvrstoće.

Prednaprezanje grede u industrijskom pogonu obuhvaća zatezanje i usidravanje užadi između dva potporna zida na krajevima staze, betoniranje elemenata oko prethodno zategnutih užadi, te presjecanje užadi nakon što beton dovoljno očvrsne. Potrebna je velika točnost u visinskom položaju užeta, a međusobni razmak treba biti minimalno koliko iznosi veličina najvećeg zrna u agregatu betona. Kad se prednaprezanje vrši na stazi za prednaprezanje treba razlikovati silu N_k kojom se žice za prednaprezanje na stazi zatežu i silu N_{k0} koja poslije oslobađanja žica od sidra djeluje na čvrsti beton. Sila N_k djelovati će na spojni presjek usljed čega će on pretrpjeti elastičnu deformaciju. Užad za prednaprezanje skratit će se za istu mjeru, što znači da će naprezanje u njima pasti. Sila prednaprezanja N_{k0} koja stvarno djeluje bit će manja od sile prednaprezanja na stazi N_k.

Popis korištenih kratica

N_k	Sila u užetu
N_{k0}	Sila pritiska užeta u betonskom elementu
N_{k10}	Sila ne izoliranog užeta
N_{k20}	Sila ne izoliranog dijela izoliranog užeta
σ	Naprezanje
σ_{zv0}	Naprezanje u čeliku za prednaprezanje uslijed prednaprezanja
σ_{zv}	Naprezanje u čeliku za prednaprezanje uslijed prednaprezanja, na stazi za prednaprezanje
σ_{bv}	Naprezanje u betonu uslijed prednaprezanja
$\Delta\sigma_{bk}$	Promjena naprezanja u betonu u nivou užeta
F_i	Površina idealiziranog presjeka
$\mathbf{F_z}$	Površina presjeka čelika za prednaprezanje
$\mathbf{F_b}$	Površina presjeka betona zajedno sa armaturom
$\mathbf{F_n}$	Površina presjeka betona bez armature
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Relativna promjena dužine
$\boldsymbol{\varepsilon_{bv}}$	Skraćenje betona uslijed prednaprezanja
$\boldsymbol{\varepsilon_{zv}}$	Izduženje čelika uslijed prednaprezanja
$\boldsymbol{\varepsilon_{zv}^{(0)}}$	Izduženje čelika uslijed prednaprezanja, na stazi za prednaprezanje
$\mathbf{E_b}$	Modul elastičnosti betona
$\mathbf{E_z}$	Modul elastičnosti čelika za prednaprezanje
$\mathbf{J_i}$	Idealni moment inercije
$\mathbf{y_i}$	Idealni razmak od težišnih linija
$\mathbf{y_{iz}}$	Idealni razmak užeta od težišta presjeka
μ_z	Moment savijanja čelika
e	Ekscentricitet
l_0	Dužina izoliranog dijela užadi
TL	Težišna linija
θ	Skretni kut
Q_k	Skretna sila
V_k	Vertikalna sila
n_k	Površina rezultirajućeg užeta
$\mathbf{M_g}$	Moment stalnog opterećenja
$\mathbf{M_v}$	Moment prednaprezanja
Q	Opterećenje
$\mathbf{F_1}$	Početna sila prednaprezanja
$\mathbf{F_2}$	Završna sila prednaprezanja
$\boldsymbol{\varepsilon_1}$	Početno izduženje čelika
$\boldsymbol{\varepsilon_2}$	Završno izduženje čelika

Sadržaj

1. Uvod 5

1.1. Općenito o prednapregnutom betonu 5
1.2. Vrste prednapregnutog betona 6
1.3. Materijali 8
1.4. Prednosti i mane prednapregnutog betona 8

2. Prednapregnuta greda prije stvrdnjavanja betona 9

2.1. Oprema za zatezanje 12
2.2. Položaj i razmaci užeta 13

3. Idealni efekti prednaprezanja 16

3.1. Statički određene konstrukcije 17
3.2. Statički neodređene konstrukcije 18

4. Proces prednaprezanja u industrijskom pogonu 21

4.1. Sile prednaprezanja prilikom prednaprezanja na stazi 21

5. Rezultati prednaprezanja 24
6. Zaključak 55
7. Literatura 56

1. Uvod

1.1. Općenito o prednapregnutom betonu

Beton je građevinski materijal koji ima veliku tlačnu, a vrlo malu vlačnu čvrstoću, koja iznosi jedva 1/10 njegove tlačne čvrstoće. U betonu se pojavljuju neizbježna unutarnja naprezanja izazvana temperaturnim razlikama i njegovim skupljanjem. Ta naprezanja vrlo brzo mogu dostići vlačnu čvrstoću betona, što ima za posljedicu pojavu pukotina i prije nego što se konstrukcija optereti. Kako je poznato, klasičnom se teorijom armiranog betona pretpostavlja da je vlačna zona napukla, pa se sile vlaka predaju samo armaturi. Prikladnom raspodjelom i oblikovanjem armature može se postići da pukotine budu tako male da nisu štetne, ali se ne mogu izbjeći. (TOMIČIĆ, 1988.)

Pukotine u betonu smatrale su se već u početku upotrebe armiranog betona za nedostatak. Zato se pomišljalo na to da se zatezanjem armature u betonu izazove naprezanje tlaka, tj. da se beton prednapregne. Osnovna ideja prednaprezanja sastoji se u tome da se konstrukcijskim mjerama u beton unese takvo stanje naprezanja kako bi se svi naponi u eksploataciji mogli preuzeti sudjelovanjem cijelog betonskog presjeka. Pri tome su vlačna naprezanja betona potpuno isključena, ili su dopuštena, ali u malim vrijednostima. Nosivost se elementa povećava u usporedbi s klasičnim armiranim betonom uz nešto veću cijenu. (TOMIČIĆ, 1988.)

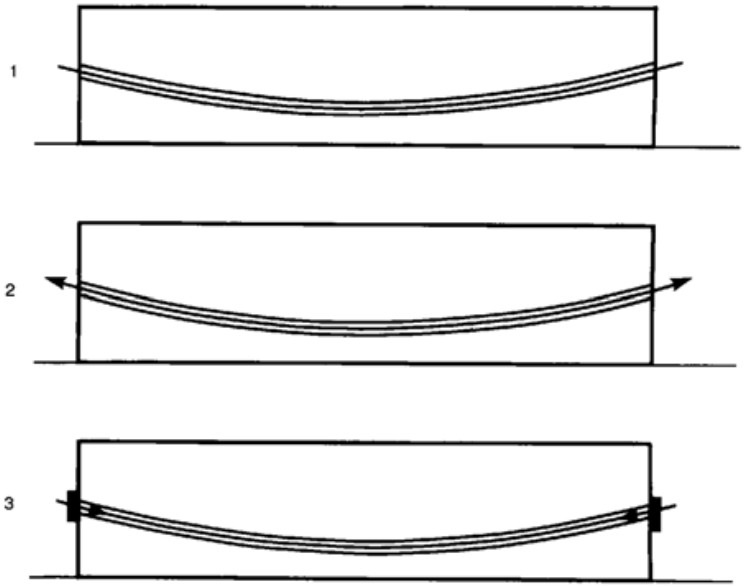
Kroz betonsku prizmu provučena je čelična šipka koja na svojim krajevima ima matice s podložnim pločicama. Nakon što beton dostigne dovoljnu čvrstoću, šipka se okretanjem matice napregne i pri tome izduži razmjerno veličini sile. Sila vlaka u šipki izazvana naprezanjem upire se preko podložnih pločica u beton i tako izaziva željeno tlačno naprezanje u betonu, pri čemu se betonska prizma skračuje. Čelična će šipka viriti iz prizme za zbroj veličina izduženja šipke i skraćenja betona. (TOMIČIĆ, 1988.)

1.2. Vrste prednapregnutog betona

1.2.1. Prema načinu prednaprezanja

Prednaprezanje poslije stvrdnjavanja betona

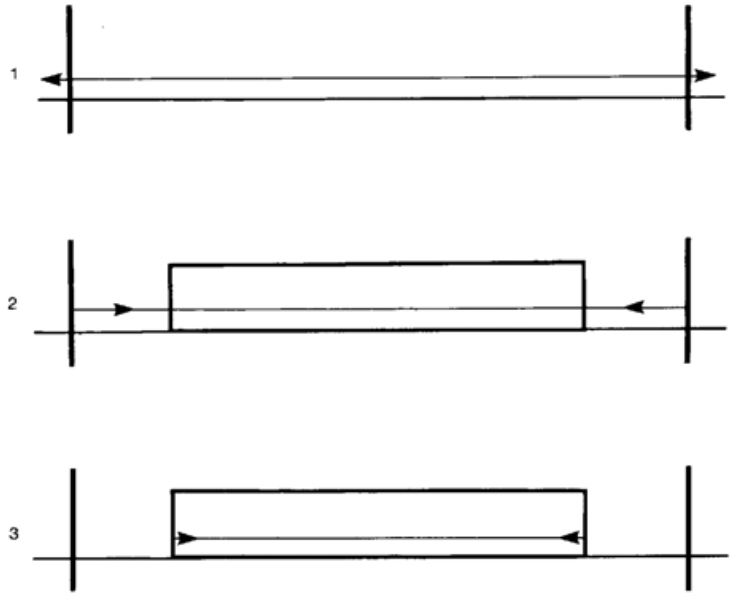
Čelik za prednaprezanje polaže se izvan betona ili u kanale (cijevi) u betonu, pri čemu se uređaj za natezanje čelika oslanja na očvrsli beton. Čelik se u napetom stanju sidri na svojim krajevima, pa se ta sila prenosi kao sila prednaprezanja na beton. Nakon prednaprezanja u kanale se za prednapregnuti čelik ubrizgava cementni mort. To je prednapregnuti beton s naknadno ostvarenim spojem koji se zasniva na međusobnom prianjanju čelika i betona. (TOMIČIĆ, 1988.)



Slika 1.1 Prednaprezanje poslije stvrdnjavanja betona

Prednaprezanje prije stvrdnjavanja betona

Prednaprezanje se izvodi na stazi za prednaprezanje. Sila vlaka iz čeličnih žica prenosi se na posebne ležajeve, a zatim se betonira element. Čim beton dostigne 70% predviđene čvrstoće, ali ne manje od 30 N/mm^2, veza se žica s ležajima raskida, pa se time sva sila iz čeličnih žica adhezijom u obliku tlaka prenosi na beton. (TOMIČIĆ, 1988.)



Slika 1.2 Prednaprezanje prije stvrdnjavanja betona

1.2.2. Prema načinu sidrenja čelika za prednaprezanje

- Sidrenje posebnim sidrima smještenima na krajevima čelika (čelične ploče s vijcima, klinovi, zadebljanja itd.)
- Sidrenje na osnovi prionljivosti čelika i betona
- Sidrenje na osnovi razvijanja kraja žica u petlju, kuku ili slično.

(TOMIČIĆ, 1988.)

1.2.3. Prema stupnju prednaprezanja

- Potpuno prednaprezanje, isključuju se naprezanja vlaka.
- Ograničeno ili nepotpuno prednaprezanje, dopuštaju se naprezanja vlaka u betonu ograničene veličine i pokrivaju se labavom armaturom da bi širina eventualnih pukotina bila u dopuštenim granicama.
- Djelomično prednaprezanje, nema ograničenja za vlačna naprezanja. Smanjena je mogućnost otvaranja pukotina prema običnome armiranom betonu. Proračunava se kao obični armirani beton.(TOMIČIĆ, 1988.)

1.3. Materijali

1.3.1. Čelik

Za prednapregnuti beton prikladni su samo čelici visoke čvrstoće. To je zbog toga što se dio izduženja ostvarenog pri zatezanju čelika, kao i sila u njemu, gubi uslijed naknadnog skraćenja betona. Zatezna sila smanjuje se za mjeru koja ovisi o odnosu skraćenja betona prema početnom izduženju čelika. Gubitak zatezne sile biti će toliko manji koliko je veće izduženje postignuto pri prethodnom zatezanju čelika. Koliko je veliko naprezanje koje se može unesti u čelik, toliko se on može više istegnuti. (LEONHART, 1962.)

1.3.2. Beton

Za prednapregnuti beton iz više razloga poželjni su betoni visoke čvrstoće jer se time dobivaju manji presjeci, manja vlastita težina, manje puzanje, a time i manji gubici. Osim visoke čvrstoće poželjno je proizvesti betone sa što manje skupljanja, a time i sa što manje gubitaka prednaprezanja. Za gubitke prednaprezanja u čeliku zbog skupljanja mjerodavno je skupljanje koje nastaje od trenutka prednaprezanja. (TOMIČIĆ, 1988.)

1.4. Prednosti i mane prednapregnutog betona

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. (LEONHART, 1962.)

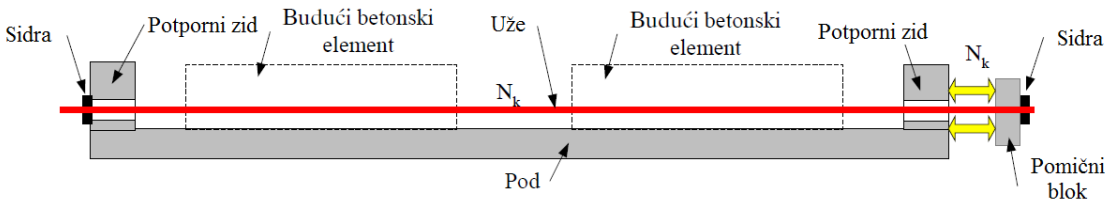
2. Prednapregnuta greda prije stvrdnjavanja betona



Slika 2.1 Prednapete grede

Postupak prednaprezanja obuhvaća sljedeće operacije:

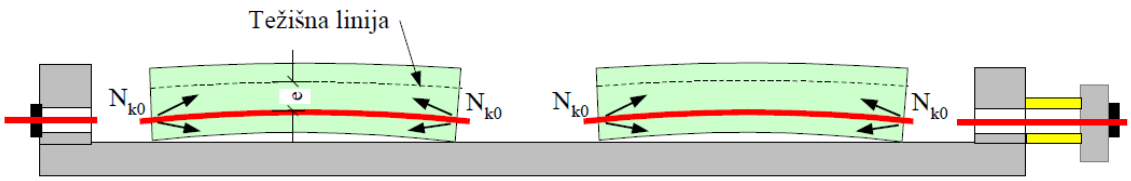
- Zatezanje i usidravanje užadi između dva potporna zida na krajevima staze;
- Betoniranje elemenata oko prethodno zategnutih užadi. S obzirom da užad i staza mogu biti velikih dužina, i preko 100 m, obično se vrši serijsko prethodno naprezanje više elemenata u nizu:
- Presjecanje užadi nakon što beton dovoljno očvrsne. (ALENDAR, 2003)



Slika 2.2 Zatezanje i usidravanje užadi između dva potporna zida na krajevima staze

Užad imaju tendenciju da se skrate, vrate na prvobitnu dužinu, i time izazivaju sile pritiska N_{k0} u betonskom elementu koji se opire skraćenju užadi. Za ovaj postupak bitno je da postoji dobar spoj užadi i betona da užad ne bi proklizala kroz beton. S obzirom da je obično u pitanju serijska proizvodnja velikog broja elemenata, bilo bi neracionalno da se presjecanje užadi vrši 28 dana nakon betoniranja, kada beton postiže svoje nominalne karakteristike. Zbog toga se

obično vrši zaparivanje betona, kako bi se ubrzalo njegovo očvršćavanje i što prije oslobodila staza za izradu novih elemenata. (ALENDAR, 2003)

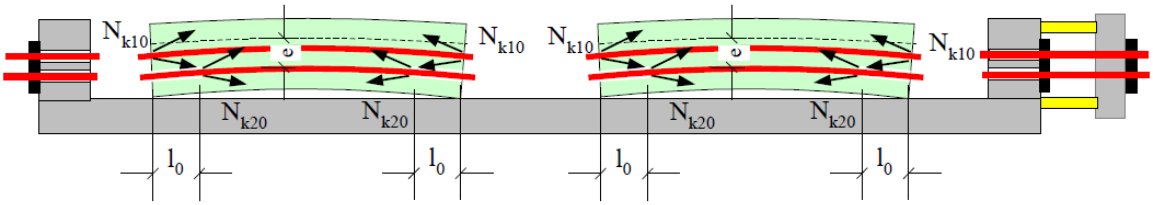


Slika 2.3. Presjecanje užadi nakon što beton dovoljno očvrsne

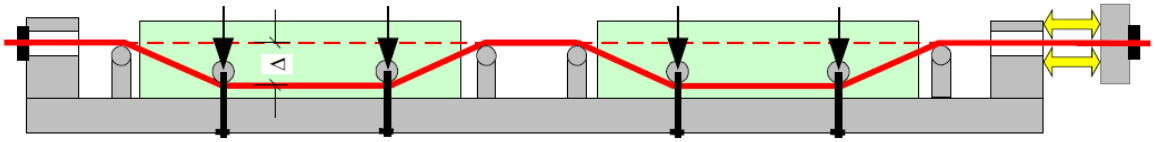
Za ovaj način prednaprezanja najlogičnije je pravolinijsko vođenje užadi kao i kontinuirani spoj betona i užadi cijelom dužinom elementa, sa konstantim ekscentricitetom e u odnosu na težišnu liniju elementa. Kod sistema prostih greda, bilo bi pak poželjno da je ekscentricitet sile prednaprezanja najveći u sredini raspona, gdje su i najveći momenti, i da se smanjuje prema osloncima, gdje bi rezultantu prednaprezanja trebalo uvesti u jezgru presjeka, ukoliko želimo da izbjegnemo naprezanja zatezanja u zoni oslonca. (ALENDAR, 2003)

U okviru ove tehnologije, promjenljiv ekscentricitet može se postići na dva načina:

- Elementi obično imaju veći broj užadi, od kojih se jedan dio u zoni oslonca na dužini l_0 može izolirati od betona, pomoću navučenih plastičnih cijevi. S obzirom da je za unošelje sile prednaprezanja neophodan spoj užadi i betona, ne izolirana užad počet će unositi silu N_{k10} na kraju nosača, dok će izolirana užad početi unositi svoj dio sile N_{k20} tek u presjeku pomaknutom za dužinu l_0. izoliranjem najnižeg reda užadi u zoni oslonca, rezultanta se pomiće prema gore, prema jezgri presjeka:
- Nakon što se izvrši uobičajeno zatezanje užadi, vrši se potezanje užadi prema dolje za željeni iznos Δ posebnim uređajima, užad se prelomi preko oslonca i prilagođava statički povoljnijem obliku. (ALENDAR, 2003)



Slika 2.4 Promjena ekscentriciteta pomoću izoliranja užadi



Slika 2.5 Promjena ekscentriciteta pomoću potezanja užadi prema dolje



Slika 2.6 Uže za prednaprezanje

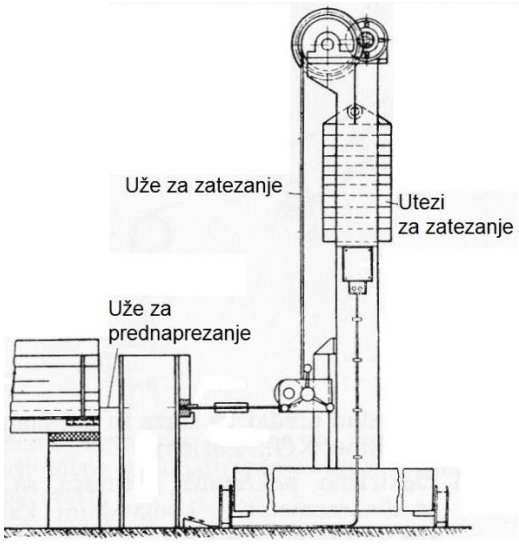
2.1. Oprema za zatezanje

2.1.1 Mehanički uređaji za zatezanje

Uređajima za prednaprezanje moraju se izazvati velike sile čiji se iznos treba točno ustanoviti. Mehanički uređaji mogu se koristiti kao:

- Utezi sa prijenosom preko poluge ili bez nje
- Prijenos preko zupčanika pokretanog koloturom
- Vreteno s pogonom za prijenos
- Mašina za namotavanje

Utezi imaju prednost jer sila prednaprezanja djeluje u točnom iznosu i neovisno o izduženju. Mehanička oprema za zatezanje koristi se kod prednaprezanja na stazi. (LEONHART, 1962.)



Slika 2.5 Uređaj za prednaprezanje sa utezima

2.1.2 Hidraulični uređaji za zatezanje

Hidrauličke preše upotrebljavaju se vrlo često jer se velike sile prednaprezanja najjednostavnije postižu hidrauličkim pritiskom. Preše za pojedinačna uža konstruirana su tako da se uže može čvrsto spojiti neposredno, dok se klip preše opire neposredno ili preko umetka, pa time o potporni zid staze za prednaprezanje. (LEONHART, 1962.)

Hidraulički pritisak većinom iznosi između 200 kg/cm² i 700 kg/cm². Manjim pritiscima daje se prednost onih preša čiji klipovi djeluju neposredno na beton, u slučaju većih pritisaka potrebni su podmetači ili podložne ploče. Sila prednaprezanja određuje se iz

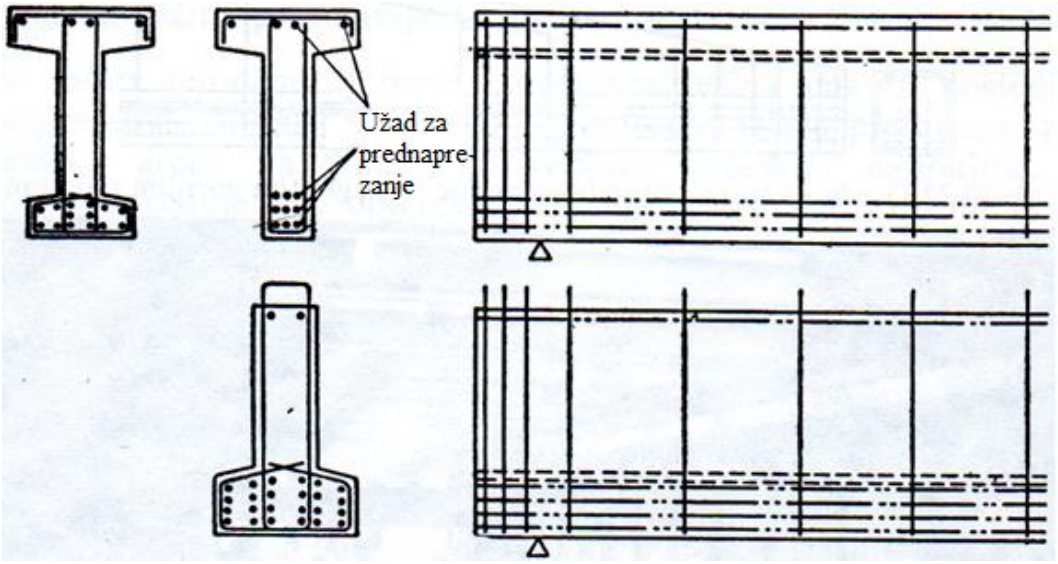
površine klipa i pritiska u preši, čitanog na manometru, pri čemu se zbog trenja treba odbiti od 1 do 3%. Rezultati su dobri ako se radi sa prešom i manometrom koji su zajedno baždareni. (LEONHART, 1962.)



Slika 2.6 Hidraulička preša za zatezanje

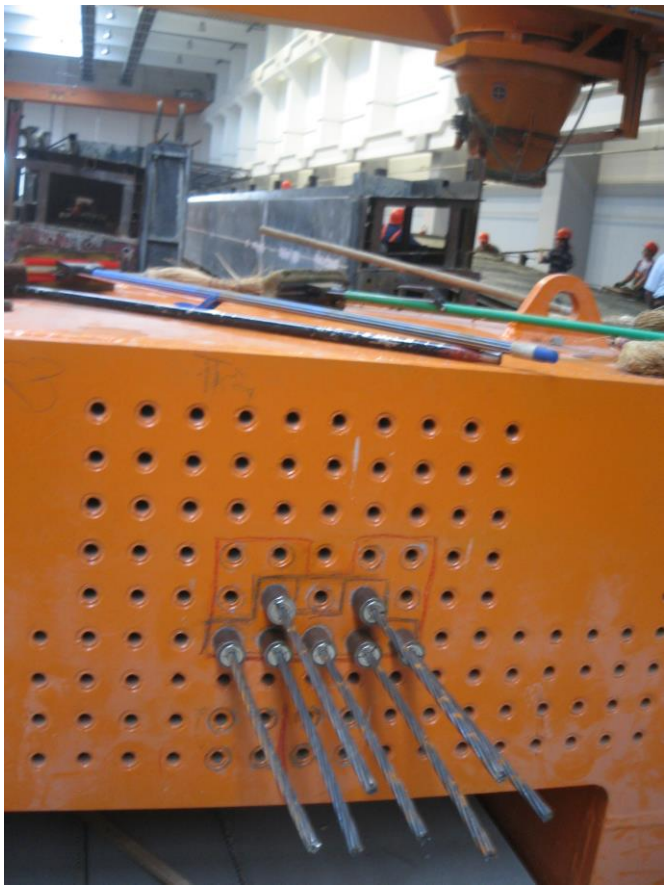
2.2. Položaj i razmaci užeta

Pri prednaprezanju na stazi užad za prednaprezanje se obično vode pravolinijski i na međusobno uskim razmacima. Na taj način njihov položaj je u sredini raspona ispravan, a u području sidrenja, nepovoljan. Sila prednaprezanja djeluje na donjem rubu i time izaziva na kraju grede znatna vertikalna naprezanja. Ta naprezanja i sile zahtjevaju dobro armiranje sponama u području uvođenja sile. Ako greda ima nožicu, onda spona mora obuhvatiti i žice u nožici. Sila oslonca daje lokalno pogodno poprečno naprezanje pritiska, ali to naprezanje kod transporta grede ne djeluje. Zbog toga se u većini slučajeva žice za prednaprezanje postavljaju i u gornji pojas grede da bi se spriječio nastanak pukotina. (LEONHART, 1962.)



Slika 2.7 Primjer grede sa staze za prednaprezanje

Kod visinskog položaja užeta prednapregnutog elementa mora se zahtjevati veća točnost nego kod konstrukcija od armiranog betona. Razlog tome su sile prednaprezanja koje su u odnosu na presjek vrlo velike. Već i mala odstupanja u visinskom položaju od zahtjevanog izazivaju vidne promjene u momentu prednaprezanja. Naprezanje pod vlastitom težinom daje nam razlika između M_g i M_v, a to su dvije vrijednosti koje su međusobno skoro jednake. Ako se dakle M_v uslijed netočnog polaganja kabla poveća za 5%, onda se naprezanje može povečati za 20 do 30% od računatog. Poseban stupanj točnosti ovisi o visini grede. Kao praktično pravilo, može se uzeti da odstupanje ne smije prekoračiti iznos od 1/200 visine grede. Za grede manje visine potrebna je veća točnost nego za velike mostovske nosače. Kod greda koje se izrađuju na stazi za prednaprezanje točni čelični šabloni osiguravanju ispravan visinski položaj užeta. (LEONHART, 1962.)



Slika 2.8 Točni čelični šabloni koji osiguravaju ispravan visinski položaj užeta

Za užad i šipke neposredno betonirane pri radu na stazi za prednaprezanje međusobni razmak treba biti minimalno koliko iznosi veličina najvećeg zrna u agregatu betona koji se ugrađuje. (LEONHART, 1962.)

3. Idealni efekti prednaprezanja

Da bi se analiziralo stanje neke konstrukcije od homogenog elastičnog materijala, sile u presjecima, deformacije, naprezanja u presjecima itd., primjenjuju se neke od metoda statike konstrukcija ili otpornosti materijala. Opterećenja konstrukcije uslijed prednaprezanja su unutrašnja opterećenja konstrukcije. Karakteristike unutrašnjih opterećenja izazivaju deformacije konstrukcije, ali u slučaju kada slobodne deformacije nisu spriječene, ne izazivaju reakcije oslonaca. U ovom djelu prikazan je postupak kako da se unutrašnja opterećenja kojima užad za prednaprezanje djeluju na konstrukciju, zamjene ekvivalentnim opterećenjem uslijed prednaprezanja. Efekti prednaprezanja, sile u presjecima, deformacije itd. određuju se za utjecaje ekvivalentnog opterećenja shvaćenog kao vanjsko opterećenje, nekom od metoda statike konstrukcija. Sva razmatranja odnose se na idealan slučaj, u realnosti neostvariv, da je sila u užetu konstantna cijelom dužinom užeta, i jednaka sili na preši kojom je uže zategnuto. Zbog različitih neizbježnih efekata, sila u užetu mijenja se dužinom nosača već u samom zatezanju užeta, a početne realizirane sile mijenjaju se tokom vremena. Analiza idealnih efekata prednaprezanja ima svoj značaj zbog shvaćanja djelovanja prednaprezanja. (ALENDAR, 2003)

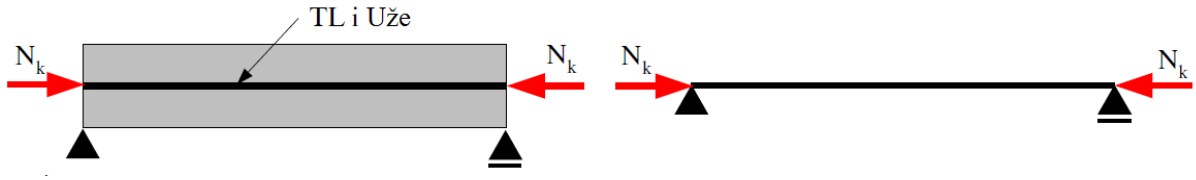
Ekvivalentna opterećenja i efekti prednaprezanja određuju se polazeći od usvojenog postupka prednaprezanja, razmatranjem sila i deformacija konstrukcije i fazi zatezanja užeta, kada se formira početno stanje sila i deformacija koje je osnova za sve naknadne analize. Neovisno o tome da li je konstrukcija statički određena ili neodređena, zategnuto uže na proizvoljno betonsko tijelo konstrukcije djeluje:

- Koncentriranim silama na mjestu sidra;
- Koncentriranim skretnim silama u pravcu simetrale kuta, na mjestu oštrog preloma položaja užeta;
- Podijeljenim skretnim opterećenjem u pravcu centra krivine na djelu užeta u krivini.

Efekti prednaprezanja dodatno ovise i o ekscentricitetu sidra na krajevima nosača, o obliku težišne linije konstrukcije kao i o tome da li je konstrukcija statički određena ili neodređena. (ALENDAR, 2003)

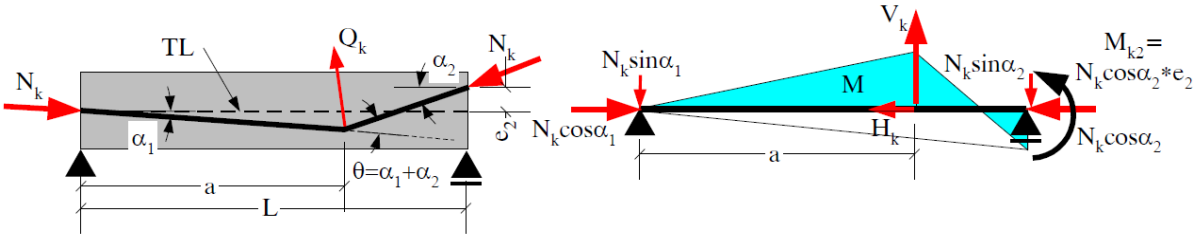
3.1. Statički određene konstrukcije

U slučaju statički određenih konstrukcija, u slučaju vanjskih statički određenih konstrukcija, prednaprezanje ne izaziva reakcije oslonca. Svi principi ilustrirani su na sljedećim primjerima konstrukcija sistema prostih greda, važe za sve statički određene konstrukcije. (ALENDAR, 2003)



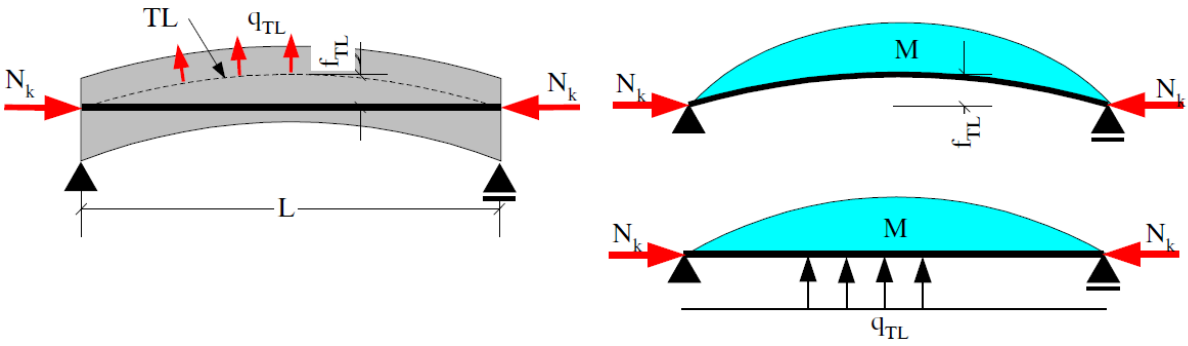
Slika 3.1 Nosač 1

Ravno uže zategnuto silom N_k unosi u konstrukciju samo koncentrirane sile na mjestu sidra. Ukoliko se os kabla poklapa sa težišnom linijom, ekvivalentno opterećenje su dvije sile N_k ba mjestima sidra, element je aksijalno pritisnut. (Slika 3.1) (ALENDAR, 2003)



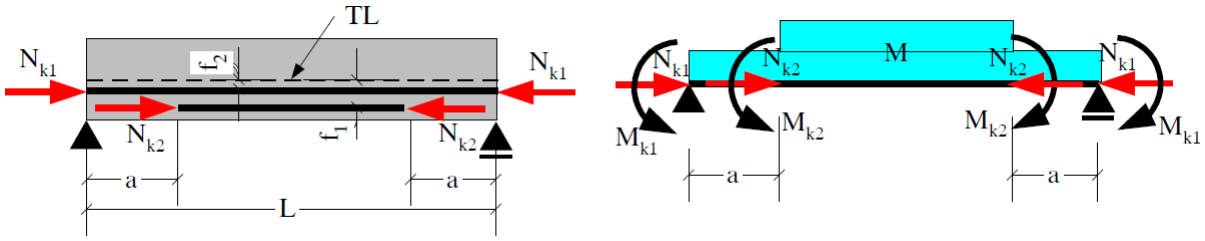
Slika 3.2 Nosač 2

Na mjestu oštrog prijeloma trase užeta, pod skretnim kutom $\theta = \alpha_1 + \alpha_2$, uže zategnuto silom N_k djeluje na konstrukciju koncentriranom skretnom silom $Q_k = 2N_k \sin\theta/2$, koja djeluje u pravcu simetrale skretnog kuta θ. U slučaju plitkih trasa užeta i malih skretnih kuteva, obično se za analizu usvaja da skretna sila djeluje vertikalno, $V_k \cong Q_k$, dok se horizontalna sila zanemaruje. (Slika 3.2) (ALENDAR, 2003)



Slika 3.3 Nosač 3

U slučaju nosača sa krivolinijskom ili poligonalnom težišnom linijom, pravolinijsko uže izaziva momente savijanja uslijed ekscentriciteta užeta u odnosu na os. Utjecaji predhodnog naprezanja mogu se odrediti u statičkom sistemu realnom, zakrivljenom težišnom linijom, ili da se usvoji pravolinijska os nosača i ekvivalentno opterećenje uslijed krivine. (Slika 3.3) (ALENDAR, 2003)



Slika 3.4. Nosač 4

Konstrukcije se obično prednapreže sa više užeta, koji ne moraju svi biti usidreni u istom presjeku nosača. Svako uže na mjestu svojeg sidra unosi koncentriranu silu, bez obzira na njem položaj unutar mase betona konstrukcije. (Slika 3.4) (ALENDAR, 2003)

3.2. Statički neodređene konstrukcije

Koncept ekvivalentnog opterećenja je primarno sredstvo za analizu statički neodređenih konstrukcija, bilo ručnim metodama ili uz primjenu računala. Međutim, projektant nije uvijek u mogućnosti izabrati položaj užeta čije će ekvivalentno opterećenje direktno balansirati valjska opterećenja. Najčešći princip je da užad treba voditi približno toku naprezanja zatezanja uslijed vanjskih opterećenja, kao što vodi i armatura klasično armiranih konstrukcija. U slučaju statički neodređenih linijskih nosača, koji se najčešće primjenjuju, moguće je formulirati skup jednostavnih pravila, pogodnih za svakodnevnu praksu. (DRAGINIĆ, 2009)

Prednosti statički neodređenih konstrukcija u odnosu na statički određene:

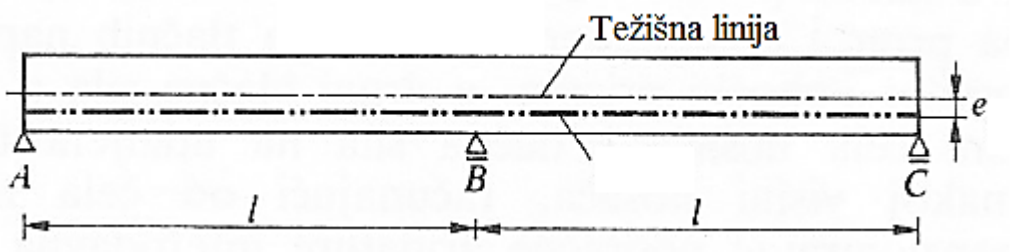
- Manji su momenti savijanja pri jednakom rasponu i pod jednakim opterećenjima;
- Manji su progibi pri jednakoj krutosti;
- Imaju veću sigurnost u graničnom stanju nosivosti. (DRAGINIĆ, 2009)

Najveći nedostaci statički neodređenih konstrukcija:

- Vrlo si osjetljivi na prisilna izobličenja, a osobito na slijeganje ležajeva;
- Učinkovitost prednapinjanja općenito je znatno manja nego kod statički određenih konstrukcija. (DRAGINIĆ, 2009)

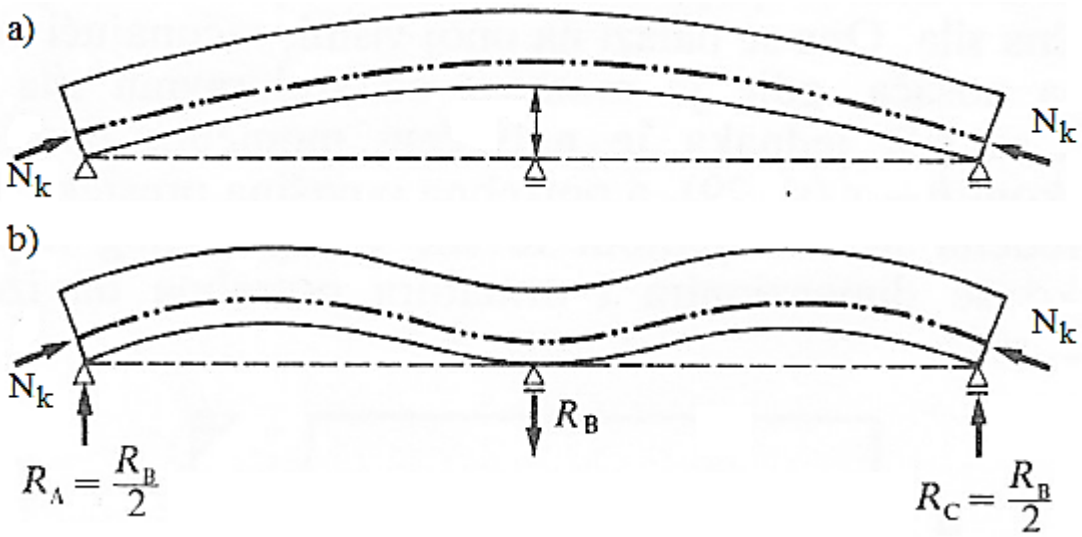
U statički neodređenim prednapregnutim nosačima pojavljuju se dodatne sile. Statički određeni nosači, naime, slobodno se izobličuju pod djelovanjem momenata od sile prednaprezanja, dok statički neodređeni nosači imaju prekobrojne veze koje sprječavaju izobličavanje. Na mjestu tih vez moraju se pojaviti pridržajne sile, reakcije, koje zajedno sa pridržajnim silama u krajnjim ležajevima tvore uravnotežen sustav sila. Djelovanjem tih pridržajnih sila nastaju prekobrojni momenti savijanja raspodijeljeni duž cijelog nosača. (DRAGINIĆ, 2009)

To se najzornije vidi na primjeru grede preko dvaju jednakih polja prednapregnutih ravnim nategom udaljenom za ekscentricitet e od težišne linije nosača.



Slika 3.5 Prednapregnuti nosać preko dva polja

Zbog sile prednaprezanja nastaje moment savijanja nepromjenjim duž dijelog raspona. Kada nebi bilo međupotpore, nisać bi se prognuo preka gore. Budući da međupotpora postoji, zbog čega se nosač ne može uzdići, na tom mjestu djeluje pridržajna sila R_b usmjerene prema dolje. (DRAGINIĆ, 2009)



Slika 3.6 Nosač nakon djelovanja sile prednaprezanja; a) bez međupotpore, b) sa međupotporom

4. Proces prednaprezanja u industrijskom pogonu

4.1. Sile prednaprezanja prilikom prednaprezanja na stazi

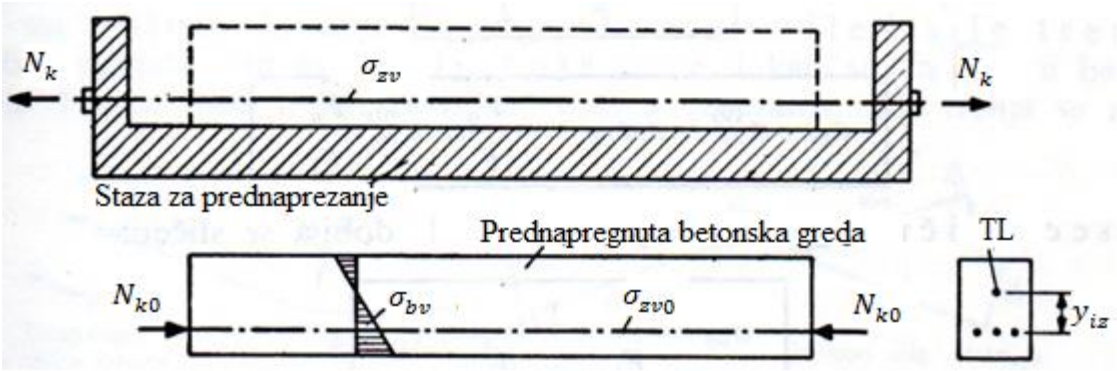
Kad se prednaprezanje vrši na stazi za prednaprezanje treba razlikovati silu N_k kojom se žice za prednaprezanje na stazi zatežu i silu N_{k0} koja poslije oslobađanja žica od sidra djeluje na čvrsti beton. Za naprezanje σ_{zv} izazvano u žicama za prednaprezanje silom prednaprezanja N_k dozvoljavaju se veća naprezanja, i to:

$$\sigma_{zv} = \frac{N_k}{F_z} \leq 0{,}8\beta_{0,2}$$

Kad se sila N_k, nakon što beton očvrsne, oslobodi veze sa sidrom, djelovati će na spojni presjek:

$$F_i = F_b + (n-1)F_z = F_n + nF_z$$

Usljed čega će on pretrpjeti elastičnu deformaciju. Žice za prednaprezanje skratit će se za istu mjeru, što znači da će naprezanje u njima pasti. Sila prednaprezanja N_{k0} koja stvarno djeluje bit će manja od sile prednaprezanja na stazi N_k.



Slika 4.1. Sila prednaprezanja N_k, te sila N_{k0} nakon oslobađanja žica

Za pravi, centrično prednapregnuti štap sila prednaprezanja N_k može se odrediti na sljedeći način:

Skraćenje ε_{bv} betona jednako je po završetku premještanja sile razlici izduženja čelika za prednaprezanje uslijed N_k, dakle $\varepsilon_{zv}^{(0)}$, i izduženja uslijed preostale sile N_{k0}, dakle ε_{zv}:

$$\varepsilon_{bv} = \varepsilon_{zv}^{(0)} - \varepsilon_{zv}$$

Potrebna veza između ε_{bv} i N_{k0} dobiva se integracijom skraćenja $\sigma_{bv0} = \varepsilon_{bv} \cdot E_b$ preko neto površine betonskog poprečnog presjeka:

$$\varepsilon_{bv} = \frac{\sigma_{bv0}}{E_b} = \frac{N_{k0}}{F_n \cdot E_b}$$

Za izduženje u stazi vrijedilo je:

$$\varepsilon_{zv}^{(0)} = \frac{N_k}{F_z \cdot E_z}$$

Pa je preostalo izduženje kad u čeliku vlada sila V_o:

$$\varepsilon_{zv} = \frac{N_{k0}}{F_z \cdot E_z}$$

Zamjenom dobivamo:

$$\frac{N_{k0}}{F_n \cdot E_b} = \frac{N_k}{F_z \cdot E_z} - \frac{N_{k0}}{F_z \cdot E_z}$$

Odakle se nakon sređivanja i stavljajući $n = \frac{E_z}{E_b}$ i $F_i = F_n + nF_z$ dobiva:

$$N_{k0} = N_k \frac{F_n}{F_n + n \cdot F_z} = N_k \frac{F_n}{F_i}$$

Odavde je sad lako dobiti naprezanja poslije premještanja sile, pa se na ponovnom uvođenju može napisati:

$$\sigma_{zv0} = \frac{N_{k0}}{F_n} = \frac{N_k}{F_i}$$

$$\sigma_{zv0} = \sigma_{zv} + n\,\sigma_{bv0} = -\frac{N_{k0}}{F_z} = \sigma_{zv}\frac{F_n}{F_i}$$

Za ekscentrično postavljeni kabel dobiva se slično:

$$\sigma_{bv0} = \frac{N_{k0}}{F_i} + \frac{y_{iz}N_k}{J_i}\,y_i$$

$$\sigma_{zv0} = -\frac{N_k}{F_z} + n \cdot \sigma_{bv0}$$

$$N_{k0} = -\sigma_{zv0}\,F_z$$

Ako su poprečni presjek i N_{k0} dati, onda se prvobitna sila prednaprezanja N_k u stazi dobiva za centrično prednaprezanje:

$$N_k = N_{k0} \cdot \frac{F_i}{F_n}$$

Za ekscentrični položaj kabla, uz uvođenje izraza $\mu_z = \frac{F_z}{F_i}$, daje:

$$N_k = N_{k0} \frac{J_i}{(1 - n\,\mu_z)\,J_i - nF_z \cdot y_{iz}^2}$$

$$N_{k0} = N_k \left[1 - n\,\mu_z - \frac{nF_z \cdot y_{iz}^2}{J_i}\right]$$

Ova naprezanja ekscentrično prednapregnute grede odgovaraju predpostavci da se betonska staza, kao da je bez težine, može savijati kako to zahtjeva ekscentrična sila. (LEONHART, 1962.)



Slika 4.2 Betoniranje prednapete grede

5. Rezultati prednaprezanja

U sljedećim primjerima prikazani su odnosi između sila kojom su zategnuta užad za prednaprezanje i izduženja koja su nastala zbog tih sila. Podaci su prikupljeni iz dnevnika prednaprezanja koji su upisani za vrijeme obavljanja stručne prakse. Nosači su prednapregnuti i betonirani na stazi za prednaprezanje koja se nalazi u industrijskom pogonu tvrtke „Zagorje – Tehnobeton“.

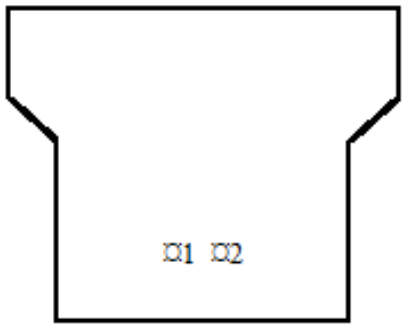
Svaki nosač je prednapregnuti sa najmanje dva čelična užeta promjera 12,5 mm ili 15,2 mm. Svaka užad je snop od 7 žica promjera 4,15 mm ili 5,00 mm. Užad su najprije zategnuta silom koja izaziva naprezanje od 5 N/mm^2, a zatim silom koja je propisana u projektu. U pojedinim nosačima razlikuju se sile u užetima kojim su prednapregnuti. Svako izduženje izmjereno je i zapisano u dnevnik prednaprezanja na zatezanju od 5 N/mm^2, te nakon zatezanja propisanom silom.

Izrađene su tablice u koje su upisane sile kojom je uže bilo zategnuto, te izduženje koje je nastalo. Nakon toga, grafički je prikazani odnos sile prednaprezanja u njutnima i izduženja u centimetrima. Prvo su obrađeni svaki od 18 primjera prednaprezanja zasebno, a zatim su iz svakog primjera izvučene srednje vrijednost i uspoređene su. U svakom postupku prednaprezanja, na jednoj stazi za prednaprezanje izrađen je jedan ili više nosača, te se izmjereno izduženje odnosi na ukupnu duljinu staze. Svaki primjer sadrži osnovne podatke o prednapregnutim elementima, dužini staze te rasporedu užeta.

Primjer 1.

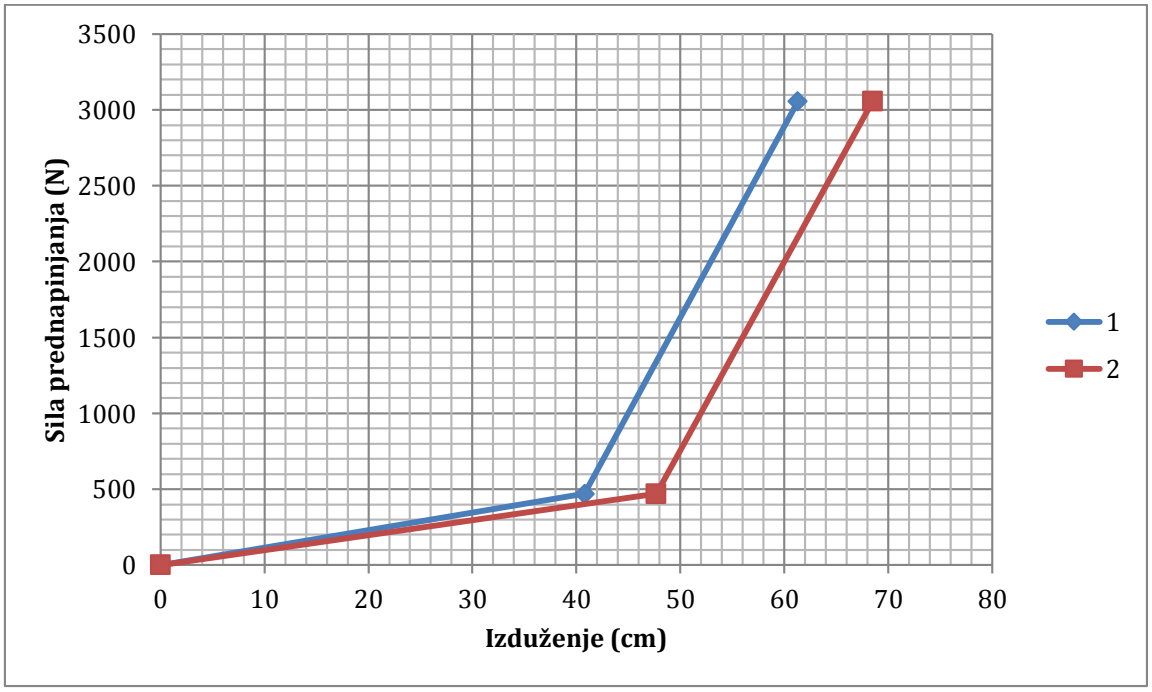
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 12,21 m**	
DUŽINA STAZE:	**39,00 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-2.**	**7Φ4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

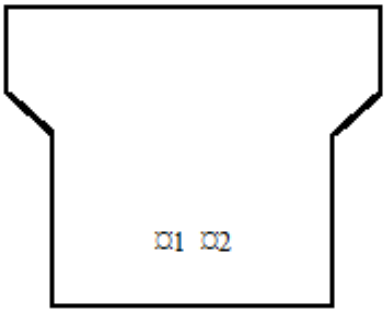
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	470 N	40,80 cm	3055 N	61,30 cm
2	470 N	47,70 cm	3055 N	68,50 cm



Primjer 2.

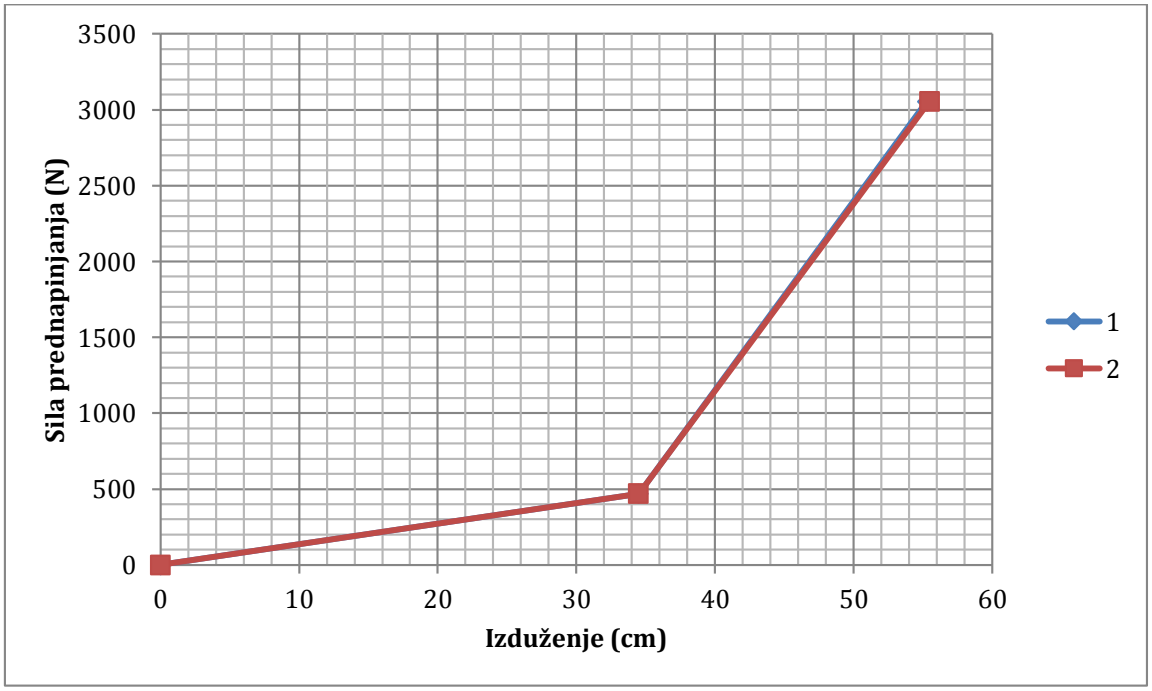
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 13,57 m**	
DUŽINA STAZE:	**39,00 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-2.**	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

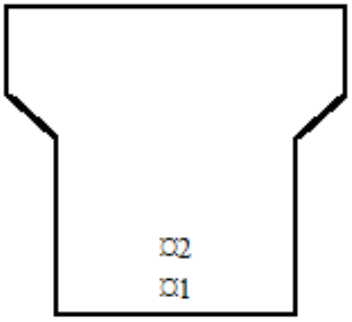
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	470 N	34,50 cm	3055 N	55,30 cm
2	470 N	34,50 cm	3055 N	55,50 cm



Primjer 3.

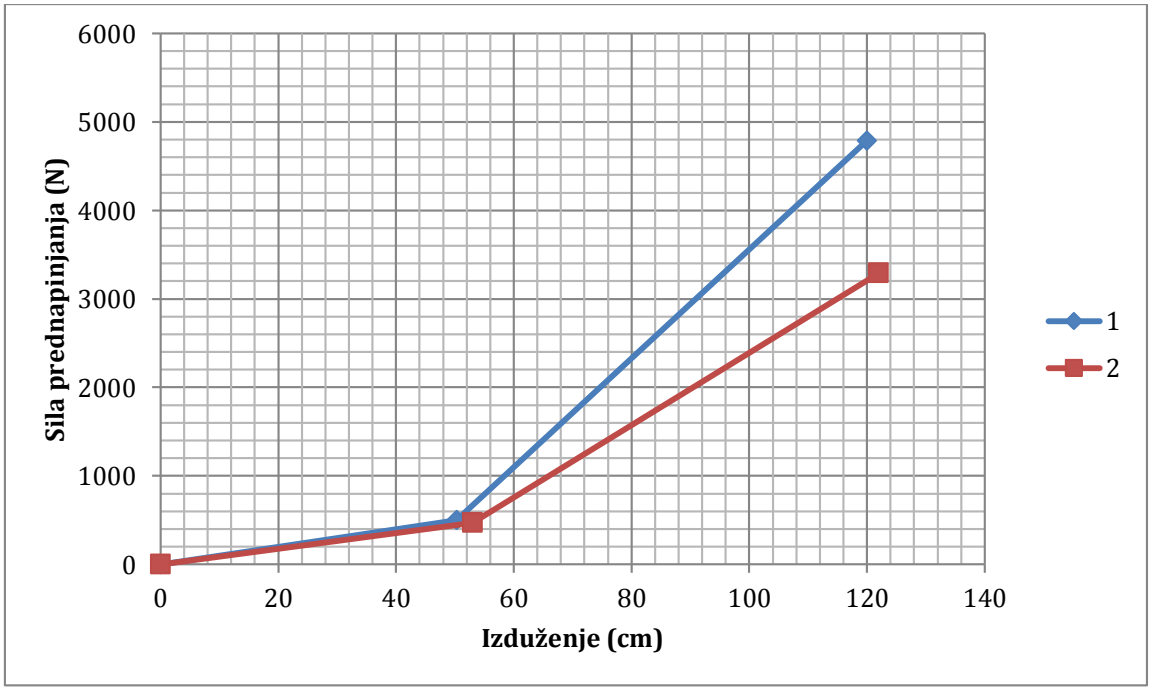
ELEMENTI:	**3 nosača duljine 10,13 m**	
DUŽINA STAZE:	**117,00 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.**	**7 Φ 5,00**
	2.	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

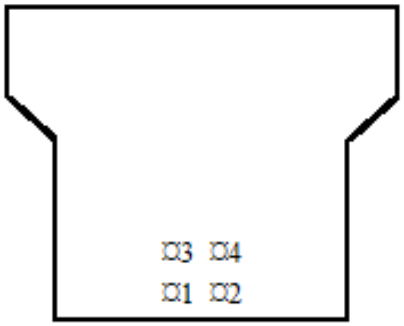
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	50,30 cm	4788 N	120,00 cm
2	470 N	53,00 cm	3290 N	122,00 cm



Primjer 4.

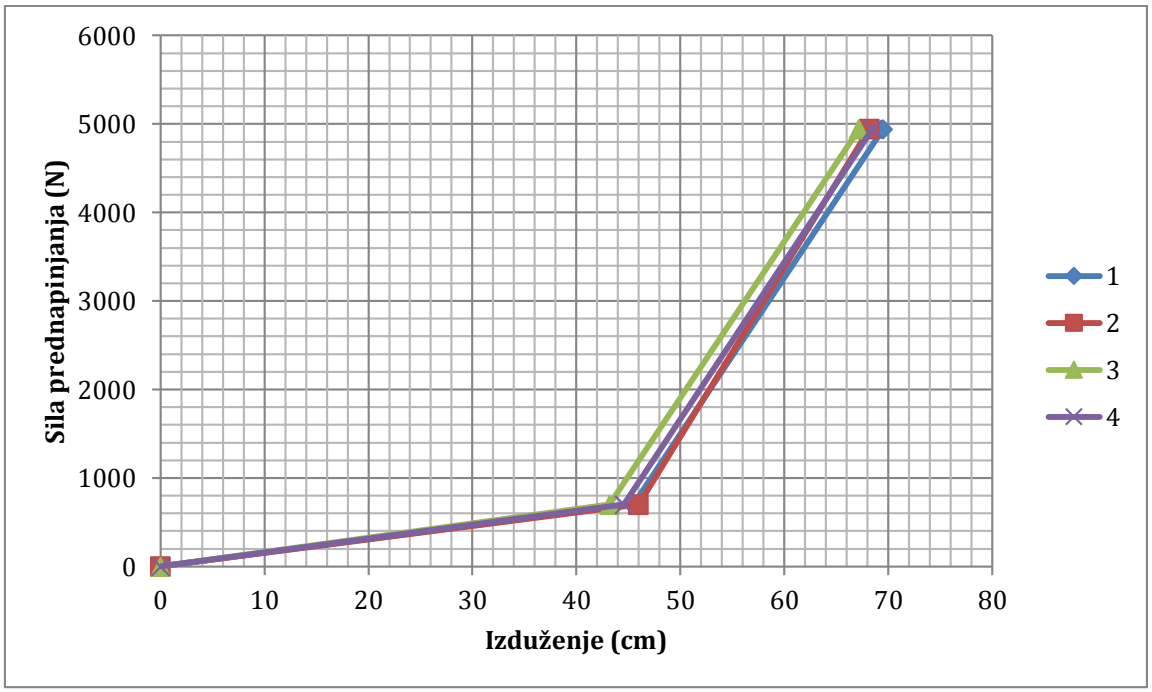
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 12,16 m**	
DUŽINA STAZE:	**39,00 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-4.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

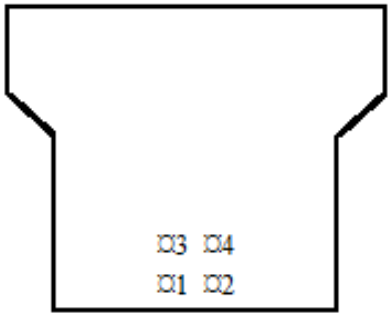
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	45,50 cm	4942 N	69,50 cm
2	700 N	46,00 cm	4942 N	68,20 cm
3	700 N	43,20 cm	4942 N	67,20 cm
4	700 N	44,60 cm	4942 N	68,50 cm



Primjer 5.

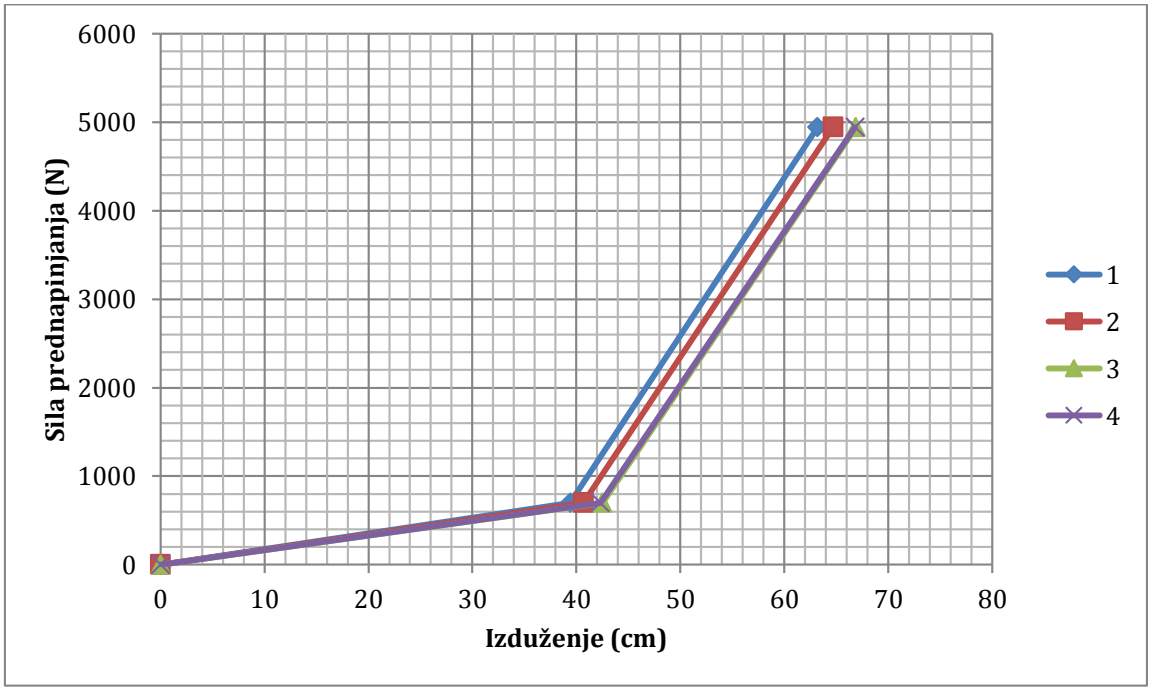
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 12,16 m**	
DUŽINA STAZE:	**39,00 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-4.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

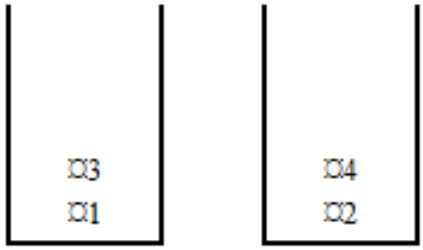
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	39,40 cm	4942 N	63,20 cm
2	700 N	40,70 cm	4942 N	64,70 cm
3	700 N	42,50 cm	4942 N	66,90 cm
4	700 N	42,30 cm	4942 N	66,80 cm



Primjer 6.

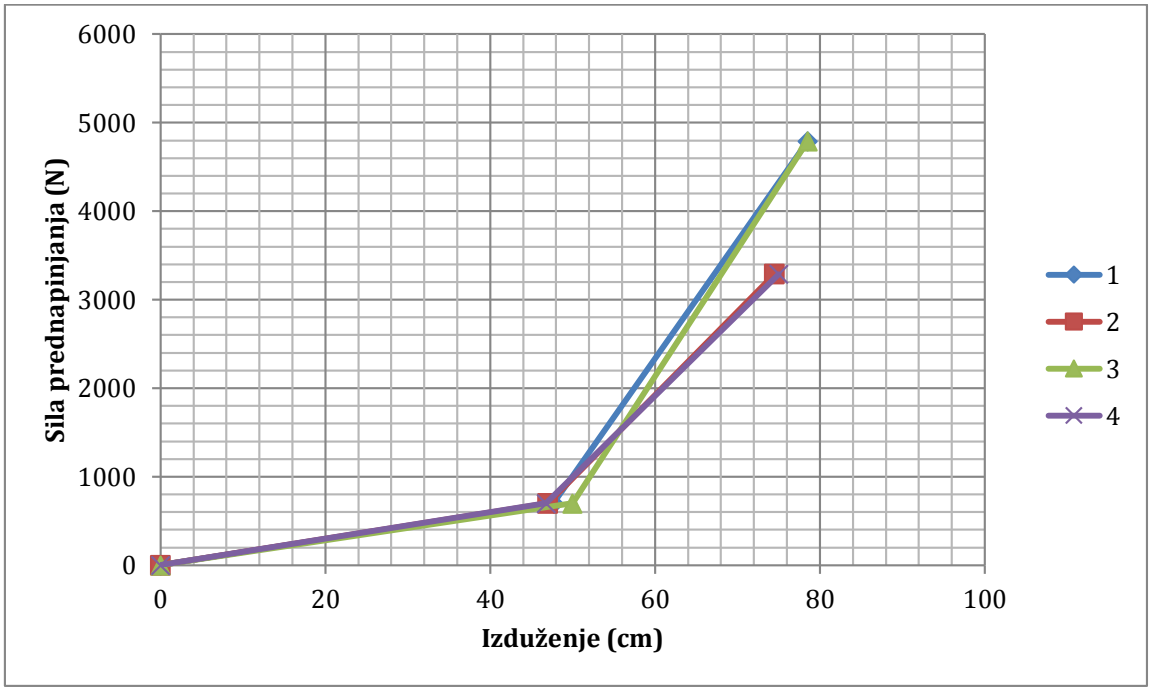
ELEMENTI:	**4 nosača duljine 9,97 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,80 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-2.**	**7 Φ 5,00**
	3.-4.	**7*4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	47,70 cm	4788 N	78,50 cm
2	700 N	47,00 cm	4788 N	74,50 cm
3	470 N	50,00 cm	3290 N	78,80 cm
4	470 N	46,80 cm	3290 N	75,00 cm



Primjer 7.

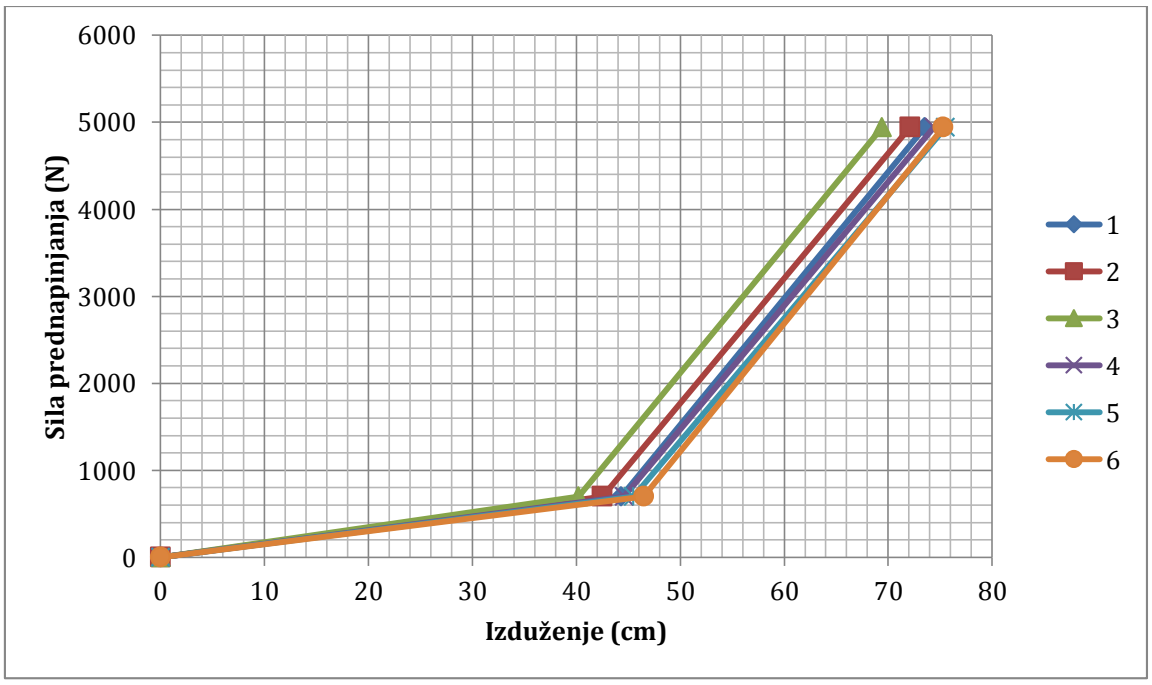
ELEMENTI:	**3 nosača duljine 11,97 m, 3 nosača duljine 11,54 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,30**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-6.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	44,30 cm	4942 N	73,50 cm
2	700 N	42,50 cm	4942 N	72,10 cm
3	700 N	40,20 cm	4942 N	69,40 cm
4	700 N	44,60 cm	4942 N	74,40 cm
5	700 N	45,50 cm	4942 N	75,50 cm
6	700 N	46,50 cm	4942 N	75,30 cm



Primjer 8.

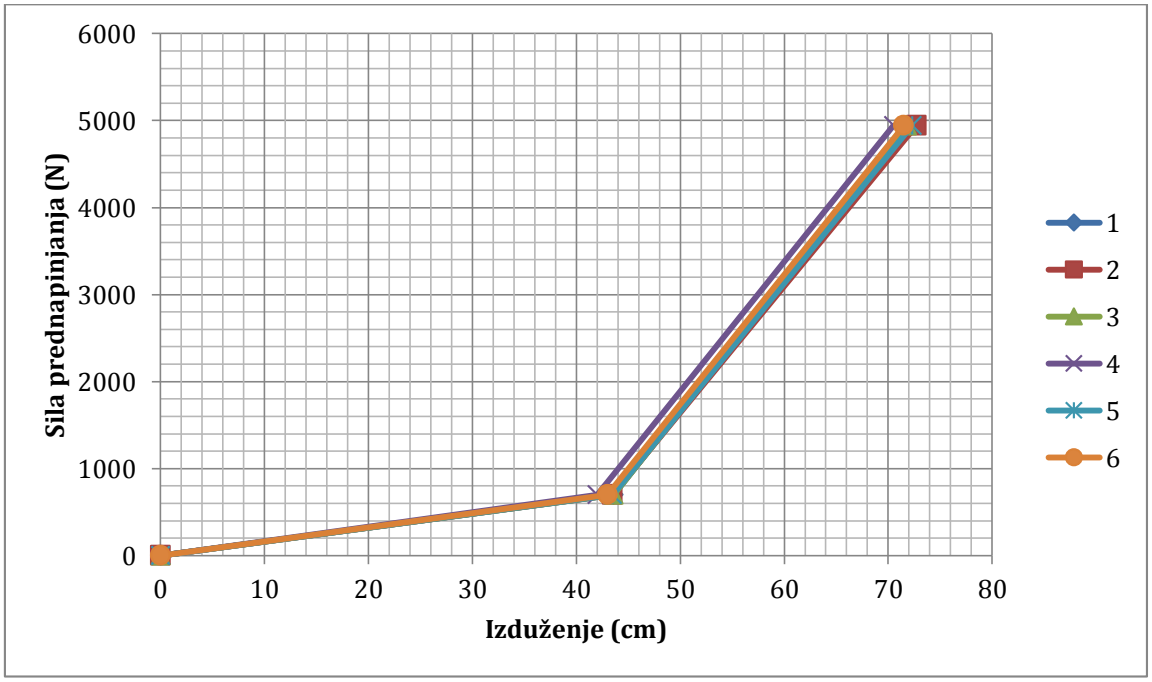
ELEMENTI:	**3 nosača duljine 11,97 m, 3 nosača duljine 12,33 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,30**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-6.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

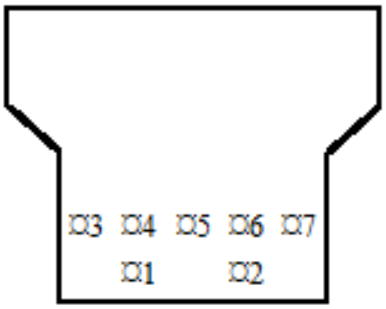
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	43,60 cm	4942 N	71,70 cm
2	700 N	43,50 cm	4942 N	72,70 cm
3	700 N	43,60 cm	4942 N	71,80 cm
4	700 N	42,00 cm	4942 N	70,50 cm
5	700 N	43,50 cm	4942 N	72,30 cm
6	700 N	43,00 cm	4942 N	71,50 cm



Primjer 9.

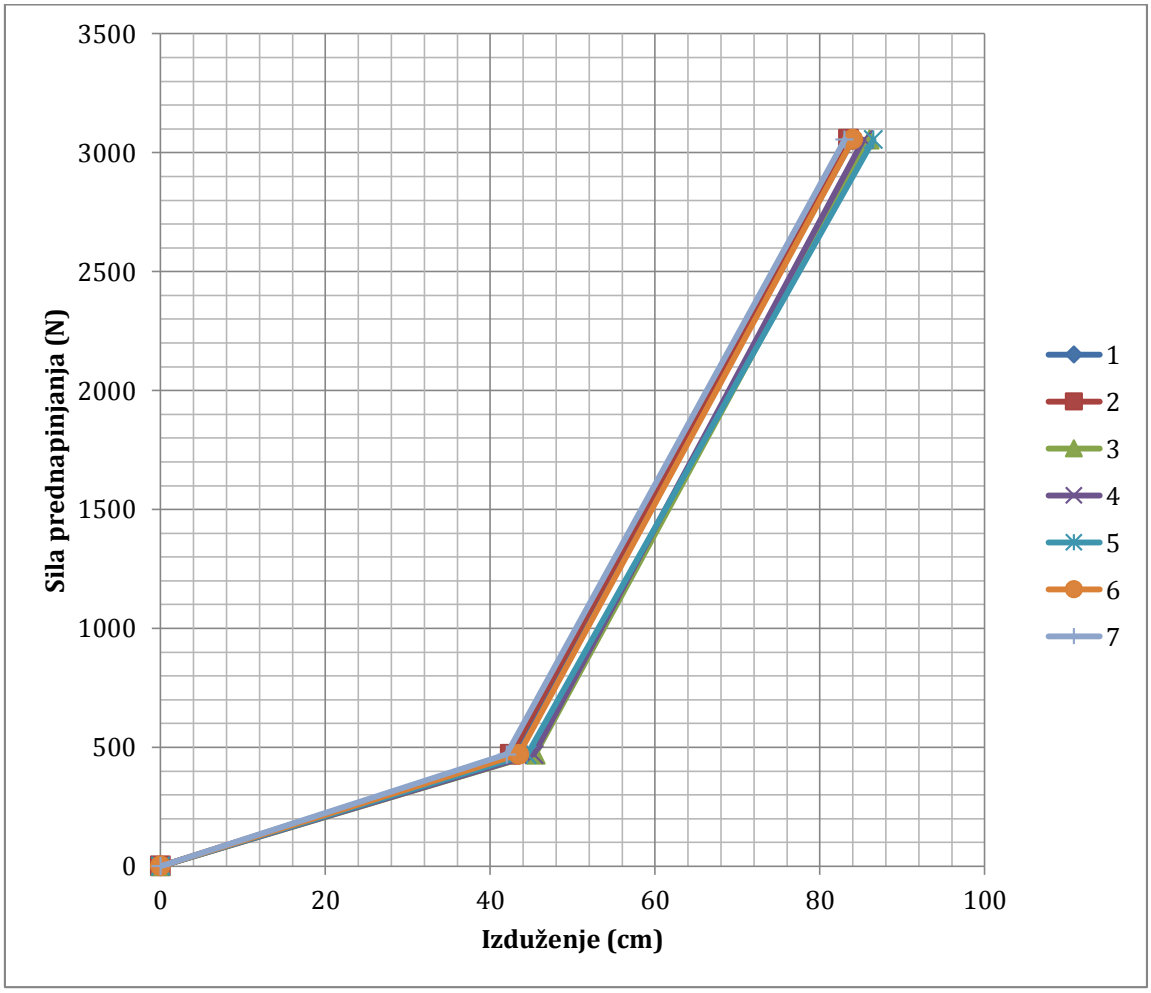
ELEMENTI:	**6 nosača duljine 9,98 m**	
DUŽINA STAZE:	**75,60 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-7.**	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

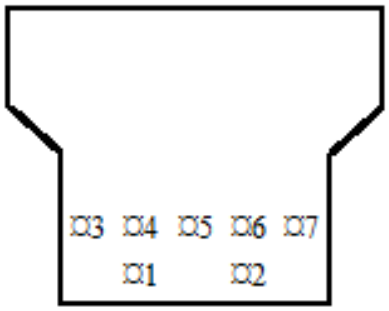
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	470 N	43,00 cm	3055 N	84,00 cm
2	470 N	42,50 cm	3055 N	83,50 cm
3	470 N	45,50 cm	3055 N	86,00 cm
4	470 N	45,30 cm	3055 N	85,30 cm
5	470 N	44,50 cm	3055 N	84,50 cm
6	470 N	43,50 cm	3055 N	84,00 cm
7	470 N	42,00 cm	3055 N	83,00 cm


3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7

Primjer 10.

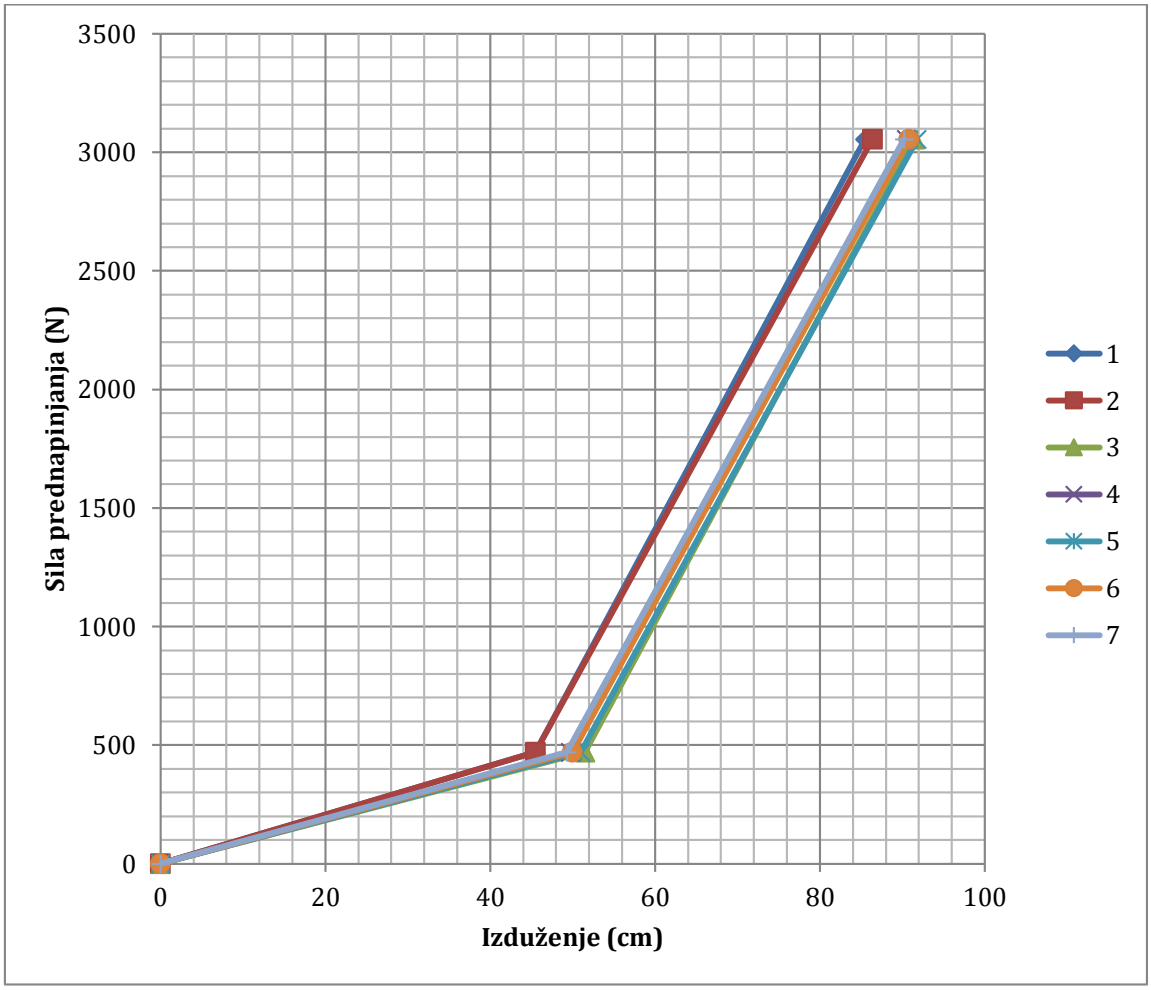
ELEMENTI:	**6 nosača duljine 9,98 m**	
DUŽINA STAZE:	**75,60 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-7.**	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

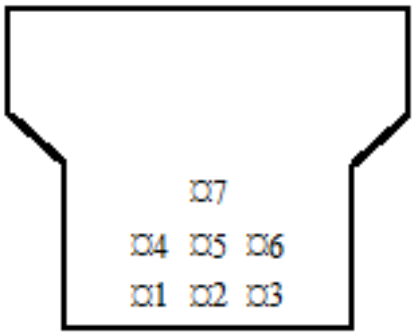
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	470 N	45,50 cm	3055 N	85,50 cm
2	470 N	45,50 cm	3055 N	76,40 cm
3	470 N	51,50 cm	3055 N	91,50 cm
4	470 N	49,70 cm	3055 N	90,50 cm
5	470 N	51,00 cm	3055 N	91,80 cm
6	470 N	50,00 cm	3055 N	90,80 cm
7	470 N	49,30 cm	3055 N	90,20 cm


3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7

Primjer 11.

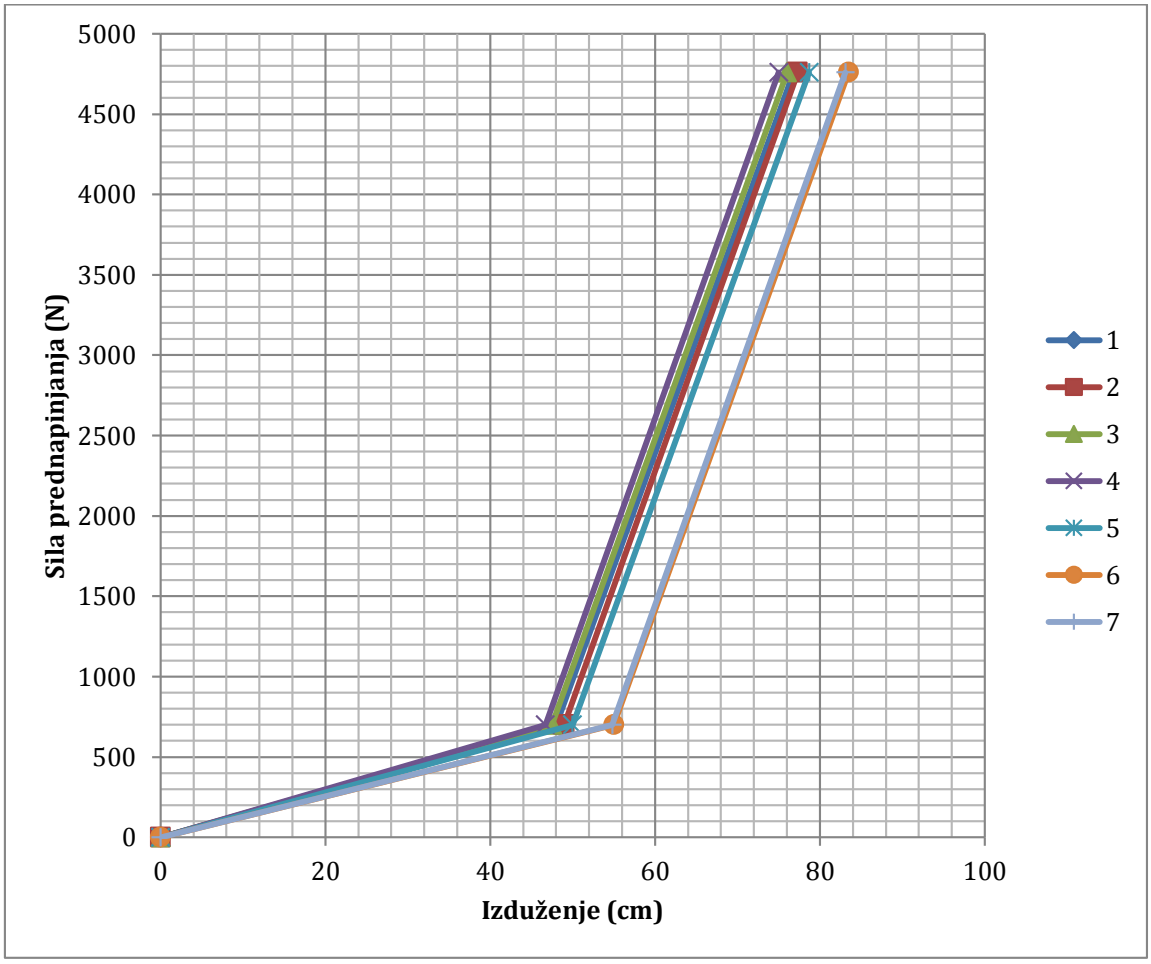
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 15,23 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,30 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-7.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

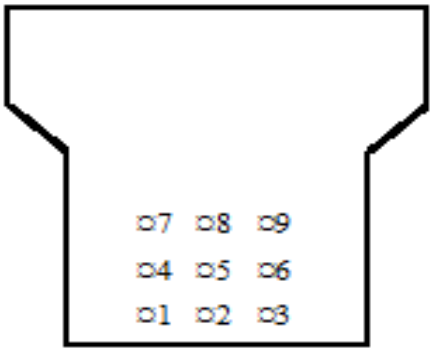
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	48,00 cm	4760 N	76,80 cm
2	700 N	49,00 cm	4760 N	77,30 cm
3	700 N	47,50 cm	4760 N	76,00 cm
4	700 N	46,70 cm	4760 N	75,00 cm
5	700 N	50,00 cm	4760 N	78,70 cm
6	700 N	55,00 cm	4760 N	83,50 cm
7	700 N	54,80 cm	4760 N	83,10 cm


5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7

Primjer 12.

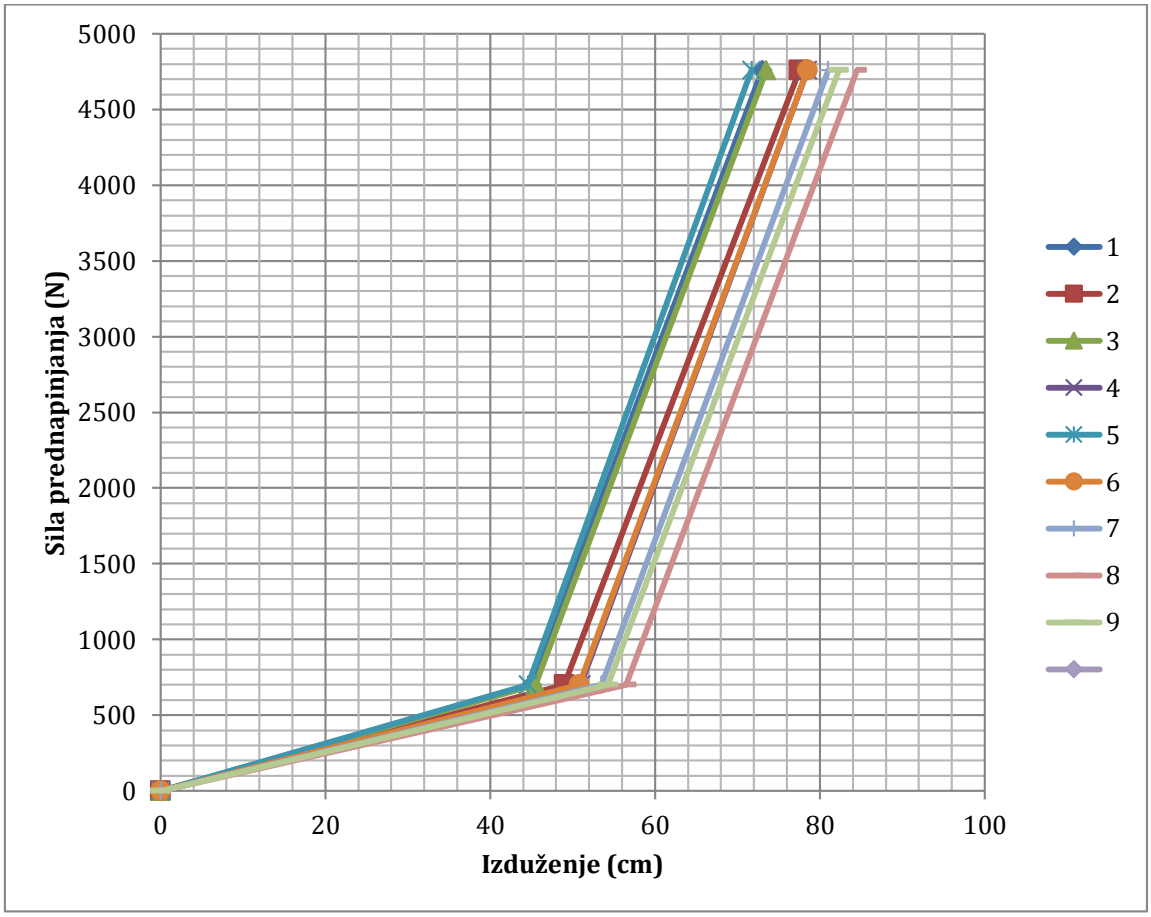
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 15,23 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,30 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-9.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

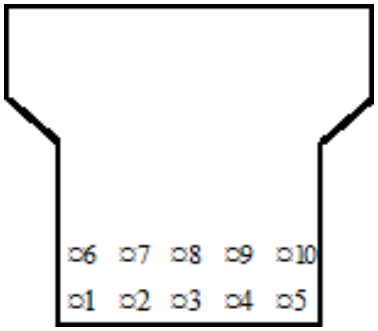
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	45,00 cm	4760 N	73,00 cm
2	700 N	49,00 cm	4760 N	77,50 cm
3	700 N	45,50 cm	4760 N	73,50 cm
4	700 N	51,00 cm	4760 N	78,50 cm
5	700 N	44,60 cm	4760 N	73,70 cm
6	700 N	50,80 cm	4760 N	78,50 cm
7	700 N	53,50 cm	4760 N	81,00 cm
8	700 N	56,50 cm	4760 N	84,50 cm
9	700 N	54,30 cm	4760 N	82,30 cm


5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9

Primjer 13.

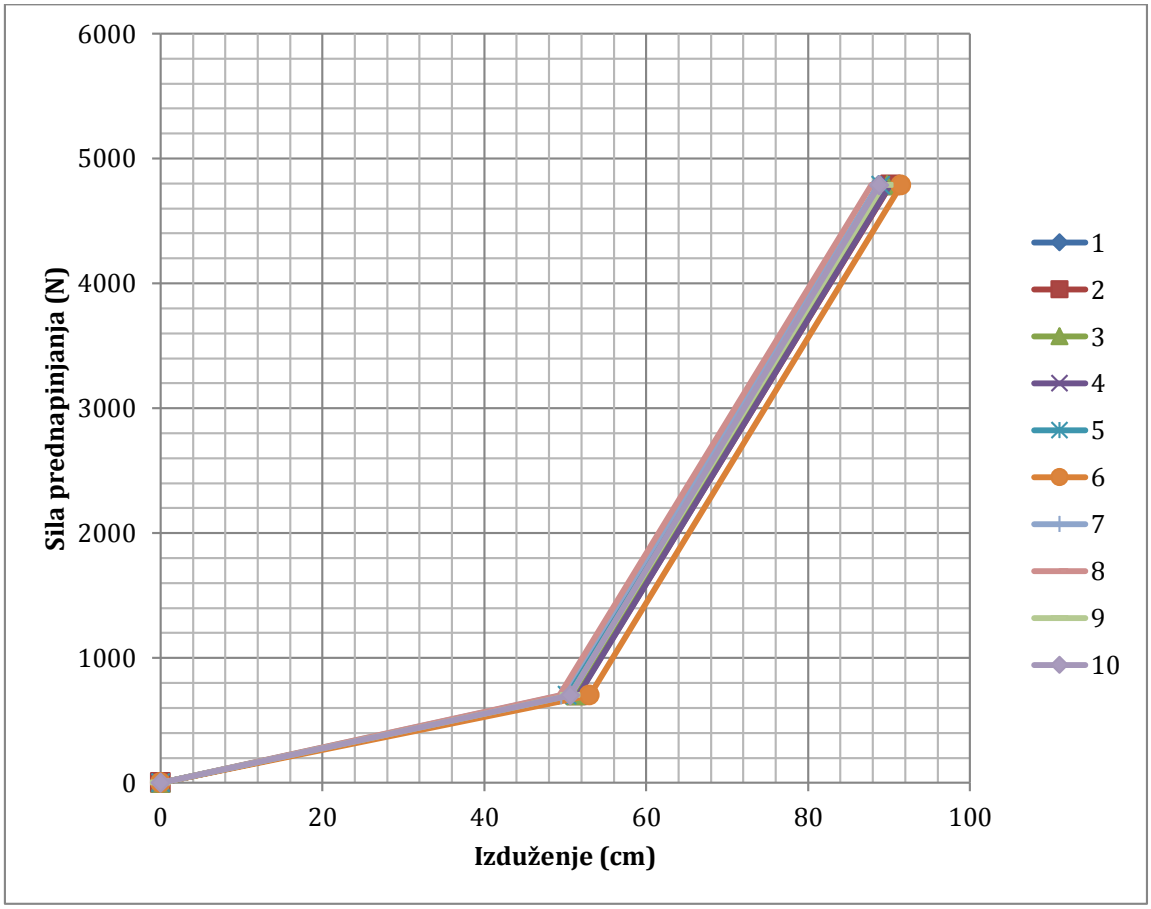
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 19,14 m**	
DUŽINA STAZE:	**64,25 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-10.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

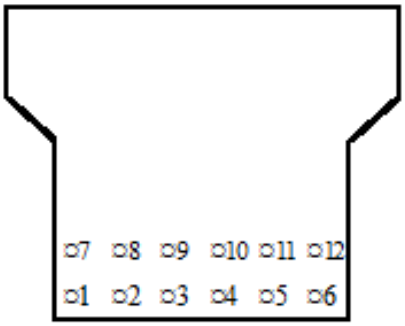
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	50,20 cm	4788 N	88,70 cm
2	700 N	51,50 cm	4788 N	90,20 cm
3	700 N	51,30 cm	4788 N	89,80 cm
4	700 N	51,60 cm	4788 N	90,10 cm
5	700 N	50,20 cm	4788 N	89,00 cm
6	700 N	53,00 cm	4788 N	91,50 cm
7	700 N	49,50 cm	4788 N	88,70 cm
8	700 N	49,30 cm	4788 N	87,80 cm
9	700 N	50,60 cm	4788 N	89,30 cm
10	700 N	50,60 cm	4788 N	88,80 cm


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Primjer 14.

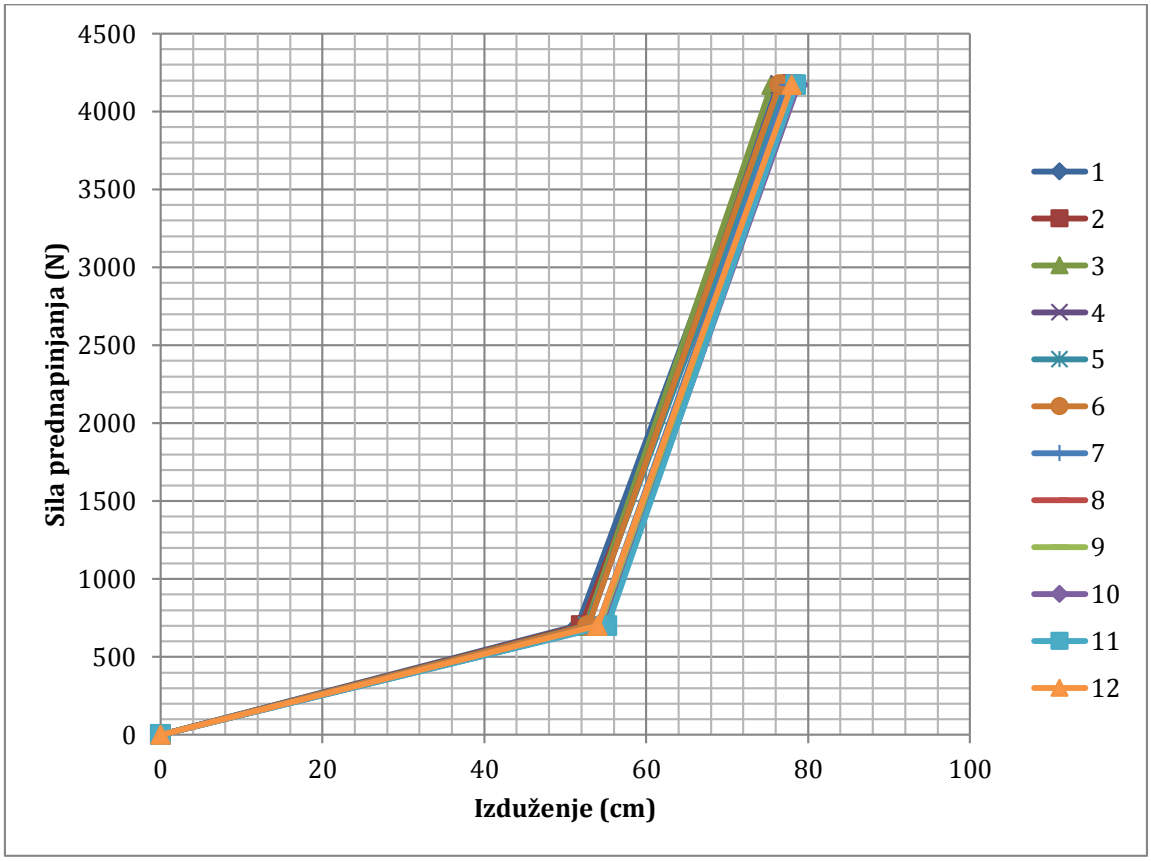
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 15,36m**	
DUŽINA STAZE:	**47,80 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-12.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

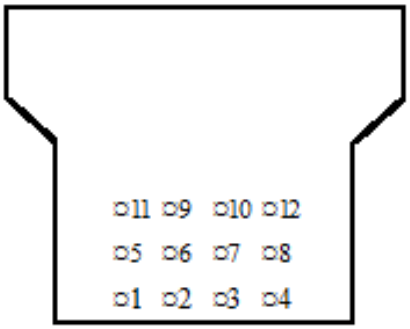
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	51,50 cm	4172 N	76,30 cm
2	700 N	52,00 cm	4172 N	78,00 cm
3	700 N	52,60 cm	4172 N	75,50 cm
4	700 N	52,80 cm	4172 N	76,50 cm
5	700 N	52,70 cm	4172 N	77,30 cm
6	700 N	52,80 cm	4172 N	76,50 cm
7	700 N	54,00 cm	4172 N	77,60 cm
8	700 N	54,80 cm	4172 N	78,50 cm
9	700 N	54,80 cm	4172 N	78,60 cm
10	700 N	55,00 cm	4172 N	78,80 cm
11	700 N	55,20 cm	4172 N	78,50 cm
12	700 N	54,00 cm	4172 N	78,00 cm


4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Primjer 15.

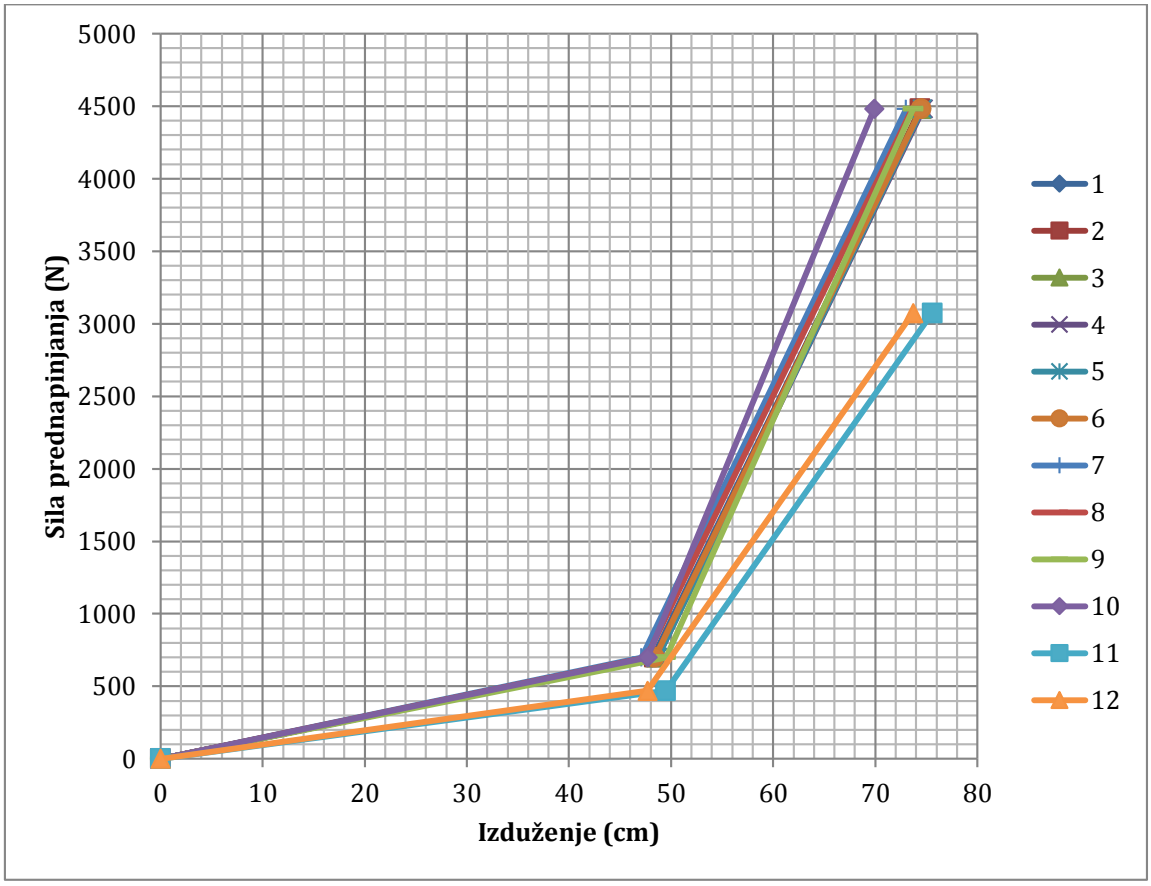
ELEMENTI:	**Nosač duljine 17,38 m**	
DUŽINA STAZE:	**47,30 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-10.**	**7 Φ 5,00**
	11.-12.	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

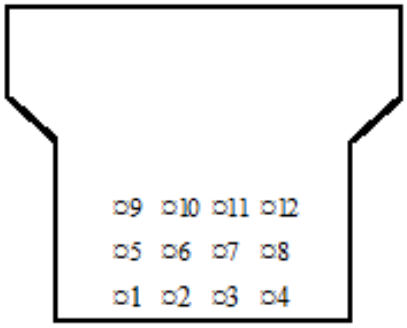
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	48,20 cm	4480 N	74,50 cm
2	700 N	48,40 cm	4480 N	74,40 cm
3	700 N	48,50 cm	4480 N	74,50 cm
4	700 N	48,70 cm	4480 N	74,70 cm
5	700 N	48,70 cm	4480 N	74,60 cm
6	700 N	48,40 cm	4480 N	74,50 cm
7	700 N	47,10 cm	4480 N	73,00 cm
8	700 N	47,60 cm	4480 N	73,60 cm
9	700 N	49,50 cm	4480 N	73,70 cm
10	700 N	47,70 cm	4480 N	69,09 cm
11	470 N	49,50 cm	3074 N	75,60 cm
12	470 N	47,70 cm	3074 N	73,70 cm


5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Primjer 16.

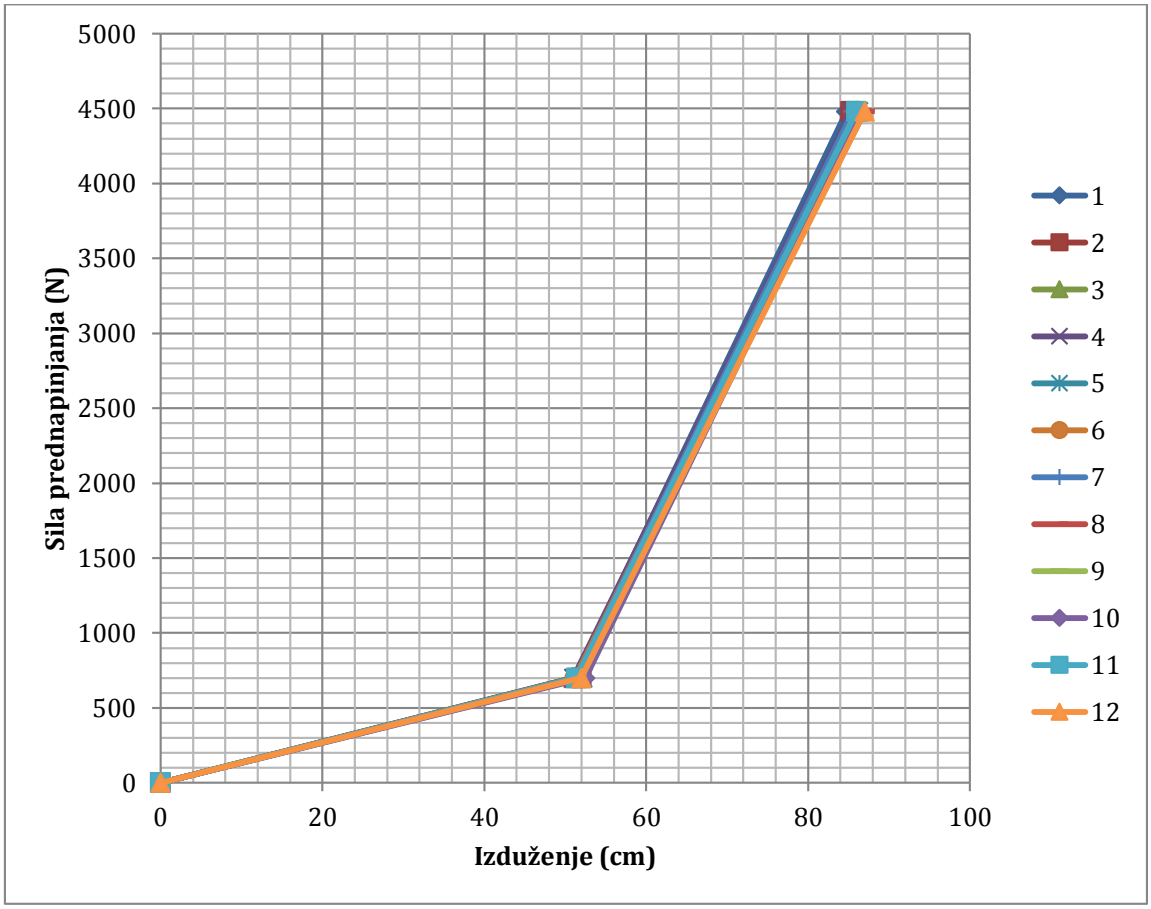
ELEMENTI:	**3 nosača duljine 17,53 m**	
DUŽINA STAZE:	**62,30 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-12.**	**7 Φ 5,0**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

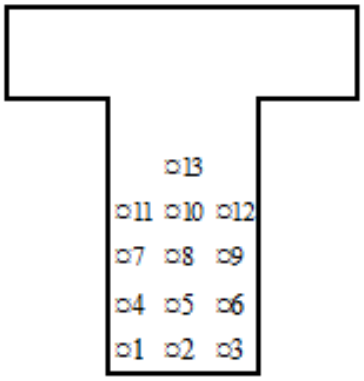
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	51,20 cm	4480 N	84,70 cm
2	700 N	52,00 cm	4480 N	86,30 cm
3	700 N	51,00 cm	4480 N	86,20 cm
4	700 N	51,00 cm	4480 N	85,30 cm
5	700 N	52,20 cm	4480 N	86,30 cm
6	700 N	51,20 cm	4480 N	86,00 cm
7	700 N	51,40 cm	4480 N	85,50 cm
8	700 N	51,50 cm	4480 N	87,00 cm
9	700 N	51,50 cm	4480 N	86,00 cm
10	700 N	52,50 cm	4480 N	86,50 cm
11	700 N	51,40 cm	4480 N	86,00 cm
12	700 N	52,00 cm	4480 N	87,00 cm


5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Sila prednapinjanja (N)
0
20
40
60
80
100
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Primjer 17.

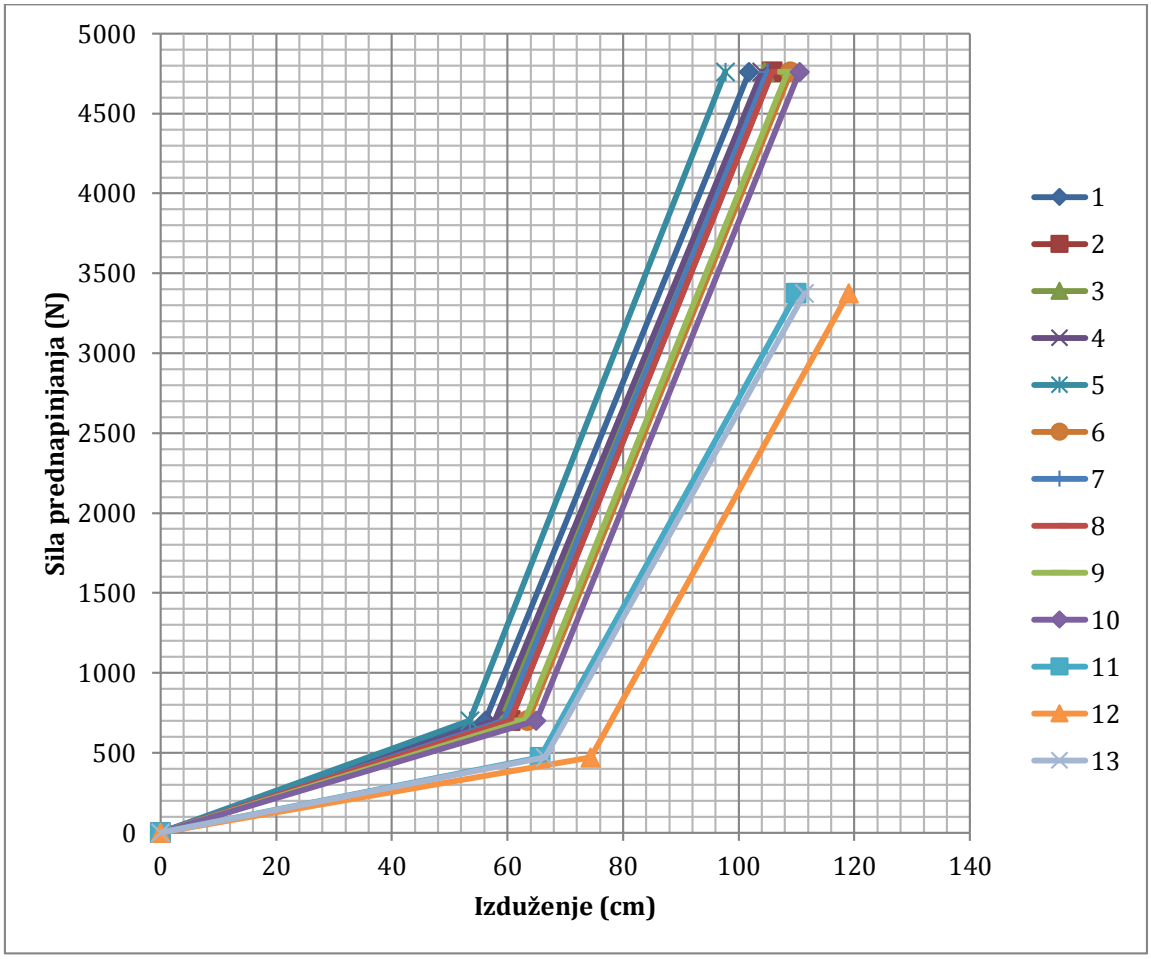
ELEMENTI	**2 nosača duljine 27,72 m**	
DUŽINA STAZE:	**75,60 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-10.**	**7 Φ 5,00**
	11.-13.	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



MJERENA IZDUŽENJA:

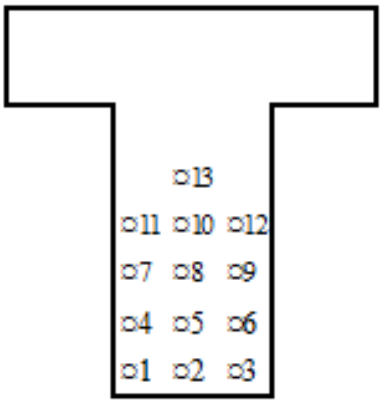
Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	56,20 cm	4760 N	101,80 cm
2	700 N	60,50 cm	4760 N	105,80 cm
3	700 N	58,50 cm	4760 N	104,50 cm
4	700 N	57,80 cm	4760 N	104,00 cm
5	700 N	53,50 cm	4760 N	97,70 cm
6	700 N	63,50 cm	4760 N	109,00 cm
7	700 N	59,50 cm	4760 N	105,00 cm
8	700 N	60,50 cm	4760 N	105,80 cm
9	700 N	63,00 cm	4760 N	108,50 cm
10	700 N	65,00 cm	4760 N	110,50 cm
11	470 N	65,70 cm	3384 N	110,00 cm
12	470 N	74,40 cm	3384 N	119,00 cm
13	470 N	66,50 cm	3384 N	111,40 cm


Sila prednapinjanja (N)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
20
40
60
80
100
120
140
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

Primjer 18.

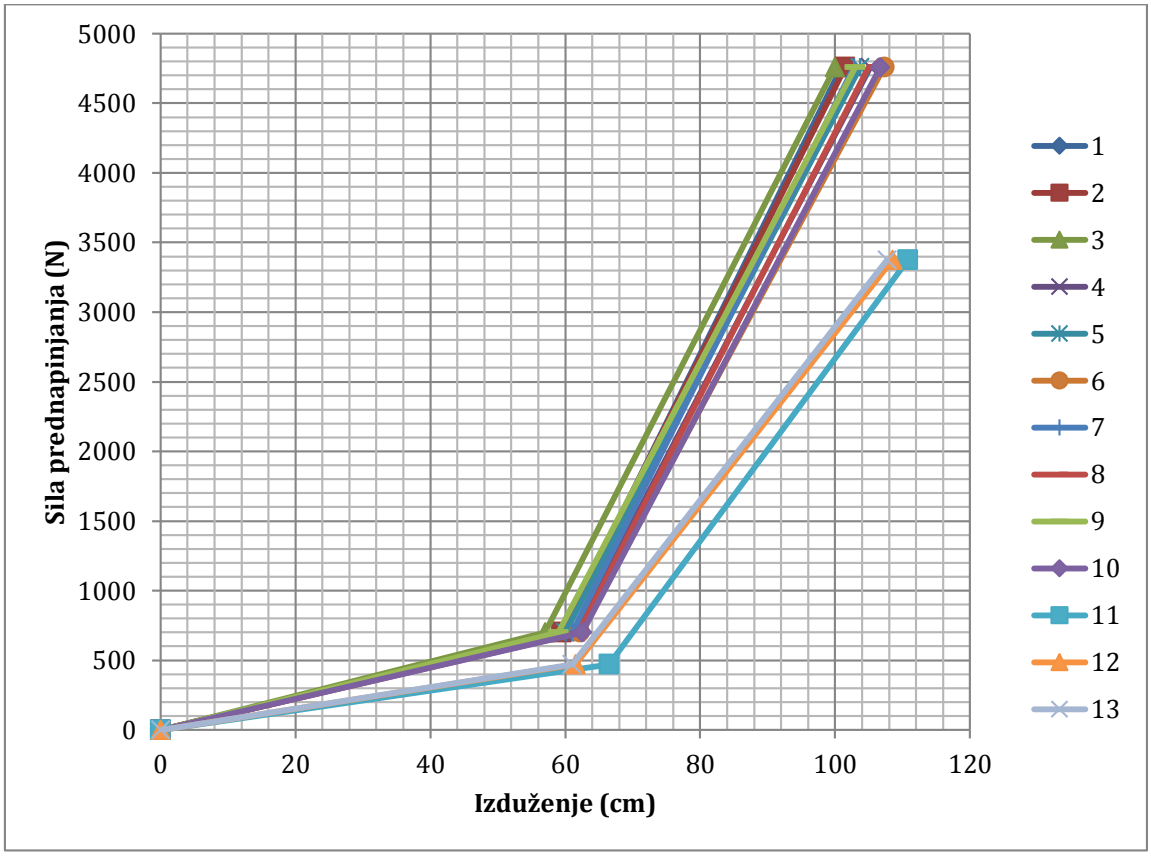
ELEMENTI:	**2 nosača duljine 27,72 m**	
DUŽINA STAZE:	**75,60 m**	
REDNI BROJ UŽETA:	**1.-10.**	**7 Φ 5,00**
	11.-13.	**7 Φ 4,15**

SKICA RASPOREDA UŽADI:



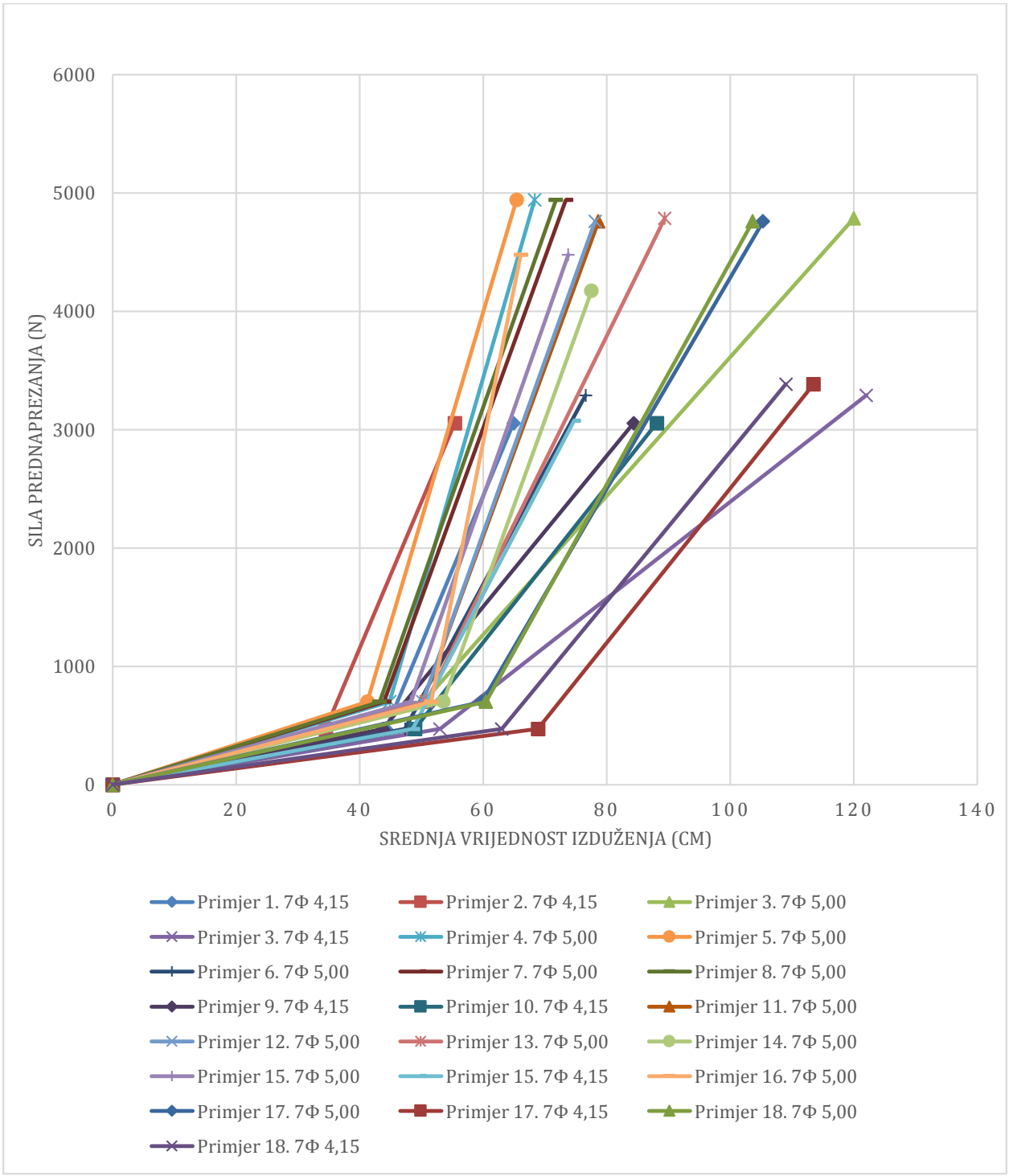
MJERENA IZDUŽENJA:

Broj užeta	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
1	700 N	59,70 cm	4760 N	101,00 cm
2	700 N	59,50 cm	4760 N	101,50 cm
3	700 N	57,00 cm	4760 N	100,00 cm
4	700 N	61,50 cm	4760 N	105,20 cm
5	700 N	60,00 cm	4760 N	103,70 cm
6	700 N	62,20 cm	4760 N	107,30 cm
7	700 N	61,00 cm	4760 N	102,80 cm
8	700 N	62,00 cm	4760 N	105,00 cm
9	700 N	59,00 cm	4760 N	103,00 cm
10	700 N	62,50 cm	4760 N	106,70 cm
11	470 N	66,50 cm	3384 N	110,80 cm
12	470 N	61,50 cm	3384 N	108,50 cm
13	470 N	61,00 cm	3384 N	107,70 cm


Sila prednapinjanja (N)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
20
40
60
80
100
120
Izduženje (cm)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

Srednje vrijednosti izduženja za svaki od navedenih primjera

	Dužina staze	Sila (F1)	Izduženje (ε1)	Sila (F2)	Izduženje (ε2)
Primjer 1. 7Φ 4,15	39,00 m	470 N	44,25 cm	3055 N	64,90 cm
Primjer 2. 7Φ 4,15	39,00 m	470 N	34,50 cm	3055 N	55,40 cm
Primjer 3. 7Φ 5,00	117,00 m	700 N	50,30 cm	4788 N	120,00 cm
Primjer 3. 7Φ 4,15	117,00 m	470 N	53,00 cm	3290 N	122,00 cm
Primjer 4. 7Φ 5,00	39,00 m	700 N	44,83 cm	4942 N	68,35 cm
Primjer 5. 7Φ 5,00	39,00 m	700 N	41,23 cm	4942 N	65,40 cm
Primjer 6. 7Φ 5,00	47,80 m	700 N	47,35 cm	4788 N	76,56 cm
Primjer 6. 7Φ 4,15	47,80 m	470 N	48,40 cm	3290 N	76,90 cm
Primjer 7. 7Φ 5,00	47,30 m	700 N	43,93 cm	4941 N	73,37 cm
Primjer 8. 7Φ 5,00	47,30 m	700 N	43,20 cm	4942 N	71,75 cm
Primjer 9. 7Φ 4,15	75,60 m	470 N	43,76 cm	3055 N	84,33 cm
Primjer 10. 7Φ 4,15	75,60 m	470 N	48,93 cm	3055 N	88,10 cm
Primjer 11. 7Φ 5,00	47,30 m	700 N	50,14 cm	4760 N	78,63 cm
Primjer 12. 7Φ 5,00	47,30 m	700 N	50,20 cm	4760 N	78,08 cm
Primjer 13. 7Φ 5,00	64,25 m	700 N	50,78 cm	4788 N	89,39 cm
Primjer 14. 7Φ 5,00	47,80 m	700 N	53,52 cm	4172 N	77,51 cm
Primjer 15. 7Φ 5,00	47,30 m	700 N	48,28 cm	4480 N	73,74 cm
Primjer 15. 7Φ 4,15	47,30 m	470 N	48,60 cm	3074 N	74,65 cm
Primjer 16. 7Φ 5,00	62,30 m	700 N	51,58 cm	4480 N	66,07 cm
Primjer 17. 7Φ 5,00	75,60 m	700 N	59,80 cm	4770 N	105,26 cm
Primjer 17. 7Φ 4,15	75,60 m	470 N	68,87 cm	3384 N	113,47 cm
Primjer 18. 7Φ 5,00	75,60 m	700 N	60,44 cm	4770 N	103,62 cm
Primjer 18. 7Φ 4,15	75,60 m	470 N	63,00 cm	3384 N	109,00 cm


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
SILA PREDNAPREZANJA (N)
0
20
40
60
80
100
120
140
SREDNJA VRIJEDNOST IZDUŽENJA (CM)
Primjer 1. 7Φ 4,15
Primjer 2. 7Φ 4,15
Primjer 3. 7Φ 5,00
Primjer 3. 7Φ 4,15
Primjer 4. 7Φ 5,00
Primjer 5. 7Φ 5,00
Primjer 6. 7Φ 5,00
Primjer 7. 7Φ 5,00
Primjer 8. 7Φ 5,00
Primjer 9. 7Φ 4,15
Primjer 10. 7Φ 4,15
Primjer 11. 7Φ 5,00
Primjer 12. 7Φ 5,00
Primjer 13. 7Φ 5,00
Primjer 14. 7Φ 5,00
Primjer 15. 7Φ 5,00
Primjer 15. 7Φ 4,15
Primjer 16. 7Φ 5,00
Primjer 17. 7Φ 5,00
Primjer 17. 7Φ 4,15
Primjer 18. 7Φ 5,00
Primjer 18. 7Φ 4,15

6. Zaključak

U početku upotrebe armiranog betona pojavljivalje su se pukotine koje su se smatrale za nedostatak. Zato se pomišljalo da se zatezanjem armature u betonu izazove naprezanje tlaka. Pri prednapregnutom betonu vlačna naprezanja su potpuno isključena, ili su dopuštena u malim vrijednostima. Prethodno prednapete grede najčešće se koriste za velike raspone kao što su montažne hale, mostovi, te za konstrukcije koje moraju podnesti već opterećenja. Nosivost prednapete grede se povećava u usporedbi s klasičnim armiranim gredama. Najveći nedostaci prednapretih greda su posebna oprema, stručna radna snaga i skuplje gradivo, materijali koji se koriste moraju biti samo visoke čvrstoće. Potreban je veći prostor za izradu prednapregnutih greda zbog dugih staza za prednaprezanje koji mogu biti duži od 100 metara.

Kod zatezanja užeta, potrebno je biti vrlo točan u visinskom položaju kabla, te ako se koristi užad različitog promjera, razlike u izduženju moraju se svesti na minimum. Kod primjera u prethodnom poglavlju vidljivo je da se na stazi istovremeno prednapinje više greda, te su sva užad, bez obzira na promjer užeta i silu kojom su zategnuta, postignula približno jednako izduženje. No također je potrebno osvrnuti se na to da kod nekih nosača, koji su prednapeti sa užadi istog promjera, te zategnuti istom silom, može se primjetiti razlika u izduženju od nekoliko centimetara. U dvanaestom primjeru razlika u izduženju između prvog i osmog užeta je čak 11,50 cm, iako je staza na kojoj su nosači prednapeti duga tek 47,30 m, dok je razliku u izduženju na trećem primjeru 2 cm, a nosači su prednapeti na stazi dugoj 117,00 m. Može se zaključiti da izduženja ovise o više faktora. Ovise o nosaču, prednaprezanju, također i o zatezanju i usidravanju užeta.

Mislim da se izrada prednapetih greda u industrijskom pogonu isplati unatoč tim nedostacima. Masivne građevine i mostovi od prednapetih elemenata su čvršći, sigurniji i estetski ljepši zbog toga jer nije potrebna velika površina presjeka, da bi se osigurala potrebna nosivost. Trebalo bi se ulagati u industrijski pogon koji izrađuje prednapregnute elemente kako bi što više građevina bilo izgrađeno tom metodom.

U Varaždinu, 09. rujna, 2015.

7. Literatura

Knjige se navode:

[1] Prof.dr. Tomičić Ivan; Betonske konstrukcije, 1988.g, Školska knjiga Zagreb
[2] Dr.Inz. Leonhart Fric; Prednapregnuti beton u praksi, 1968., Građevinska knjiga Beograd

Doktorski, magistarski i diplomski radovi:

[3] Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton, vežbe na IX-om semestru odseka za konstrukcije, Građevinski fakultet u Beogradu, 2003.

Internet izvori:

[4] http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/prednapeti-beton/12-staticki-neodredjeni-nosaci.pdf

Popis slika

Slika 1.1 Prednaprezanje poslije stvrdnjavanja betona, Izvor: Prof.dr. Tomičić Ivan; Betonske konstrukcije, 1988.g, Školska knjiga Zagreb.....6.

Slika 1.2 Prednaprezanje prije stvrdnjavanja betona, Izvor: Prof.dr. Tomičić Ivan; Betonske konstrukcije, 1988.g, Školska knjiga Zagreb.....7.

Slika 2.1. Prednapete grede.....9.

Slika 2.2. Zatezanje i usidravanje užadi između dva potporna zida na krajevima staze, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....9.

Slika 2.3. Presjecanje užadi nakon što beton dovoljno očvrsne, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....10.

Slika 2.4 Promjena ekscentriciteta pomoću izoliranja užadi, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....11.

Slika 2.5 Promjena ekscentriciteta pomoću potezanja užadi prema dolje, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....11.

Slika 2.6 Uže za prednaprezanje, Izvor: www.sz-wholesaler.com.....11.

Slika 2.5 Uređaj za prednaprezanje sa utezima, Izvor: Dr.Inz. Leonhart Fric; Prednapregnuti beton u praksi, 1968., Građevinska knjiga Beograd.....12.

Slika 2.6 Hidraulička preša za zatezanje.....13.

Slika 2.7 Primjer grede sa staze za prednaprezanje, Izvor: Dr.Inz. Leonhart Fric; Prednapregnuti beton u praksi, 1968., Građevinska knjiga Beograd.....14.

Slika 2.8 Točni čelični šabloni koji osiguravaju ispravan visinski položaj užeta.....15.

Slika 3.1 Nosač 1, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....17.

Slika 3.2 Nosač 2, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....17.

Slika 3.3 Nosač 3, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....18.

Slika 3.4 Nosač 4, Izvor: Vanja Alendar; Prethodno napregnuti beton.....18.

Slika 3.5 Prednapregnuti nosać preko dva polja, Izvor: http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/prednapeti-beton/12-staticki-neodredjeni-nosaci.pdf.....19.

Slika 3.6 Nosač nakon djelovanja sile prednaprezanja, Izvor: http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/prednapeti-beton/12-staticki-neodredjeni-nosaci.pdf.....20.

Slika 4.1. Sila prednaprezanja N_k, te sila N_{k0} nakon oslobađanja žica, Izvor: Dr.Inz. Leonhart Fric; Prednapregnuti beton u praksi, 1968., Građevinska knjiga Beograd.....21.

Slika 4.2 Betoniranje prednapete grede.....23.