



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**MOST SASTAVLJEN OD OBRNUTIH PREDNAPETIH
PREDGOTOVLJENIH T NOSAČA**

Dora Salopek

Zagreb, rujan 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**MOST SASTAVLJEN OD OBRNUTIH PREDNAPETIH
PREDGOTOVLJENIH T NOSAČA**

**BRIDGE COMPOSED OF REVERSED
PRECAST PRESTRESSED T GIRDERS**

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Ana Mandić Ivanković

Studentica:

Dora Salopek

Zagreb, rujan 2019.

Sažetak

U ovom radu napravljen je proračun karakteristično obrnutog T i L nosača prednapetog armiranobetonskog mosta u Drnišu. Za statički proračun koristi se računalni program *Sofistik 2018*. Dimenzioniranje glavnih nosača vrši se prema Eurokodu te je provedeno za: stalno i dodatno stalno opterećenje, prometno opterećenje, temperaturu i vjetar. Rad obuhvaća: dispoziciju, analizu opterećenja mosta, statički model za globalnu analizu konstrukcije, određivanje učinaka vezanih za prednapinjanje glavnih nosača, dimenzioniranje glavnih nosača prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabivosti, te nacрте armature.

Ključne riječi: most, prednapeti predgotovljeni nosači, model konstrukcije, dimenzioniranje

Abstract

This thesis is about calculation of the characteristic inverted T and L beams of prestressed reinforced concrete bridge in Drniš. Software *Sofistik 2018* is used for the static-analysis. Design of the structural elements is done according to Eurocode. Loads which are included in calculation are: dead and additional dead load, traffic load, thermal actions and wind actions. The thesis includes: drawings, load analysis of the bridge, static model for global structural analysis, effects related to prestressing of main beams, design of main beams according to ultimate limit states and serviceability limit states, and reinforcement drawings.

Key words: bridge, precast prestressed beams, static structure model, analysis

Sadržaj

1.	Uvodno o tipu nosača	1
1.1.	Predgotovljeni polumontažni mostovi	1
1.2.	Tipovi poprečnih presjeka predgotovljenih mostova	2
1.3.	Mostovi sastavljeni od obrnutih T nosača	4
2.	Izloženost i odabir materijala	7
2.1.	Opis rasponskog sklopa	7
2.2.	Položaj konstrukcije i djelovanje okoliša	7
2.3.	Materijali	11
2.3.1.	Beton	11
2.3.2.	Čelik za armiranje	11
2.3.3.	Čelik za prednapinjanje	11
3.	Proračunski model i djelovanja	13
3.1.	Analiza djelovanja	13
3.1.1.	Stalna opterećenja	13
3.1.2.	Prometno opterećenje (EN 1991-2).....	16
3.1.3.	Temperatura (EN 1991-1-5).....	19
3.1.4.	Vjetar (EN 1991-1-4)	24
3.1.5.	Potres (EN 1998-1, EN 1998-2).....	32
3.2.	Statički model za globalni proračun	36
3.2.1.	Opis načina modeliranja i elemenata modela.....	36
3.2.2.	Materijali	42
3.2.3.	Poprečni presjeci	46
3.2.4.	Ispis reznih sila za faze izvedbe	56
3.2.5.	Ispis reznih sila za ostala opterećenja.....	73
3.3.	Kombinacije djelovanja (EN 1990).....	87
3.4.	Prednapinjanje	89
3.4.1.	Prednapinjanje obrnutog T nosača	89
3.4.2.	Prednapinjanje L nosača.....	116
4.	Dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.....	142
4.1.	Granično stanje nosivosti za obrnuti T nosač.....	142
4.1.1.	Sila prednapinjanja	142

4.1.2. Armatura za robusnost presjeka	142
4.1.3. Dimenzioniranje presjeka za uporabu ($t=\infty$) – savijanje s uzdužnom silom.....	144
4.1.4. Dokaz predstlačenog vlačnog područja.....	147
4.1.5. Provjera na poprečnu silu na udaljenosti d od oslonca	149
4.1.6. Dimenzioniranje presjeka nad ležajem.....	152
4.2. Granično stanje nosivosti za L nosač	154
4.2.1. Sila prednapinjanja	154
4.2.2. Armatura za robusnost presjeka	154
4.2.3. Dimenzioniranje presjeka za uporabu ($t=\infty$) – savijanje s uzdužnom silom.....	156
4.2.4. Dokaz predstlačenog vlačnog područja.....	159
4.2.5. Provjera na poprečnu silu na udaljenosti d od oslonca	161
4.2.6. Dimenzioniranje presjeka nad ležajem.....	164
5. Dimenzioniranje prema graničnom stanju uporabivosti	166
5.1. Granično stanje uporabivosti za obrnuti T nosač	166
5.1.1. Provjera raspucalosti presjeka	166
5.1.2. Dokaz tlačnih naprezanja u betonu	170
5.1.3. Provjera naprezanja u čeliku za prednapinjanje	172
5.1.4. Provjera dekompresije.....	172
5.1.5. Proračun armature za ograničavanje širine pukotina	174
5.2. Granično stanje uporabivosti za L nosač.....	175
5.2.1. Provjera raspucalosti presjeka	175
5.2.2. Dokaz tlačnih naprezanja u betonu	178
5.2.3. Provjera naprezanja u čeliku za prednapinjanje	180
5.2.4. Provjera dekompresije.....	180
5.2.5. Proračun armature za ograničavanje širine pukotina	182
6. Vođenje natega i raspored armature	183
6.1. Rekapitulacija odabrane armature za obrnuti T nosač	183
6.2. Rekapitulacija odabrane armature za L nosač	186
7. Zaključak.....	189
Literatura	192
Popis slika	193
Popis tablica	196

1. Uvodno o tipu nosača

1.1. Predgotovljeni polumontažni mostovi

Mostovi sastavljeni od predgotovljenih nosača predstavljaju optimalno rješenje za mostove malih raspona od 20 m do 35 m, što su nadvožnjaci, vijadukti i mostovi za prijelaze rijeka.

Predgotovljeni betonski elementi u mostogradnji se koriste već niz godina, a njihova glavna prednost je brza i ekonomična izvedba. Izvedbom gotovih elemenata u pogonima kontrolira se kvaliteta proizvedenih elemenata koja je ujednačena s obzirom na njegu betona i tvorničku kontrolu kvalitete, te se rad odvija neovisno od atmosferskih uvjeta. Predgotovljeni elementi koji se mogu koristiti u mostogradnji su gotovo svi dijelovi gornjeg i donjeg ustroja, no najčešće se koriste elementi za izvedbu glavnih nosača. Predgotovljeni glavni nosači proizvode se u pogonima, gotovi dopremaju na gradilište i postavljaju na ležajevе, te se u potpunosti monolitiziraju sa betonskom pločom i poprečnim elementima. Pogoni za proizvodnju mogu se organizirati i na gradilištu što značajno ubrzava vrijeme gradnje i smanjuje troškove dopreme.

Prednosti ovakvih tipova mostova su: ujednačenost kvalitete izvedbe i brza izvedba, opetovano korištenje iste tehnologije gradnje i opreme, mogućnost izvedbe kod teško pristupačnih terena ispod konstrukcije, mogućnost nesmetanog odvijanja prometa ispod u fazi izvedbe, itd. Tijekom godina primjene predgotovljenih mostova ukazalo se na neke nedostatke kao što su trajnost konstrukcije i estetski dojam. Nakon svega 10-20 godina uporabe beton je počeo propadati zbog intenzivne korozije armature i ljuštenja zaštitnog sloja betona, puno je razloga zašto se to dogodilo a jedni od njih su koristili mali zaštitni slojevi i vrlo tanke debljine elemenata, te nedovoljnog i rijetkog održavanja konstrukcije. Veliki troškovi sanacije doveli su do drugačijeg projektiranja i građenja ovakvih tipova mostova, pa se danas koriste nosači nove generacije gdje su elementi i zaštitni slojevi veći, kao i visine nosača i betonskih ploča. Više pažnje se posvećuje detaljima koji su otporni na vanjska oštećenja i nedovoljno održavanje. [12]

Prednapinjanje ovakvih konstrukcija vrši se na mjestu proizvodnje te se elementi mogu prethodno ili naknadno prednapeti. Ukoliko se element izvodi na gradilištu, presjek se naknadno prednapinje, a često je razred betona predgotovljenog i monolitnog betona različit pa se primjenjuje transformirani presjek. [10]

1.2. Tipovi poprečnih presjeka predgotovljenih mostova

Glavni nosači mogu se najšire podijeliti na T, I i sandučaste presjeke. Podpodjela se definira prema širini gornje pojasnice pojedinog nosača. Ukoliko nosač ima veću širinu gornje pojasnice, više od 150 cm naziva se širokopojasnim nosačem ili je sandučasti. Kod nosača manje širine gornje pojasnice, od 60 cm do 130 cm nazivaju se uskopojasnim (I) nosačima.

U gotovo svakoj zemlji mogu se vidjeti različite varijacije glavnih nosača, ovisno o građevinskim tvrtkama koje ih proizvode. Najveći proizvođač nosača za mostove u Hrvatskoj je tvrtka Viadukt. Nosači prikazani na slici su iz njihovog kataloga sa ponekim izmjenama vezano uz minimalne debljine pojaseva zbog uvjeta trajnosti. Koristeći ove nosače moguće je izvesti gotovo svaki rebrasti i pločasti presjek mosta. Za svaki nosač definiran je i maksimalan raspon koji se sa njime može ostvariti, s obzirom na njegovu maksimalnu visinu i mogućnosti postavljanja broja kabela za prednapinjanje. [12]

BUBLE TEA ('I' NOSAČ)	'Tv' NOSAČ	'Tw' NOSAČ
'I' NOSAČ	'I' NOSAČ	SAN 210/135
SAN 210/115	SAN 210/75	SAN 116/50

Slika 1. Viaduktovi karakteristični tipovi nosača [12]

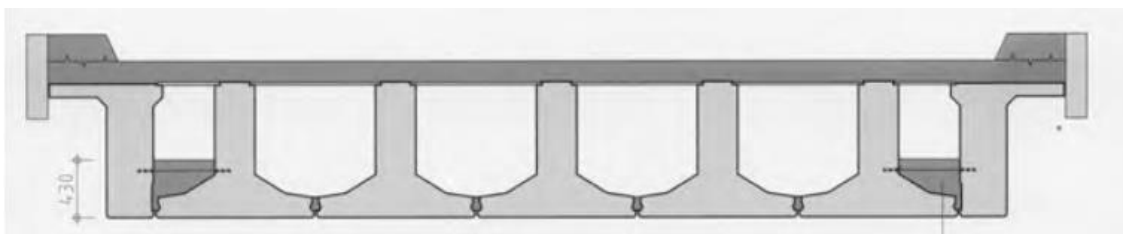
Na slici je prikaz tipova poprečnih presjeka koji se najčešće koriste kod predgotovljenih polumontažnih mostova, te njihova usporedba u bitnim segmentima kao što su proizvodnja, djelotvornost kod spregnutih i ne spregnutih presjeka, raspoloživ prostor za armaturu i njihova primjena. U ovom radu kao glavni nosači se koriste obrnuti T i L nosač koji imaju složenu izvedbu te ovisno o geometriji nemaju puno prostora za kabele u donjoj zoni ukoliko je potrebno puno prednapete armature, no ima dovoljno mjesta za nenapetu armaturu. Koriste se u mostogradnji.

Osnovni oblici presjeka	PRAVOKUTNI	T - PRESJEK	I - PRESJEK	OBRNUTI T - PRESJEK
Skica osnovnog + varijacije	 + 	 + 	 + 	 + 
Dodatno		(a) Više mjesta za kabele u donjoj pojasnici (b) Bolja stabilnost pri izvedbi	Torzijski krut i čvrst	
Proizvodnja	Jednostavna	Jednostavna	Skupa oplata	Složena
Raspoloživ prostor za armaturu	Prikladan	Manji od prikladnog	Dobar	Dobar
Djelotvornost kod ne-spregnutih presjeka	Slaba, $z \approx 0,4h$	Dobra, $z \approx 0,5h$	Vrlo dobra, $z \approx 0,7h$	Vrlo mala; mala granična nosivost na savijanje
Primjena ne-spregnutih presjeka	Kod lakih opterećenja i za manje raspone; Veliki M_{SW}/M_T	Za velike krovne raspone gdje je $LL \ll DL$; Veliki M_{SW}/M_T	Za velike raspone i teška opterećenja; Mali M_{SW}/M_T	Veliki M_{SW}/M_T
Djelotvornost za spregnute presjeke	Vrlo dobra, pogotovo kad je presjek zakošen	Malo povećana nosivost	Vrlo dobra	Vrlo dobra s gornjom pojasnicom lijevanom na mjestu
Primjena spregnutih presjeka	Prikladna za zgrade	Preko gornje ploče povezuju se pojedinačni presjeci; nije potrebna oplata	Kod zgrada s velikim rasponima i kod mostova	Kod mostova

Slika 2. Osnovni oblici presjeka [11]

1.3. Mostovi sastavljeni od obrnutih T nosača

Gredni mostovi malih raspona često su sastavljeni od obrnutih T ili I nosača na određenom razmaku. Nosači su povezani poprečnim nosačem na svakom osloncu, a ponekad i u sredini raspona, ovisno o duljini raspona mosta. Ploča se izvodi monolitno na mjestu izvedbe. Sustav je povoljan za statički sustav prostih greda i za kontinuirane nosače. U gornje dijelove nosača postavlja se poprečna armatura koja prolazi i kroz nosač i kroz ploču kako bi se ostvarilo spregnuto djelovanje između dva materijala različitih karakteristika. Mostovi sastavljeni od obrnutih T nosača pogodni su za raspone od 15 do 45 m. Sustav je u konačnici zatvoren, odnosno rasponski sklop je ploča. Nosači u vrijeme izvedbe služe i kao oplata kolničkoj ploči koja se naknadno betonira. [13]



Slika 3. Most sastavljen od obrnutih T nosača [13]

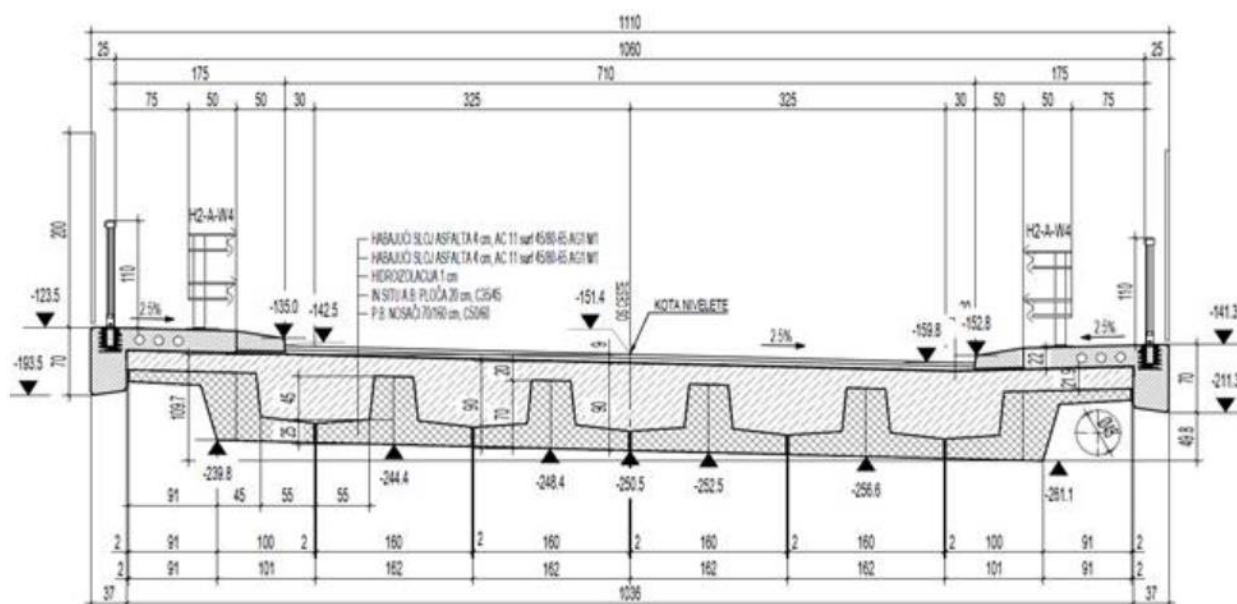


Slika 4. Izvedba mosta sastavljenog od obrnutih T nosača [13]

Prednosti građenja obrnutim T nosačima je što su predgotovljeni, pa je potrebno kratko vrijeme da se oni postave na ležajeve mosta (dan do dva) što znači skoro nesmetan promet ispod mosta, te se često koriste kada treba premostiti željeznicu jer se željeznički promet ne može na dugo vremena zatvoriti.

Most Kamenjača (zaobilaznica Drniš)

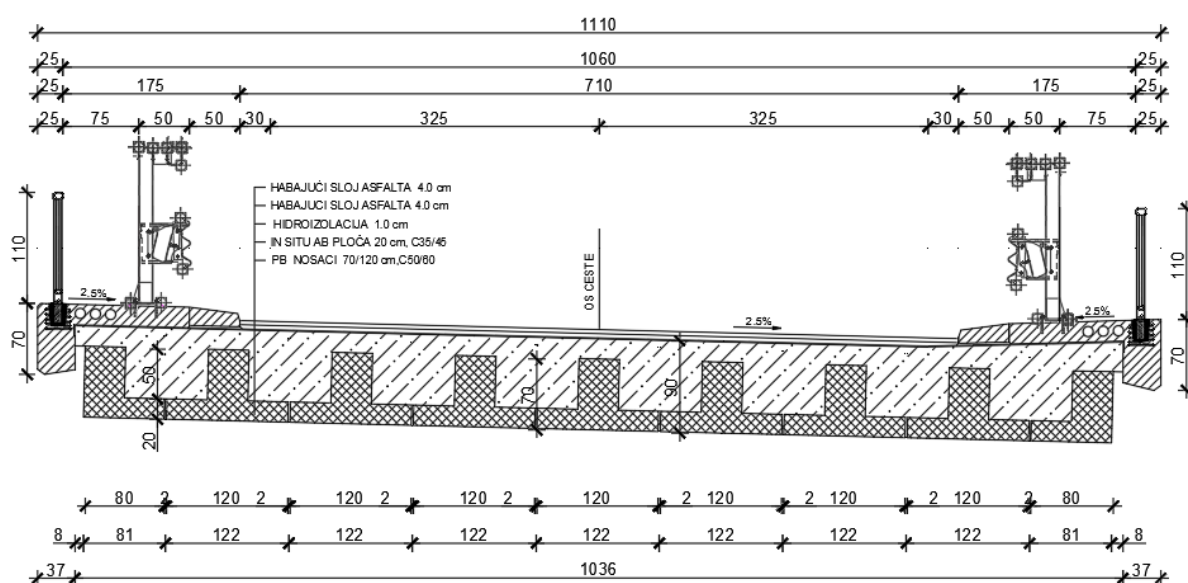
Rasponski sklop nadvožnjaka Kamenjača sastoji se od montažnih prednapetih betonskih nosača obrnutog T presjeka. Na položene nosače se betonira ploča do debljine od 70 cm. Prednapeti nosači rasponskog sklopa su obrnutog „T“ presjeka, visine 0,7 m, debljine pojaseva na rubovima 20 cm, a na spoju sa hrptom 25 cm, širina hrpta na vrhu iznosi 0,4 m, a na spoju sa pojasnicom 0,5 m. Širina pojasnice je 1,6 m. U poprečnom presjeku su četiri nosača na osnom razmaku od 1,62 m. Rubni nosači su „Z“ poprečnog presjeka s nesimetričnim dužinama pojaseva. Dužina gornje pojasnice nosača (ispod pješačke staze) iznosi 0,75 m dok je dužina donje pojasnice ista kao i pojasnice na „T“ nosačima. Predgotovljeni nosači su od betona klase C50/60. Nosači se prethodno prednapinju uz korištenje užadi promjera 0,62" (150 mm^2), kvalitete čelika 1640/1860. Primijenjuje se pojedinačna užad promjera 15,7 mm. Broj užadi u pojedinom nosaču ovisi o položaju nosača u poprečnom presjeku (prema statičkom proračunu). Užad za prednapinjanje nosača smještena je u visini pojasnice za srednje nosače, dok se za rubne nosače užad postavlja i u gornjem dijelu presjeka. Kolnička ploča je minimalne debljine 20 cm, C35/45, betonira se „in situ“. Nadvožnjak je položen koso u odnosu na prepreku, kut prijelaza je 77° , a os ceste je u pravcu. Rasponski sklop je monolitno spojen sa stupovima i upornjacima.



Slika 5. Poprečni presjek mosta Kamenjača

Podloga ovog rada je projekt Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za most Kamenjača na zaobilaznici kod Drniša, uz neke preinake. Most koji se proračunavao u ovom radu sastoji se od više (7) obrnutih T nosača manjih dimenzija, te dva rubna L nosača. U ovom radu željelo se prikazati koje bi mogle biti razlike ako se stavi više nosača manjih dimenzija u poprečni presjek. Odabrale su se baš ovakve manje dimenzije zbog toga što će puno manje opterećenja preuzeti pojedini nosač, te je smanjena vlastita težina nosača, što naravno utječe na rezultate i dimenzioniranje. Krajnji Z nosači su se zamijenili sa L nosačima zbog složene geometrije i zato što postoji problem vlačnih naprezanja u gornjoj pojasnici Z nosača zbog unosa sile prednapinjanja u donju pojasnicu, te se treba prednapeti i gornja pojasnica. Most u ovom radu je položen okomito na prepreku radi pojednostavljenja.

Materijali pojedinih elemenata, kao i opterećenja dobivena za lokaciju Drniš prema Eurokodu uzeta su kao i u projektu. Također statički sustav je kontinuirani nosač.



Slika 6. Poprečni presjek mosta

2. Izloženost i odabir materijala

2.1. Opis rasponskog sklopa

Most premošćuje tri raspona, dva vanjska od 19 m i unutrašnji od 12,5m. Statički sustav svakog predgotovljenog nosača je kontinuirana greda. Visina obrnutog „T“ nosača u njegovoj osi iznosi 70 cm, a širina pojasnice iznosi 60+40+60 cm i prati poprečni pad kolničke ploče od 2.5%. Visina „L“ nosača iznosi 70 cm, a širina pojasnice iznosi 40+40 cm i prati poprečni pad kolničke ploče od 2.5%.

Prometnica na mostu je državna cesta dimenzija:

$$2 \cdot 325 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 200 = 1100 \text{ cm}$$

Ukupna širina mosta iznosi 1100 cm. Kolnička ploča poprečnog pada 2.5% i širine 1036 cm dobetonirana je na predgotovljene nosače. Za tu širinu kolničke ploče potrebno nam je 7 „T“ nosača i 2 „L“ nosača. Most se nalazi u Drnišu.

2.2. Položaj konstrukcije i djelovanje okoliša

Razredi izloženosti – MOST U UNUTRAŠNJOSTI

Zbog utjecaja okoliša na građevinu svim plohama betonske konstrukcije dodjeljuju se razredi agresivnog djelovanja okoliša. Iz tablice prema HRN EN 206:2016 određuju se razredi izloženosti predgotovljenog nosača.

Presjek je izložen razredima izloženosti:

Tablica 1. Odabrani razredi izloženosti

XC4	Betonske površine u dodiru s vodom, koje nisu u XC2. Vanjski elementi izloženi kiši.	Korozija uzrokovana karbonatizacijom.
XD1	Betonske površine izložene kloridima iz zraka.	Korozija uvjetovana kloridima koji nisu iz mora.
XF2	Vertikalne površine betona cestovnih konstrukcija izložene smrzavanju i solima za odmrzavanje iz zraka.	Djelovanje smrzavanja i odmrzavanja sa soli za odmrzavanje ili bez nje.

Nominalna debljina zaštitnog sloja, koja se specificira na nacrtima armature i primjenjuje u proračunu c_{nom} dobiva se uvećanjem najmanje debljine zaštitnog sloja c_{min} dopuštenim odstupanjem u izvedbi Δc_{dev} :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

Najmanja debljina zaštitnog sloja c_{min} mora omogućiti prionjivost armature i betona, zaštitu čelika od korozije te požarnu otpornost, a određuje se izrazom:

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

Iz uvjeta prionjivosti armature i betona najmanja debljina zaštitnog sloja prema EN 1992-1-1 jednak je pretpostavljenom promjeru šipke:

$$\rightarrow c_{min,b} = 20 \text{ mm}$$

Iz uvjeta izloženosti okolišu za pojedine razrede izloženosti :

- početni razred konstrukcije S4
- -1 zbog primjene većeg razreda betona od C40/50
- -1 zbog osigurane posebne kontrole kvalitete betona
- dopušteno odstupanje u izvedbi Δc_{dev} uzeto s 10 mm, vrijedi:

Tablica 2. Odabrana nominalna debljina zaštitnog sloja za nenapetu armaturu

RAZRED IZLOŽENOSTI	XC4	XD1
$c_{min,dur} [\text{mm}]$	20	25
$\Delta c [\text{mm}]$	10	10
$c_{nom} [\text{mm}]$	30	35

Za nenapetu armaturu pretpostavljaju se šipke $\phi 20$.

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}\} = \max\{20 \text{ mm}; 25 \text{ mm}; 10 \text{ mm}\} = 25 \text{ mm}$$

Odabrani nazivni zaštitni sloj betona za nenapetu armaturu:

$$\rightarrow c_{nom,ab} = 35 \text{ mm}$$

Iz uvjeta izloženosti okolišu za pojedine razrede izloženosti :

- početni razred konstrukcije S4
- -1 zbog primjene većeg razreda betona od C40/50
- -1 zbog osigurane posebne kontrole kvalitete betona
- dopušteno odstupanje u izvedbi Δc_{dev} uzeto s 10 mm, vrijedi:

Tablica 3. Odabrana nominalna debljina zaštitnog sloja za prednapetu armaturu

RAZRED IZLOŽENOSTI	XC4	XD1
$c_{min,dur}$ [mm]	30	35
Δc [mm]	10	10
c_{nom} [mm]	40	45

Za prednapete armaturu pretpostavlja se užad promjera 15.7mm u jednom redu.

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}\} = \max\{1,5 \times 15.7 \text{ mm}; 35 \text{ mm}; 10 \text{ mm}\} = 35 \text{ mm}$$

Odabrani nazivni zaštitni sloj betona za prednapetu armaturu:

$$\rightarrow c_{nom,ab} = 45 \text{ mm}$$

Određivanje razmaka između užadi i armature

- za čelik za armiranje vrijedi (svijetli razmak šipki):

$$a_s = \max \begin{cases} \geq d_s \\ \geq 20 \text{ mm} \\ \geq d_g + 5 \text{ mm} \end{cases}$$

d_s – promjer najdeblje šipke armature
u presjeku

d_g – promjer max. zrna agregata

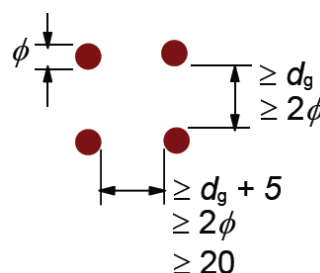
$$a_s = \max \begin{cases} \geq 20 \\ \geq 20 \text{ mm} \\ \geq 16 + 5 = 21 \text{ mm} \end{cases}$$

Mjerodavan je treći uvjet.

- za čelik za prednapinjanje i to za prethodno prednapinjanje vrijedi (svijetli razmak natega):

- horizontalni:

$$a_{p,h} = \max \begin{cases} \geq 2 \times d_p \\ \geq 20 \text{ mm} \\ \geq d_g + 5 \text{ mm} \end{cases}$$



$$a_{p,h} = \max \begin{cases} \geq 2 \times 15,7 = 31,4 \text{ mm} \\ \geq 20 \text{ mm} \\ \geq 16 + 5 = 21 \text{ mm} \end{cases}$$

Mjerodavan je prvi uvjet.

- vertikalni:

$$a_{p,v} = \max \begin{cases} \geq 2 \times d_p \\ \geq d_g \end{cases}$$

$$a_{p,v} = \max \begin{cases} \geq 2 \times 15,7 = 31,4 \text{ mm} \\ \geq 16 \text{ mm} \end{cases}$$

Mjerodavan je prvi uvjet.

Osni razmak između natega:

$$u_{p,v} = a_{p,v} + d_{p,nom}$$

$$u_{p,h} = a_{p,h} + d_{p,nom}$$

$$u_{p,v} = 31,4 + 15,7 = 47,1 \text{ mm} \Rightarrow \text{ODABRANO } u_{p,v} = 50 \text{ mm}$$

$$u_{p,h} = 31,4 + 15,7 = 47,1 \text{ mm} \Rightarrow \text{ODABRANO } u_{p,h} = 50 \text{ mm}$$

Rastlačenje i ograničenje širina pukotina:

Prema dodatku norme HRN EN 1992-2:2013/NA:2013 provjere rastlačenja i širine pukotina biraju se preporučene vrijednosti maksimalne vrijednosti širine pukotina i odgovarajuća pravila za kombinacije.

XC4, XD1, XF2 → provjera pukotina na 0,2 mm za karakterističnu kombinaciju djelovanja
→ provjera rastlačenja za čestu kombinaciju djelovanja

2.3. Materijali

2.3.1. Beton

Najmanji potrebni razred čvrstoće betona prema HRN EN 206-1:2016 :

- iz uvjeta agresivnog djelovanja okoliša:

XC4 → C30/37

XD1 → C30/37

XF2 → C25/30

- iz uvjeta najnižeg razreda za naknadno prednapeti beton:
C25/30

Odabrani razred tlačne čvrstoće betona:

C50/60

- $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ -karakteristična tlačna čvrstoća betona valjka starog 28 dana
- $f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$ -srednja osna vlačna čvrstoća betona
- $E_{cm} = 37000 \text{ N/mm}^2$ -sekantni modul elastičnosti

2.3.2. Čelik za armiranje

Šipka HRN EN 100830-3-B500B-20x12000 ($\Phi 20$, $l = 12,0 \text{ m}$)

- $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ -karakteristična granica popuštanja
- $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$ -karakteristična vlačna granica
- razred duktilnosti B -visoka duktilnost
- $E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ -sekantni modul elastičnosti

2.3.3. Čelik za prednapinjanje

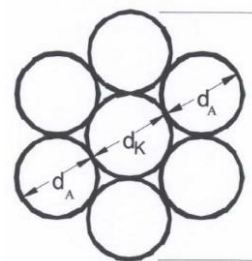
Oznaka užeta: HRN EN 10138-2-Y1860C-5,0-I

$f_{p0,1k}$ - naprezanje čelika za prednapinjanje pri 0,1% zaostaloj deformaciji

f_{pk} - karakteristična vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje

E_{sp} - modul elastičnosti čelika za prednapinjanje

$$\begin{aligned} f_{p0,1k} &= 1640 \text{ N / mm}^2 \\ \text{Za } 1640/1860 \rightarrow f_{pk} &= 1860 \text{ N / mm}^2 \\ E_{sp} &= 195000 \text{ N / mm}^2 \end{aligned}$$



$$d_p \approx 3 \times d_a$$

Jedno uže ima 7 žica (0,62"), 1640/1860, $d_p=15,7$ mm, $A_p=150$ mm²

3. Proračunski model i djelovanja

3.1. Analiza djelovanja

3.1.1. Stalna opterećenja

3.1.1.1. Vlastita težina (po fazama izvedbe – faza 1 i 2)

FAZA 1 – Postavljanje nosača na ležajeve ili naglavne grede

Izračun linijskog opterećenja težine jednog nosača i svih nosača:

$$A_{1,T,nosač} = 0,440 \text{ m}^2 \rightarrow G_{1,nosača} = A_{1,nosač} \cdot \gamma_b = 0,440 \cdot 25 = 11,0 \text{ kN/m}$$

$$A_{1,L,nosač} = 0,360 \text{ m}^2 \rightarrow G_{1,nosača} = A_{1,nosač} \cdot \gamma_b = 0,360 \cdot 25 = 9,0 \text{ kN/m}$$

$$A_{\text{svih nosača}} = 3,80 \text{ m}^2 \rightarrow G_{\text{svih nosača}} = A_{\text{svih nosača}} \cdot \gamma_b = 3,80 \cdot 25 = 95,0 \text{ kN/m}$$

FAZA 2 – Betoniranje ploče i poprečnih nosača (monolitizacija roštiljnog sklopa)

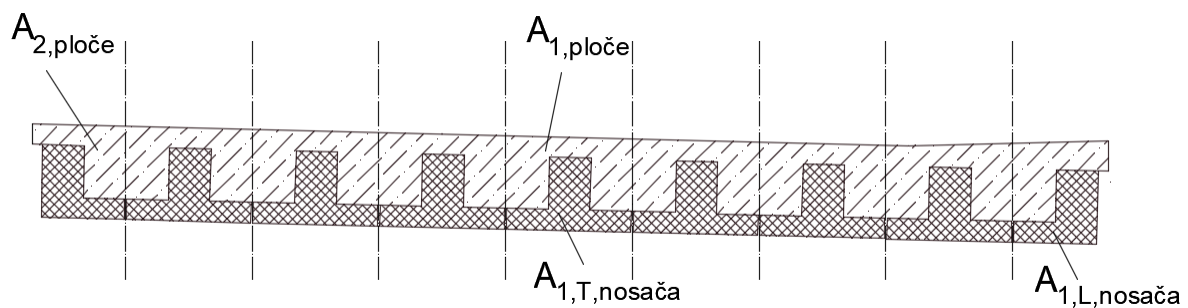
Izračun linijskog opterećenja težine pripadajućeg dijela ploče za jedan nosač i cijele ploče:

$$A_{1,ploče} = 0,653 \text{ m}^2 \rightarrow G_{1,ploče} = A_{1,ploče} \cdot \gamma_b = 0,653 \cdot 25 = 16,33 \text{ kN/m}$$

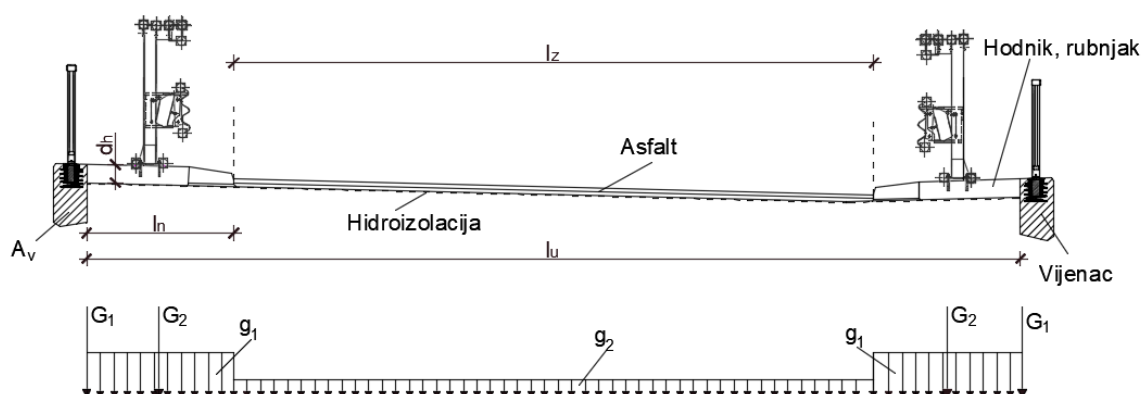
$$A_{2,ploče} = 0,391 \text{ m}^2 \rightarrow G_{2,ploče} = A_{2,ploče} \cdot \gamma_b = 0,391 \cdot 25 = 9,78 \text{ kN/m}$$

$$A_{\text{cijela ploča}} = 7 \cdot 0,653 + 2 \cdot 0,391 = 5,353 \text{ m}^2$$

$$\rightarrow G_{\text{cijele ploče}} = A_{\text{cijela ploča}} \cdot \gamma_b = 5,353 \cdot 25 = 133,83 \text{ kN/m}$$



Slika 7. Vlastita težina nosača i ploče



Slika 8. Dodatna stalna opterećenja

3.1.1.2. Dodatno stalno (faza 3)

Za cijeli most:

Pješačka staza i

rubnjak..... $d_h \cdot l_h \cdot 25 = 0,21 \cdot 1,65 \cdot 25 \cdot 2 = 17,33$ [kN/m]Hidroizolacija..... $0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot l_u = 0,5 \cdot 10,36 = 5,18$ [kN/m]Zastor..... $0,08 \cdot l_z \cdot 21 \text{ kN/m}^3 = 0,08 \cdot 7,10 \cdot 21 = 11,93$ [kN/m]Ograde..... $4 \cdot 0,5 = 2,00$ [kN/m]Vijenac..... $A_v \cdot 25 \cdot 2 = 0,249 \cdot 25 \cdot 2 = 12,45$ [kN/m]

Ukupno: 48,89 [kN/m]

Za jedan nosač: na mostu se nalazi devet nosača

- Rubni nosač:

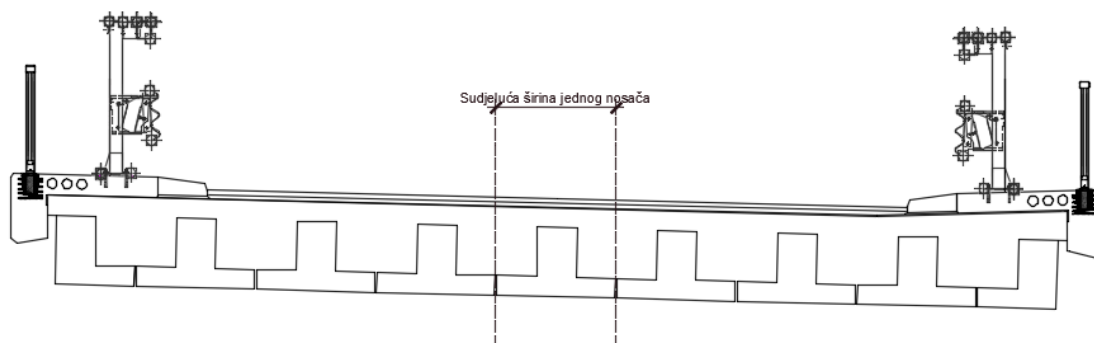
Pješačka staza i rubnjak..... $d \cdot l \cdot 25 = 0,21 \cdot 0,90 \cdot 25 = 4,73$ [kN/m]Hidroizolacija..... $0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot l = 0,5 \cdot 0,90 = 0,45$ [kN/m]Ograde..... $2 \cdot 0,5 = 1,00$ [kN/m]Vijenac..... $A_v \cdot 25 = 0,249 \cdot 25 = 6,23$ [kN/m]

Ukupno: 12,41 [kN/m]

- Srednji nosač:

Hidroizolacija..... $0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot l = 0,5 \cdot 1,20 = 0,60$ [kN/m]Zastor..... $0,08 \cdot l \cdot 21 \text{ kN/m}^3 = 0,08 \cdot 1,20 \cdot 21 = 2,02$ [kN/m]

Ukupno: 2,62 [kN/m]



Slika 9. Pripadajuća širina za dodatno stalno opterećenje srednjeg nosača

Izračun dodatnih stalnih opterećenja grupiranih po širini mosta (za unos u statički model):

Linijnska opterećenja:

$$G_1 = A_v \cdot 25 \text{ (vijenac)} + 0,5 \text{ (ograda)} = 0,249 \cdot 25 + 0,5 = 6,73 \text{ [kN/m]}$$

$$G_2 = 0,5 \text{ (ograda)} = 0,5 \text{ [kN/m]}$$

Ploština (površinska opterećenja):

$$g_1 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + d_h \cdot 25 \text{ (hodnik)} = 0,5 + 0,21 \cdot 25 = 5,75 \text{ [kN/m}^2 \text{]}$$

$$g_2 = 0,5 \text{ (hidroizolacija)} + 0,08 \cdot 21 \text{ (zastor)} = 2,18 \text{ [kN/m}^2 \text{]}$$

3.1.2. Prometno opterećenje (EN 1991-2)

3.1.2.1. Model opterećenja 1 (Load Model 1)

Određivanje broja i širine prometnih trakova ovisno o širini kolnika:

Tablica 4. Broj i širina proračunskih trakova [2]

Širina kolnika w	Broj prometnih trakova	Širina prometnih trakova (m)	Preostala širina kolnika (m)
$< 5,4 \text{ m}$	$n=1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n=2$	$w/2$	0
$w \geq 6 \text{ m}$	$n = \text{Int}(w/3)$	3 m	$w - 3 \times n$

- širina kolnika: $w = 710 \text{ cm}$
- br. prometnih trakova širine 3 m: $n = 2$
- preostala širina kolnika: $w - 6 \text{ m} = 1,10 \text{ m}$

Cestovno opterećenje i koeficijenti EN 1991-2:

Tablica 5. Model opterećenja 1: karakteristike vrijednosti [2]

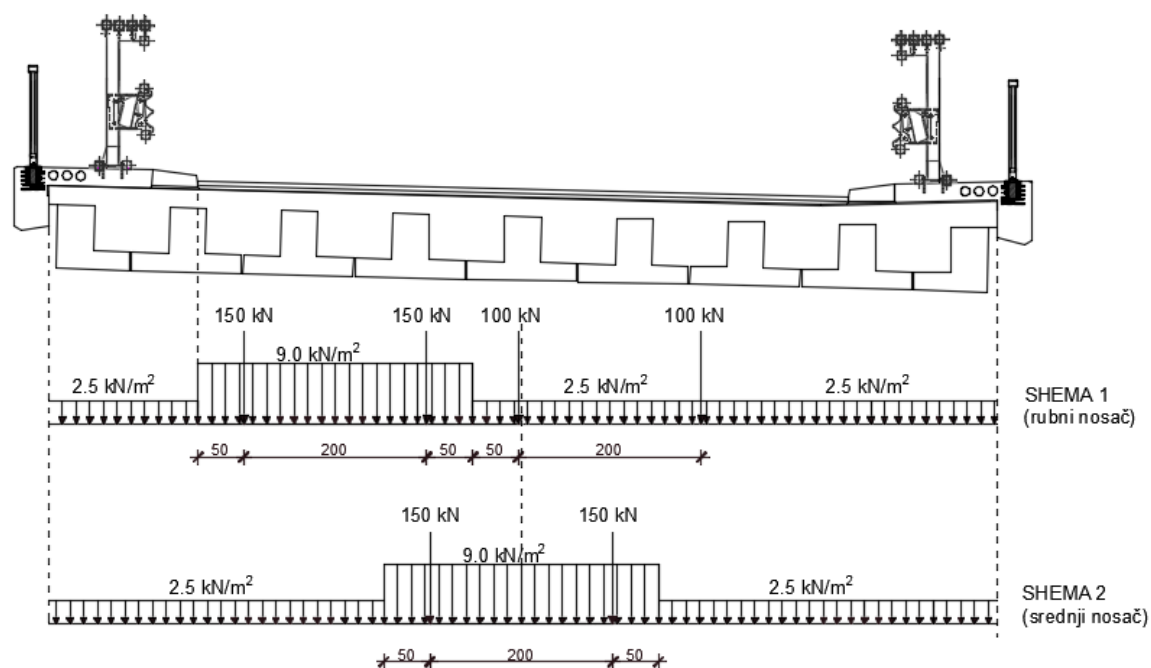
Položaj	Dvoosovinsko opterećenje		Jednoliko rasprostranjeno opterećenje
	Osovinsko opterećenje Q_{ik} (kN)	α_{Qi}	q_{ik} (ili q_{rk}) (kn/m ²)
Vozni trak 1	300	1,0	9,0
Vozni trak 2	200	1,0	2,5
Vozni trak 3	100	1,0	2,5
Ostali vozni trakovi	0	-	2,5
Preostala površina	0	-	2,5

Moguće sheme opterećenja:

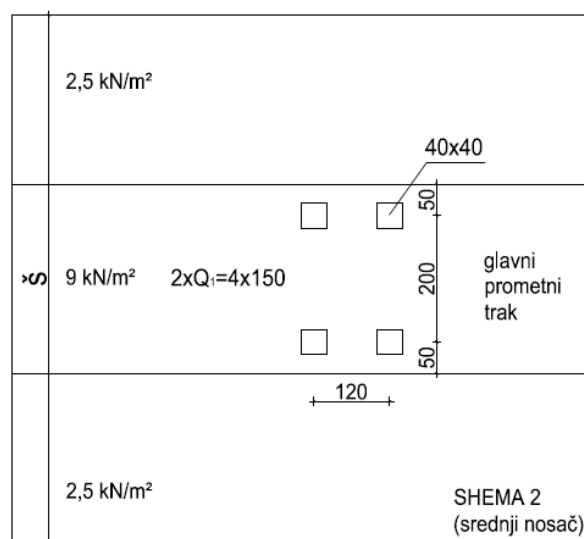
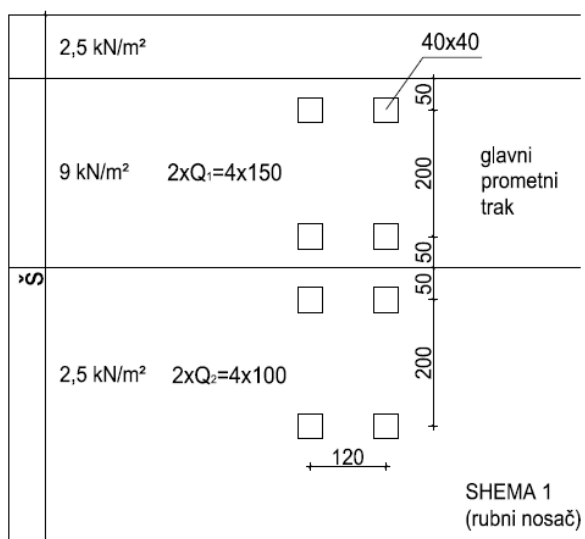
Položaj glavnog prometnog traka ovisi o konstrukcijskom elementu za koji tražimo kritičnu vrijednost rezne sile za dimenzioniranje. Položaj teškog vozila (glavnog prometnog traka) u poprečnom smjeru može se tako mijenjati kako bi se odredila maksimalna vrijednost mjerodavnog učinka za dimenzioniranje.

Elementi za koje tražimo mjerodavne sheme prometnog opterećenja kod mostova su obično:

1. glavni nosači (max i min M_y)
 - a. rubni nosač → SHEMA 1
 - b. srednji nosač → SHEMA 2
2. betonska ploča (max i min M_y) → SHEMA 3
3. poprečni nosač iznad ležaja (max i min M_y)
4. ležaj (maksimalna reakcija)



Slika 10. Sheme prometnog opterećenja za glavne nosive elemente



3.1.2.2. Kočenje i pokretanje vozila

Sila kočenja može djelovati na mostu bilo gdje duž glavnog prometnog traka:

$$Q_{lk} = 0,6 \alpha_{Q1} \times (2Q_{1k}) + 0,10 \alpha_{q1} \times q_{1k} \times w_1 \times L$$

$$360 \cdot \alpha_{Q1} \leq Q_{lk} \leq 900 \text{ u kN}$$

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 300 + 0,1 \cdot 1,0 \cdot 9,0 \cdot 3 \cdot 50,50 = 496,35 \text{ kN} < 900 \text{ kN}$$

$$Q_{lk} = 835,2 \text{ kN}$$

α_{Q1} - koeficijent redukcije opterećenja teškog vozila = 1,0

α_{q1} - koeficijent redukcije opterećenja kontinuiranog opterećenja = 1,0

q_{1k} - kontinuirano opterećenje u 1. traci = 9 kN/m²

Q_{1k} - osovinsko opterećenje u 1. traci = 300 kN

w_1 - širina 1. trake = 3 m

L - duljina mosta

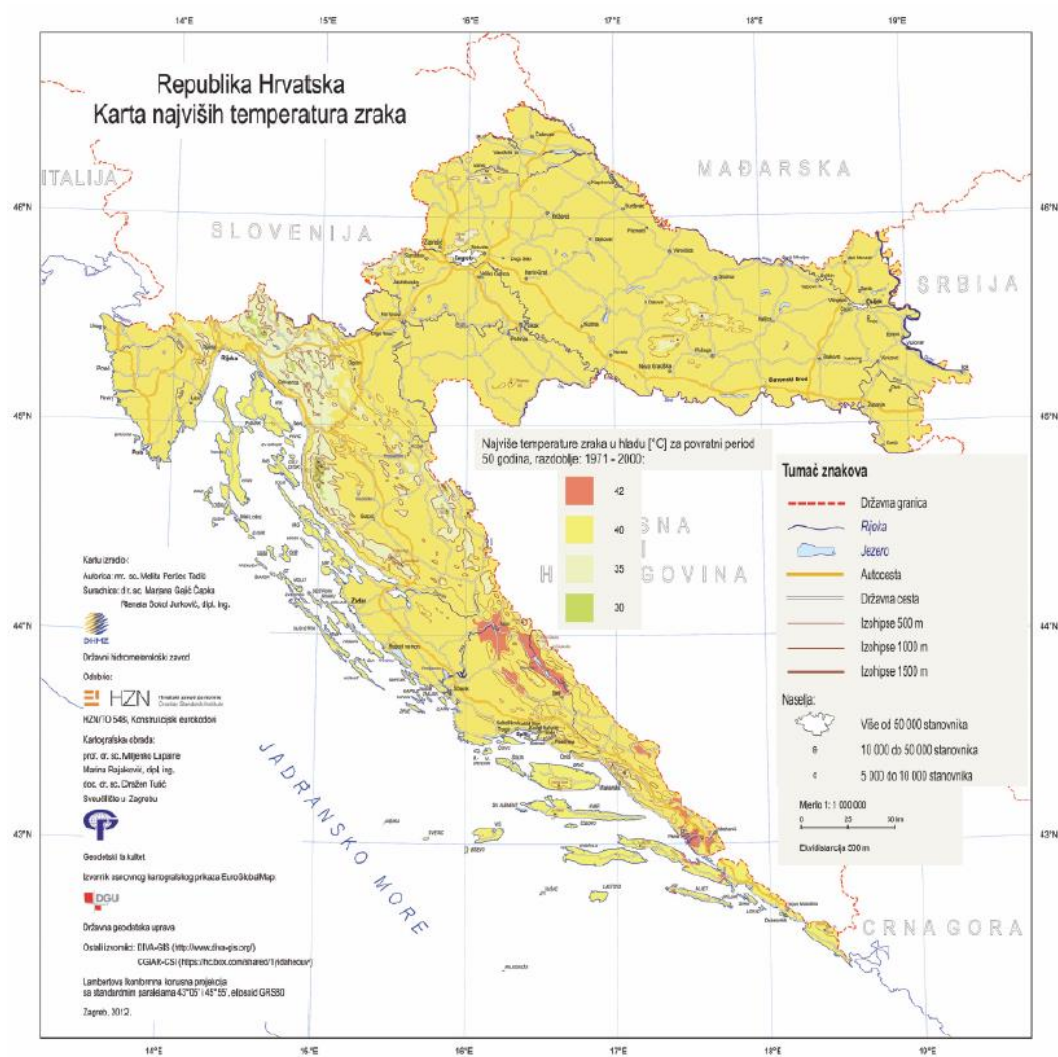
Sila pokretanja po iznosu je jednaka sili kočenja, a djeluje u suprotnom smjeru. To znači da se kod statičkog proračuna sile kočenja i pokretanja mogu zadati kao jedno djelovanje koje ima promjenjiv predznak.

3.1.3. Temperatura (EN 1991-1-5)

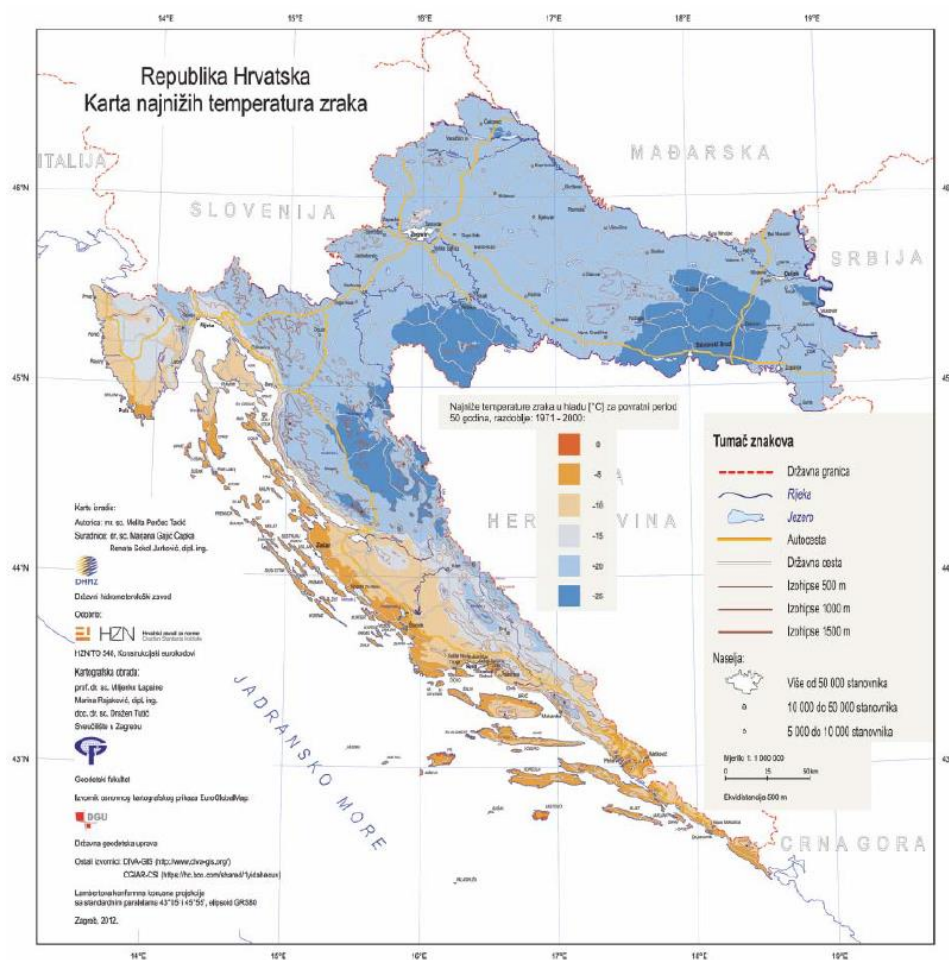
3.1.3.1. Jednolika temperatura

$T_{\max}$: + 40 °C očitano iz karte najviših temperatura zraka Republike Hrvatske prema HRN EN 1991-1-5:2012/NA za lokaciju Drniš

$T_{\min}$: -10 °C očitano iz karte najnižih temperatura zraka Republike Hrvatske prema HRN EN 1991-1-5:2012/NA za lokaciju Drniš



Slika 12. Karta najviših temperatura Republike Hrvatske [1]



Slika 13. Karta Najnižih temperatura zraka Republike Hrvatske [1]

Korištenjem dijagrama ovisnosti najviše/najniže temperature zraka u hladu ($T_{\min}/T_{\max}$) i najniže/najviše komponente jednolične temperature mosta ($T_{e,\max}/T_{e,\min}$) prema HRN EN 1991-1-5:2011 :

$$T_{e,\max} = 42^{\circ}\text{C}$$

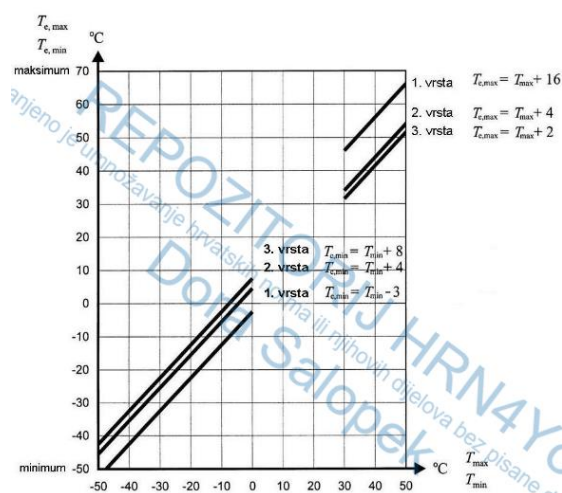
$$T_{e,\min} = -2^{\circ}$$

Linija Type 1 – čelična kolnička ploča na čeličnim sandučastim nosačima,

rešetkastom ili punostijenom nosaču

Linija Type 2 – betonska kolnička ploča na čeličnim sandučastim ili rešetkastim nosačima ili na punostijenim nosačima

Linija Type 3 – betonska ploča ili betonska kolnička ploča na betonskim gredama ili sandučastim nosačima



T_0 – vjerojatna računska temperatura mosta u vrijeme kad je konstrukcija djelotvorno upeta. Može se definirati projektom, a obično iznosi 10 – 20 °C.

$$T_0 = 10^\circ\text{C}$$

Najveća razlika negativne računske temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{con}} = T_0 - T_{e,\text{min}} = 10 - (-2) = 12^\circ\text{C}$$

Najveća razlika pozitivne računske temperature mosta je:

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_{e,\text{max}} - T_0 = 42 - 10 = 32^\circ\text{C}$$

Za proračun pomaka prijelaznih naprava i ležajeva i reakcija ležajeva mjerodavne su ove vrijednosti temperatura sa još dodatnih 20 °C, dakle, mjerodavne temperature će biti:

$$\Delta T_{N,\text{con,bear}} = \Delta T_{N,\text{con}} + 20^\circ\text{C} = 12 + 20 = 32^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{N,\text{exp,bear}} = \Delta T_{N,\text{exp}} + 20^\circ\text{C} = 32 + 20 = 52^\circ\text{C}$$

3.1.3.2. Nejednolika linearno promjenjiva temperatura

Tablica 6. Preporučene vrijednosti komponente linearne temperaturne razlike za različite vrste rasponskih sklopova cestovnih, pješačkih i željezničkih mostova [3]

Vrsta rasponskog sklopa	Gornja površina toplija od donje	Donja površina toplija od gornje
	$\Delta T_{M,\text{heat}} [^\circ\text{C}]$	$\Delta T_{M,\text{cool}} [^\circ\text{C}]$
1.vrsta: čelični rasponski sklop	18	13
2.vrsta: spregnuti rasponski sklop	15	18
3.vrsta: betonski rasponski sklop		
- betonski sandučasti nosač	10	5
- betonska greda	15	8
- betonska ploča	15	8

Tablica 7. Preporučene vrijednosti faktora k_{sur} za različite debljine kolnika zastora [3]

Cestovni, pješački i željeznički mostovi						
Debljina zastora kolnika	1.vrsta		2. vrsta		3. vrsta	
	Gornja površina toplija od donje	Donja površina toplija od gornje	Gornja površina toplija od donje	Donja površina toplija od gornje	Gornja površina toplija od donje	Donja površina toplija od gornje
mm	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}
Bez zastora	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
Vodonepropusni	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
Zastor (želj.) (750 mm)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0

Gornje vrijednosti se još množe sa faktorom k_{sur} koji ovisi o debljini asfaltnog zastora.

$$\Delta T_{M,heat} = 0,82 \times 15 = 12,3^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{M,cool} = 1,0 \times 8 = 8^{\circ}\text{C}$$

Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promjenjive temperature

U nekim slučajevima potrebno je uzeti u obzir istodobno djelovanje jednolike i nejednolike temperaturne komponente pa se koristi nepovoljniji od sljedećih učinaka:

$$\Delta T_{M,heat} + \omega_N \Delta T_{N,exp} \quad \text{ili} \quad \Delta T_{M,cool} + \omega_N \Delta T_{N,con} \quad \omega_N = 0,35$$

$$\omega_M \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,exp} \quad \text{ili} \quad \omega_M \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,con} \quad \omega_M = 0,75$$

Proračunati će se osam kombinacija opterećenja temperaturom:

A) Jednolika temperaturna komponenta:

1) Ljeto – gornji rub konstrukcije se zagrijava:

$$\Delta T_{N,exp} + \omega_M \Delta T_{M,heat} = 32^{\circ}\text{C} + 0,75 \times 12,3 = 32^{\circ}\text{C} + 9,23^{\circ}\text{C}$$

2) Ljeto – gornji rub konstrukcije se hladi:

$$\Delta T_{N,exp} + \omega_M \Delta T_{M,cool} = 32^{\circ}\text{C} + 0,75 \times 8 = 32^{\circ}\text{C} + 6^{\circ}\text{C}$$

3) Zima – gornji rub konstrukcije se zagrijava:

$$\Delta T_{N,con} + \omega_M \Delta T_{M,heat} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,75 \times 12,3 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} + 9,23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4) Zima – gornji rub konstrukcije se hladi:

$$\Delta T_{N,con} + \omega_M \Delta T_{M,cool} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,75 \times 8 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C} + 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

B) Linearna temperaturna komponenta:

1) Ljeto – gornji rub konstrukcije se zagrijava:

$$\omega_N \Delta T_{N,exp} + \Delta T_{M,heat} = 0,35 \times 32 + 12,3 = 11,2 \text{ }^{\circ}\text{C} + 12,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2) Ljeto – gornji rub konstrukcije se hladi:

$$\omega_N \Delta T_{N,exp} + \Delta T_{M,cool} = 0,35 \times 32 + 8 = 11,2 \text{ }^{\circ}\text{C} + 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3) Zima – gornji rub konstrukcije se zagrijava:

$$\omega_N \Delta T_{N,con} + \Delta T_{M,heat} = 0,35 \times 12 + 13,2 = 4,20 \text{ }^{\circ}\text{C} + 12,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4) Zima – gornji rub konstrukcije se hladi:

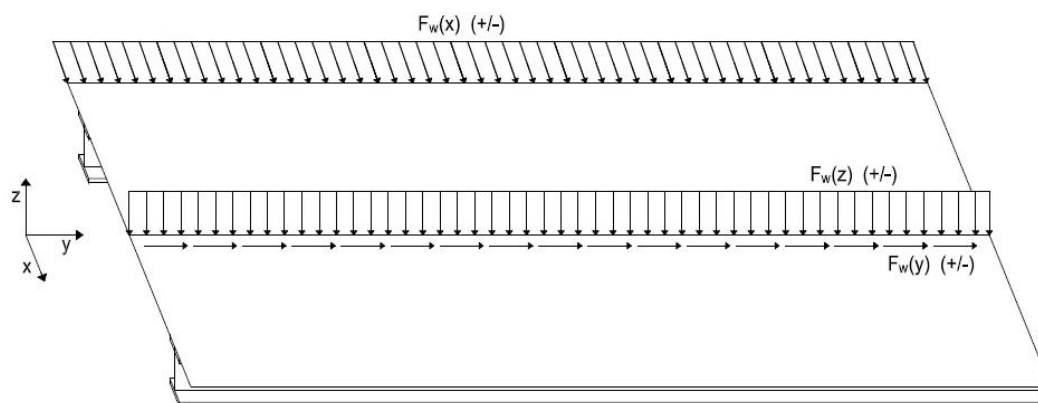
$$\omega_N \Delta T_{N,con} + \Delta T_{M,cool} = 0,35 \times 12 + 8 = 4,20 \text{ }^{\circ}\text{C} + 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.1.4. Vjetar (EN 1991-1-4)

$v_{b,0} = 20$ [m/s] očitano iz vjetrovne karte Republike Hrvatske prema HR EN 1991-1-4:2012/NA za lokaciju Drniš



Slika 15. Osnovna brzina vjetra $v_{b,0}$ za Republiku Hrvatsku [1]



3.1.4.1. Vjetar na rasponski sklop poprečno ($F_{w(x)}$)

NEOPTEREĆENI MOST:

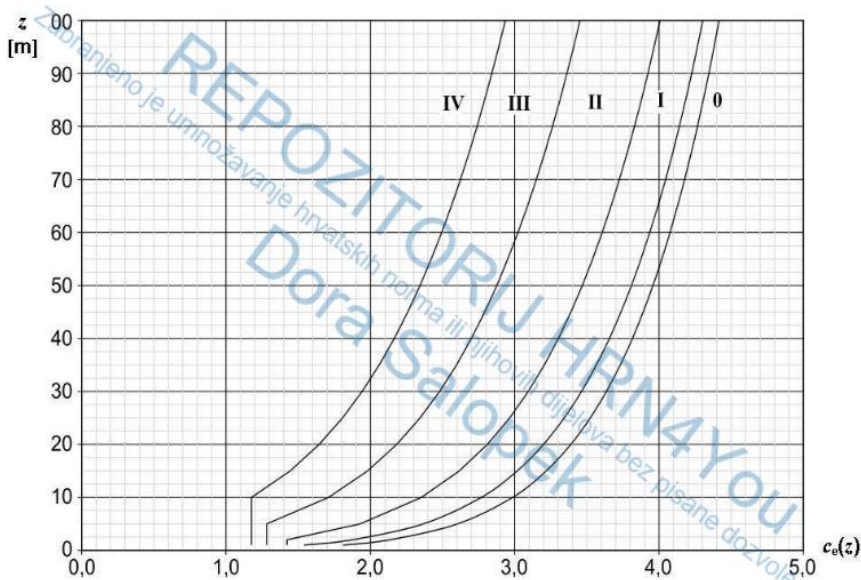
$$F_{w(x),neop} [kN/m] = q_b \cdot c_e(z) \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

$$q_b - \text{osnovni pritisak vjetra: } q_b = \frac{\delta}{2} \cdot v_b^2 = \frac{1,25}{2000} \cdot 20^2 = 0,25 [kN/m^2]$$

$$v_b - \text{osnovna brzina vjetra: } v_b [m/s] = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = v_{b,0} \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 20 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 20 [m/s]$$

$c_e(z)$ – koeficijent izloženosti prema visini na kojoj se nalazi rasponski sklop od terena i prema kategoriji terena

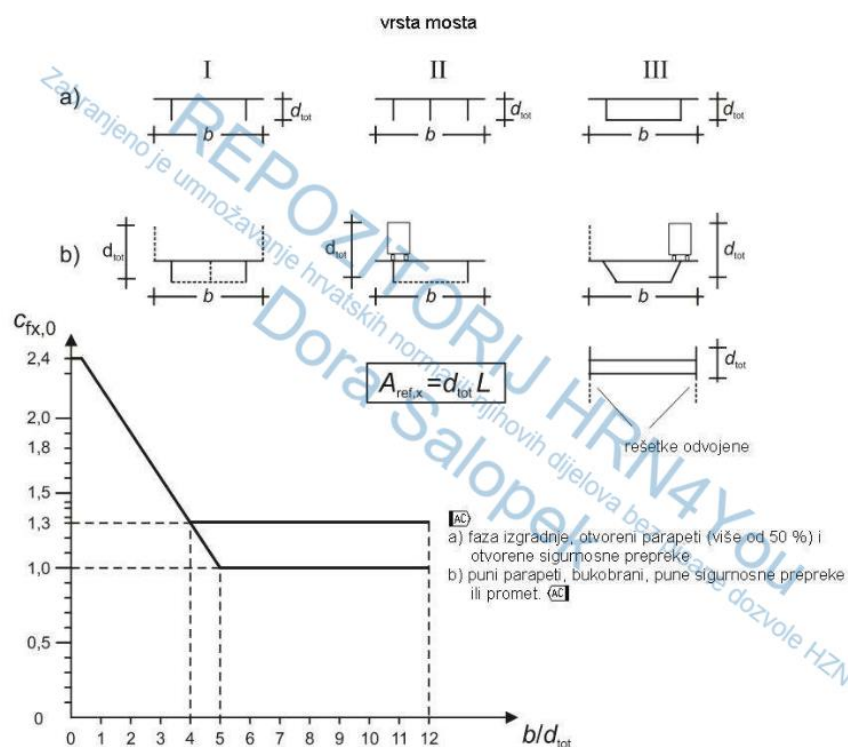
Korištenjem dijagrama faktora izloženosti prema HR EN 1991-1-4:2012 za kategoriju terena III (Površina sa niskom vegetacijom kao što je trava i izoliranim preprekama (drveće, zgrade) s minimalnim razmakom od 20 visina prepreke) i visinu $z = 7,65$ m, $c_e(z) = 1,50$.

Slika 17. Grafički prikaz faktora izloženosti $c_e(z)$ [4]

$c_{fx,0}$ – koeficijent oblika koji ovisi o obliku rasponskog sklopa, ogradama na mostu i prometu
Korištenjem dijagrama koeficijenta sile za mostove HR EN 1991-1-4:2012 ($b/d_{tot} = 11,10 / 1,40 = 7,93$) određen je koeficijent oblika $c_{fx,0} = 1,3$.

h_{ref} – referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra: $d = 1,4m + 1,1 = 2,5$ m

$$F_{w(x),neop} [kN/m] = 0,25 \cdot 1,50 \cdot 1,3 \cdot 2,5 = 1,22 [kN/m]$$

Slika 18. Koeficijent sile za mostove $c_{fx,0}$ [4]

OPTEREĆEN MOST:

$$F_{w(x),opt} [kN/m] = q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref}$$

q_p – vršni pritisak vjetra: $q_p = 0,64 [kN/m^2]$ – pri ovom vršnom pritisku most se zatvara za promet iz prometnih sigurnosnih razloga

$$q_b \cdot c_e(z) = 0,25 \cdot 1,50 = 0,38$$

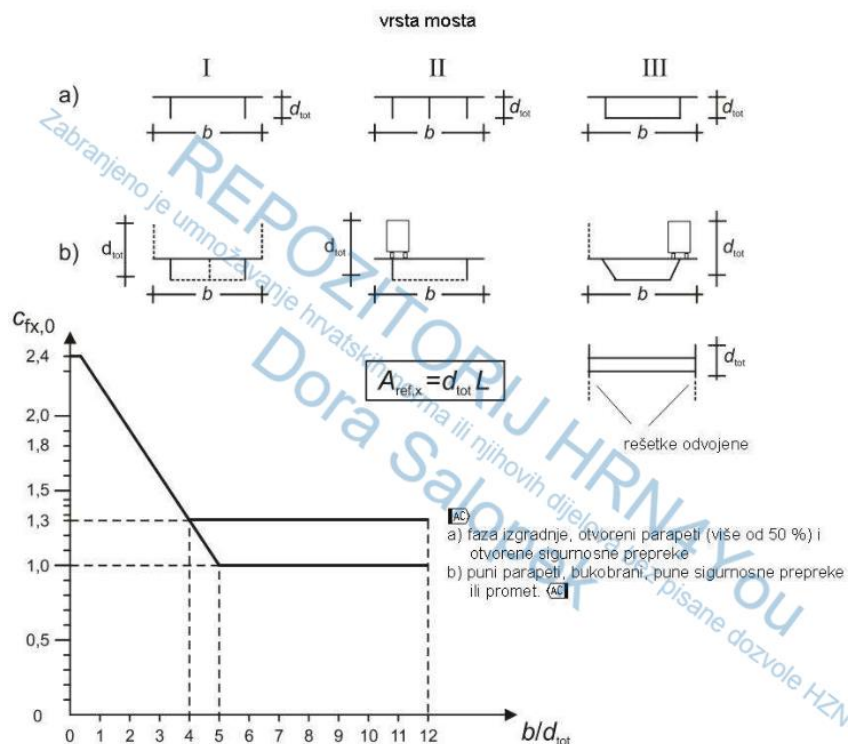
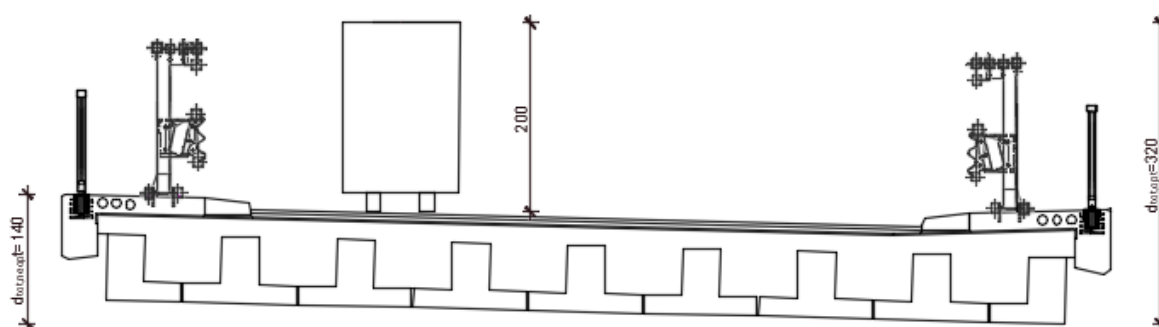
$$\min \{0,64; (q_b \cdot c_e(z))\} = \min \{0,64; 0,38\} = 0,38$$

$c_{fx,0}$ – koeficijent oblika se u slučaju opterećenog mosta računa sa krivuljom b) i odnosom

Korištenjem dijagrama koeficijenta sile za mostove HR EN 1991-1-4:2012 ($b/d_{tot} = 11,10 / 3,20 = 3,47$) određen je koeficijent oblika $c_{fx,0} = 1,45$.

h_{ref} – referentna visina sklopa na koju djeluje pritisak vjetra – jednaka visini sa vozilom d_{tot}

$$F_{w(x),opt} [kN/m] = 0,38 \cdot 1,45 \cdot 3,20 = 1,76 [kN/m]$$

Slika 19. Koeficijent sile za mostove $c_{fx,0}$ [4]

Slika 20. Referentna visina na koju djeluje pritisak vjetra

3.1.4.2. Vjetar na rasponski sklop uzdužno ($F_{w(y)}$)

NEOPTEREĆEN MOST:

$$F_{w(y),neopt} [kN/m] = 0,25 \cdot F_{w(x),neopt} = 0,25 \cdot 1,22 = 0,31 [kN/m]$$

OPTEREĆEN MOST:

$$F_{w(y),opt} [kN/m] = 0,25 \cdot F_{w(x),opt} + 0,5 \cdot q_p \cdot c_{fx,0} \cdot h_{ref,vozilo}$$

$$q_p = \text{vršni pritisak vjetra: } q_p = 0,38 [kN/m^2]$$

$$c_{fx,0} = 1,45$$

$$h_{ref,vozilo} = 2 \text{ m (visina vozila iznad kolnika)}$$

$$F_{w(y),opt} [kN/m] = 0,25 \cdot 1,76 + 0,5 \cdot 0,38 \cdot 1,45 \cdot 2 = 1,0 [kN/m]$$

3.1.4.3. Vjetar na rasponski sklop vertikalno ($F_{w(z)}$)

NEOPTEREĆEN MOST:

$$F_{w(z),neopt} [kN/m] = q_b \cdot c_e(z) \cdot c_{f,z} \cdot b$$

$$F_{w(z),neopt} [kN/m] = 0,25 \cdot 1,50 \cdot 0,9 \cdot 11,1 = 3,75 [kN/m]$$

OPTEREĆEN MOST:

$$F_{w(y),opt} [kN/m] = q_b \cdot c_{f,z} \cdot b$$

$$F_{w(y),opt} [kN/m] = 0,38 \cdot 0,9 \cdot 11,1 = 3,80 [kN/m]$$

3.1.4.4. Vjetar na stupove (poprečno i uzdužno)

$$F_w [kN/m] = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

$c_s c_d$ – konstrukcijski faktor, za stupove niže od 15 m iznosi 1,0

$q_p(z_e)$ – vršni pritisak vjetra (vrijednosti od ranije za opterećen i neopterećen most)

b – širina stupa okomito na djelovanje vjetra

c_f – koeficijent sile koji se različito određuje za pravokutne i kružne stupove

Koeficijent c_f za pravokutne stupove:

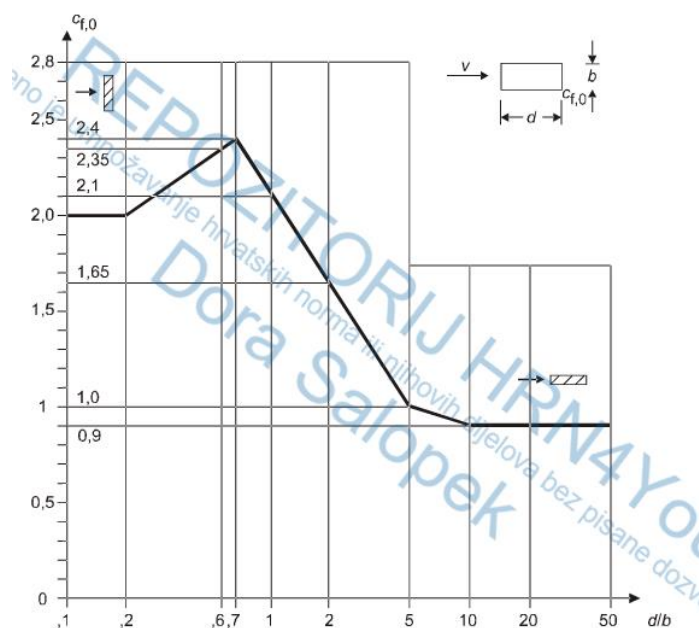
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

$c_{f,0}$ - koeficijent sile za pravokutne stupove s oštrim uglovima i bez toka preko slobodnog kraja

ψ_r - faktor smanjenja za kvadratne profile sa zaobljenim uglovima, ovisi o Reynoldsovu broju

ψ_λ - faktor učinka kraja za elemente s tokom preko slobodnog kraja

Korištenjem dijagrama koeficijenta sile za pravokutne profile s oštrim uglovima i bez toka preko slobodnog kraja prema HR EN 1991-1-4:2012 ($d/b=700/410$), $c_{f,0}=1,80$.



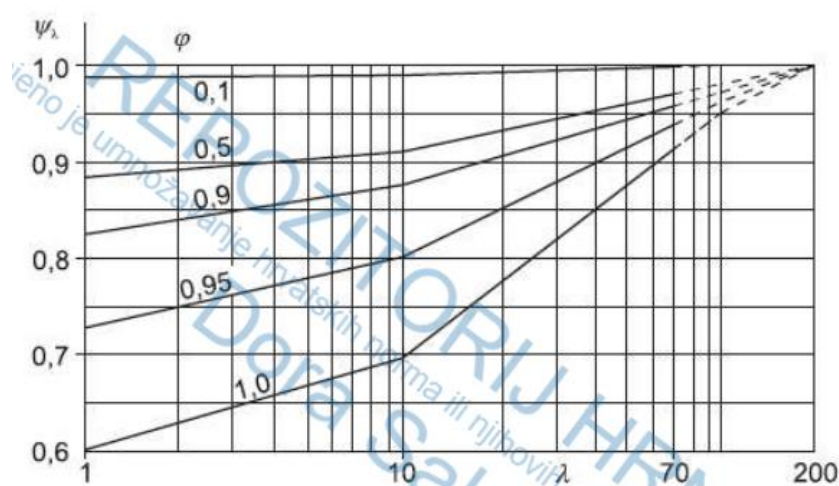
Slika 21. Koeficijenta sile za pravokutne profile s oštrim uglovima i bez toka preko slobodnog kraja prema [4]

Korištenjem tablice vrijednosti proračunske vitkosti za kružne valjke, poligonalne presjeke, pravokutne presjeke, profile s oštrim rubovima i rešetkaste konstrukcije prema HR EN 1991-1-4:2012/NA, za stupove mosta možemo pretpostaviti $\lambda=\infty$.

Položaj konstrukcije, vjetar okomito na ravninu stranice	Proračunska vitkost λ
	$\lambda = (l/b)(2/c_{f,0})$ $\lambda = (2l/b)(2/c_{f,0})$ $\lambda = \infty$

Slika 22. Vrijednosti proračunske vitkosti za kružne valjke, poligonalne presjeke, pravokutne presjeke, profile s oštrim rubovima i rešetkaste konstrukcije [4]

Korištenjem dijagrama orijentacijskih vrijednosti faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće (za stupove bez otvora $\varphi=1,0$) i vitkosti ($\lambda=\infty$) prema HR EN 1991-1-4:2012/NA, $\psi_\lambda = 1,0$.



Slika 23. Orijentacijske vrijednosti faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće (za stupove bez otvora $\varphi=1,0$) i vitkosti ($\lambda=\infty$) [4]

NEOPTEREĆEN MOST:

$$q_p(z_e) = 0,25 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 1,70 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,70$$

$$F_w \text{ [kN / m]} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,70 \cdot 0,25 \cdot 4,10 = 1,74 \text{ [kN/m]}$$

OPTEREĆEN MOST:

$$q_p(z_e) = 0,38 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

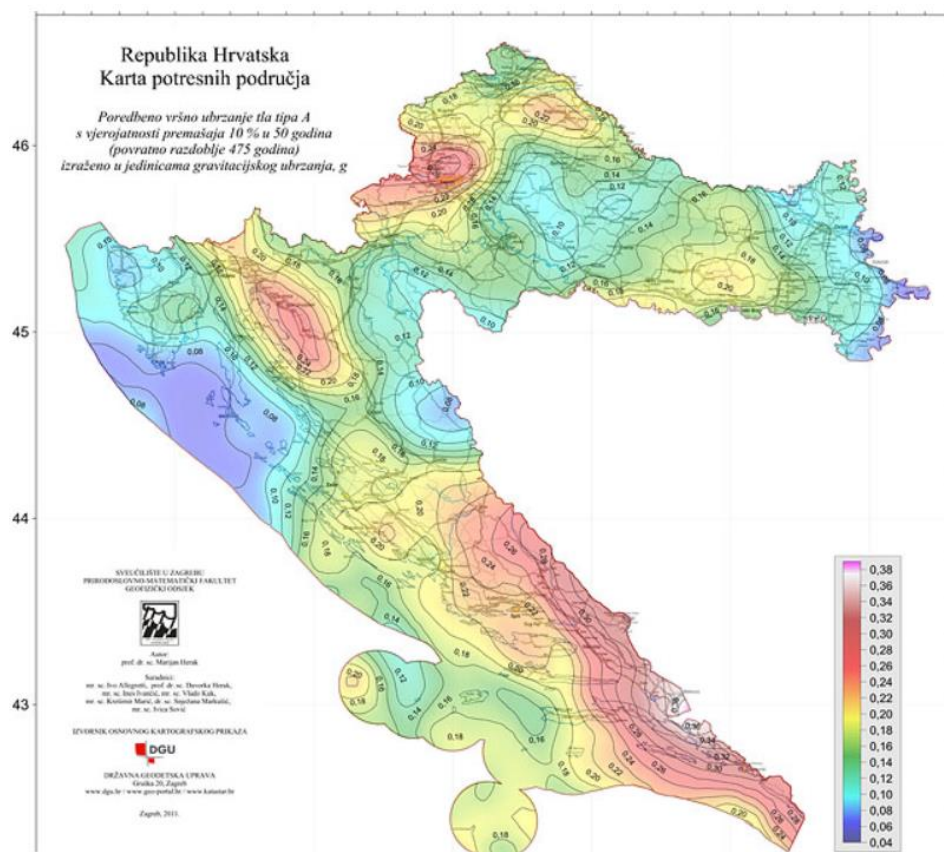
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 1,70 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,70$$

$$F_w \text{ [kN / m]} = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot b = 1,0 \cdot 1,70 \cdot 0,38 \cdot 4,10 = 2,65 \text{ [kN/m]}$$

3.1.5. Potres (EN 1998-1, EN 1998-2)

a_g – akceleracija tla očitana za povratni period $T_p = 475$ godina sa karte potresnih područja Republike Hrvatske prema HRN EN 1998-1:2011/NA

$a_g (475 \text{ god.}) = 0,242 \text{ g}$



Slika 24. Karta potresnih područja Republike Hrvatske [5]

Tablica 8. Tipovi temeljnog tla [6]

Tip temeljnog tla	Opis stratigrafskog profila
A	Stijena ili druga geološka formacija poput stijene uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini
B	Nanosi vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom
C	Duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka metara do više stotina metara
D	Nanosi rahlog tla do srednje zbijenog nekoherentnog tla (s nešto mekih koherentnih slojeva ili bez njih), ili pretežno meko no dobro koherentno tlo
E	Profil tla koji se sastoji od površinskog aluvijskog sloja s vrijednostima v_s za tipove C ili D i debljinama između 5 i 20 m ispod kojeg je kruti materijal s $v_s > 800 \text{ m/s}$

Odabrana kategorija tla A.

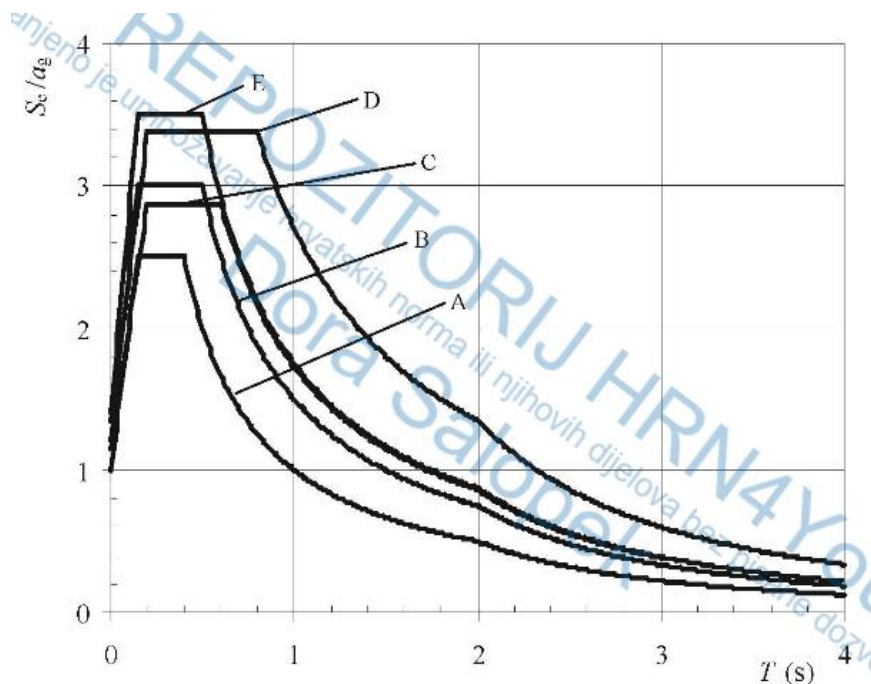
Prema odabranoj kategoriji tla slijede parametri za definiciju spektra:

Tablica 9. Vrijednosti parametara koji opisuju elastični spektar odziva tipa 1 [6]

Horizontalni spektar Tip 1	S	T_B	T_C	T_D
A	1,0	0,15	0,4	2,00

Tablica 10. Vrijednosti parametara koji opisuju vertikalni elastični spektar odziva [6]

Vertikalni spektar	a_{vg}/a_g	T_B	T_C	T_D	S
Tip 1	0,9	0,05	0,15	1,0	1,00



Slika 25. Preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 za temeljna tla tipa A do E (5%-tno prigušenje) [6]

Proračunski horizontalni i vertikalni spektar određuje se prema iskazanim parametrima tla i akceleracije i prema izrazima:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_B : S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \\
 T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) &\begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \\
 T_D \leq T : S_d(T) &\begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad \beta=0,2
 \end{aligned}$$

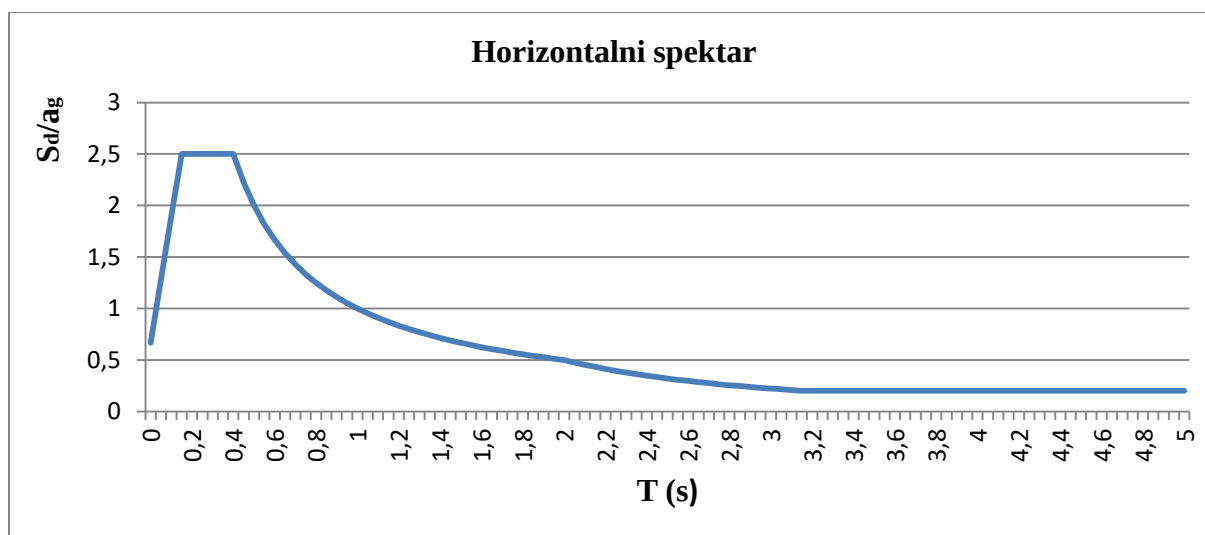
Pretpostaviti će se elastično neduktilno ponašanje stupova (kratki i jaki stupovi sa velikom tlačnom silom) bez mogućnosti razvijanja plastičnih zglobova pa je u tom slučaju faktor ponašanja $q=1,0$.

Faktor važnosti za most uzet je 1,0.

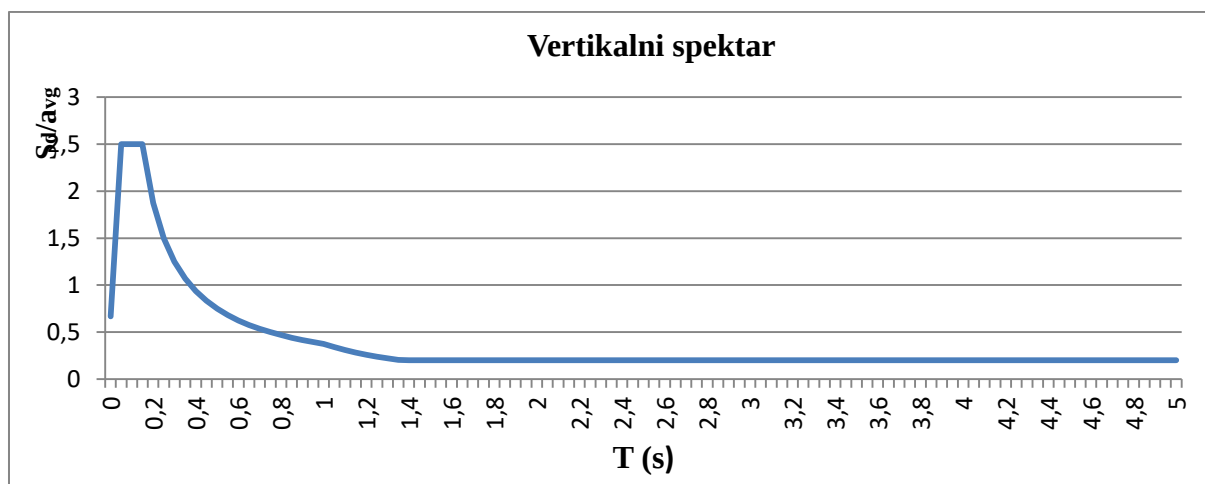
Tablica vrijednosti odziva $S_d(T)$ za periode $T < 0,4$ s i grafički prikaz dijagramom za horizontalni i vertikalni proračunski spektar:

Tablica 11. Vrijednosti odziva $S_d(T)$

	T	a_g (0,152g)	S	q	Sd,hor	Sd,ver	Sd,hor/a g	Sd,ver/a g
$0 \leq T \leq T_B$	0	2,374	1,00	1,00	1,5827	1,4244	0,6667	0,6667
$T_B \leq T \leq T_C$	0,4	2,374	1,00	1,00	5,9351	2,0031	2,5000	0,9375
$T_C \leq T \leq T_D$	0,8	2,374	1,00	1,00	2,9675	1,0015	1,2500	0,4688
	1,2	2,374	1,00	1,00	1,9784	0,5564	0,8333	0,2604
	1,6	2,374	1,00	1,00	1,4838	0,4273	0,6250	0,2000
$T_D \leq T$	2	2,374	1,00	1,00	1,1870	0,4273	0,5000	0,2000
	2,4	2,374	1,00	1,00	0,8243	0,4273	0,3472	0,2000
	2,8	2,374	1,00	1,00	0,6056	0,4273	0,2551	0,2000
	3,2	2,374	1,00	1,00	0,4748	0,4273	0,2000	0,2000
	3,6	2,374	1,00	1,00	0,4748	0,4273	0,2000	0,2000
	4	2,374	1,00	1,00	0,4748	0,4273	0,2000	0,2000
	4,4	2,374	1,00	1,00	0,4748	0,4273	0,2000	0,2000
	4,75	2,374	1,00	1,00	0,4748	0,4273	0,2000	0,2000



Slika 26. Horizontalni spektar odgovora

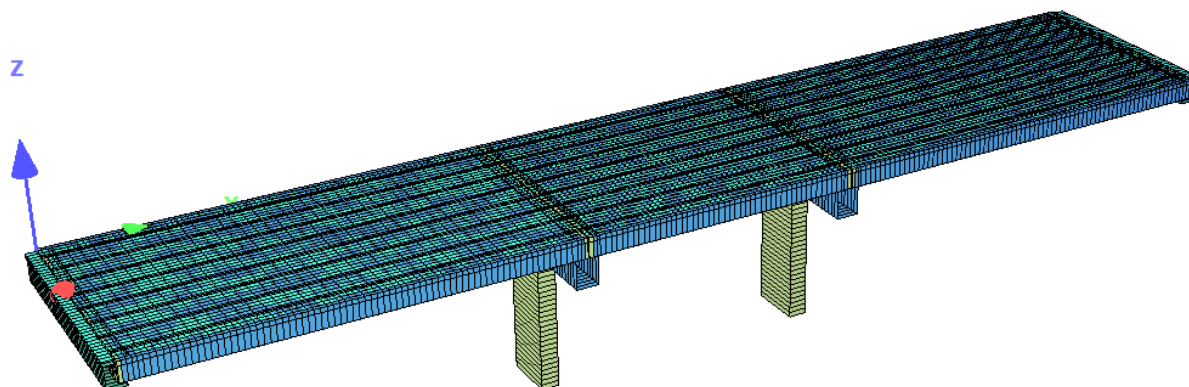


Slika 27. Vertikalni spektar odgovora

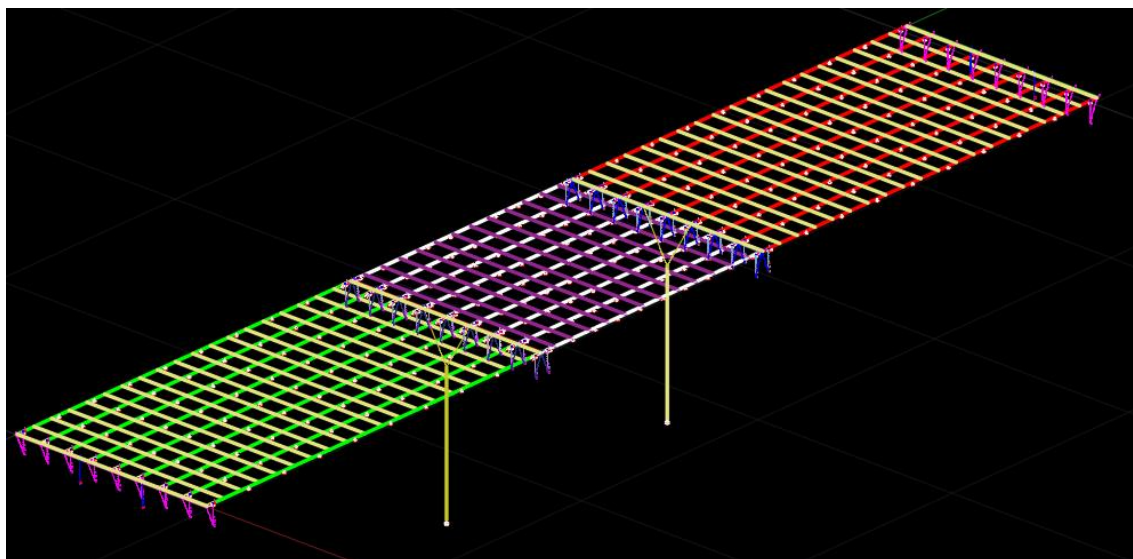
Djelovanje potresa uzeto je u obzir u modelu mosta, te je zadan prema svojim karakteristikama, no kako nije predmet ovog diplomskog rada u daljnjem proračunu nije uzet u obzir.

3.2. Statički model za globalni proračun

3.2.1. Opis načina modeliranja i elemenata modela



Slika 28. Model mosta



Slika 29. Roštiljni model mosta u Softplus-u

- **Općenito (ukupna duljina, prepreka, slobodni profil)**

Izvodi se prednapeti gredni betonski most u blizini Drniša ukupne duljine 61,94 m. Projekt je zamišljen kao nadvožnjak koji prevodi brzu cestu preko prometnice i željeznice s visinama slobodnih profila od 6,225 m, tj. 5,563 m. Niveleta mosta je konveksno zakrivljena radijusa $R = 400000$ m. Most je izveden kao kontinuirani nosač preko tri raspona s dva veća rubna raspona duljine 19 m, te srednjim rasponom duljine 12,5 m.

- **Opis gornjeg ustroja (poprečni presjek, statički sustav, materijali, izvedba)**

Poprečni presjek mosta sastoji se od sedam obrnutih T nosača sa punim kontinuitetom nad osloncima i kvalitetom materijala C 50/60, te dva rubna L nosača sa punim kontinuitetom nad osloncima i kvalitetom materijala C 50/60. Obrnuti T nosači su visine 70 cm, širine gornjeg pojasa 40 cm, te donjeg 120 cm. Rubni L nosači su visine 70 cm, širine gornjeg pojasa 40 cm, te donjeg 80 cm. Ukupna širina poprečnog presjeka iznosi 11,10 m. Promet mosta odvija se u dva smjera, a širina voznog traka sa svake strane je 3,25 m dok je širina pješačke ili revizione staze 0,75 m. Nosač tijekom izvedbe prolazi kroz dvije faze. U prvoj fazi se nalazi kao prosta greda oslonjena na naglavnu gredu i poprečni nosač nad upornjakom. Dakle, njegovu čitavu težinu, i težinu svježeg betona kolničke ploče preuzima sustav proste grede. U drugoj fazi se nalazi kao kontinuirani nosač preko tri raspona kada se izbetonira prazan prostor između nosača nad stupom i upornjakom. Nakon ostvarivanja kontinuiteta

sva daljnja djelovanja biti će preuzeta sustavom kontinuiranog nosača. Tu spadaju djelovanja dodatnog stalnog, prometa, vjetra, potresa, temperature... Izvedba punog kontinuiteta se ostvaruje izvedbom jedne naglavne grede nad stupom koja je zajednička za sve nosače lijevog i desnog raspona, te poprečnog nosača nad upornjakom. Širina poprečnog nosača i naglavne grede mora biti tolika da dozvoli naližeganje uzdužnih nosača sa svake strane od barem 30 cm, i dodatan prostor između njih u kojem se može ostvariti nastavljanje kontinuitetne armature za prijenos momenta iznad oslonca. Koriste se predgotovljeni armirano betonski prethodno prednapeti nosači. Poprečni nosači razreda betona C 35/45 visine su 100 cm i širine 80 cm nad upornjakom. Naglavne grede razreda betona C 35/45 visine su 140 cm i širine 100 cm. Korišten je armaturni čelik B500B. Čelik za prednapinjanje je 1640/1860. Koristi se sustav prednapinjanja DYWIDAG i to uže od 7 žica, pri čemu je promjer užeta $d_p=15.7$ mm, a površina poprečnog presjeka užeta $A_p=150$ mm². Iznad predgotovljenih T nosača nalazi se in situ kolnička ploča kvalitete materijala C35/45 i promjenjive debljine 20 do 70 cm. Iznad kolničke ploče postavlja se hidroizolacija i 8 cm habajućeg sloja.

- **Opis provedenog proračuna (model za proračun, opterećenja, kombinacije)**

Konstrukcija je modelirana korištenjem štapnog roštiljnog modela pomoću programskog paketa „SOFISTIK.“ Djelovanje nosivog sustava je modelirano pomoću roštiljnog modela, gdje su betonski nosači, zajedno s dijelom betonske ploče određene širine za koju se smatra da nosi zajedno s nosačem, zamijenjeni štapom ekvivalentnih statičkih karakteristika, a poprečno djelovanje ploče zamijenjeno je štapovima poprečnim na glavne. Fiktivni poprečni nosači postavljaju se jer u stvarnosti betonska ploča ima značajnu krutost u oba horizontalna smjera. Rezultat toga je kvalitetnija preraspodjela opterećenja između uzdužnih nosača te se stoga uzima u obzir u modelu, ali bez težine jer je ona već uzeta u obzir pločom u uzdužnom smjeru. Na taj se način osigurava realnija raspodjela opterećenja nego u slučaju bez fiktivnih poprečnih štapova. Osim toga, u poprečnom smjeru dodani su poprečni nosači koji se nalaze nad upornjacima kao štapovi. Radi toga što je proračun proveden metodom konačnih elemenata, štapovi su podijeljeni u veći broj pomoću čvorova koji su postavljeni svakih 1 metar u uzdužnom smjeru.

Napravljen je proračun analize opterećenja za vlastitu težinu mosta (program sam računa), dodatno stalno, prometno opterećenje, vjetar, temperaturu i potres. Dodatna težina nenosivih elemenata kao što su hodnik, vijenac, kolnik, ograde i hidroizolacija uzeti su u obzir te ovisno o vrsti ubačeni u model kao površinsko ili linijsko opterećenje. Opterećenja vjetrom uzeta su za sva tri smjera (dva horizontalna i uzgon) prema normi, a promatrana je situacija kada se na mostu odvija promet i kada se ne odvija promet. U modelu je opterećenje izraženo linijskim po dužini mosta, a opterećuju se betonski nosači. Temperatura je sukladno lokaciji i uvjetima koji su postavljeni na izvedbu mosta izračunata i nanesena u model. Razmatrala se jednolika i nejednolika temperatura, kao i njihova kombinacija. Opterećenje prometom razmatrano je za model opterećenja 1 prema kojem se most po širini dijeli u trake. Glavna traka opterećena je kontinuiranim opterećenjem od 9 kN/m^2 te dvjema koncentriranim silama od kojih svaka iznosi 150 kN na razmaku od 2 m. Traka je širine 3,25 m, a koncentrirane sile su centrirane u traci. Ostale trake su također opterećene, ali drukčijim opterećenjem, što je detaljnije prikazano analizi opterećenja. Zasebno je zadano kontinuirano, a zasebno tandem vozila (koncentrirane sile). Na kraju su u proračunu kombinirane trake tako da daju najnepovoljniju situaciju za proračun. Potres je proračunat korištenjem višemodalne spektralne analize. Za te je potrebe očitana vrijednost ubrzanja tla za lokaciju mosta i

karakteristike tla. Program Sofistik je sam na temelju podataka o konstrukciji izračunao modalne mase i krutosti te proveo dinamički proračun. Kao rezultat dobiveni su oblici osciliranja.

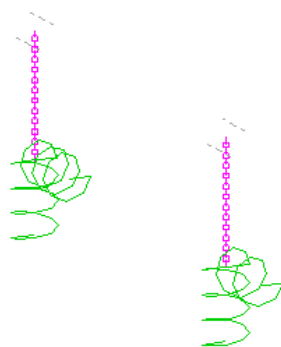
Mjerodavna kombinacija za GSN je stalna proračunska situacija, a za GSU česta, nazovistalna i rijetka. Nije provedeno dimenzioniranje za GSN i GSU, te ostale provjere naprezanja, dekompresije i raspucalosti presjeka u paketu Sofistik. Poanta modela je bila dobiti mjerodavne unutrašnje sile i momente od pojedinog opterećenja za rasponski sklop te ručno izračunati kombinacije opterećenja i prednapinjanje, te na temelju tih podataka proračunati granično stanje nosivosti i uporabivosti.

- **Ležajevi (stalni i privremeni)**

Lončasti ležajevi se nalaze nad upornjacima, a nad stupovima je upeta veza nosača i naglavne grede. Ležajevi nad upornjacima su modelirani tako da im je spriječen pomak u vertikalnom (GRP 68) i poprečnom smjeru (GRP 69), a slobodan pomak u uzdužnom smjeru jer će uzdužne horizontalne reakcije preuzeti stupovi.

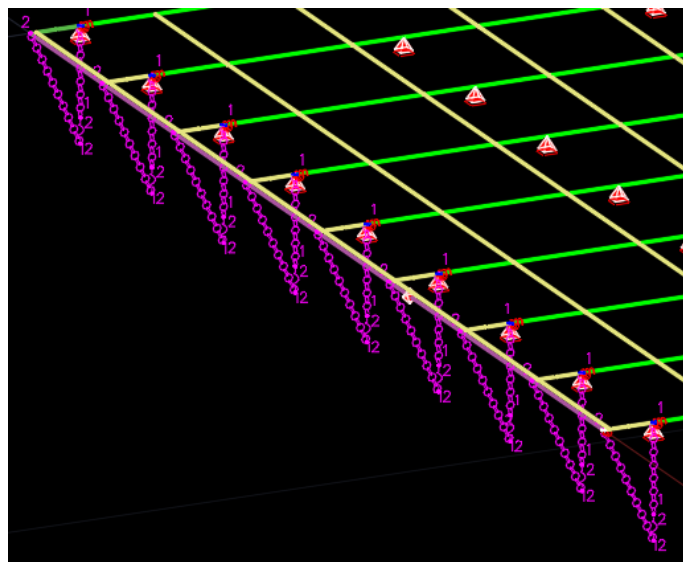


Slika 30. Dispozicija ležajeva

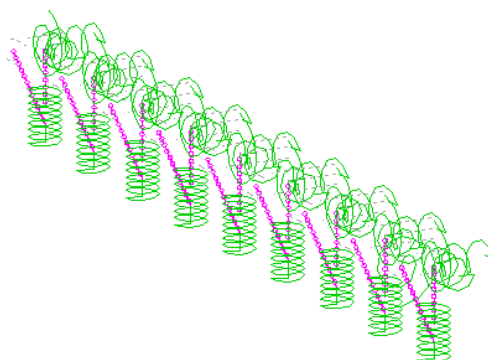


Slika 31. Stalni ležajevi nad upornjakom

Pomoćni ležajevi nad upornjakom koriste se za stabilizaciju nosača u prvoj fazi izvedbe, odnosno kada je statički sustav nosača prosta greda. Opruge za stabilnost sustava u uzdužnom smjeru (GRP 81) koje sadrže i torzijsku krutost te na taj način sprječavaju rotaciju nosača oko svoje osi i opruge za stabilnost u poprečnom smjeru (GRP 80) postavljaju se na kraj proste grede. KF veza na tom mjestu služi da se poveže čvor u osi nosača sa čvorom na dnu nosača (GRP 75), te na kraju KF veze dolazi opruga za stabilnost nosača u vertikalnom smjeru (GRP 76). KF vezom (GRP 77) povezuje se čvor na dnu nosača sa čvorom u osi poprečnog nosača nad upornjakom. Na poziciji poprečnog nosača nad upornjakom nalazi se opruga (GRP 95) za pridržanje poprečnog nosača u uzdužnom smjeru u fazi njegove izvedbe. Također duž nosača postavljeni su ležajevi za stabilnost u vertikalnom smjeru (GRP 70) dok nosač ne očvrsne i nije u stanju nositi vlastitu težinu.

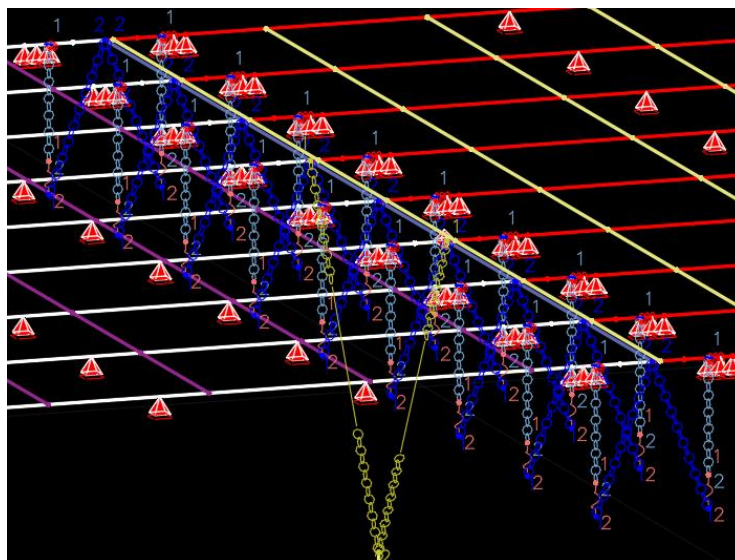


Slika 32. Pomoćni ležajevi nad upornjakom u modelu

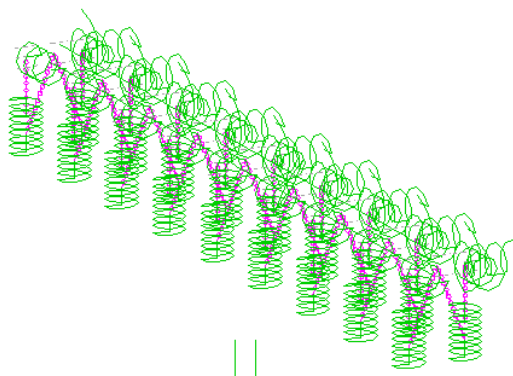


Slika 33. Pomoćni ležajevi nad upornjakom

Isti princip se primijenio i na pomoćne ležajeve nad stupom, osim što opruge za stabilnost sustava u uzdužnom smjeru (GRP 81) se postavljaju na početak svakog nosača, a na kraju nosača ih nema jer nam je dovoljno ih imati na jednom kraju nosača da bude dovoljna stabilnost. KF vezom (GRP 12) povezuju se čvor na vrhu stupa sa dva čvora u osi naglavne grede zbog stabilnosti u fazi izvedbe.



Slika 34. Pomoćni ležajevi nad stupom u modelu

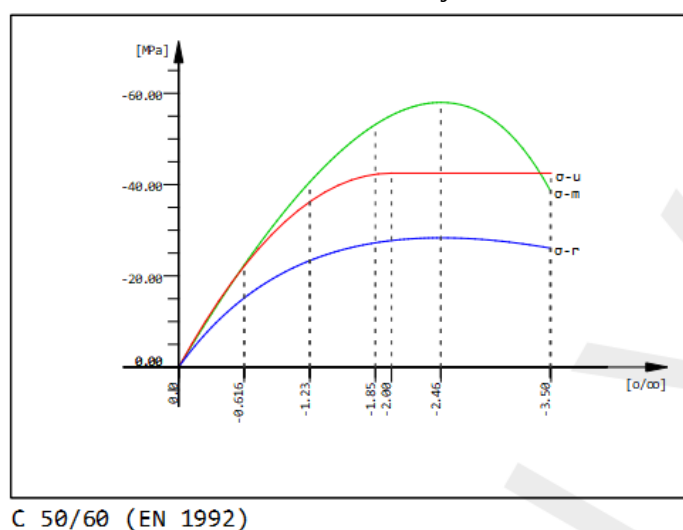


Slika 35. Pomoćni ležajevi nad stupom

3.2.2. Materijali

Mat	Classification
1	C 50/60 (EN 1992)
2	B 500 B (EN 1992)
3	C 35/45 (EN 1992)-PLOČA
4	B 500 B (EN 1992)-PLOČA
5	C 35/45 (EN 1992)-FIKTIVNE PLOČE
6	B 500 B (EN 1992)-fiktivne ploče
7	C 40/50 (EN 1992)-STUP
8	C 35/45 (EN 1992)-NAGLAVNA GREDA
9	B 500 B (EN 1992)-NAGLAVNA GREDA
10	B 500 B (EN 1992)-STUP
11	C 35/45 (EN 1992)-POPREČNI NOSAČ
12	B 500 B (EN 1992)-poprečno nosač

Slika 36. Materijali



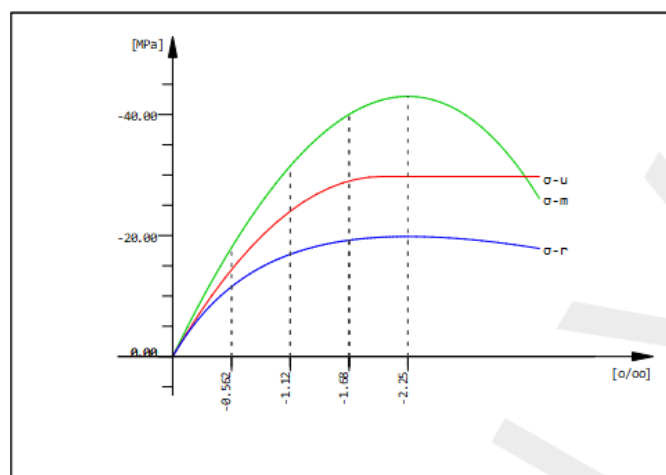
C 50/60 (EN 1992)

Slika 37. Dijagram naprezanje- deformacija betona C50/60

Mat 1 C 50/60 (EN 1992)

Young's modulus	E	37278	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	f _c	42.50	[MPa]
Shear modulus	G	15532	[N/mm ²]	Nominal strength	f _{ck}	50.00	[MPa]
Compression modulus	K	20710	[N/mm ²]	Tensile strength	f _{ctm}	4.07	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,05}	2.85	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,95}	5.29	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	f _{bd}	4.28	[MPa]
				Service strength	f _{cm}	58.00	[MPa]
				Fatigue strength	f _{cd,fat}	22.67	[MPa]
				Tensile strength	f _{ctd}	1.90	[MPa]
				Tensile failure energy	G _f	0.15	[N/mm]

Slika 38. Beton glavnih nosača



C 35/45 (EN 1992)

Slika 39. Dijagram naprezanje- deformacija betona C35/40

Mat 3 C 35/45 (EN 1992)-PLOČA

Young's modulus	E	34077	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	f _c	29.75	[MPa]
Shear modulus	G	14199	[N/mm ²]	Nominal strength	f _{ck}	35.00	[MPa]
Compression modulus	K	18932	[N/mm ²]	Tensile strength	f _{ctm}	3.21	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,05}	2.25	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,95}	4.17	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	f _{bd}	3.37	[MPa]
				Service strength	f _{cm}	43.00	[MPa]
				Fatigue strength	f _{cd,fat}	17.06	[MPa]
				Tensile strength	f _{ctd}	1.50	[MPa]
				Tensile failure energy	G _f	0.14	[N/mm]

Slika 40. Beton kolničke polče

Mat 5 C 35/45 (EN 1992)-FIKTIVNE PLOČE

Young's modulus	E	34077	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	f _c	29.75	[MPa]
Shear modulus	G	14199	[N/mm ²]	Nominal strength	f _{ck}	35.00	[MPa]
Compression modulus	K	18932	[N/mm ²]	Tensile strength	f _{ctm}	3.21	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,05}	2.25	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,95}	4.17	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	f _{bd}	3.37	[MPa]
				Service strength	f _{cm}	43.00	[MPa]
				Fatigue strength	f _{cd,fat}	17.06	[MPa]
				Tensile strength	f _{ctd}	1.50	[MPa]
				Tensile failure energy	G _f	0.14	[N/mm]

Slika 41. Beton fiktivnih štapova za ostvarenje roštiljnog djelovanja

Mat 8 C 35/45 (EN 1992)-NAGLAVNA GREDA

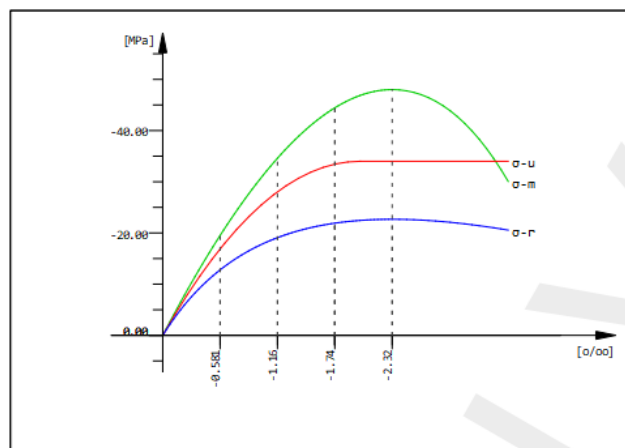
Young's modulus	E	34077	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	f _c	29.75	[MPa]
Shear modulus	G	14199	[N/mm ²]	Nominal strength	f _{ck}	35.00	[MPa]
Compression modulus	K	18932	[N/mm ²]	Tensile strength	f _{ctm}	3.21	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,05}	2.25	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	f _{ctk,95}	4.17	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	f _{bd}	3.37	[MPa]
				Service strength	f _{cm}	43.00	[MPa]
				Fatigue strength	f _{cd,fat}	17.06	[MPa]
				Tensile strength	f _{ctd}	1.50	[MPa]
				Tensile failure energy	G _f	0.14	[N/mm]

Slika 42. Beton naglavne grede

Mat 11 C 35/45 (EN 1992)-POPREČNI NOSAČ

Young's modulus	E	34077	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	fc	29.75	[MPa]
Shear modulus	G	14199	[N/mm ²]	Nominal strength	fck	35.00	[MPa]
Compression modulus	K	18932	[N/mm ²]	Tensile strength	fctm	3.21	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	fctk,05	2.25	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	fctk,95	4.17	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	fbd	3.37	[MPa]
				Service strength	fcsm	43.00	[MPa]
				Fatigue strength	fcd,fat	17.06	[MPa]
				Tensile strength	fctd	1.50	[MPa]
				Tensile failure energy	Gf	0.14	[N/mm]

Slika 43. Beton poprečnog nosača



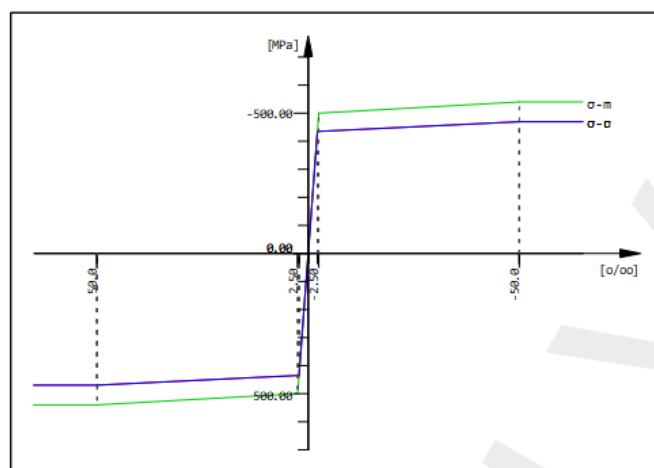
C 40/50 (EN 1992)

Slika 44. Dijagram naprezanje- deformacija betona C40/50

Mat 7 C 40/50 (EN 1992)-STUP

Young's modulus	E	35220	[N/mm ²]	Safetyfactor		1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength	fc	34.00	[MPa]
Shear modulus	G	14675	[N/mm ²]	Nominal strength	fck	40.00	[MPa]
Compression modulus	K	19567	[N/mm ²]	Tensile strength	fctm	3.51	[MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	fctk,05	2.46	[MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	fctk,95	4.56	[MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	fbd	3.68	[MPa]
				Service strength	fcsm	48.00	[MPa]
				Fatigue strength	fcd,fat	19.04	[MPa]
				Tensile strength	fctd	1.64	[MPa]
				Tensile failure energy	Gf	0.15	[N/mm]

Slika 45. Beton stupa



Slika 46. Dijagram naprezanje - deformacija čelika B500B

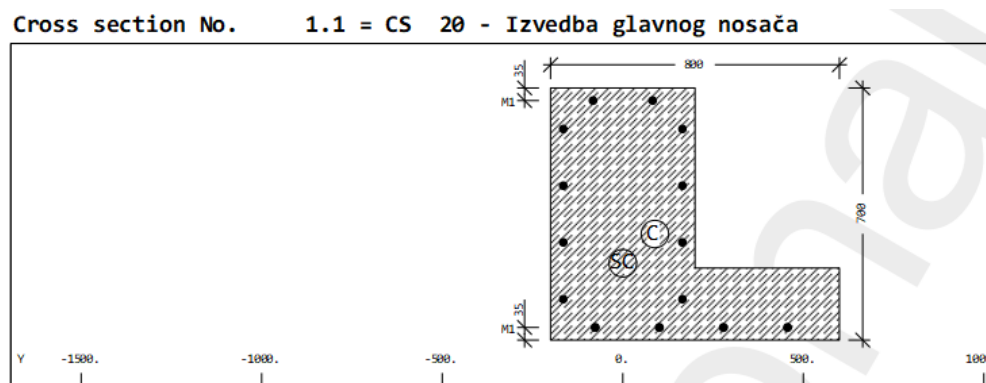
Young's modulus	E	200000	[N/mm ²]	Safetyfactor	1.15	[-]
Poisson's ratio	μ	0.30	[-]	Yield stress	f _y	500.00 [MPa]
Shear modulus	G	76923	[N/mm ²]	Compressive yield	f _{yc}	500.00 [MPa]
Compression modulus	K	166667	[N/mm ²]	Tensile strength	f _t	540.00 [MPa]
Nominal Weight	γ	78.5	[kN/m ³]	Compressive strength	f _c	540.00 [MPa]
Mean density	ρ	7850.0	[kg/m ³]	Ultimate strain	50.00	[‰]
Elongation coefficient	α	1.20E-05	[1/K]	relative bond coeff.	1.00	[-]
max. thickness	t-max	32.00	[mm]	EN 1992 bond coeff.	k ₁	0.80 [-]
				Hardening modulus	E _h	0.00 [MPa]
				Proportional limit	f _p	500.00 [MPa]
				Dynamic allowance	σ-dyn	152.17 [MPa]

Slika 47. Armaturni čelik

3.2.3. Poprečni presjeci

Zbog malog razmaka između glavnih nosača sudjelujuća širina ploče odgovara širini pojasnice glavnog nosača.

Pri modeliranju nosač prolazi kroz dvije faze. U prvoj fazi „CS 20: Izvedba glavnog nosača“, nosač nosi vlastitu težinu svježeg betona. U drugoj „spregnutoj fazi“ na nosač se dobetonira kolnička ploča, te tada postaje spregnuti presjek, nosač nosi i težinu svježeg betona ploče. U konačnici kada prođe faza pužanja i skupljanja cjelovitog presjeka, presjek nosi dodatno stalno opterećenje.



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
1	3.6000E-01	2.266E-01	1.559E-02	88.9	0.1	37278	900.0	2.141E-02
2	1.123E-02	2.423E-01	1.476E-02	405.6	486.6	15532	(BEAM)	8.936E-03
			6.222E-03					-43.08

Mat	material number	yc[mm],zc[mm]	ordinate of elastic centroid
A[m ²]	sectional area	ysc[mm],zsc[mm]	ordinate of shear centre
Ay[m ²],Az[m ²],Ayz[m ²]	transverse shear deformation area	E[N/mm ²]	Young's modulus
Iy[m ⁴],Iz[m ⁴],Iyz[m ⁴]	bending moment of inertia	g[kg/m]	weight per length
I-1[m ⁴],I-2[m ⁴],α[°]	principal moments of inertia and angle of the principal axes		
MRf	reinforcement material number		
It[m ⁴]	torsional moment of inertia		
G[N/mm ²]	Shear modulus		

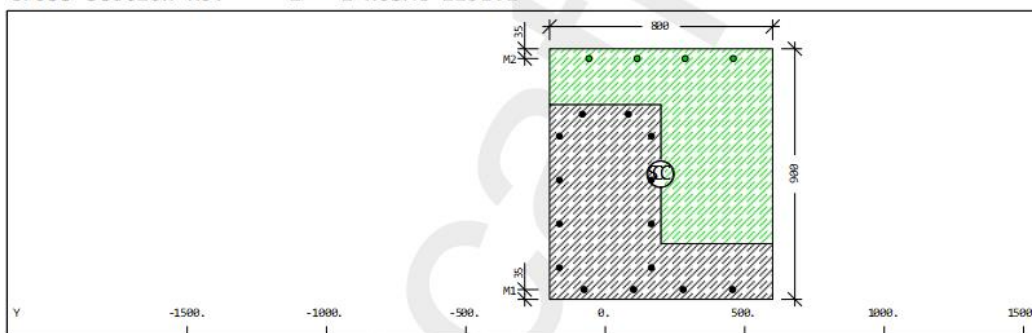
Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-288.9	-405.6	420.1	1.944E-01	2	3.217E+01	9.094E+00
	511.1	294.4	394.1	3.600E-01		4.691E+01	6.606E+00

α-T[1/K]	Elongation coefficient
ymin[mm],zmin[mm],ymax[mm],zmax[mm]	extreme coordinates relative to centroid
hymin[mm],hzmin[mm]	minimum value for internal lever
AK[m ²]	torsional equivalent area (Bredt)
MRs	transverse reinforcements material number
1/WT[1/m ³],1/WT2[1/m ³]	torsional resistance
1/WVy[1/m ²],1/WVz[1/m ²]	shear force resistance
AB[m ²]	gross concrete area

Slika 48. Izvedba „L“ nosača (lijevo)

Cross section No. 1 - L NOSAČ LIJEVI



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
1	7.4733E-01	5.730E-01	5.142E-02	196.0	199.8	37278	1800.0	5.142E-02
2	7.264E-02	6.054E-01	3.979E-02	250.8	250.0	15532	(BEAM)	3.979E-02
			-1.253E-04					0.62

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRS	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-396.0	-450.8	536.2	3.744E-01	2	7.627E+00	2.127E+00
	404.0	449.2	638.2	7.200E-01		3.182E+01	2.107E+00

Section values for warping

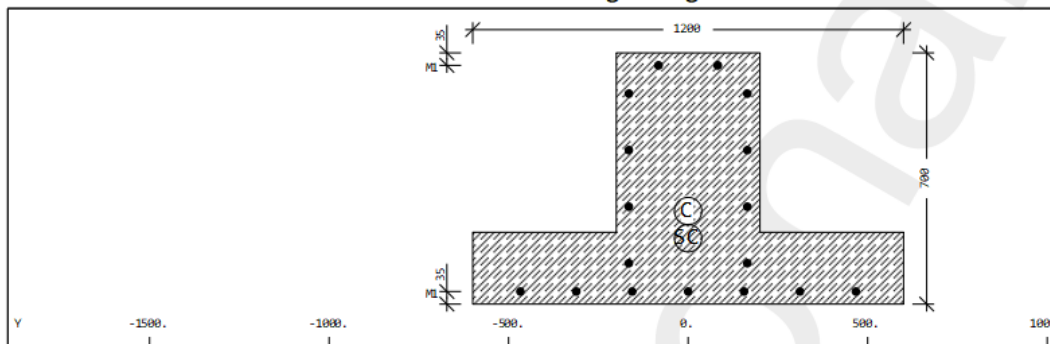
wmin[m ²]	wmax[m ²]	CM[m ⁶]	CMS[m ⁴]	ASwyy[m ⁶]	ASwzz[m ⁶]	ry[mm]	rz[mm]
-0.0385	0.0385	8.505E-05	0.005	1.581E-07	1.690E-08	-26.1	-58.7

Partial cross sections

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]				α[°]
1	3.6000E-01	2.846E-01	1.559E-02	88.9	37278	900.0	2.141E-02
2	3.632E-02	3.061E-01	1.476E-02	405.6	15532		8.936E-03
			6.222E-03				-43.08
3	3.6000E-01	2.884E-01	1.559E-02	311.1	37278	900.0	2.141E-02
4	3.632E-02	2.993E-01	1.476E-02	94.4	15532		8.936E-03
			6.222E-03				-43.08

Slika 49. Poprečni presjek „L“ nosača (lijevo)

Cross section No. 2.1 = CS 20 - Izvedba glavnog nosača



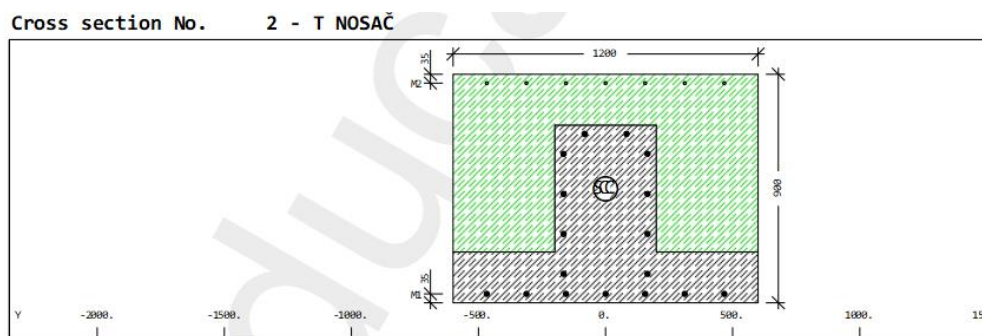
Static properties of cross section

Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm2]	g[kg/m]	I-1[m4]
MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm2]		I-2[m4]
		Ayz[m2]	Iyz[m4]					α[°]
1	4.4000E-01	2.773E-01	1.833E-02	0.0	0.0	37278	1100.0	3.147E-02
2	1.276E-02	2.094E-01	3.147E-02	440.9	516.4	15532	(BEAM)	1.833E-02
Mat	material number			yc[mm],zc[mm]		ordinate of elastic centroid		
A[m2]	sectional area			ysc[mm],zsc[mm]		ordinate of shear centre		
Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2]	transverse shear deformation area			E[N/mm2]		Young's modulus		
Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4]	bending moment of inertia			g[kg/m]		weight per length		
I-1[m4],I-2[m4],α[°]	principal moments of inertia and angle of the principal axes							
MRf	reinforcement material number							
It[m4]	torsional moment of inertia							
G[N/mm2]	Shear modulus							

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-600.0	-440.9	684.1	2.334E-01	2	2.804E+01	6.376E+00
	600.0	259.1	471.5	4.400E-01		2.146E+01	7.187E+00
α-T[1/K]	Elongation coefficient						
ymin[mm],zmin[mm],ymax[mm],zmax[mm]	extreme coordinates relative to centroid						
hymin[mm],hzmin[mm]	minimum value for internal lever						
AK[m ²]	torsional equivalent area (Bredt)						
MRs	transverse reinforcements material number						
1/WT[1/m ³],1/WT2[1/m ³]	torsional resistance						
1/WVy[1/m ²],1/WVz[1/m ²]	shear force resistance						
AB[m ²]	gross concrete area						

Slika 50. Izvedba „obrnutog T“ nosača



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
1	1.1081E+00	8.994E-01	7.584E-02	0.0	0.0	37278	2700.0	1.312E-01
2	1.582E-01	9.156E-01	1.312E-01	252.8	250.0	15532	(BEAM)	7.584E-02
			-1.671E-10					90.00

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-600.0	-452.8	810.2	5.558E-01	2	4.453E+00	1.403E+00
	600.0	447.2	637.2	1.080E+00		1.002E+01	1.375E+00

Section values for warping

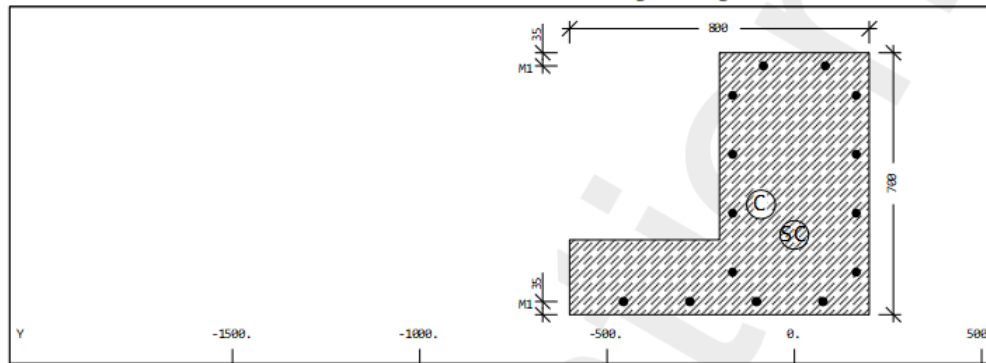
Wmin[m2]	Wmax[m2]	CM[m6]	CMS[m4]	ASwyy[m6]	ASwzz[m6]	ry[mm]	rz[mm]
-0.0843	0.0843	8.317E-04	0.019	-1.014E-11	-1.760E-10	0.0	-55.8
Wmin[m2],Wmax[m2]		unit warping		ASwyy[m6],ASwzz[m6]		warping sectional value	
CM[m6]		warping resistance		ry[mm],rz[mm]		sectional distance	
CMS[m4]		warping shear resistance					

Partial cross sections

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]				α[°]
1	4.4000E-01	4.934E-01	1.833E-02	0.0	37278	1100.0	3.147E-02
2	5.665E-02	3.345E-01	3.147E-02	440.9	15532		1.833E-02
3	6.4000E-01	4.060E-01	2.751E-02	0.0	37278	1600.0	9.813E-02
4	1.016E-01	5.811E-01	9.813E-02	118.7	15532		2.751E-02

Slika 51. Poprečni presjek „obrnutog T“ nosača

Cross section No. 3.1 = CS 20 - Izvedba glavnog nosača



Static properties of cross section

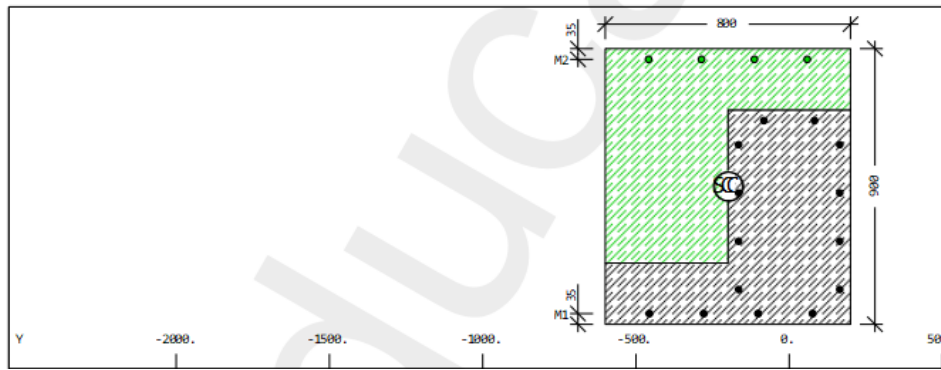
Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm2]	g[kg/m]	I-1[m4]
MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm2]		I-2[m4]
		Ayz[m2]	Iyz[m4]					α[°]
1	3.6000E-01	2.256E-01	1.559E-02	-88.9	-0.1	37278	900.0	2.141E-02
2	1.121E-02	2.397E-01	1.476E-02	405.6	486.9	15532	(BEAM)	8.936E-03
			-6.222E-03					43.08
Mat	material number			yc[mm],zc[mm]		ordinate of elastic centroid		
A[m2]	sectional area			ysc[mm],zsc[mm]		ordinate of shear centre		
Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2]	transverse shear deformation area			E[N/mm2]		Young's modulus		
Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4]	bending moment of inertia			g[kg/m]		weight per length		
I-1[m4],I-2[m4],α[°]	principal moments of inertia and angle of the principal axes							
MRf	reinforcement material number							
It[m4]	torsional moment of inertia							
G[N/mm2]	Shear modulus							

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-511.1	-405.6	420.1	1.944E-01	2	3.204E+01	9.285E+00
	288.9	294.4	394.1	3.600E-01		4.775E+01	6.637E+00
α-T[1/K]	Elongation coefficient						
ymin[mm],zmin[mm],ymax[mm],zmax[mm]	extreme coordinates relative to centroid						
hymin[mm],hzmin[mm]	minimum value for internal lever						
AK[m ²]	torsional equivalent area (Bredt)						
MRs	transverse reinforcements material number						
1/WT[1/m ³],1/WT2[1/m ³]	torsional resistance						
1/WVy[1/m ²],1/WVz[1/m ²]	shear force resistance						
AB[m ²]	gross concrete area						

Slika 52. Izvedba „L“ nosača (desno)

Cross section No. 3 - L NOSAČ DESNO



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
1	7.4733E-01	6.177E-01	5.142E-02	-196.0	-199.8	37278	1800.0	5.142E-02
2	7.264E-02	6.064E-01	3.979E-02	250.8	250.0	15532	(BEAM)	3.979E-02
			1.253E-04					-0.62

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-404.0	-450.8	536.2	3.744E-01	2	7.630E+00	2.078E+00
	396.0	449.2	638.2	7.200E-01		3.184E+01	2.075E+00

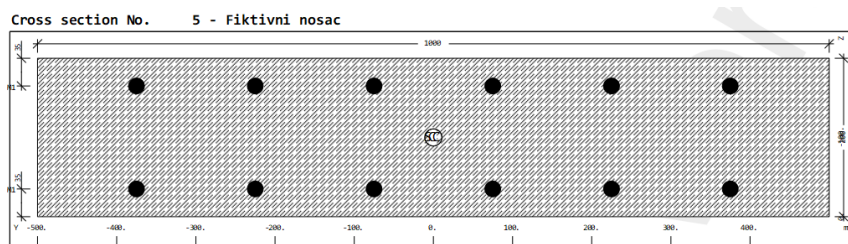
Section values for warping

Wmin[m ²]	Wmax[m ²]	CM[m ⁶]	CMS[m ⁴]	ASwyy[m ⁶]	ASwzz[m ⁶]	ry[mm]	rz[mm]
-0.0384	0.0384	8.497E-05	0.005	5.940E-07	-6.697E-07	26.0	-58.7
Wmin[m ²], Wmax[m ²] unit warping CM[m ⁶] warping resistance CMS[m ⁴] warping shear resistance ASwyy[m ⁶], ASwzz[m ⁶] warping sectional value ry[mm], rz[mm] sectional distance							

Partial cross sections

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]				α[°]
1	3.6000E-01	3.130E-01	1.559E-02	-88.9	37278	900.0	2.141E-02
2	3.632E-02	3.065E-01	1.476E-02	405.6	15532		8.936E-03
			-6.222E-03				43.08
3	3.6000E-01	3.046E-01	1.559E-02	-311.1	37278	900.0	2.141E-02
4	3.632E-02	2.998E-01	1.476E-02	94.4	15532		8.936E-03
			-6.222E-03				43.08

Slika 53. Poprečni presjek „L“ nosača (desno)



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
5	2.0000E-01	1.670E-01	6.667E-04	0.0	0.0	34077	500.0	1.667E-02
6	2.348E-03	1.753E-01	1.667E-02	-100.0	-100.0	14199	(BEAM)	6.667E-04

Mat material number
 A[m²] section area
 Ay[m²],Az[m²],Ayz[m²] transverse shear deformation area
 Iy[m⁴],Iz[m⁴],Iyz[m⁴] bending moment of inertia
 I-1[m⁴],I-2[m⁴],α[°] principal moments of inertia and angle of the principal axes
 MRf reinforcement material number
 It[m⁴] torsional moment of inertia
 G[N/mm²] Shear modulus
 yc[mm],zc[mm] ordinate of elastic centroid
 ysc[mm],zsc[mm] ordinate of shear centre
 E[N/mm²] Young's modulus
 g[kg/m] weight per length

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-500.0	-100.0	666.7	1.069E-01	6	8.515E+01	7.475E+00
	500.0	100.0	133.3	2.000E-01		3.632E+01	6.875E+00

α-T[1/K] Elongation coefficient
 ymin[mm],zmin[mm],ymax[mm],zmax[mm] extreme coordinates relative to centroid
 hymin[mm],hzmin[mm] minimum value for internal lever
 AK[m²] torsional equivalent area (Bredt)
 MRs transverse reinforcements material number
 1/WT[1/m³],1/WT2[1/m³] torsional resistance
 1/WVy[1/m²],1/WVz[1/m²] shear force resistance
 AB[m²] gross concrete area

Section values for warping

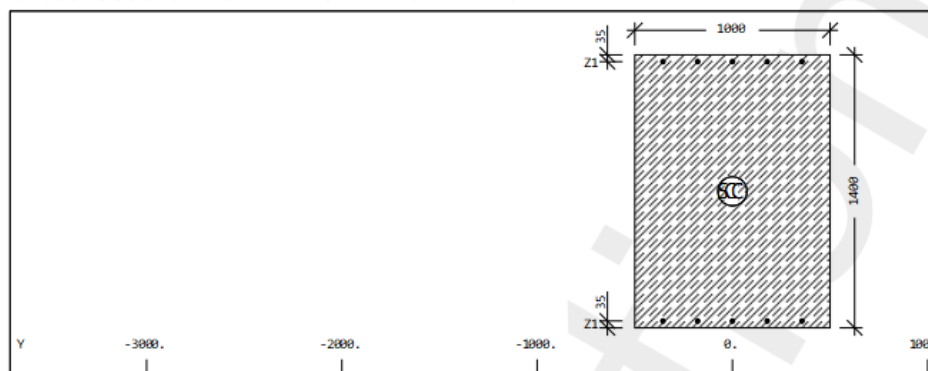
wmin[m ²]	wmax[m ²]	CM[m ⁶]	CMS[m ⁴]	ASwyy[m ⁶]	ASwzz[m ⁶]	ry[mm]	rz[mm]
-0.0405	0.0405	4.729E-05	0.013	-4.986E-20	4.765E-21	0.0	0.0

wmin[m²],wmax[m²] unit warping
 CM[m⁶] warping resistance
 CMS[m⁴] warping shear resistance
 ASwyy[m⁶],ASwzz[m⁶] warping sectional value
 ry[mm],rz[mm] sectional distance

Slika 54. Poprečni presjek fiktivnog nosača za ostvarivanje roštiljnog djelovanja

Nosivi sustav je modeliran pomoću roštiljnog modela, a poprečno djelovanje ploče zamijenjeno je štapovima poprečnim na glavne, odnosno fiktivnim poprečnim nosačima. Postavljaju se jer u stvarnosti betonska ploča ima značajnu krutost u oba horizontalna smjera. Zadaje se bez težine jer je ona već uzeta u obzir pločom u uzdužnom smjeru, a u modelu to se napravilo tako da se isključena vlastita težina elementa.

Cross section No. 6 - NAGLAVNA GREDA



Static properties of cross section

Mat	A[m2]	Ay[m2]	Iy[m4]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm2]	g[kg/m]	I-1[m4]
MRf	It[m4]	Az[m2]	Iz[m4]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm2]		I-2[m4]
		Ayz[m2]	Iyz[m4]					$\alpha[^\circ]$
8	1.4000E+00	1.180E+00	2.287E-01	0.0	0.0	34077	3500.0	
9	2.640E-01	1.174E+00	1.167E-01	1400.0	1399.7	14199	(BEAM)	

Mat material number
 A[m2] sectional area
 Ay[m2], Az[m2], Ayz[m2] transverse shear deformation area
 Iy[m4], Iz[m4], Iyz[m4] bending moment of inertia
 I-1[m4], I-2[m4], $\alpha[^\circ]$ principal moments of inertia and angle of the principal axes
 MRf reinforcement material number
 It[m4] torsional moment of inertia
 G[N/mm2] Shear modulus
 yc[mm], zc[mm] ordinate of elastic centroid
 ysc[mm], zsc[mm] ordinate of shear centre
 E[N/mm2] Young's modulus
 g[kg/m] weight per length

Additional static properties of cross section

$\alpha-T[1/K]$	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m2]	MRs	1/WT[1/m3]	1/WVy[1/m2]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m2]		1/WT2[1/m3]	1/WVz[1/m2]
1.0E-05	-500.0	-700.0	666.7	7.851E-01	9	3.067E+00	1.057E+00
	500.0	700.0	933.3	1.400E+00		5.591E+00	1.067E+00

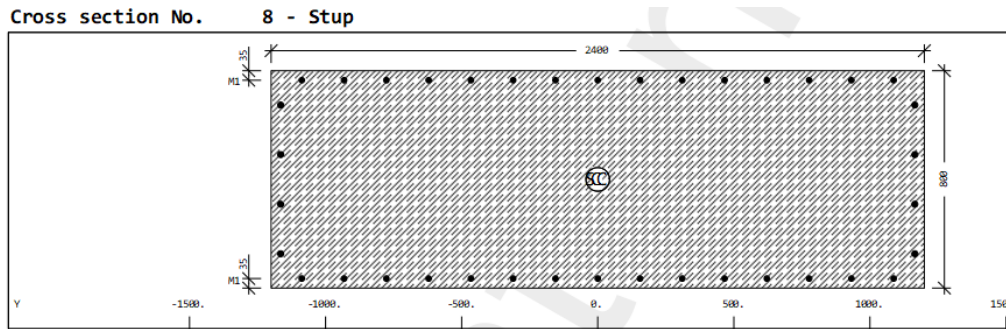
$\alpha-T[1/K]$ Elongation coefficient
 ymin[mm], zmin[mm], ymax[mm], zmax[mm] extreme coordinates relative to centroid
 hymin[mm], hzmin[mm] minimum value for internal lever
 AK[m2] torsional equivalent area (Bredt)
 MRs transverse reinforcements material number
 1/WT[1/m3], 1/WT2[1/m3] torsional resistance
 1/WVy[1/m2], 1/WVz[1/m2] shear force resistance
 AB[m2] gross concrete area

Section values for warping

Wmin[m2]	Wmax[m2]	CM[m6]	CMS[m4]	ASwyy[m6]	ASwzz[m6]	ry[mm]	rz[mm]
-0.1171	0.1171	2.319E-03	0.040	-2.961E-10	1.482E-10	0.0	0.5

Wmin[m2], Wmax[m2] unit warping
 CM[m6] warping resistance
 CMS[m4] warping shear resistance
 ASwyy[m6], ASwzz[m6] warping sectional value
 ry[mm], rz[mm] sectional distance

Slika 55. Poprečni presjek naglavne grede



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
7	1.9200E+00	1.602E+00	1.024E-01	0.0	0.1	35220	4800.0	9.216E-01
10	3.252E-01	1.620E+00	9.216E-01	0.0	0.0	14675	(BEAM)	1.024E-01

Mat material number
 A[m²] sectional area
 Ay[m²], Az[m²], Ayz[m²] transverse shear deformation area
 Iy[m⁴], Iz[m⁴], Iyz[m⁴] bending moment of inertia
 I-1[m⁴], I-2[m⁴], α[°] principal moments of inertia and angle of the principal axes
 MRf reinforcement material number
 It[m⁴] torsional moment of inertia
 G[N/mm²] Shear modulus
 yc[mm], zc[mm] ordinate of elastic centroid
 ysc[mm], zsc[mm] ordinate of shear centre
 E[N/mm²] Young's modulus
 g[kg/m] weight per length

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRs	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-1200.0	-400.0	1600.0	1.050E+00	10	2.425E+00	7.796E-01
	1200.0	400.0	533.3	1.920E+00		1.708E+00	7.736E-01

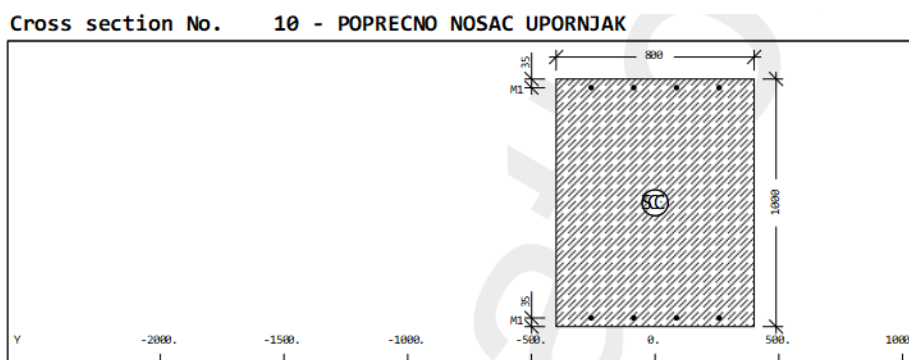
α-T[1/K] Elongation coefficient
 ymin[mm], zmin[mm], ymax[mm], zmax[mm] extreme coordinates relative to centroid
 hymin[mm], hzmin[mm] minimum value for internal lever
 AK[m²] torsional equivalent area (Bredt)
 MRs transverse reinforcements material number
 1/WT[1/m³], 1/WT2[1/m³] torsional resistance
 1/WVy[1/m²], 1/WVz[1/m²] shear force resistance
 AB[m²] gross concrete area

Section values for warping

wmin[m ²]	wmax[m ²]	CM[m ⁶]	CMS[m ⁴]	ASwyy[m ⁶]	ASwzz[m ⁶]	ry[mm]	rz[mm]
-0.3282	0.3282	3.144E-02	0.557	-1.030E-16	-7.860E-19	-0.3	0.0

wmin[m²], wmax[m²] unit warping
 CM[m⁶] warping resistance
 CMS[m⁴] warping shear resistance
 ASwyy[m⁶], ASwzz[m⁶] warping sectional value
 ry[mm], rz[mm] sectional distance

Slika 56. Poprečni presjek stupa



Static properties of cross section

Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm ²]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
MRf	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm ²]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]	Iyz[m ⁴]					α[°]
11	8.0000E-01	6.863E-01	6.667E-02	0.0	0.0	34077	2000.0	
12	8.967E-02	6.743E-01	4.267E-02	500.0	500.0	14199	(BEAM)	

Mat material number
 A[m²] sectional area
 Ay[m²], Az[m²], Ayz[m²] transverse shear deformation area
 Iy[m⁴], Iz[m⁴], Iyz[m⁴] bending moment of inertia
 I-1[m⁴], I-2[m⁴], α[°] principal moments of inertia and angle of the principal axes
 MRf reinforcement material number
 It[m⁴] torsional moment of inertia
 G[N/mm²] Shear modulus

Additional static properties of cross section

α-T[1/K]	ymin[mm]	zmin[mm]	hymin[mm]	AK[m ²]	MRS	1/WT[1/m ³]	1/WVy[1/m ²]
	ymax[mm]	zmax[mm]	hzmin[mm]	AB[m ²]		1/WT2[1/m ³]	1/WVz[1/m ²]
1.0E-05	-400.0	-500.0	533.3	4.494E-01	12	6.821E+00	1.823E+00
	400.0	500.0	666.7	8.000E-01		1.843E+01	1.846E+00

α-T[1/K] Elongation coefficient
 ymin[mm], zmin[mm], ymax[mm], zmax[mm] extreme coordinates relative to centroid
 hymin[mm], hzmin[mm] minimum value for internal lever
 AK[m²] torsional equivalent area (Bredt)
 MRS transverse reinforcements material number

Section values for warping

Wmin[m ²]	Wmax[m ²]	CM[m ⁶]	CMS[m ⁴]	ASwyy[m ⁶]	ASwzz[m ⁶]	ry[mm]	rz[mm]
-0.0546	0.0546	2.420E-04	0.008	-5.916E-20	-1.190E-19	0.0	0.0

Wmin[m²], Wmax[m²] unit warping
 CM[m⁶] warping resistance
 CMS[m⁴] warping shear resistance

ASwyy[m⁶], ASwzz[m⁶] warping sectional value
 ry[mm], rz[mm] sectional distance

Slika 57. Poprečni presjek poprečnog nosača na upornjaku

3.2.4. Ispis reznih sila za faze izvedbe

CSM – „construction stage manager“ – modul u kojem definiramo faze izvedbe. Ovim se simulira gradnja po fazama. Za svaku fazu se definiraju aktivni elementi. Posebno su se razmatrale faze izvođenja donjeg ustroja, izvedba i prednapinjanje glavnih nosača, betoniranje i očvršćavanje ploče, dodatnog stalnog opterećenja, puštanja mosta u promet i na kraju životnog vijeka mosta. Za sve faze koje uključuju betoniranje elemenata razmatrala se podfaza utjecaji skupljanja i puzanja, te vrijeme trajanja procesa za pojedinu fazu izvedbe što se može vidjeti na slici:

```
+PROG CSM urs:16 $ CSM
HEAD Calculation of Construction Stages PAGE UNII 0
$----- Table of Construction Stages-----
```

CS	10	TYPE G_1	TITL 'Donji ustroj'							
CS	15	TYPE C_1	TITL 'Puzanje i skupljanje 7 dana'	T	7	RH	70	TEMP	20	NCRE 1
CS	20	TYPE G_1	TITL 'Izvedba glavnih nosaca'							
CS	24	TYPE B	TITL 'Uklanjanje oslonaca'							
CS	25	TYPE P	TITL 'Prednapinjanje nosaca'							
CS	30	TYPE C_1	TITL 'Puzanje i skupljanje 28 dana'	T	28	RH	70	TEMP	20	NCRE 1
CS	39	TYPE G_1	TITL 'Betoniranje ploce'							
CS	40	TYPE B	TITL 'Ocvrscavanje ploce'							
CS	45	TYPE C_1	TITL 'Puzanje i skupljanje 30 dana'	T	30	RH	70	TEMP	20	NCRE 1
CS	50	TYPE G_2	TITL 'Dodatno stalno'							
CS	55	TYPE C_1	TITL 'Puzanje i skupljanje 45 dana'	T	45	RH	70	TEMP	20	NCRE 3
CS	58	TYPE C_1	TITL 'Puzanje i skupljanje do prometa'	T	45	RH	70	TEMP	20	NCRE 3
CS	61	TYPE C_2	TITL 'Puzanje i skupljanje nakon prometa'	T	18250	RH	70	TEMP	20	NCRE 5

Slika 58. Faze građenja

Stupove smo aktivirali u fazi izvedbe CS 10. Naglavne grede i poprečne nosači nakon stupova također u fazi CS 10. Stalne ležajeve nad upornjacima aktivirali smo odmah nakon izvedbe poprečnih nosača nad upornjacima također u fazi CS 10, a privremeni ležaj u uzdužnom smjeru (GRP 70) aktiviran je u fazi CS 10 kada još ne postoji kontinuitet i kada je potreban za stabilizaciju stupova i poprečnog nosača u uzdužnom smjeru, po uspostavljanju kontinuiteta nakon betoniranja ploče CS 39 on se isključuje. Glavni nosači aktiviraju se u fazi izvedbe CS 20 zajedno sa privremenim ležajevima (GRP 75,76,77,79,80,81) koji služe kako bi se stabilizirao nosač dok je još u fazi proste grede, tj. dok nije nastupio puni kontinuitet, te se oni isključuju nakon betoniranja ploče u CS 39. Pomoćni ležajevi (GRP 90) služe za stabilizaciju nosača u vertikalnom smjeru dok su oni proste grede te se isključuju prije prednapinjanja nosača u CS 24. U fazi očvršćavanja ploče CS 40 aktiviraju se elementi kontinuiteta, odnosno izbetoniraju se dijelovi iznad stupova i upornjaka između prostih greda, te fiktivni nosači za ostvarivanje roštiljnog djelovanja (GRP 0).

\$ Table of Groups														
GRP 12	ICSI 10	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU -	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$STUP				
GRP 10,11,95	ICSI 10	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU -	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$NAGLAVNA GREDA, POPREČNI NOSAČ, STABILIZACIJA				
GRP 1,2,3,4,5,6,7,8,9	ICSI 20	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$GLAVNI NOSAČI				
GRP 75,76,77	ICSI 20	ATIL 39	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ POMOĆNI LEŽAJEVI STUP KF VEZE				
GRP 79,80,81	ICSI 20	ATIL 39	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ POMOĆNI LEŽAJEVI ZA STABILIZACIJU NOSAČA				
GRP 90	ICSI 20	ATIL 24	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ POMOĆNI LEŽAJEVI DUŽ NOSAČA Z SMJER				
GRP 67	ICSI 10	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ STALNI LEŽAJEVI KF VEZA				
GRP 68,69	ICSI 10	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ STALNI LEŽAJEVI OPRUGE				
GRP 70	ICSI 10	ATIL 39	HFIX 99999	BEDD 10	SITU 39	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ POMOĆNI LEŽAJEVI UZDUŽNI SMJER				
GRP 21,22,23,24,25,26,27,28,29,0	ICSI 40	ATIL -	HFIX 99999	BEDD 10	SITU -	T0 7	FAC1 1	ICSD 10	PHIF 1	\$ELEMENTI KONTINUITETA I FIKTIVNI NO:				

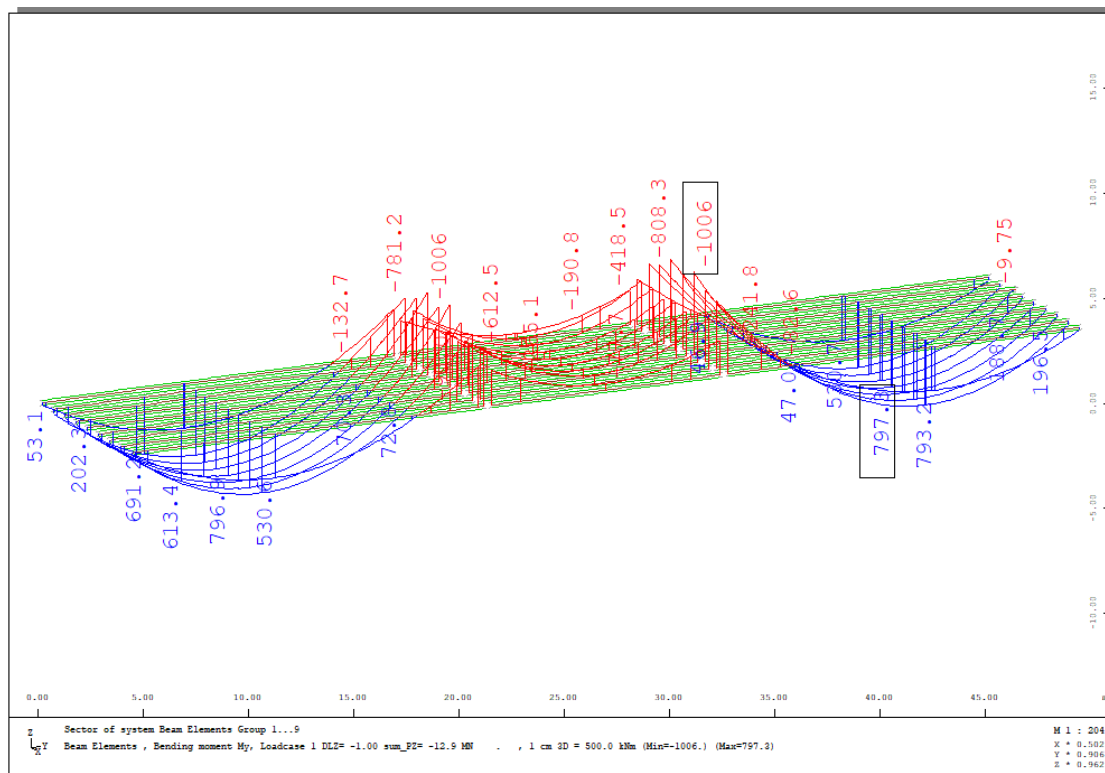
Slika 59. Grupe elemenata za aktivaciju u pojedinoj fazi

Prikaz reznih sile za rasponski sklop u fazama izvedbe, prema predviđenom slijedu izvedbe:

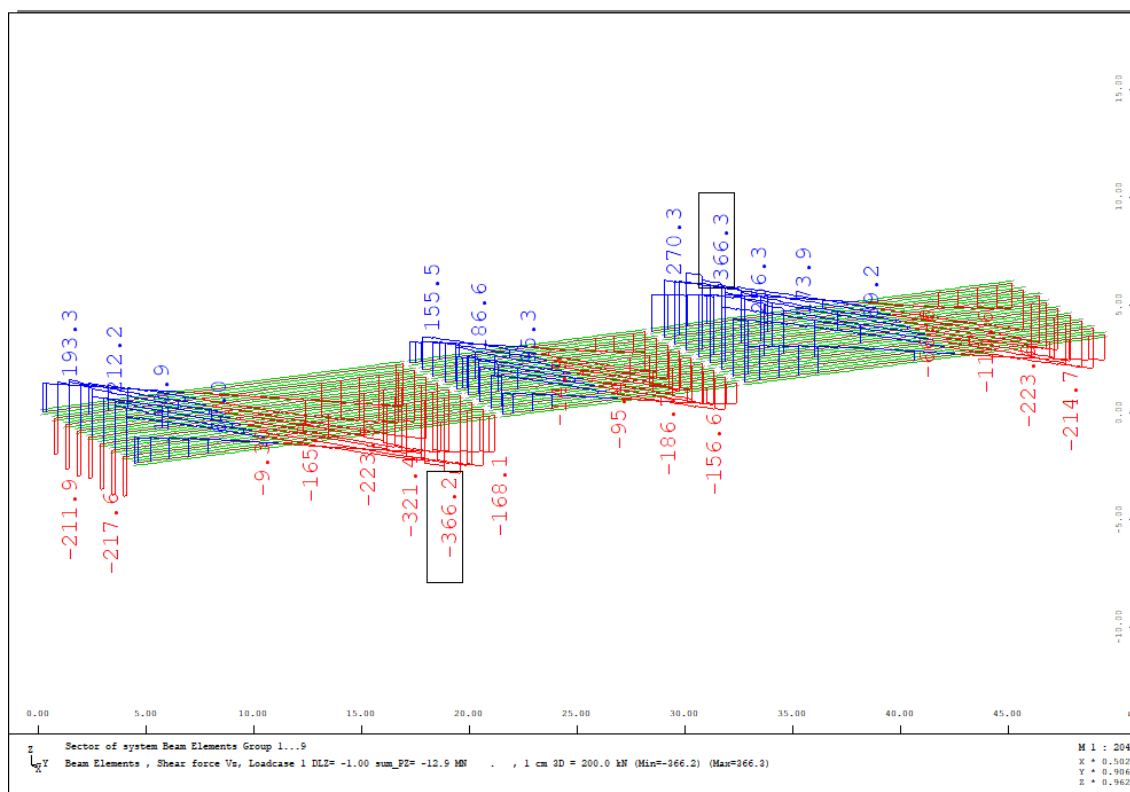
1. Izvedba donjeg ustroja (LC 5010)
2. Puzanje i skupljanje 7 dana (LC 5015)
3. Izvedba glavnih nosača (LC 5020)
4. Uklanjanje privremenih oslonaca (LC 5024)
5. Prednapinjanje glavnih nosača (LC 5025)
6. Puzanje i skupljanje 28 dana (LC 5030)
7. Betoniranje ploče (LC 5039)
8. Očvršćenje ploče (LC 5040)
9. Puzanje i skupljanje 30 dana (LC 5045)
10. Dodatno stalno (LC 5050)
11. Puzanje i skupljanje 45 dana (LC 5055)
12. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (LC 5058)
13. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5061)

U nastavku su prikazane rezne sile za rasponski sklop samo za faze izvedbe koje potrebne za daljnji proračun, te prikaz zadanih opterećenja u Sofistiku.

- Vlastita težina (LC1)

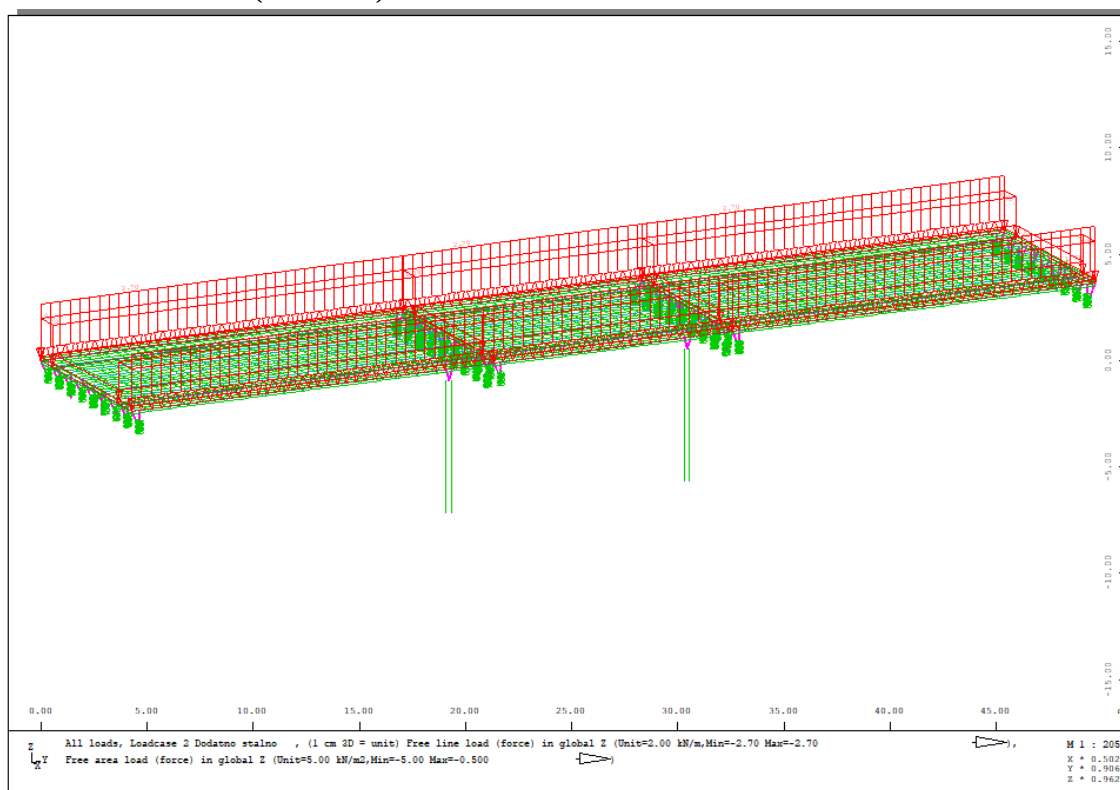


Slika 60. Vlastita težina (My) [kNm]

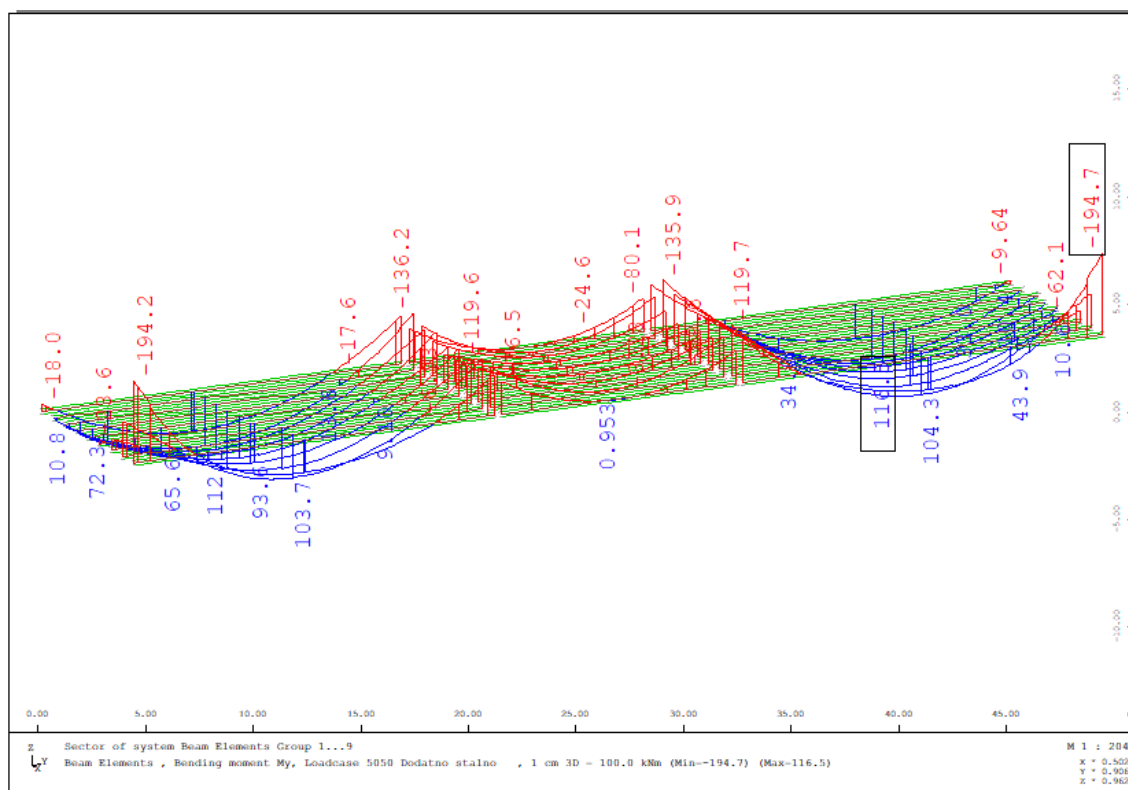


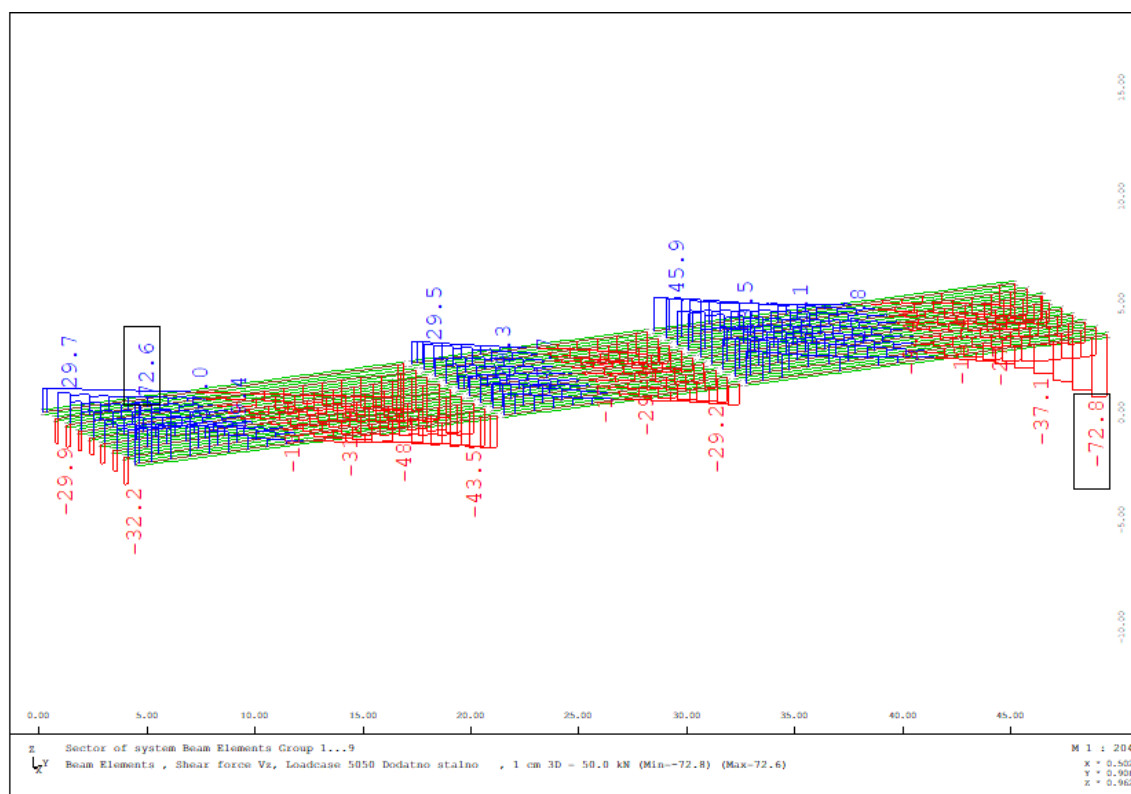
Slika 61. Vlastita težina (Vz) [kN]

- Dodatno stalno (LC 5050)

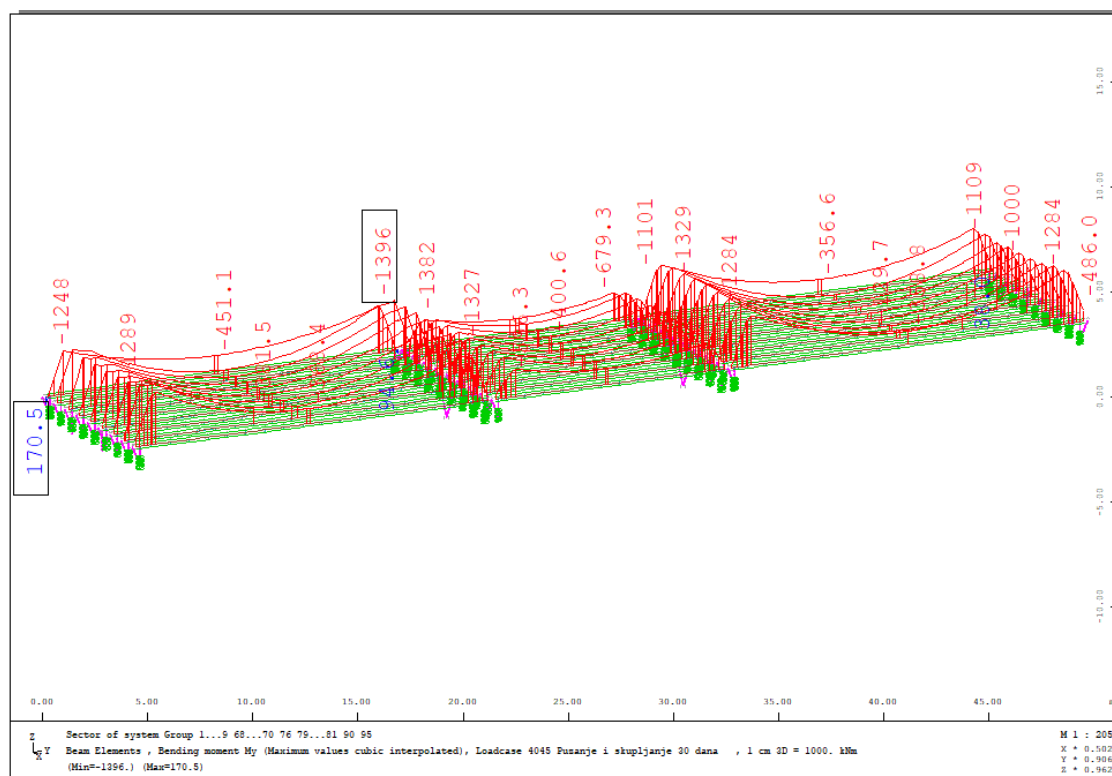


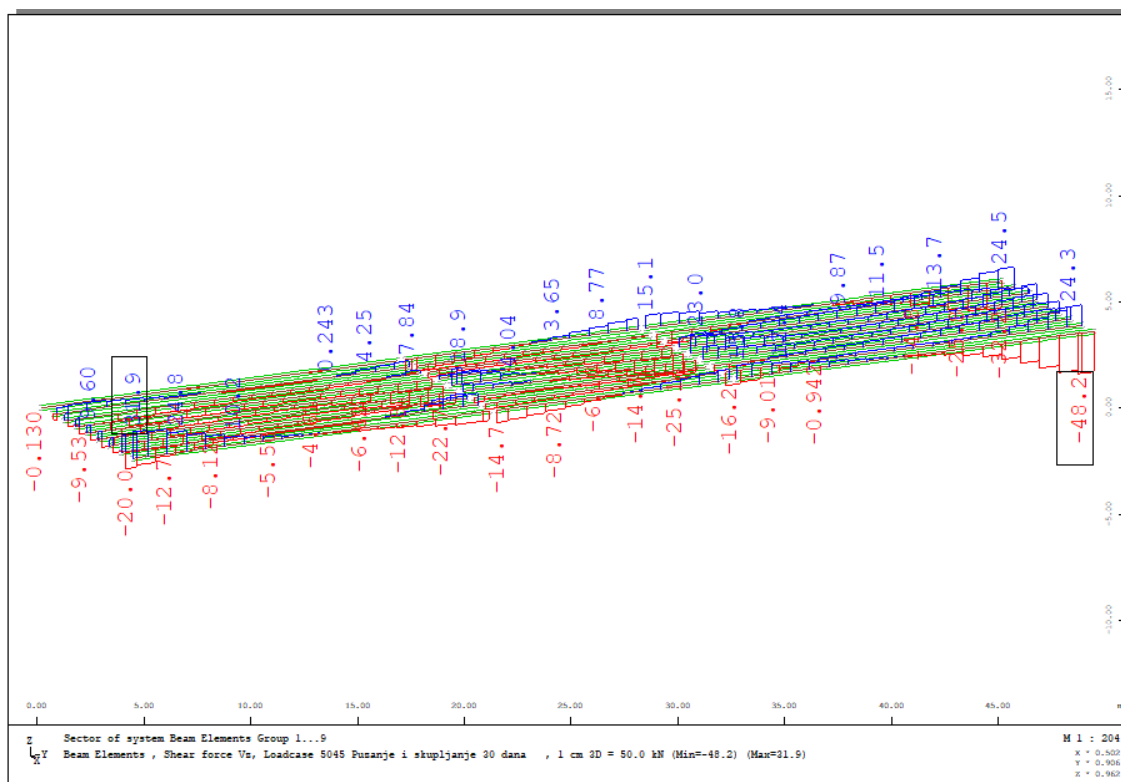
Slika 62. Dodatno stalno opterećenje u modelu

Slika 63. Dodatno stalno (M_y) [kNm]

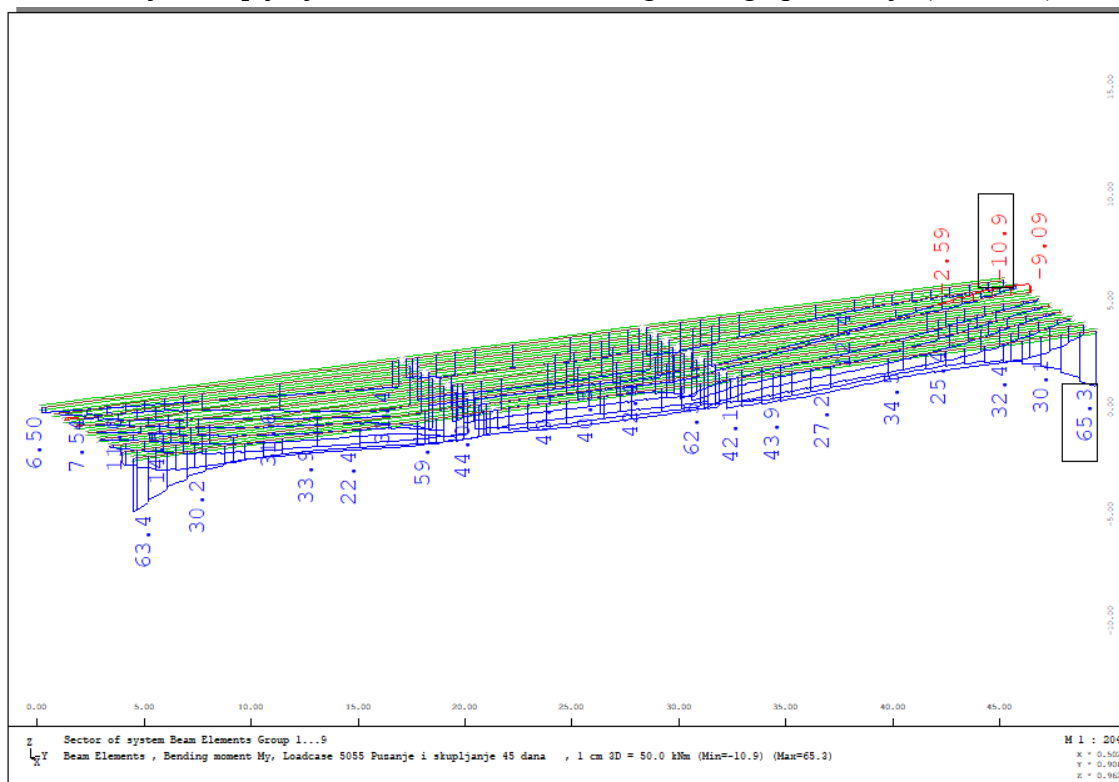
Slika 64. Dodatno stalno (V_z) [kN]

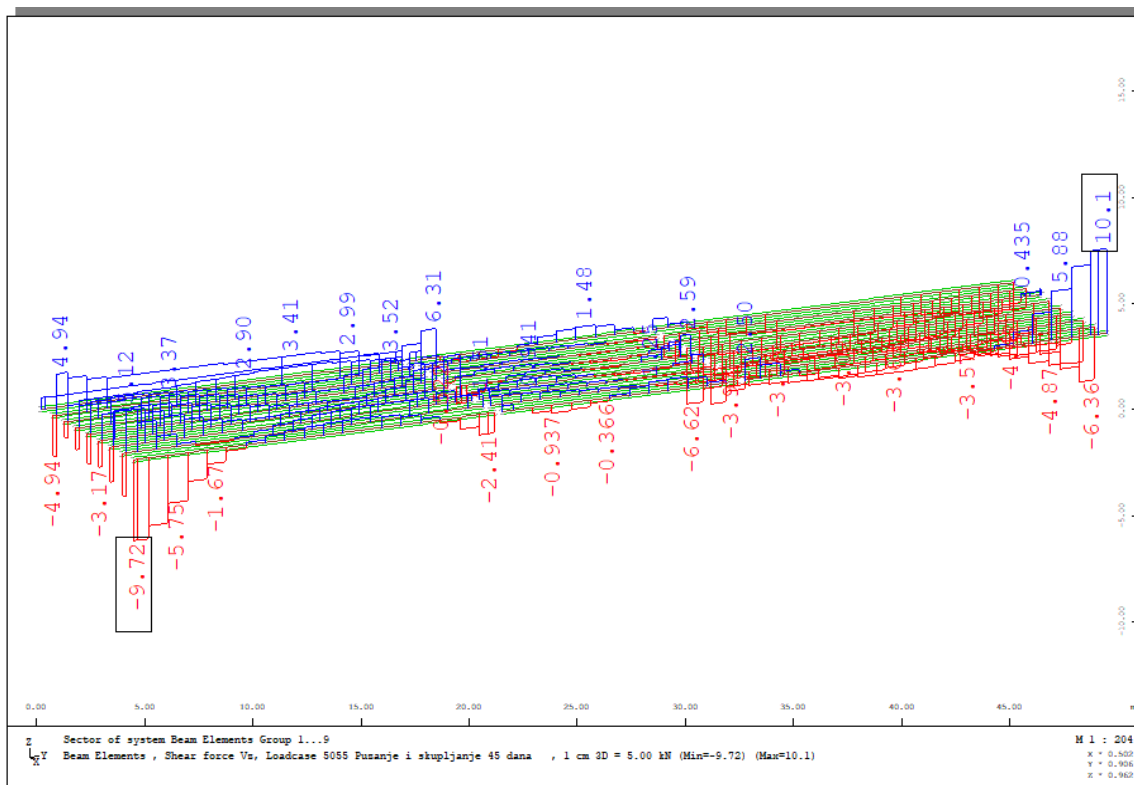
- Puzanje i skupljanje 30 dana nakon očvršćavanja ploče (LC 5045)

Slika 65. Puzanje i skupljanje 30 dana (M_y) [kNm]

Slika 66. Puzanje i skupljanje 30 dana (V_z) [kN]

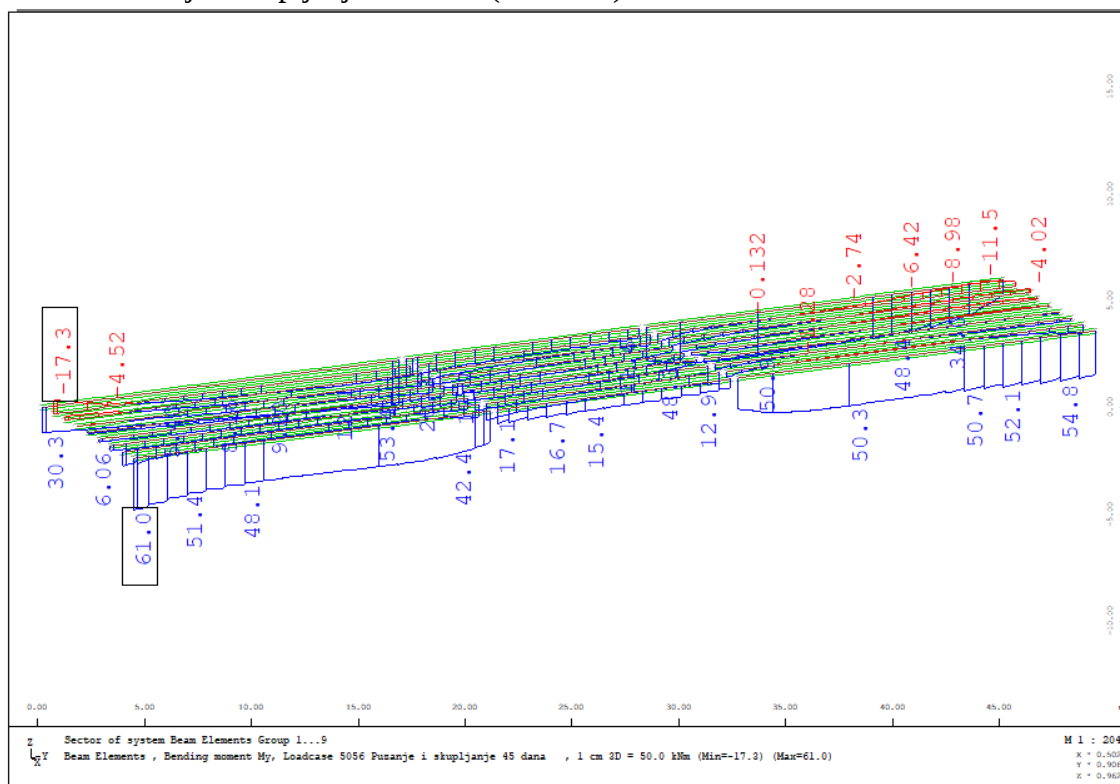
- Puzanje i skupljanje 45 dana nakon dodatnog stalnog opterećenja (LC 5055)

Slika 67. Puzanje i skupljanje 45 dana (1) (M_y) [kNm]

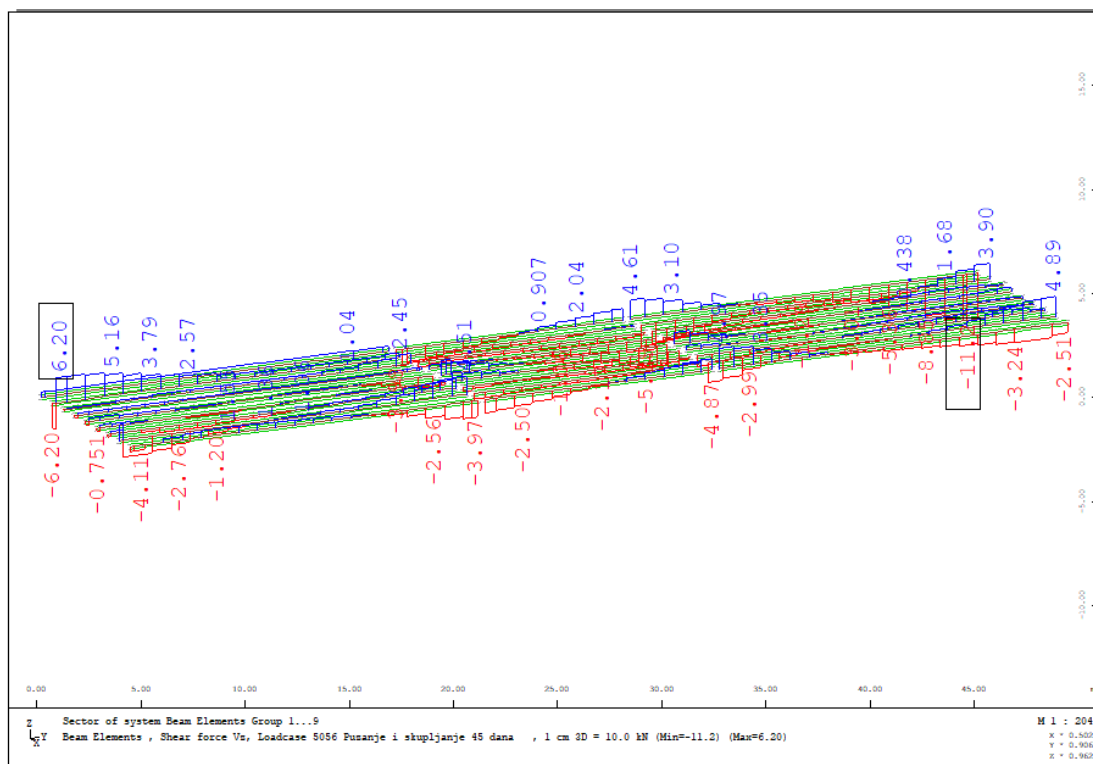


Slika 68. Puzanje i skupljanje 45 dana (1) (Vz) [kN]

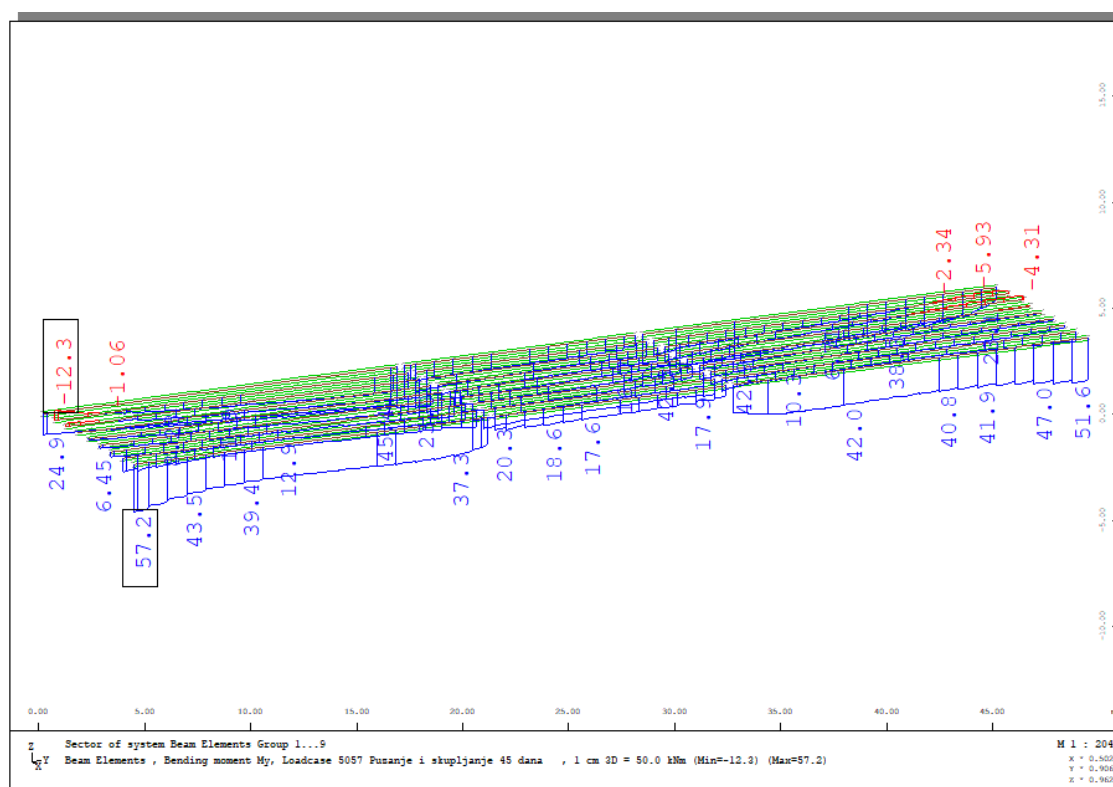
- Puzanje i skupljanje 45 dana (LC 5056)

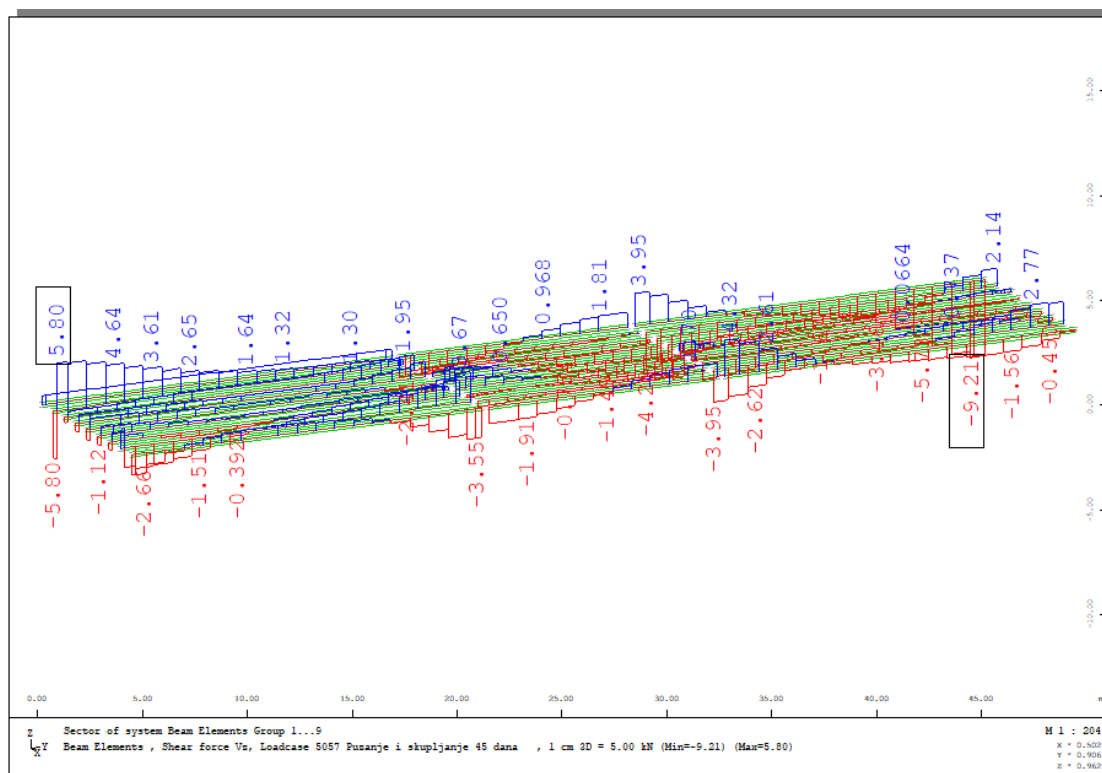


Slika 69. Puzanje i skupljanje 45 dana (2) (My) [kNm]

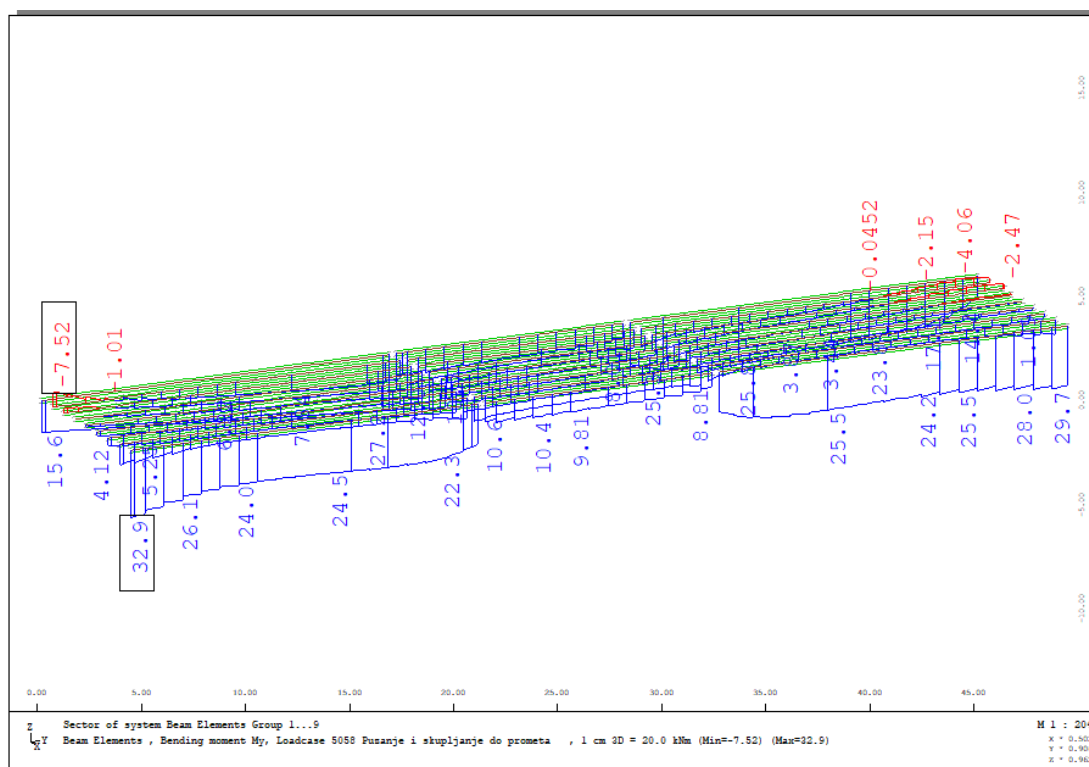
Slika 70. Puzanje i skupljanje 45 dana (2) (V_z) [kN]

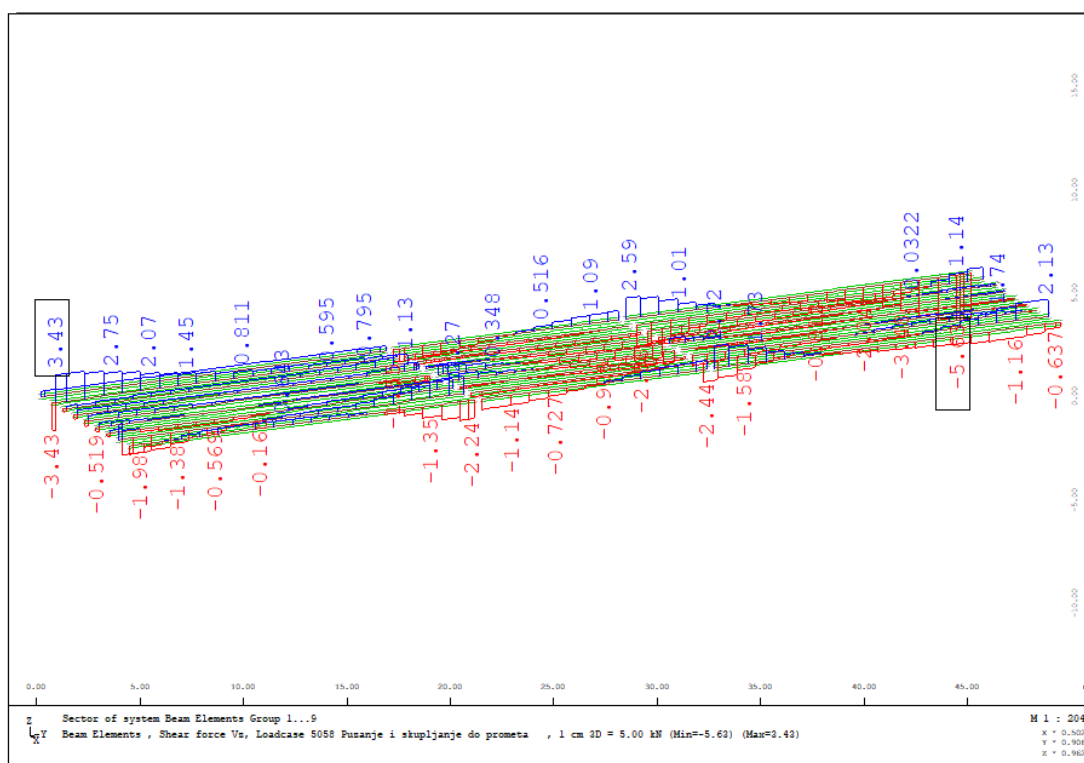
- Puzanje i skupljanje 45 dana (LC 5057)

Slika 71. Puzanje i skupljanje 45 dana (3) (M_y) [kNm]

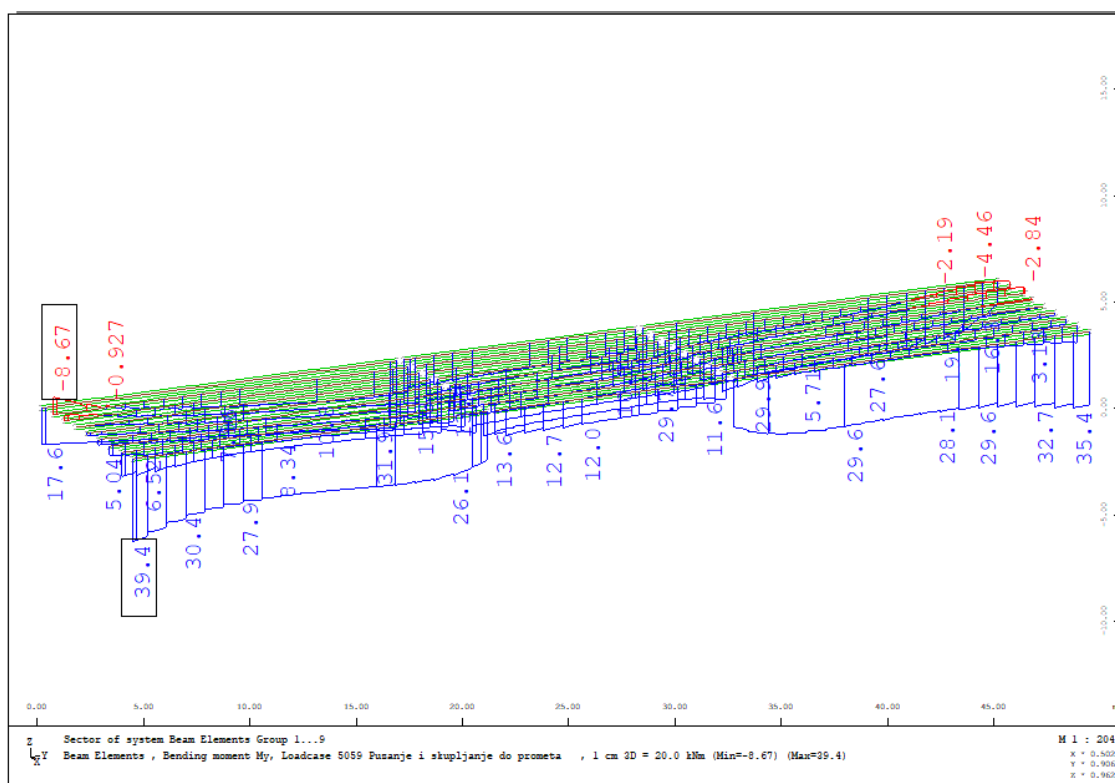
Slika 72. Puzanje i skupljanje 45 dana (3) (V_z) [kN]

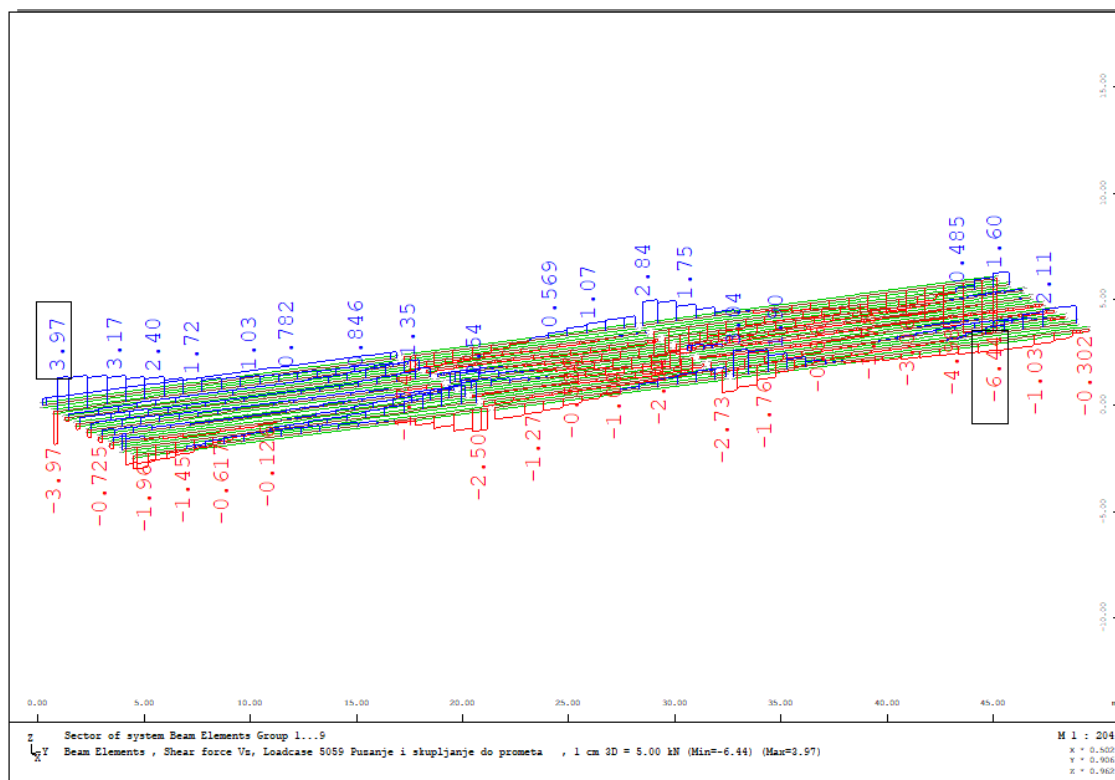
- Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (LC 5058)

Slika 73. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (1) (M_y) [kNm]

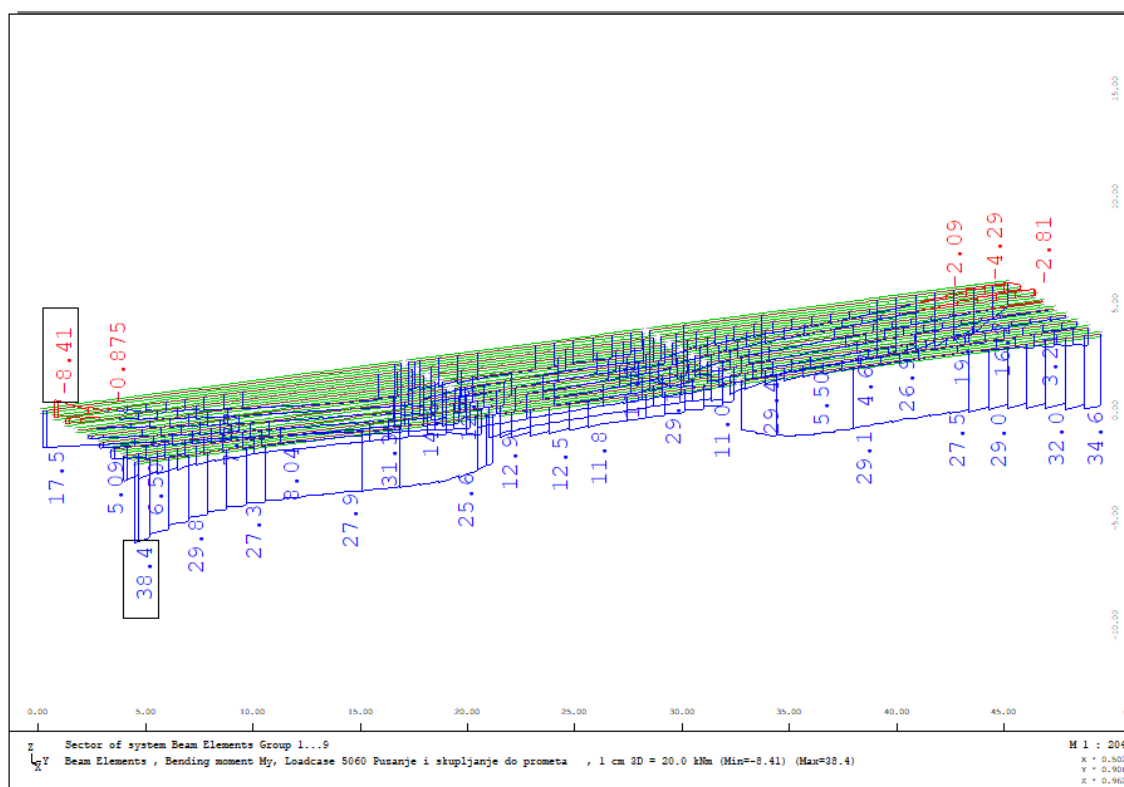
Slika 74. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (1) (V_z) [kN]

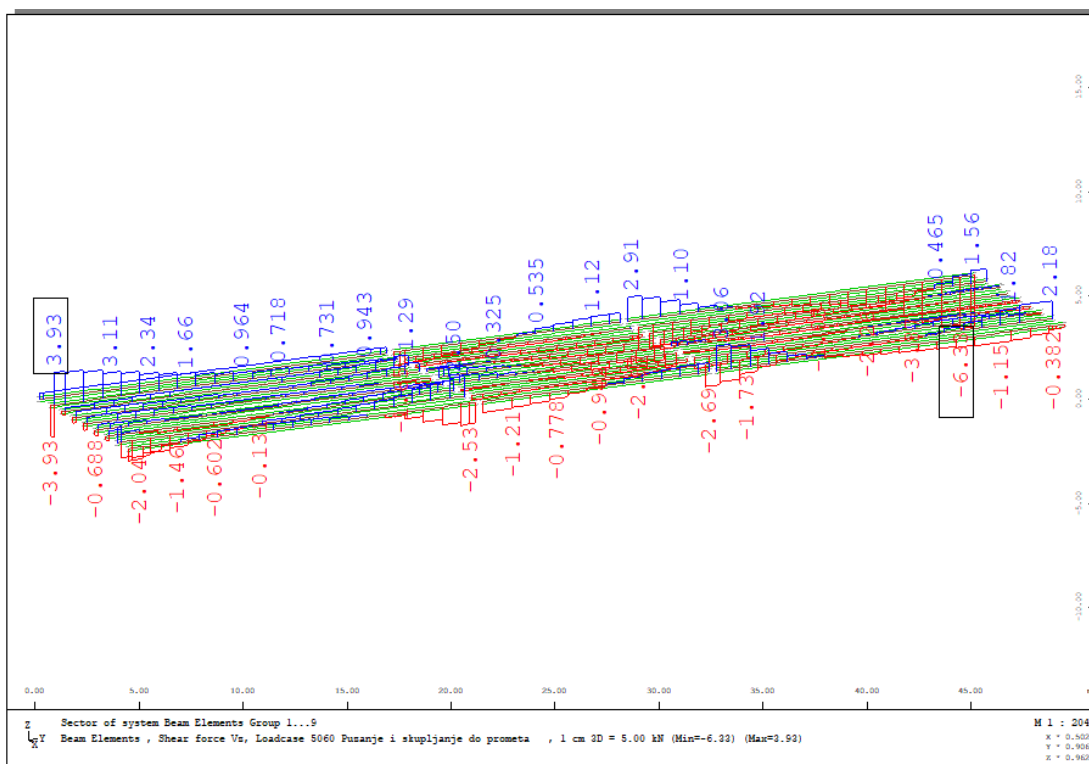
- Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (LC 5059)

Slika 75. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (2) (M_y) [kNm]

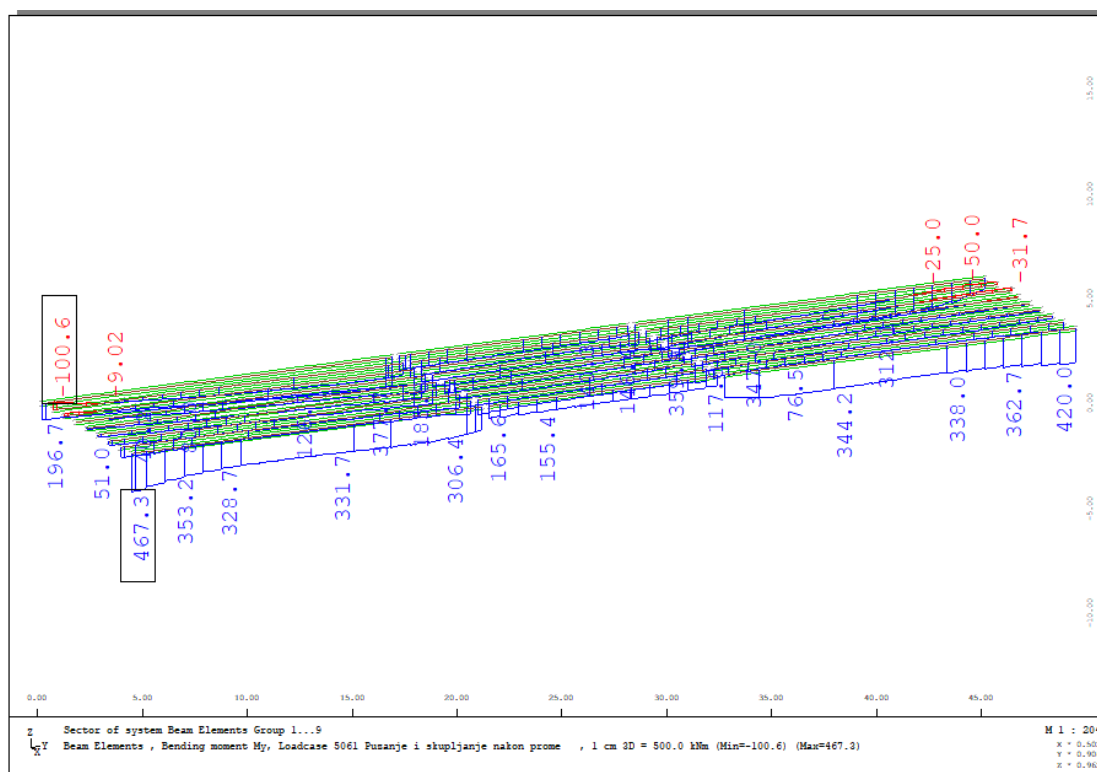
Slika 76. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (2) (V_z) [kN]

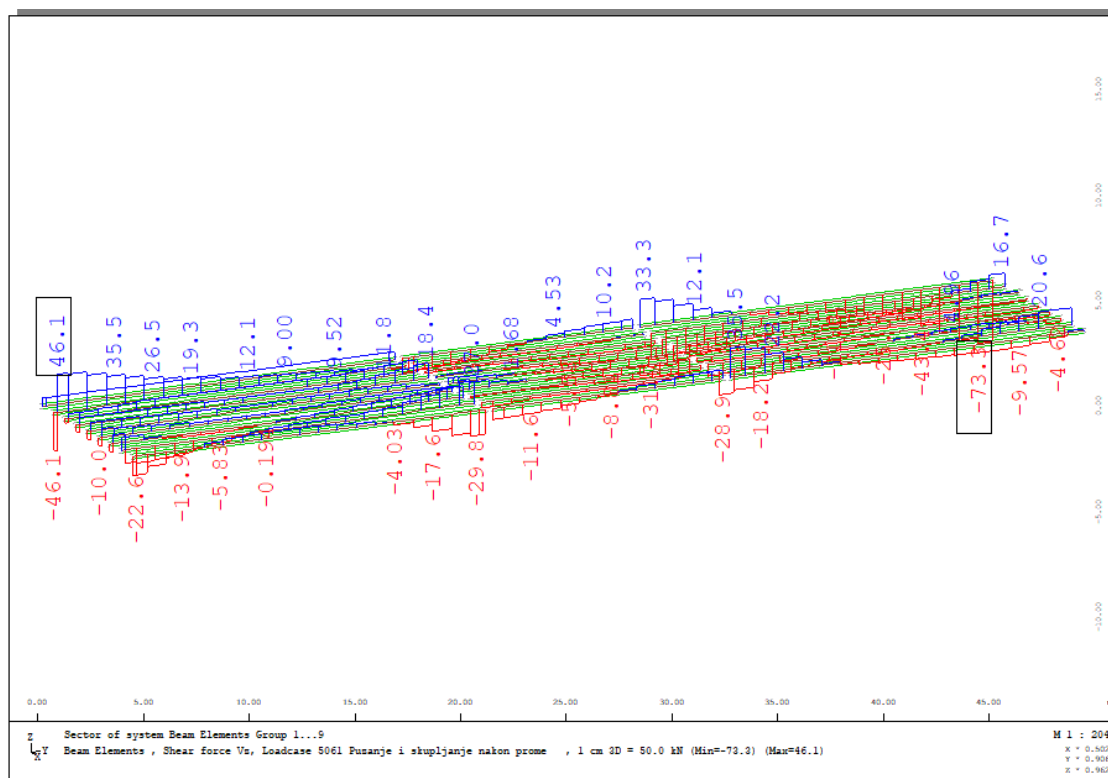
- Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (LC 5060)

Slika 77. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (3) (M_y) [kNm]

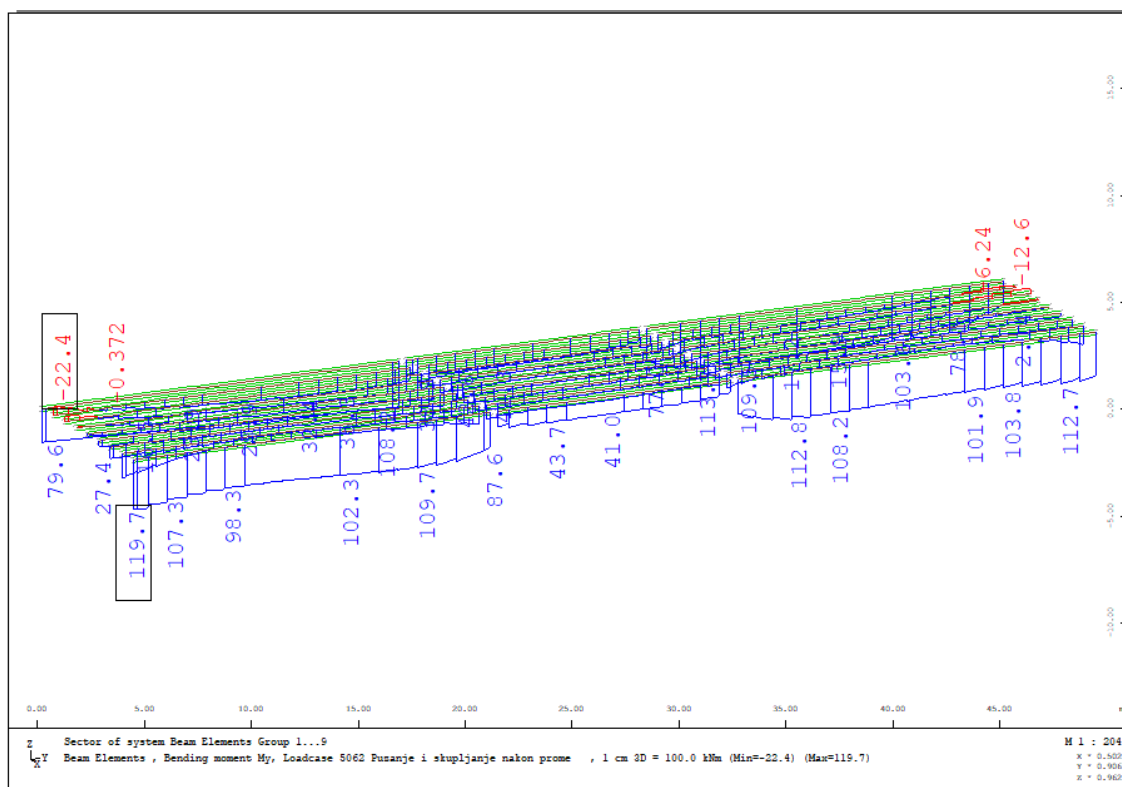
Slika 78. Puzanje i skupljanje prije puštanja u promet (3) (V_z) [kN]

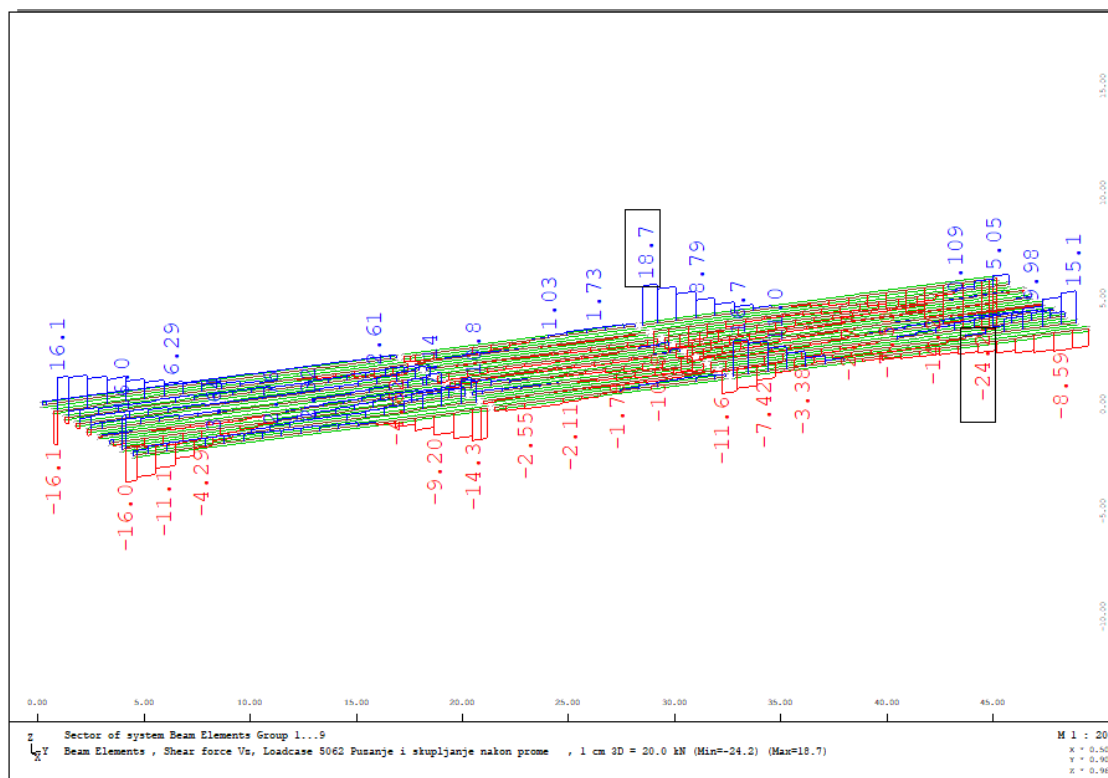
- Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5061)

Slika 79. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (1) (M_y) [kNm]

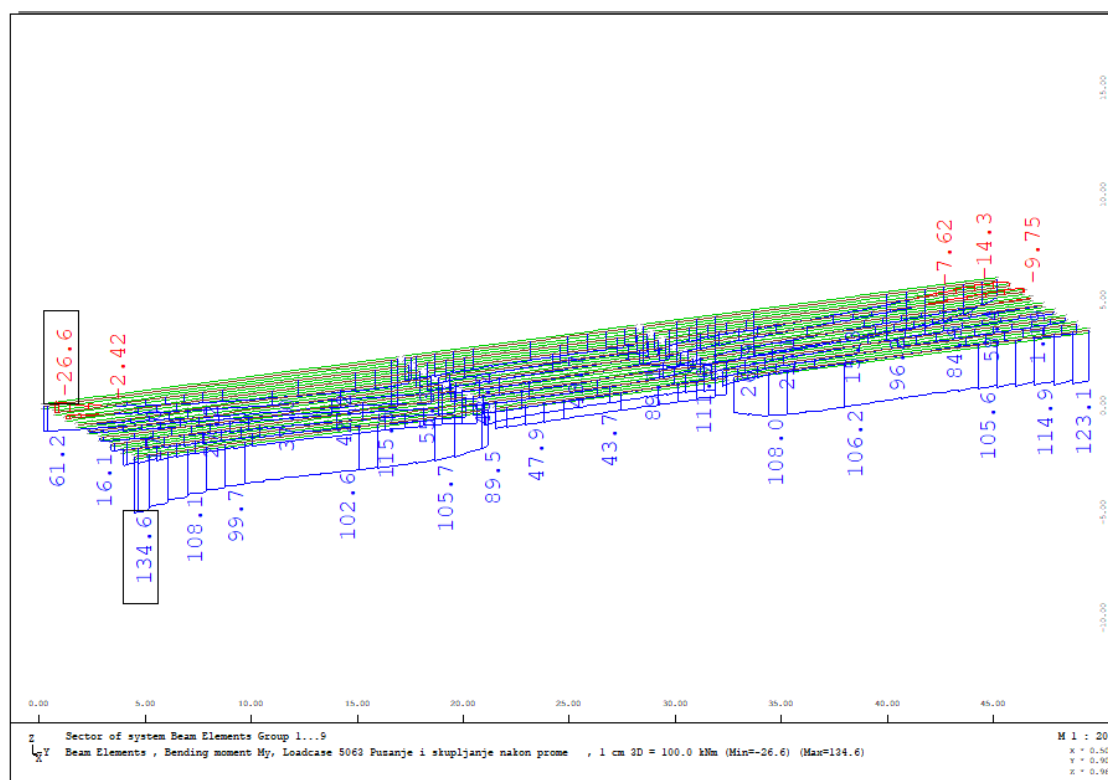
Slika 80. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (1) (V_z) [kN]

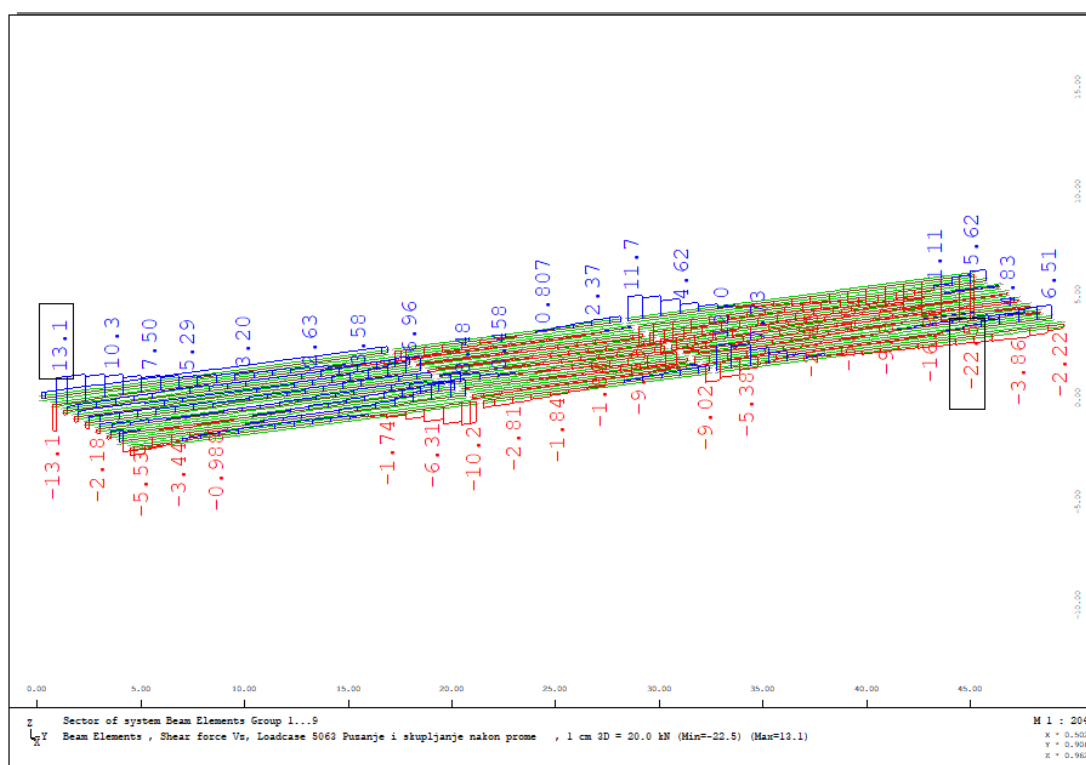
- Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5062)

Slika 81. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (2) (M_y) [kNm]

Slika 82. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (2) (V_z) [kN]

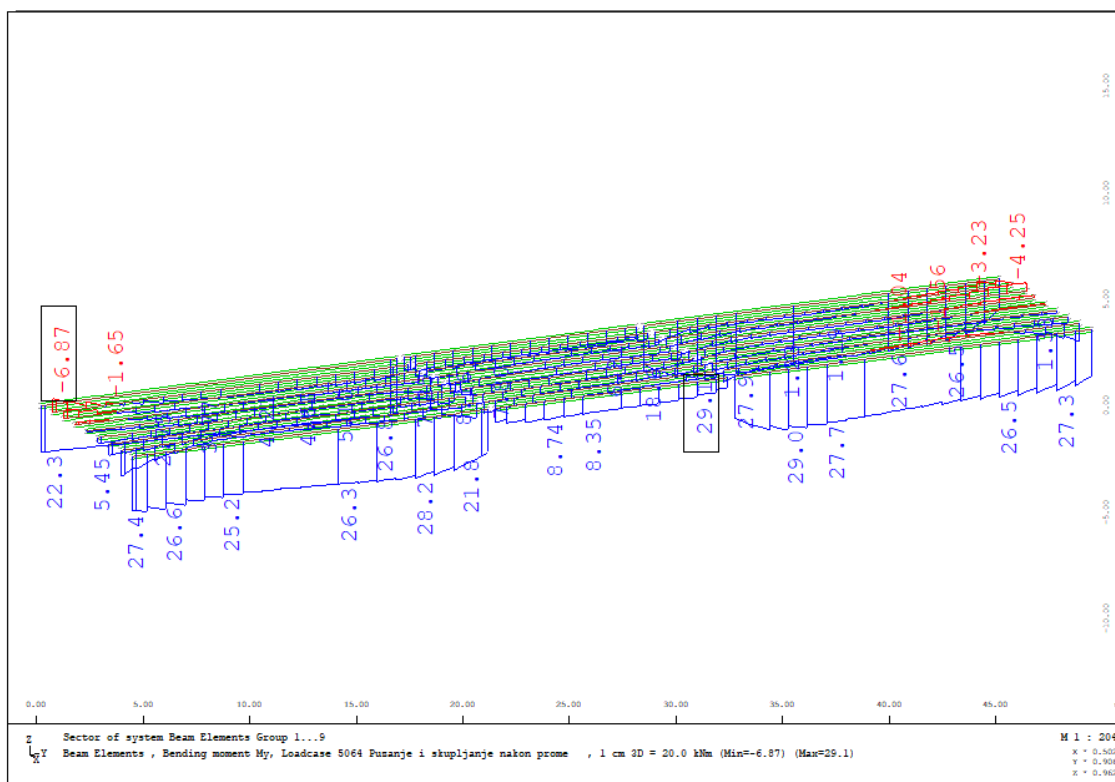
- Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5063)

Slika 83. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (3) (M_y) [kNm]

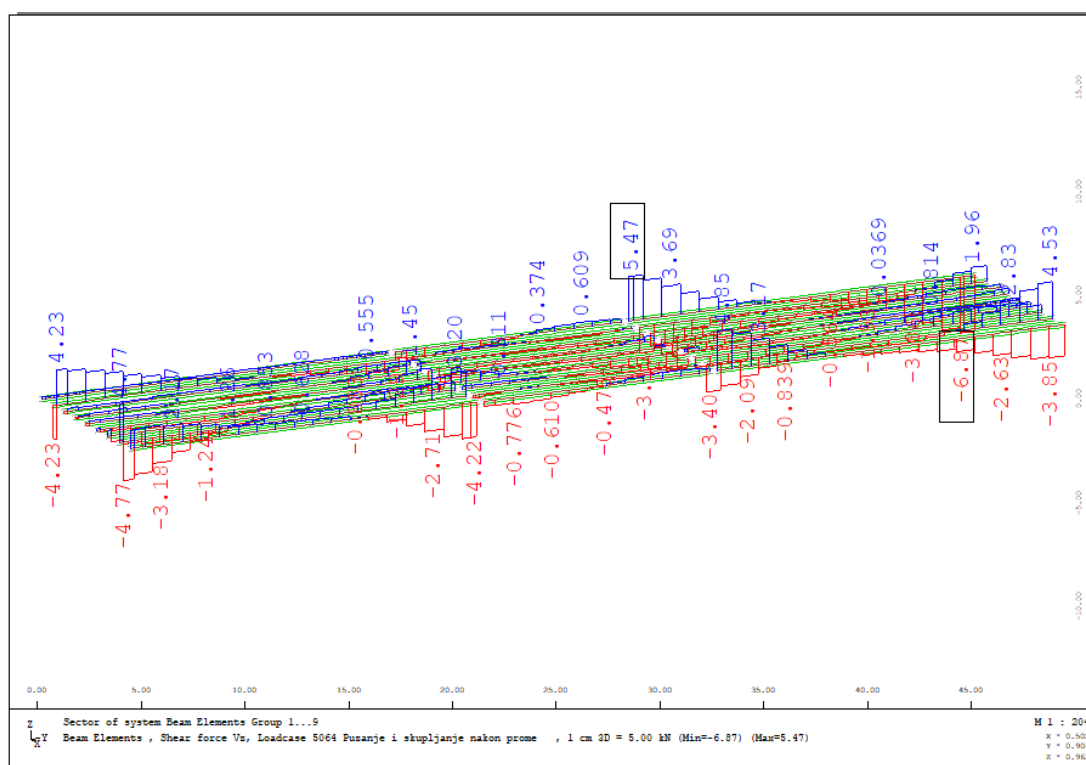


Slika 84. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (3) (Vz) [kN]

- Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5064)

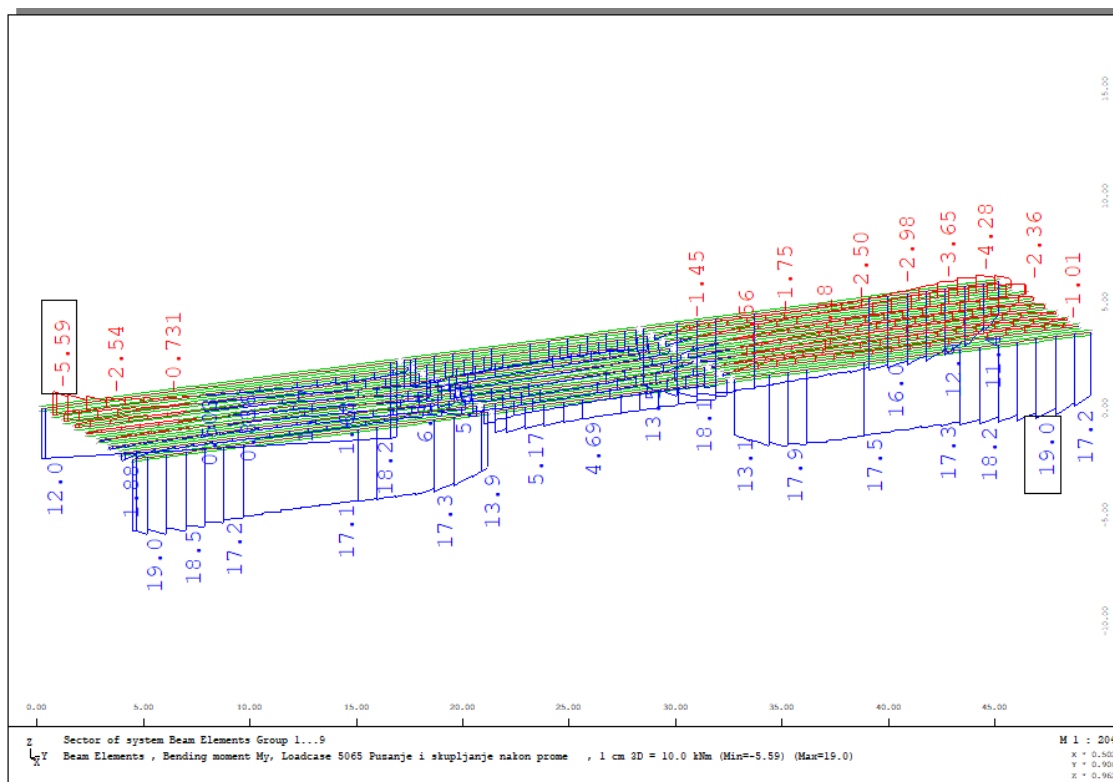


Slika 85. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (4) (My) [kNm]

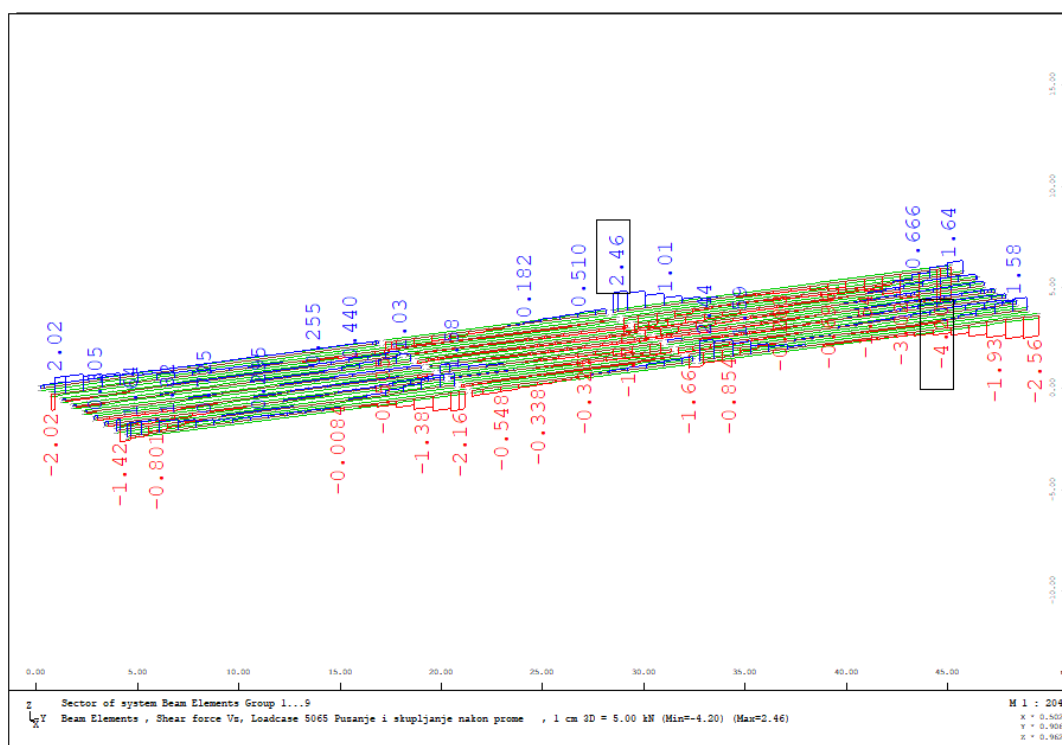


Slika 86. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (4) (Vz) [kN]

- Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (LC 5065)



Slika 87. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (5) (My) [kNm]

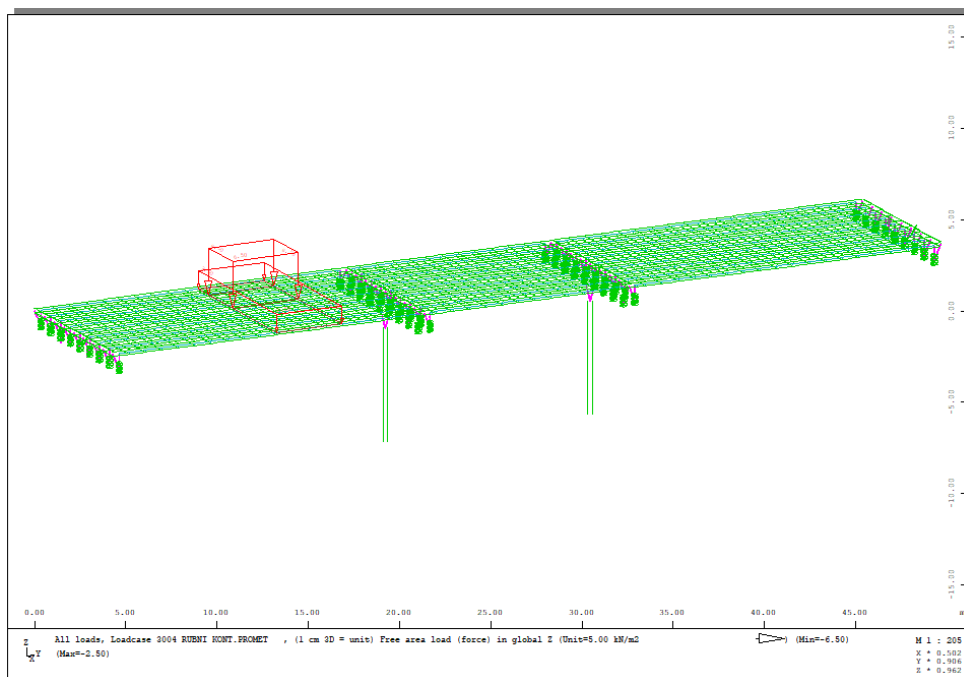


Slika 88. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (5) (V_z) [kN]

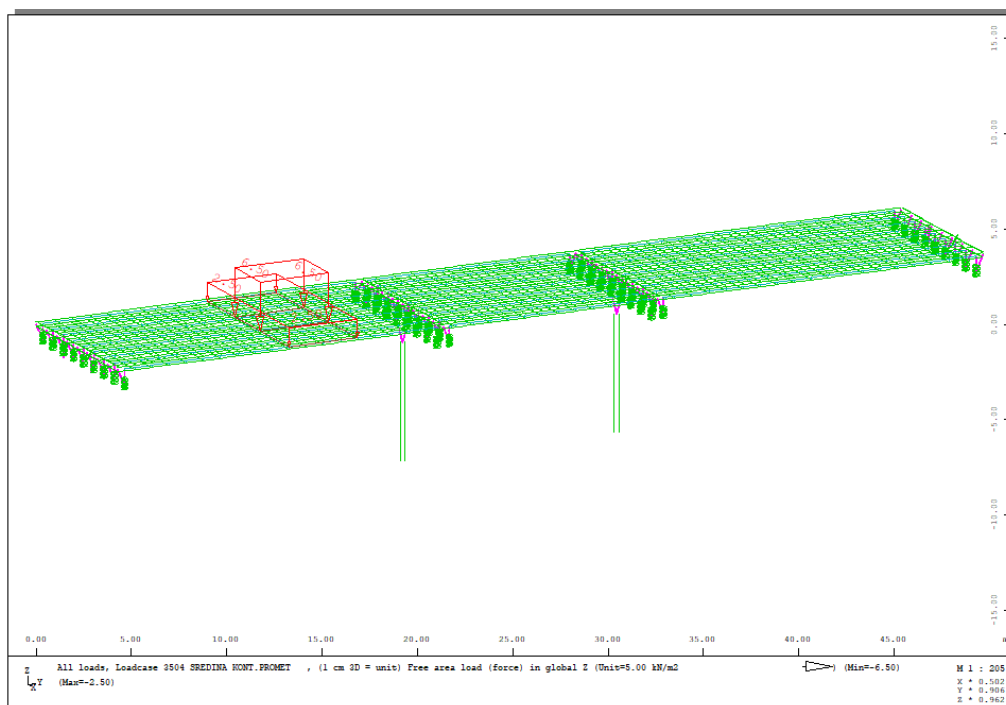
3.2.5. Ispis reznih sila za ostala opterećenja

3.2.5.1. Prometno opterećenje

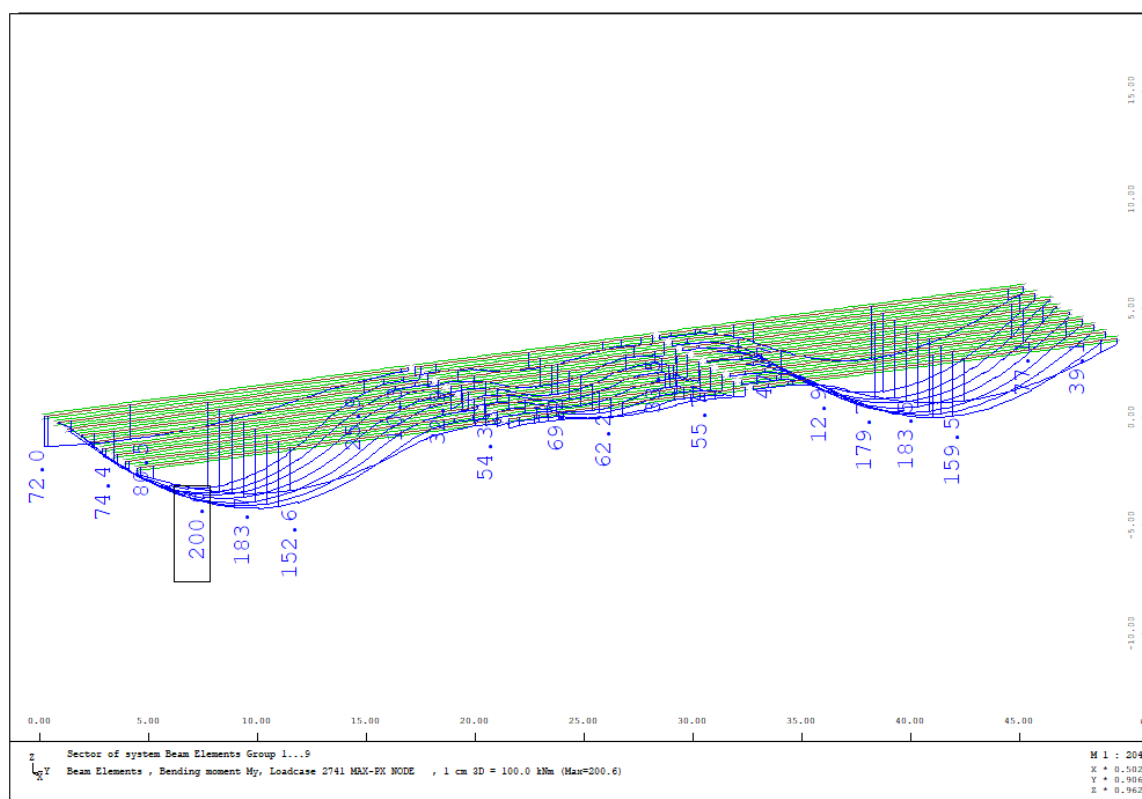
- Kontinuirano prometno opterećenje (LC 2741,2744)



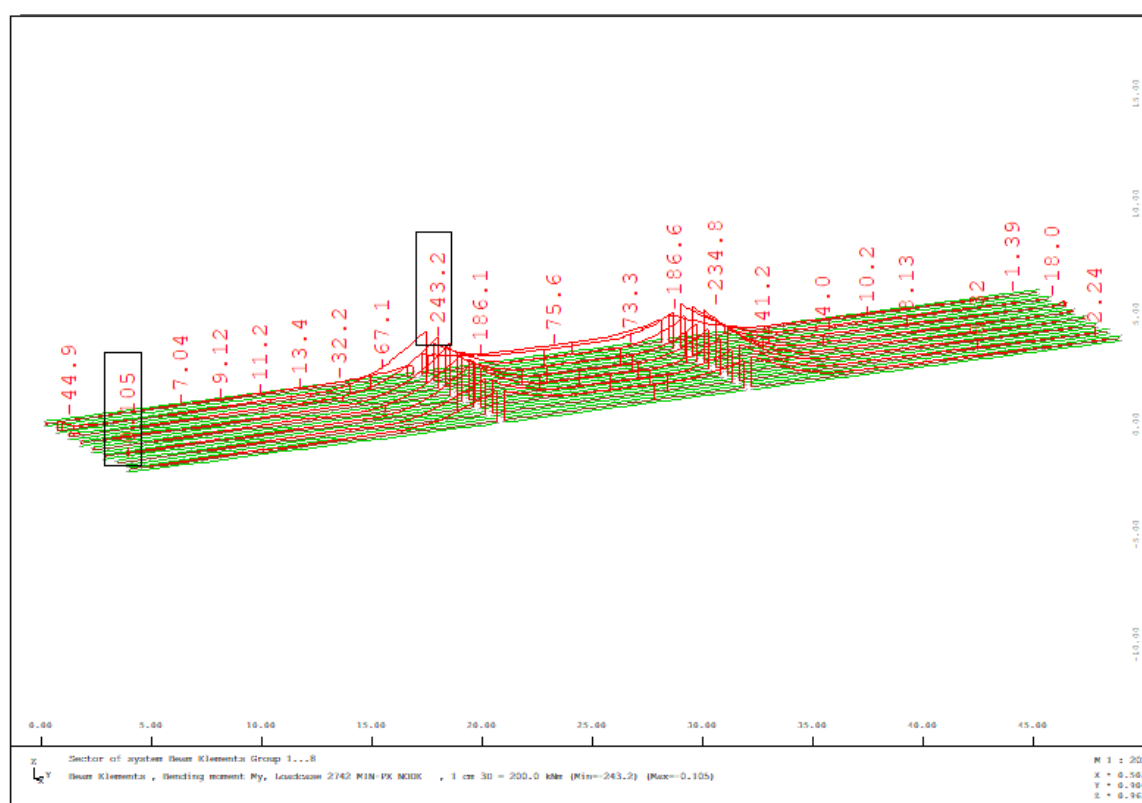
Slika 89. Prikaz rubnog kontinuiranog prometnog opterećenja (odabran samo jedan prikaz radi preglednosti jer se ista vrijednost proteže duž cijelog mosta)



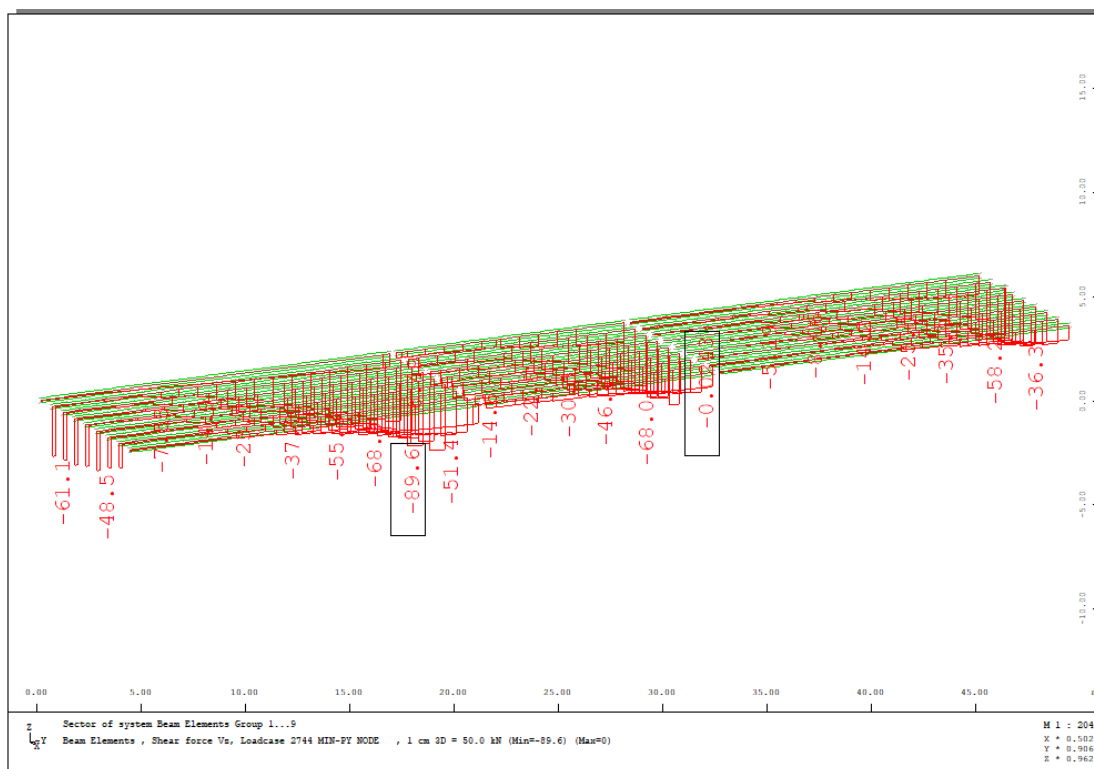
Slika 90. Prikaz srednjeg kontinuiranog prometnog opterećenja (odabran samo jedan prikaz radi preglednosti jer se ista vrijednost proteže duž cijelog mosta)



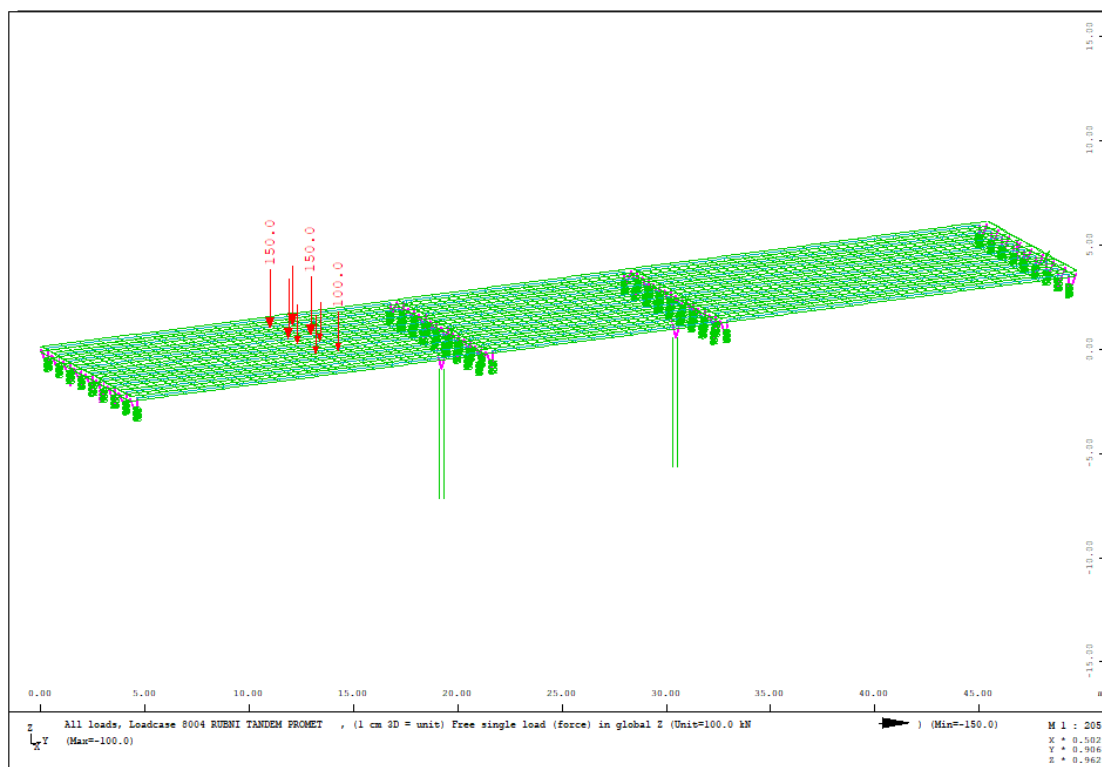
Slika 91. Kontinuirano prometno opterećenje (My) [kNm]



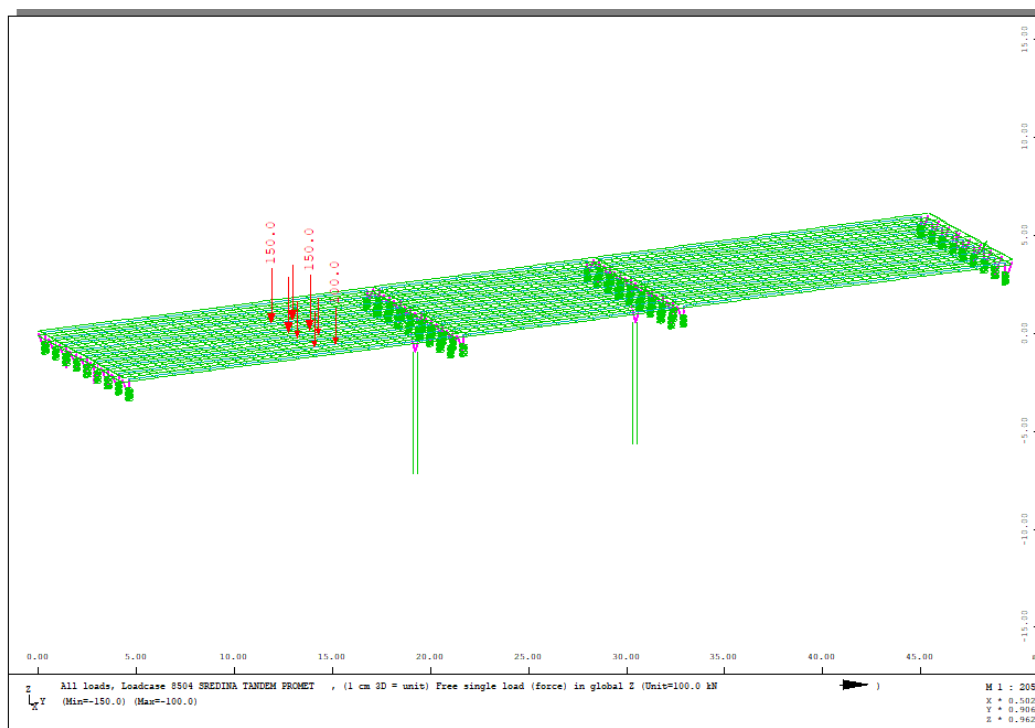
Slika 92. Kontinuirano prometno opterećenje (My) [kNm]

Slika 93. Kontinuirano prometno opterećenje (V_z) [kN]

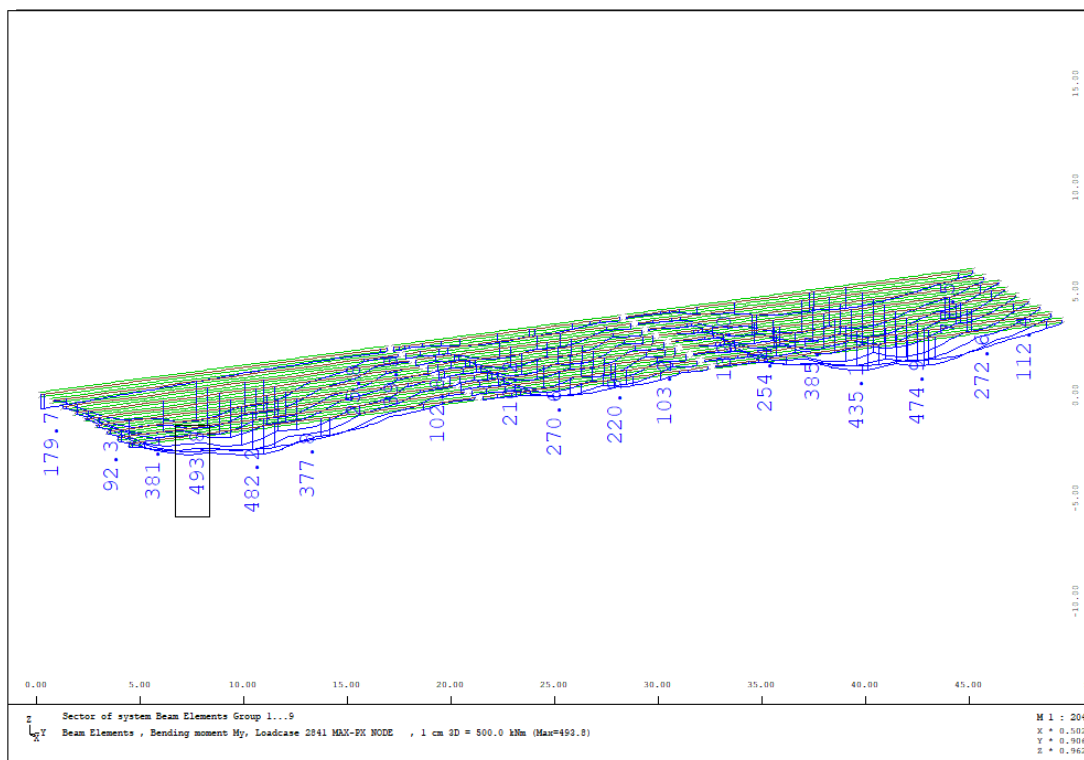
- Osovinsko prometno opterećenje (LC 2841, LC 2844)



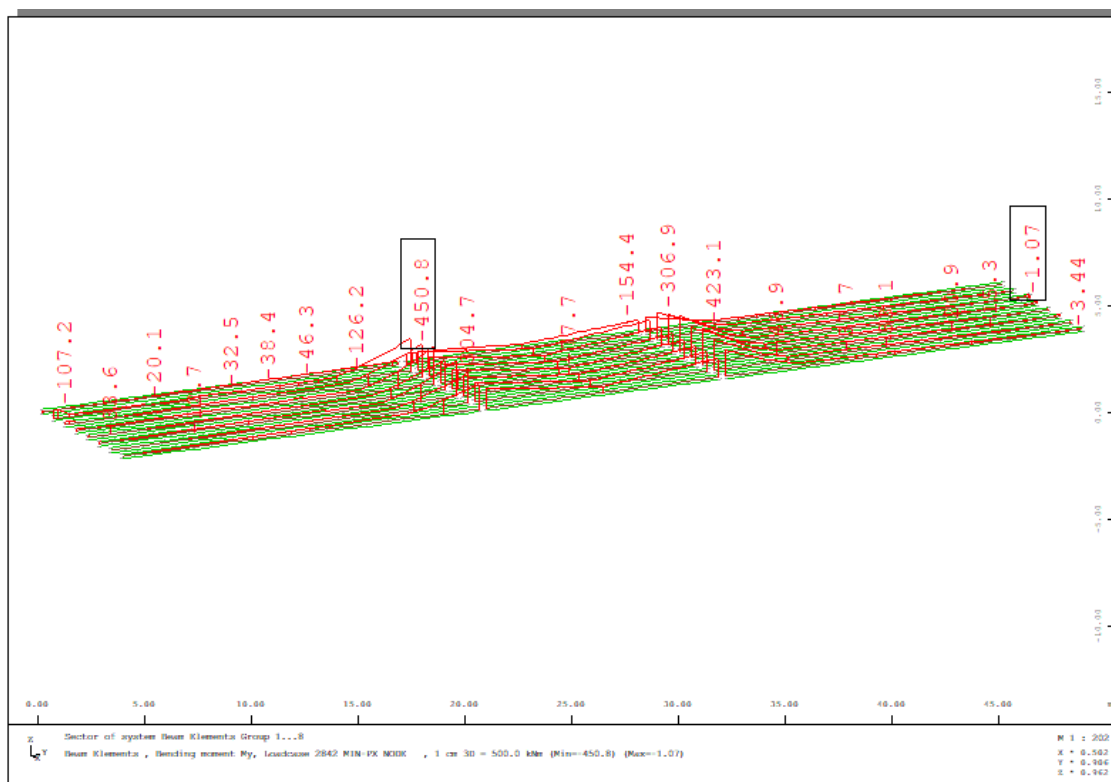
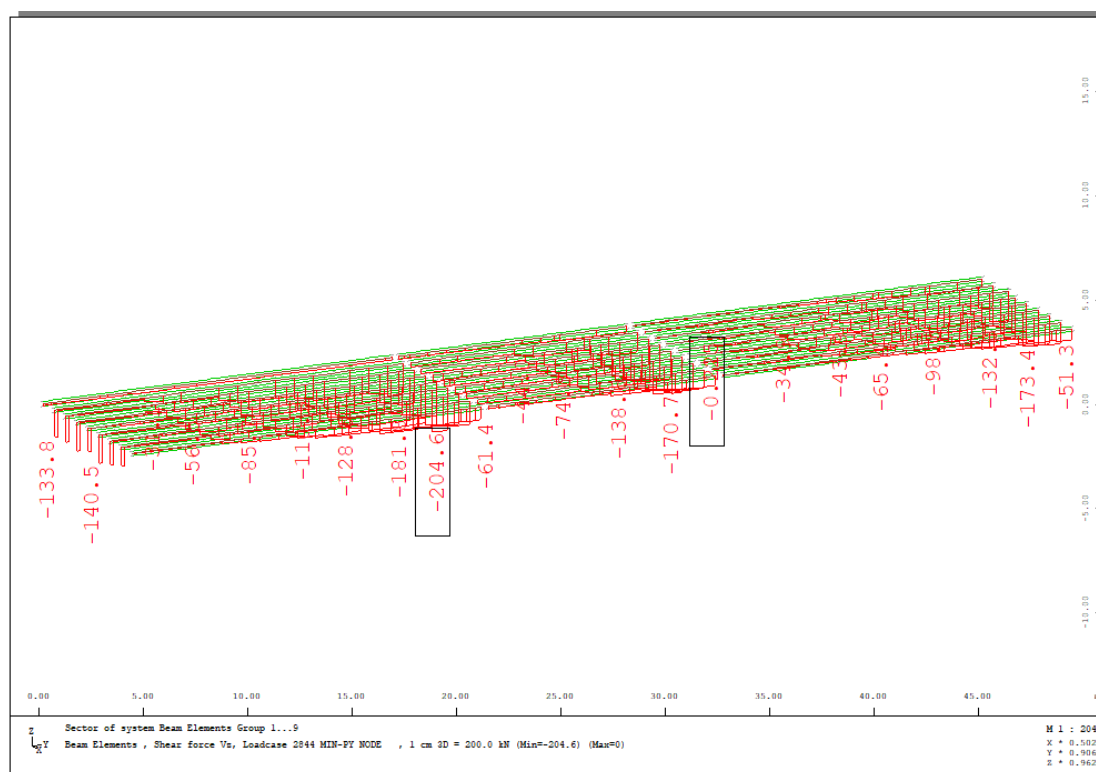
Slika 94. Prikaz osovinskog prometnog opterećenja za rubni trak (odabran samo jedan prikaz radi preglednosti jer se ista vrijednost proteže duž cijelog mosta)



Slika 95. Prikaz osovinskog prometnog opterećenja za rubni trak (odabran samo jedan prikaz radi preglednosti jer se ista vrijednost proteže duž cijelog mosta)

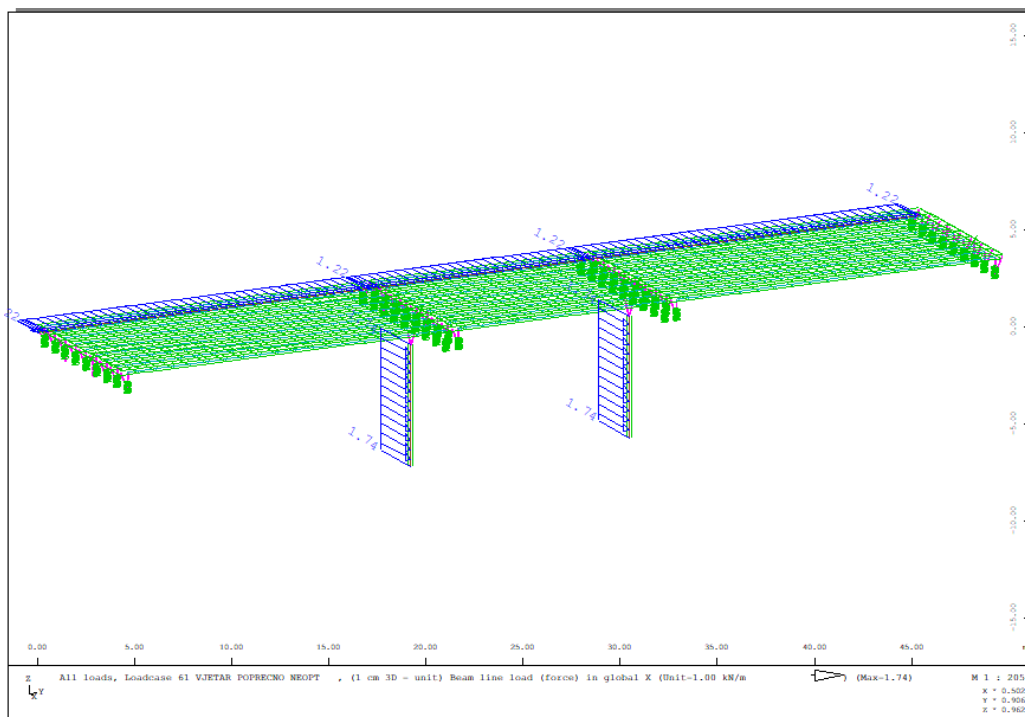


Slika 96. Osovinsko prometno opterećenje (My) [kNm]

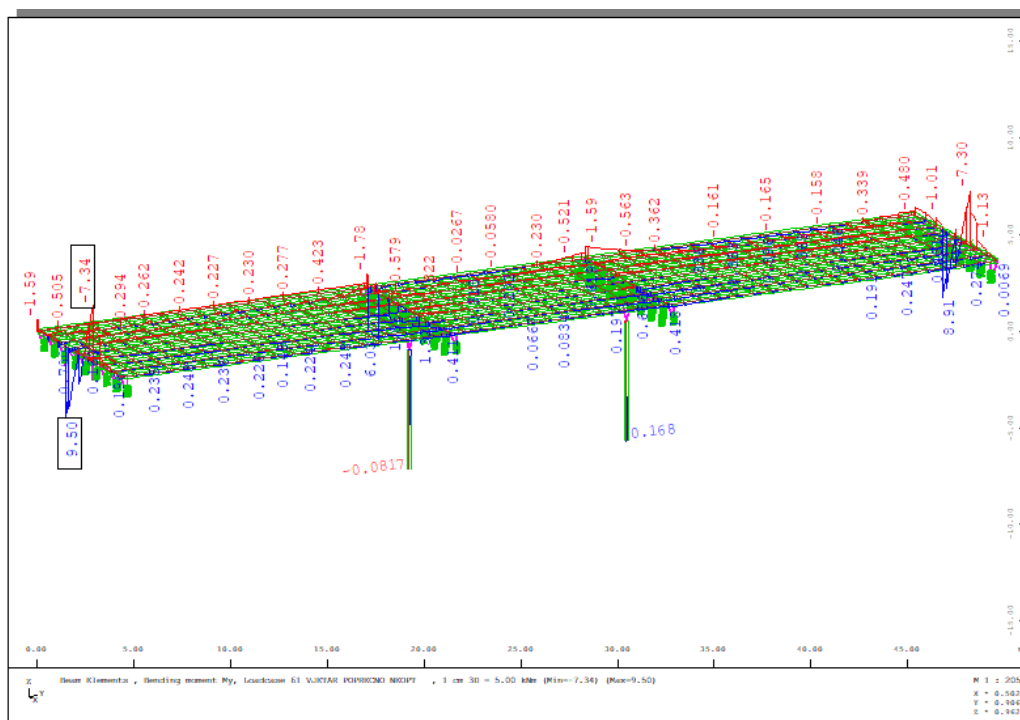
Slika 97. Osovinsko prometno opterećenje (M_y) [kNm]Slika 98. Osovinsko prometno opterećenje (V_z) [kN]

3.2.5.2. Vjetar

- Vjetar poprečno na neopterećen most (LC 61)

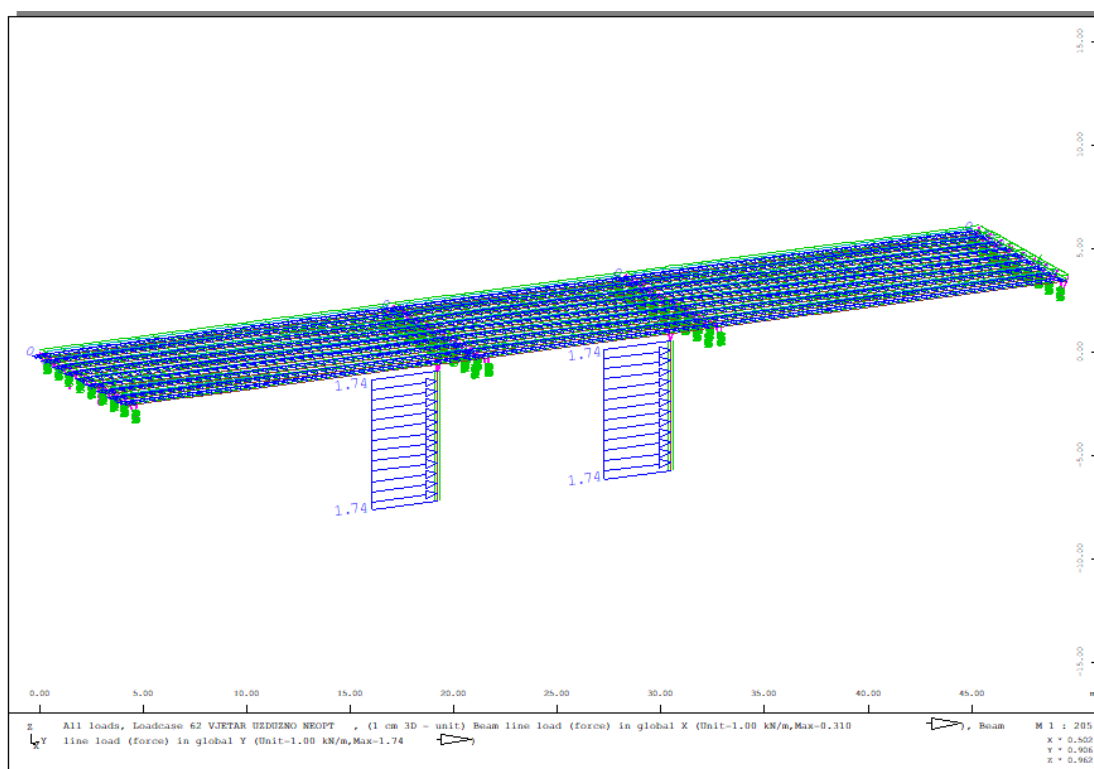


Slika 99. Vjetar na neopterećeni most poprečno

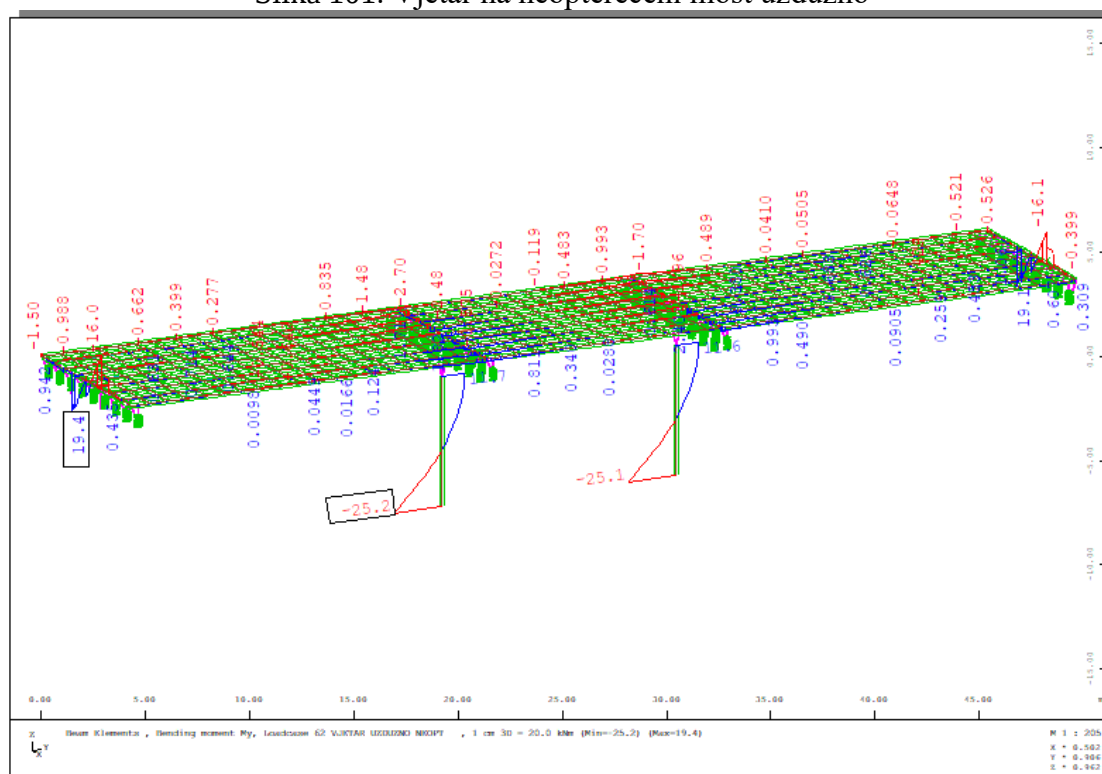


Slika 100. Vjetar na neopterećeni most poprečno (My) [kNm]

- Vjetar uzdužno na neopterećen most (LC 62)

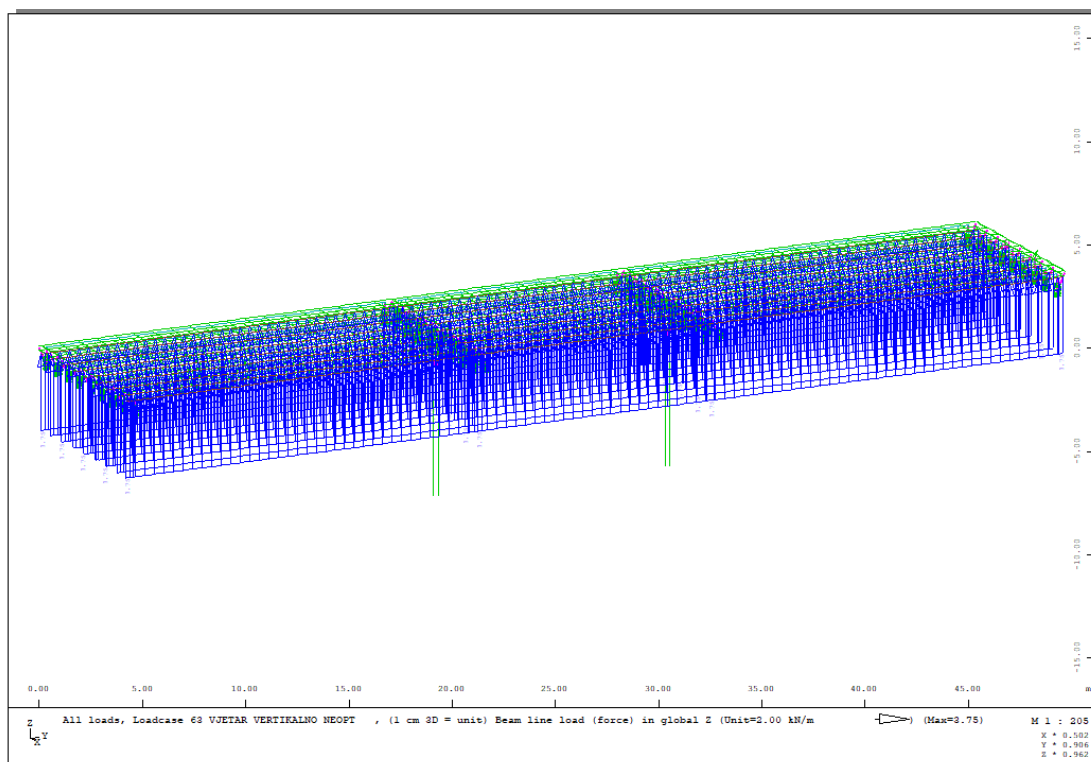


Slika 101. Vjetar na neopterećeni most uzdužno

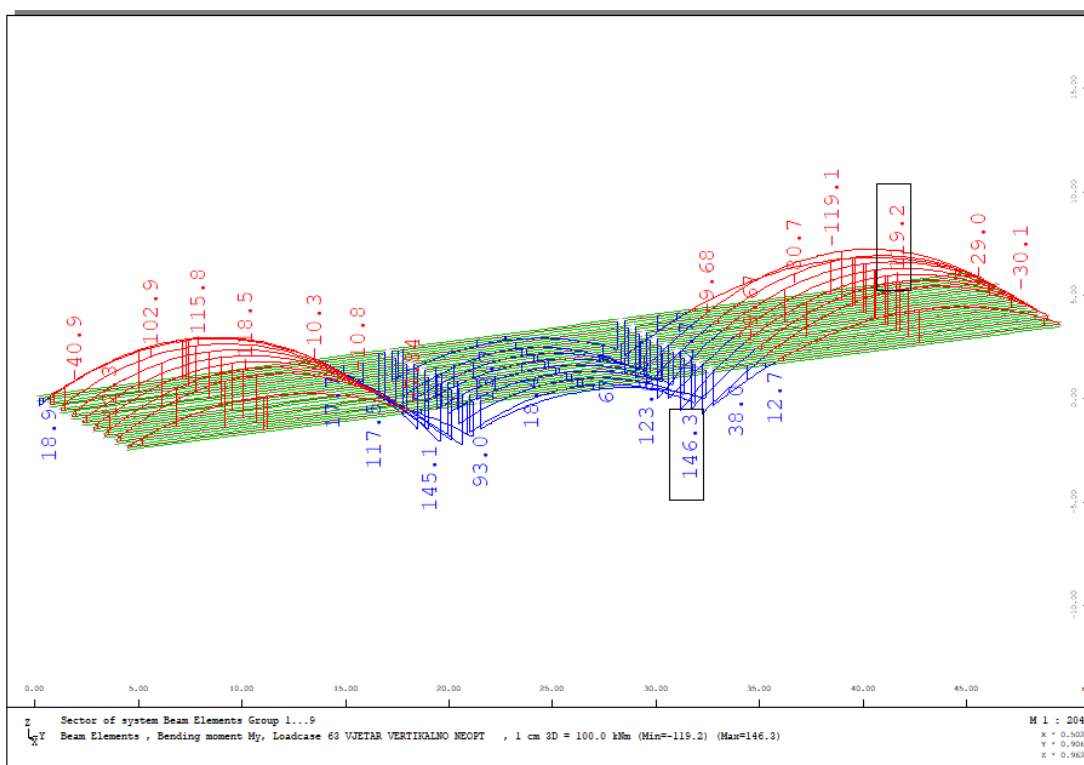


Slika 102. Vjetar uzdužno na neopterećeni most (my) [kNm]

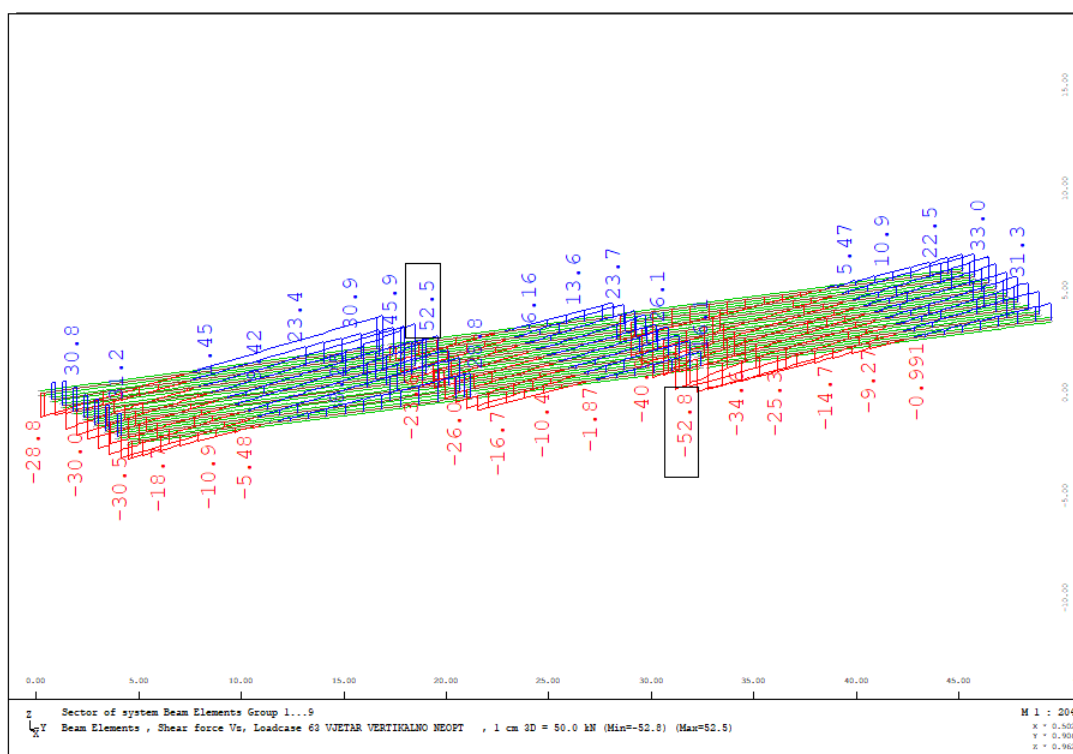
- Vjetar odižući na neopterećeni most (LC 63)



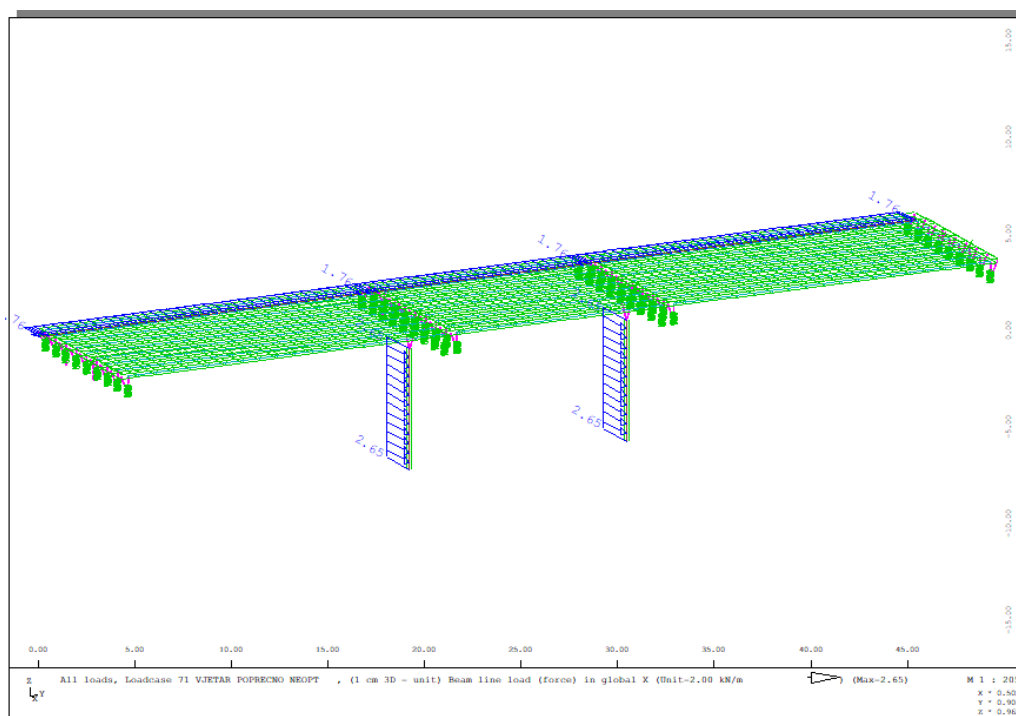
Slika 103. Odižući vjetar na neopterećeni most



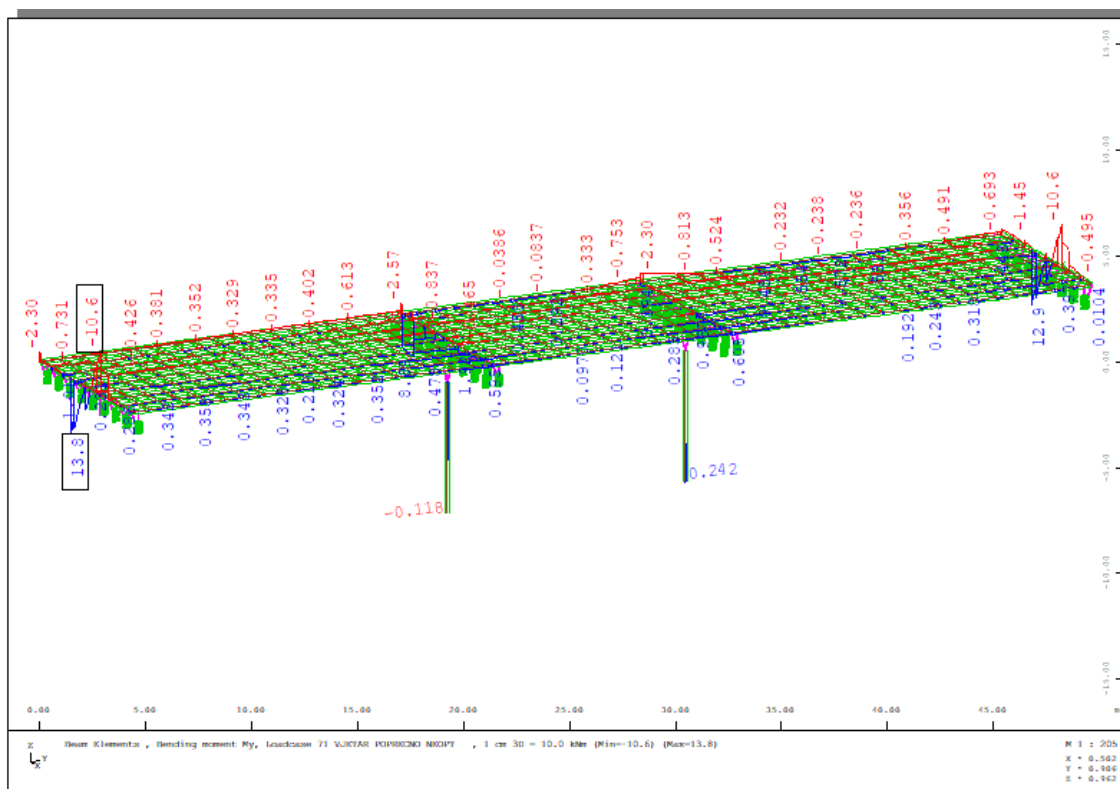
Slika 104. Odižući vjetar na neopterećeni most (My) [kNm]

Slika 105. Odižući vjetar na neopterećeni most (V_z) [kN]

- Vjetar poprečno (LC 71)

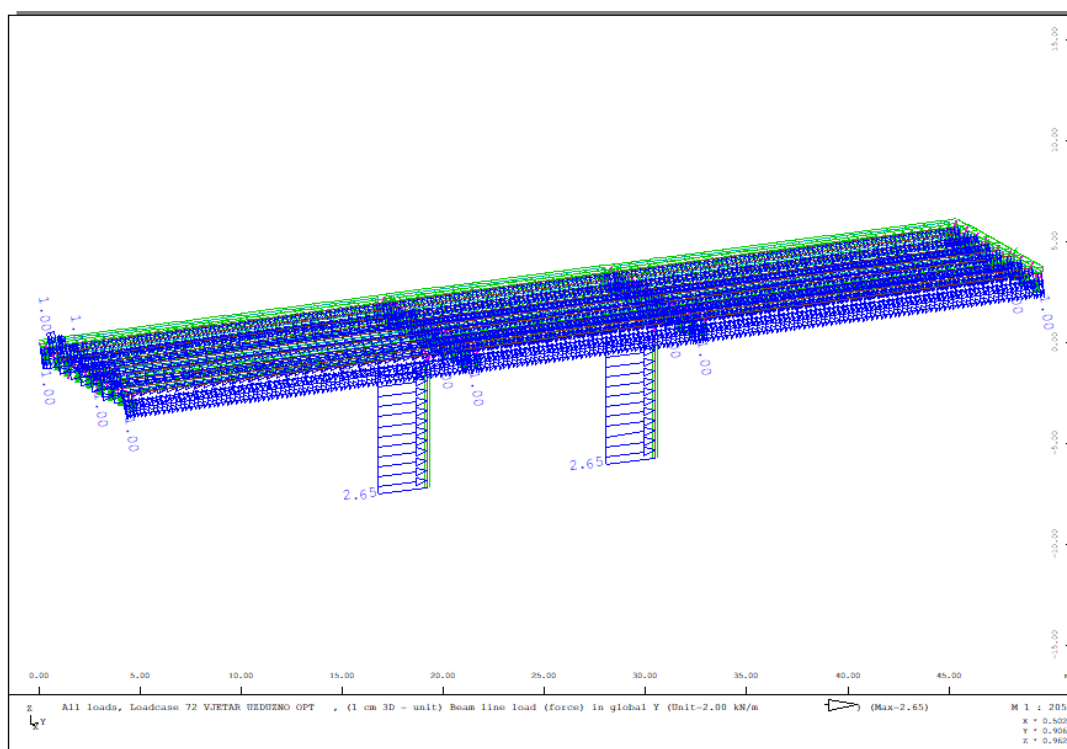


Slika 106. Vjetar na opterećeni most poprečno

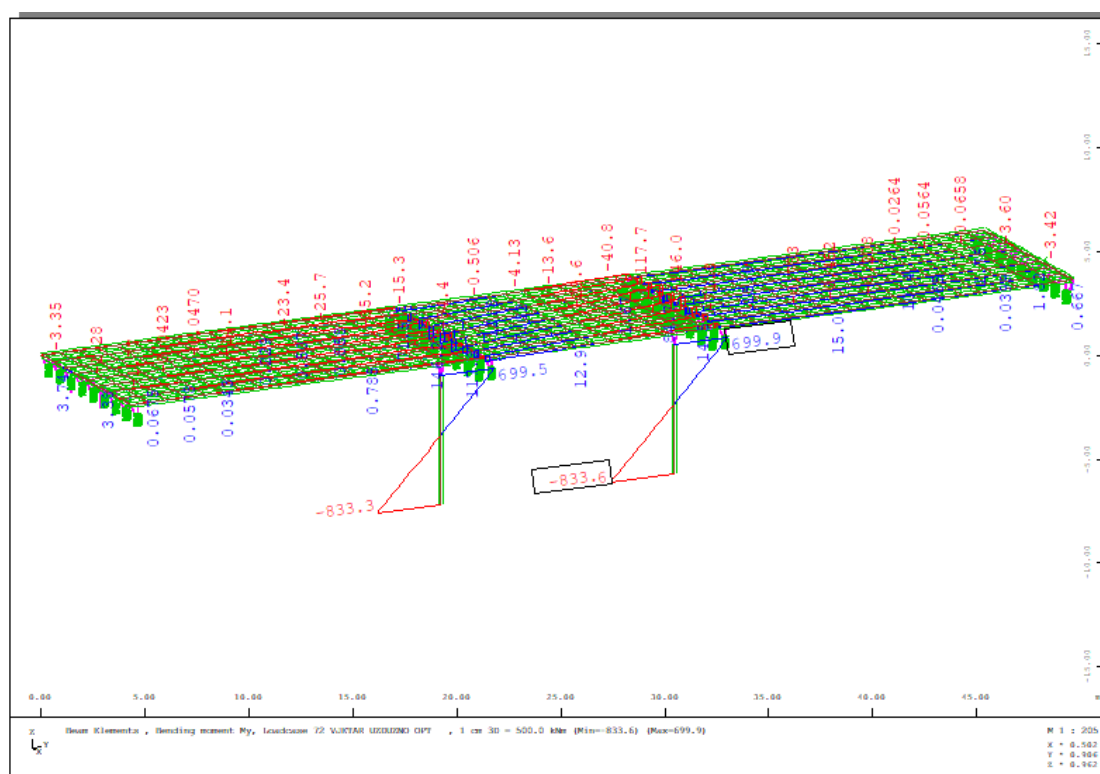


Slika 107. Vjetar poprečno na opterećeni most (my) [kNm]

- Vjetar uzdužno (LC 72)

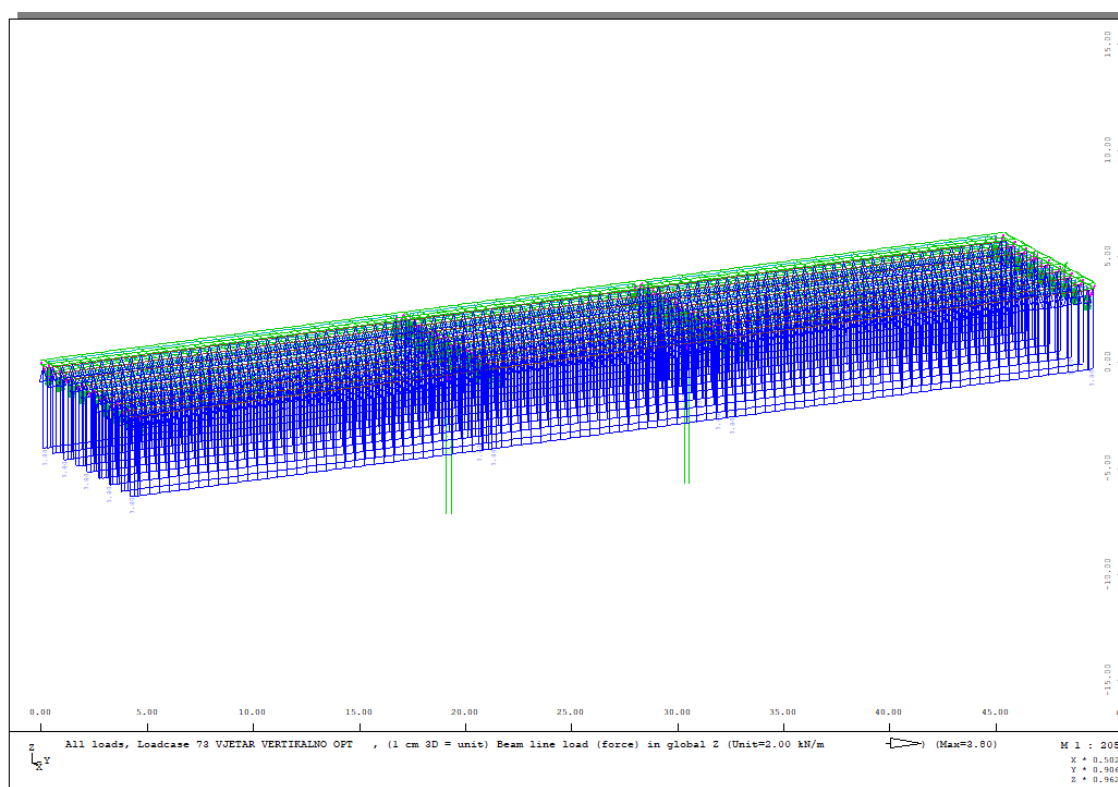


Slika 108. Vjetar na opterećeni most uzdužno

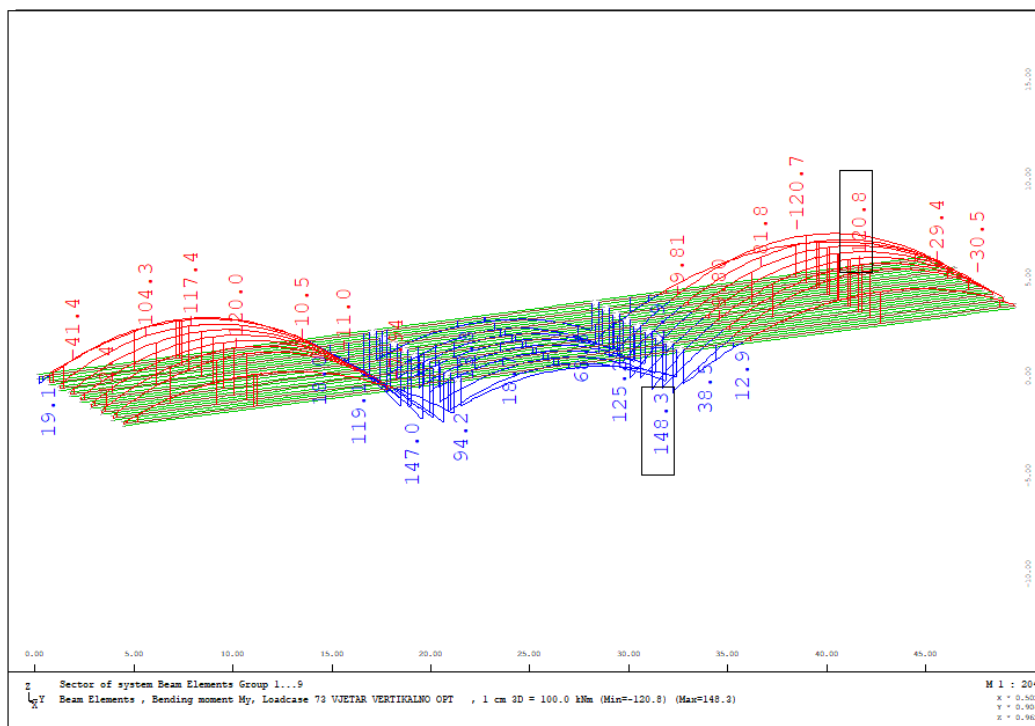
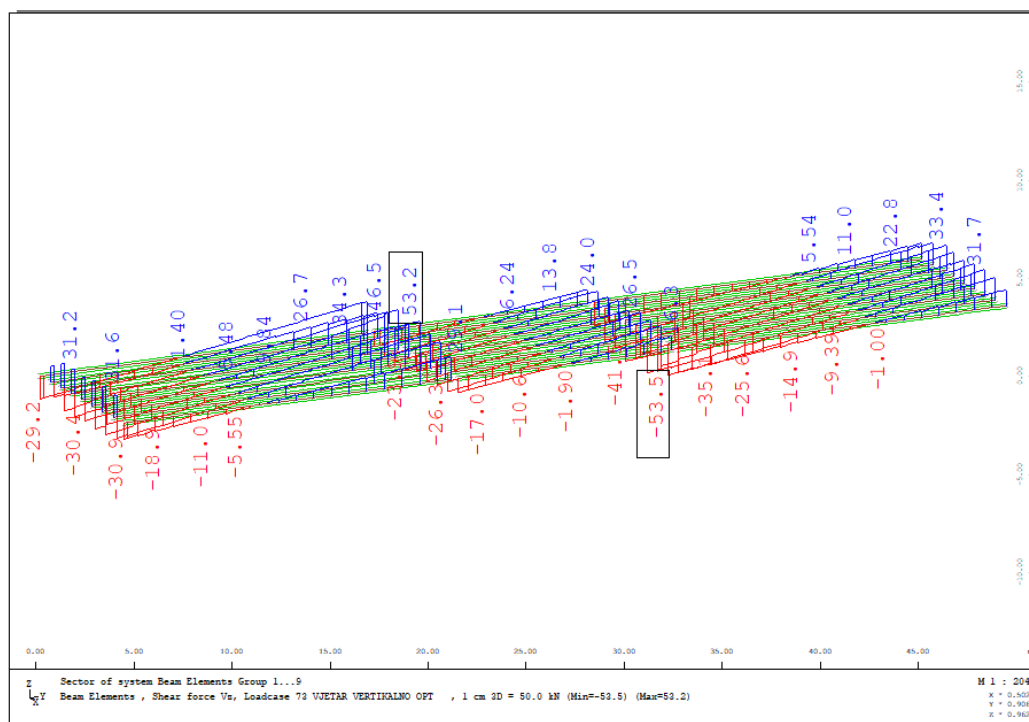


Slika 109. Vjetar uzdužno na opterećeni most (My) [kNm]

- Vjetar odižuću na opterećeni most (LC 73)



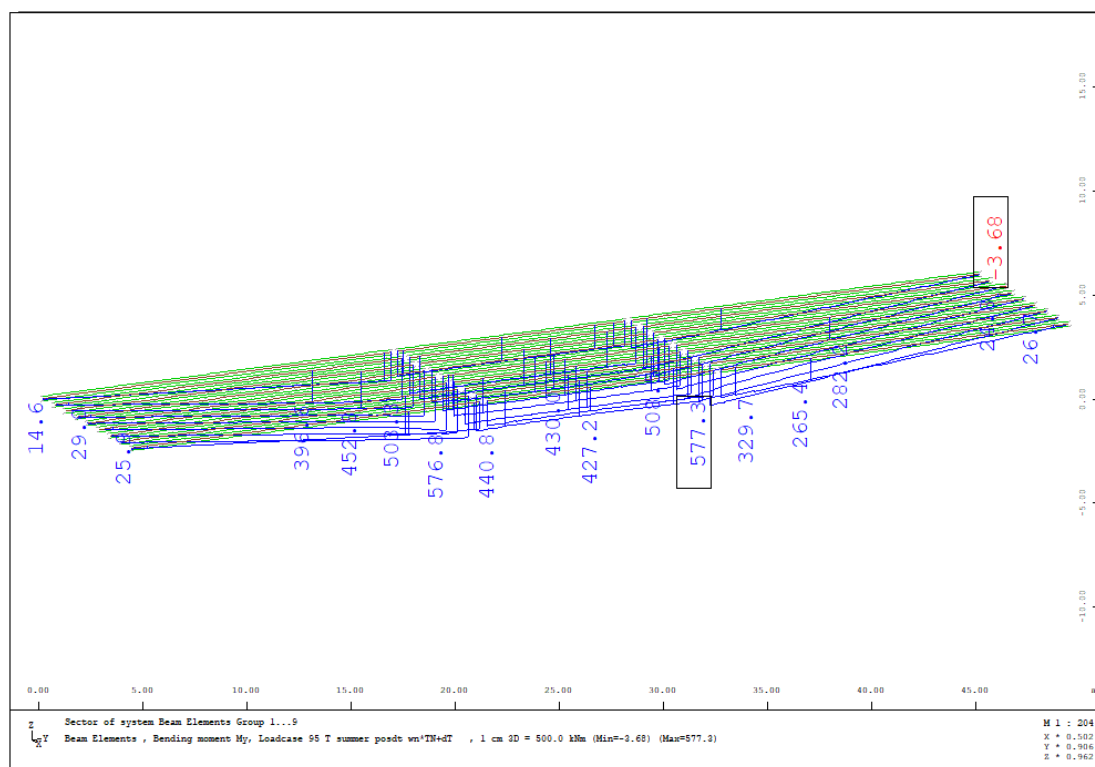
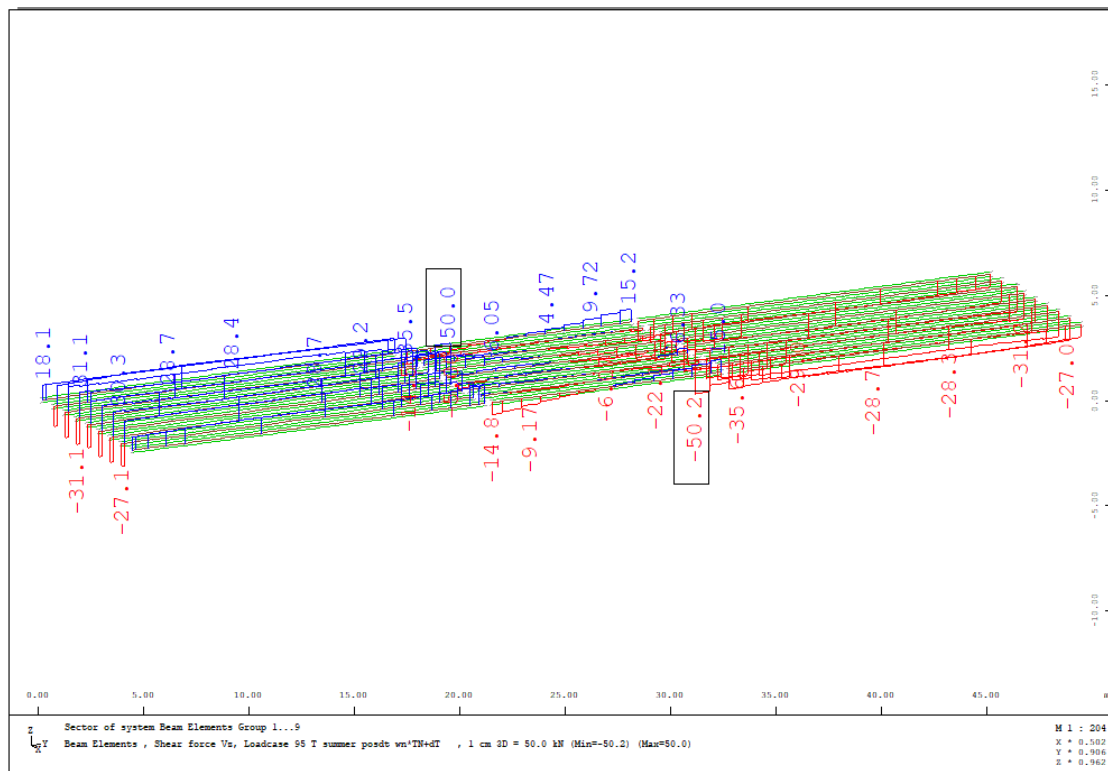
Slika 110. Odižuću vjetar na neopterećeni most

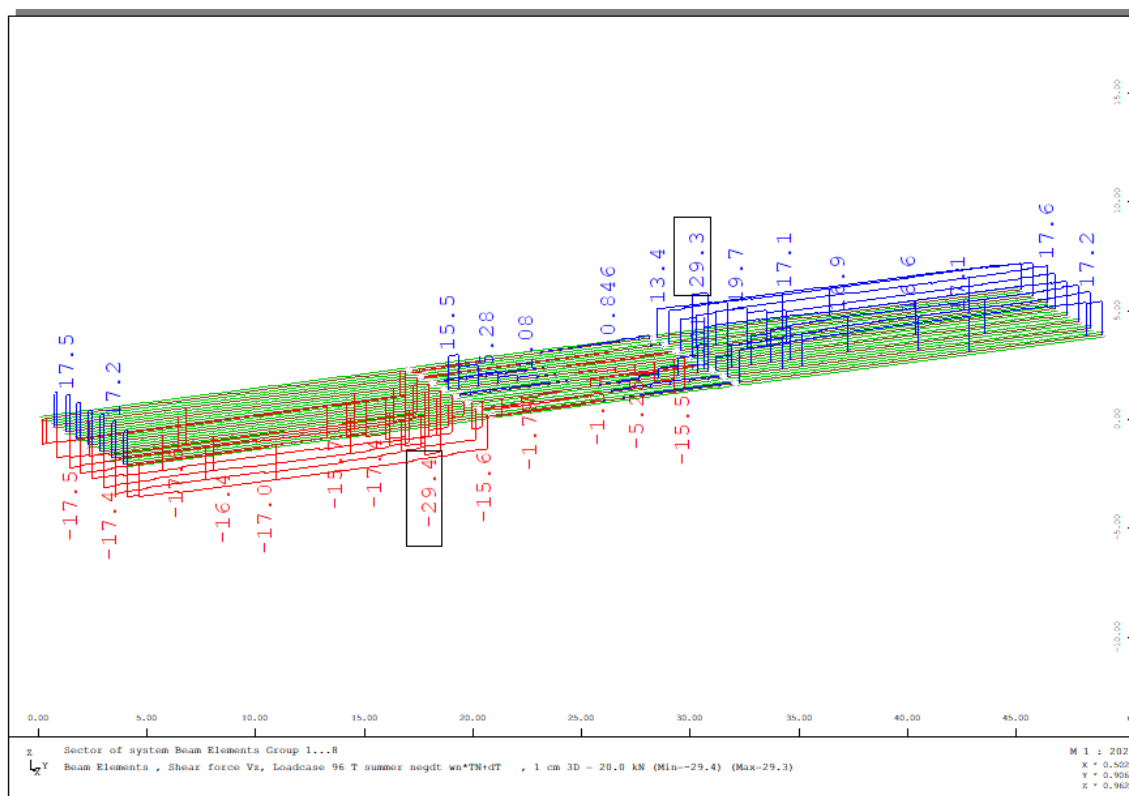
Slika 111. Vjetar vertikalno na opterećeni most (M_y) [kNm]Slika 112. Vjetar vertikalno na opterećeni most (V_z) [kN]

Zbog malih vrijednosti momenata od poprečnog i uzdužnog djelovanja vjetra na konstrukciju, momenti od tih utjecaja se ne uzimaju u obzir u proračunu. Vertikalno djelovanje (uzgon) nema značajne vrijednosti prema ostalim dominantnim opterećenjima te se također ne uzima u obzir u proračunu (također je suprotnih predznaka od ostalih opterećenje što znači da djeluje povoljno, a ovdje proračunavamo na najnepovoljniju kombinaciju djelovanja).

3.2.5.3. Temperatura

- Temperatura (LC 95,96)

Slika 113. Temperatura (M_y) [kNm]Slika 114. Temperatura (V_z) [kN]



Slika 115. Temperatura (Vz) [kN]

3.3. Kombinacije djelovanja (EN 1990)

Dimenzioniranje nosača mosta provedeno je prema **graničnom stanju nosivosti** za:

- stalnu ili prolaznu situaciju :

$$E_d = E_d \left[\sum_j (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_p \cdot P_k \right]$$

Dimenzioniranje elemenata mosta provedeno je prema **graničnom stanju uporabljivosti** za:

- rijetku ili karakterističnu kombinaciju djelovanja:

$$E_d = E_d \left[\sum_j G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right]$$

→ **Provjera raspucalosti presjeka** – ne raspucali su oni presjeci u kojima za karakterističnu kombinaciju djelovanja nije prekoračena srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona, f_{ctm} .

→ **Provjera naprezanja u čeliku za armiranje** – naprezanja u čeliku za armiranje pri karakterističnoj kombinaciji djelovanja ograničena su na $0,8 f_{yk} \cdot \sigma_s \leq 0,8 \times f_{yk}$,

(f_{yk} – karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje).

→ **Dokaz tlačnih naprezanja u betonu** – naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja trebaju biti $\sigma_c \leq 0,6 \times f_{ck}$ (karakteristične tlačne čvrstoće betona).

→ **Provjeru naprezanja u čeliku za prednapinjanje** – ograničenje naprezanja u čeliku za prednapinjanje na $0,75 f_{pk}$ za djelovanje karakteristične kombinacije djelovanja i srednje vrijednosti sile prednapinjanja. $\sigma_p \leq 0,75 \times f_{pk}$.

f_{pk} – karakteristična vrijednost čvrstoće čelika za prednapinjanje.

→ **Dokaz širine pukotina** – za razred izloženosti XC4 i XD3 dopuštena širina pukotina za karakterističnu kombinaciju djelovanja je $w_k = 0,2 \text{ mm}$

- nazovistalnu kombinaciju djelovanja:

$$E_d = E_d \left[\sum_j (G_{k,j}) + \sum_i (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right]$$

→ **Dokaz tlačnih naprezanja u betonu** – tlačna naprezanja u betonu ne smiju prijeći $0,45 f_{ck}$ za djelovanje nazovistalne kombinacije djelovanja. $\sigma_c \leq 0,45 \times f_{ck}$

- čestu kombinaciju djelovanja :

$$E_d = E_d \left[\sum_j (G_{k,j}) + \psi_{11} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \right]$$

→ **Dokaz rastlačenja (dekompresije)** – za razred izloženosti XC4 i XD1 dokaz rastlačenja se provodi za čestu kombinaciju djelovanja.

Djelovanje	Simbol	ψ_0	ψ_1	ψ_2	
Prometna opterećenja (vidjeti tablicu 4.4 norme EN 1992-2)	gr1a (LM1 + opterećenja pješačke ili biciklističke staze) ¹⁾	TS – prolazna situacija	0,75	0,75	0
		UDL – jednoliko raspodijeljeno opterećenje	0,40	0,40	0
		opterećenja pješačke + biciklističke staze ²⁾	0,40	0,40	0
	gr1b (pojedinačna osovina)		0	0,75	0
	gr2 (horizontalne sile)		0	0	0
	gr3 (opterećenja pješacima)		0	AC 0,40 AC	0
	gr4 (LM4 – opterećenje navalom ljudi)		0	AC – AC	0
	gr5 (LM3 – posebna vozila)		0	AC – AC	0
Sile vjetra	F_{wk} stalne proračunske situacije izvedba		0,6 0,8	0,2 –	0 0
	F_w^*		1,0	–	–
	Toplinska djelovanja	T_k	0,6 ³⁾	0,6	0,5
Opterećenja snijegom	$Q_{Sn,k}$ (tijekom izvedbe)		0,8	–	–
Opterećenja pri izvedbi	Q_c		1,0	–	1,0

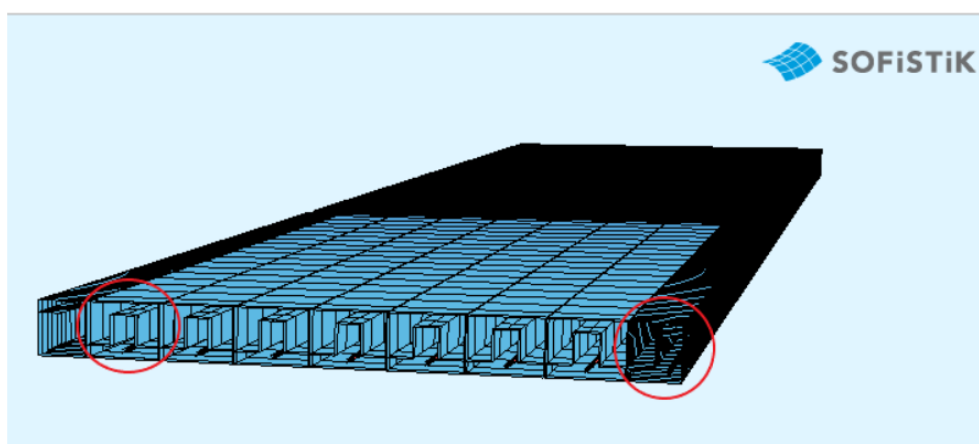
¹⁾ Preporučene vrijednosti za ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 za gr1a i gr1b dane su za cestovni promet u skladu s faktorima prilagodbe α_{Q1} , α_{Q2} , α_{Q3} i β_Q jednakim 1. Oni koji se odnose na UDL odgovaraju uobičajenom scenariju prometa u kojem dolazi rijetko do nagomilavanja teretnjaka. Za druge razrede cesta ili za očekivani promet smiju se odrediti druge vrijednosti, ovisno o odabiru odgovarajućih faktora α . Primjerice, vrijednost ψ_2 koja je različita od nule smije se uzeti samo za sustav UDL Modela opterećenja LM1, za mostove na kojima je jak kontinuiran promet. Vidjeti i normu EN 1998.

²⁾ Kombinaćijska vrijednost pješačkog i biciklističkog prometa spomenuta u tablici 4.4.a norme EN 1991-2 jest „umanjena“ vrijednost. Faktori ψ_0 i ψ_1 su primjenjivi za tu vrijednost.

³⁾ Preporučena vrijednost ψ_0 za toplinska djelovanja smije se u najviše slučajeva smanjiti na nulu za granična stanja nosivosti EQU, STR i GEO. Vidjeti i eurokodove za proračun.

Slika 116. Preporučene vrijednosti faktora ψ za cestovne mostove [7]

Odabrani su karakteristični obrnuti T i L nosač u prvom rasponu koji će se dalje proračunati:



Slika 117. Odabrani nosači

3.4. Prednapinjanje

3.4.1. Prednapinjanje obrnutog T nosača

3.4.1.1. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka T nosača

A – Površina poprečnog presjeka prednapetog betona

z_g – udaljenost od težišta do gornjeg ruba presjeka

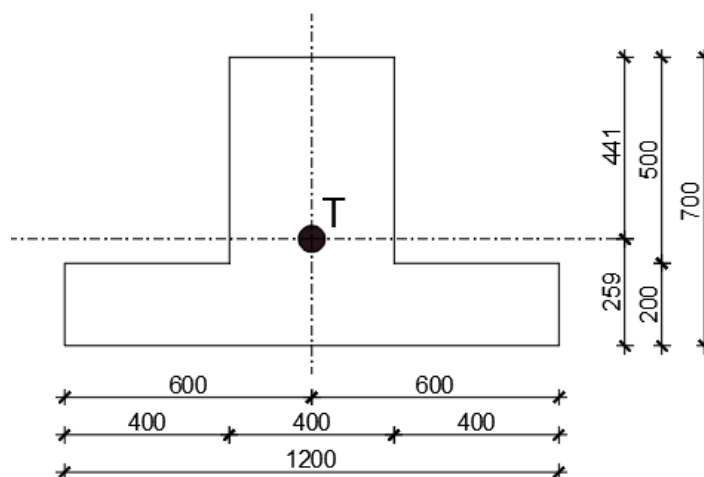
z_d – udaljenost od težišta do donjeg ruba presjeka

I – moment tromosti poprečnog presjeka

$W_g = \frac{I}{z_g}$ - moment otpora gornjeg dijela presjeka

$W_d = \frac{I}{z_d}$ - moment otpora donjeg dijela presjeka

Geometrijske karakteristike nosača	Bruto poprečni presjek
A	0,4400 m ²
z_d	0,2591 m
z_g	0,4409 m
I	0,0479 m ⁴
W_g	0,1086 m ³
W_d	0,1849 m ³



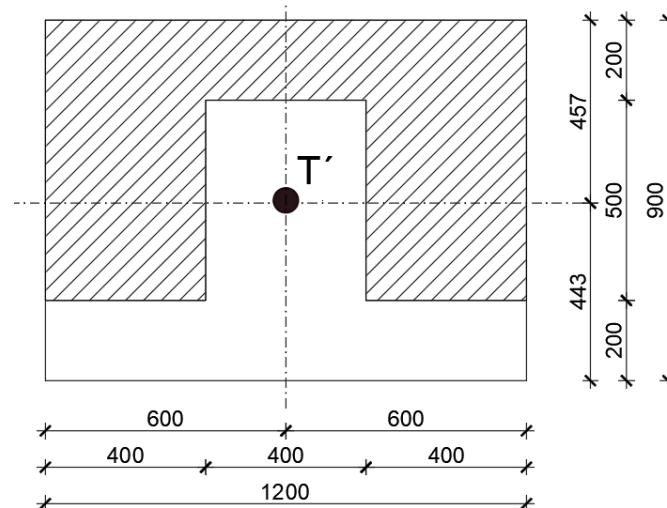
Slika 118. Poprečni presjek obrnutog T nosača

3.4.1.2. Geometrijske karakteristike spregnutog presjeka

S obzirom da su predgotovljeni nosač i dobetonirane ploče različite kvalitete, vrijednosti površina dobetoniranog dijela valja pomnožiti omjerom sekantnih modula elastičnosti dvaju različitih betona.

$$\begin{array}{lll} \text{- nosač} & \text{C50/60} & \rightarrow E_{cm} = 37000 \text{ N/mm}^2 \\ \text{- ploča} & \text{C35/45} & \rightarrow E_{cm} = 34000 \text{ N/mm}^2 \end{array}$$

$$\alpha = \frac{34000}{37000} = 0,919$$



Slika 119. Poprečni presjek spregnutog nosača

$$A'_c = A_c + \alpha \cdot d_{pl} \cdot b_{pl} = 0,4400 + 0,919(2 \cdot 0,4 \cdot 0,7 + 0,2 \cdot 0,4) = 1,0282 \text{ m}^2$$

$$z'_d = \frac{\sum A_{ci} \cdot y_{di}}{A'_c} = \frac{1,2 \cdot 0,2 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,45 + 0,919 \cdot (2 \cdot 0,4 \cdot 0,7 \cdot 0,55 + 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,8)}{1,0282} = 0,4433 \text{ m}^2$$

$$z'_g = h - z'_d = 0,9 - 0,4433 = 0,4567 \text{ m}$$

$$I'_c = I_{c0} + \sum A_{ci} \cdot y_{ti}^2 = 0,0479 + 0,4400 \cdot (0,4433 - 0,2591)^2 + 0,919 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 0,7^3}{12} + 0,28 \cdot (0,4567 - 0,35)^2 \right) + 0,919 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 0,2^3}{12} + 0,08 \cdot (0,4567 - 0,1)^2 \right) = 0,2313 \text{ m}^4$$

$$W'_d = \frac{I'_c}{z'_d} = \frac{0,2313}{0,4433} = 0,5217 \text{ m}^3$$

$$W'_g = \frac{I'_c}{z'_g} = \frac{0,2313}{0,4567} = 0,5065 \text{ m}^3$$

3.4.1.3. Određivanje potrebnog broja natega

Momenti dobiveni u Sofistiku:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 786,6 kNm$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 112,10 kNm$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 200,60 kNm$

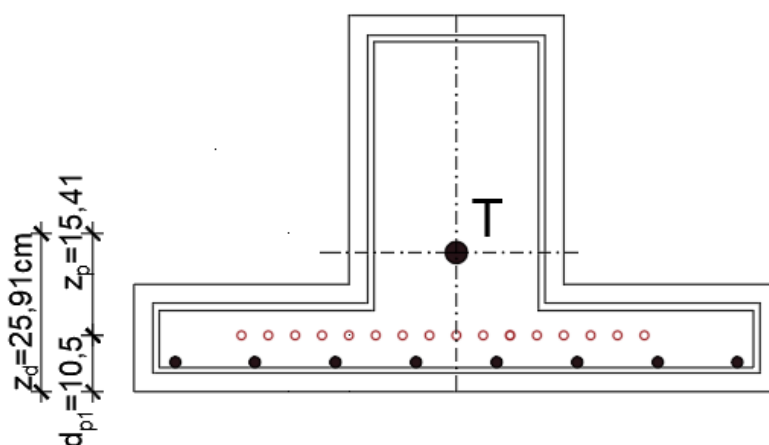
Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 490,80 kNm$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 396,60 kNm$

Samom određivanju broja užadi u glavnom nosaču prethodi odabir sustava prednapinjanja. Koristiti će se sustav prednapinjanja DYWIDAG i to uže spleteno od 7 žica, pri čemu je promjer užeta $d_p = 15,7 \text{ mm}$, a površina poprečnog presjeka užeta $A_p = 150 \text{ mm}^2$. Potreban broj užadi za prednapinjanje predgotovljenog nosača se ne može unaprijed odrediti bez pojedinih pretpostavki.

Budući da je u preliminarnom odabiru potrebnog broja užadi u nosaču (a time i ukupnu silu prednapinjanja u nosaču) potrebno poznavati krak sile prednapinjanja (udaljenost od težišta poprečnog presjeka nosača do zajedničkog težišta svih užadi za prednapinjanje) treba pretpostaviti broj užadi kako bi znali odrediti njihovo zajedničko težište. Zbog navedenog, postupak preliminarnog odabira potrebnog broja natega u nosaču je iterativni proces, koji zahtjeva barem dva koraka. Užad se duž cijelog nosača vodi u pravcu.

Određivanje udaljenosti težišta užadi od donjeg ruba nosača:



Slika 120. T presjek s pretpostavljenim nategama

$$d_{p1} = c_{nom} + \varphi_v + \frac{\varphi_u}{2} + u_{p,v} + \frac{u_{p,v}}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} + 5 = 10,5 \text{ cm}$$

$$z_d = 25,91 \text{ cm}$$

$$z_p = z_d - d_{p1} = 25,91 - 10,5 = 15,41 \text{ cm}$$

Najveća sila kojom se napreže natega P_0 (sila na aktivnom kraju $x=0$), neposredno nakon prednapinjanja ne smije premašiti vrijednost $P_0 = A_p \times \sigma_{p,max}$.

$$\sigma_{p,max} = \min \begin{cases} 0,80 \cdot f_{pk} = 0,80 \times 1860 = 1488 \text{ N/mm}^2 \\ 0,90 \cdot f_{p0,1k} = 0,90 \times 1640 = 1476 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{p,max} = 1476 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalna sila u užetu neposredno nakon prednapinjanja:

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} = 150 \times 1476 = 221400 \text{ N} = 221,40 \text{ kN}$$

Naprezanje u natezi neposredno nakon prednapinjanja ili prijenosa:

$$\sigma_{p,m0} = \min \begin{cases} 0,75 \cdot f_{pk} = 0,75 \times 1860 = 1395,0 \text{ N/mm}^2 \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \times 1640 = 1394,0 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{p,m0} = 1394,0 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalna sila u užetu neposredno nakon prijenosa naprezanja:

$$P_{m0} = A_p \cdot \sigma_{p,m0} = 150 \times 1394,0 = 209100 \text{ N} = 209,10 \text{ kN}$$

Za približno određivanje broja užadi (površina čelika za prednapinjanje) provjeravamo rastlačenje (dekompresiju).

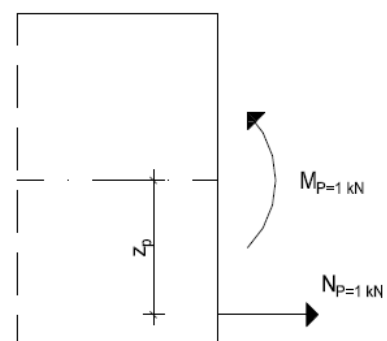
Za razred XC4 i XD1 i čestu kombinaciju djelovanja na užadi bližim rubu ne smiju se pojaviti **vlačna naprezanja**. Za ovu razinu proračuna gubici sile prednapinjanja se pretpostavljaju sa 20 %. Mjerodavan je proračunski presjek u polju u trenutku $t = \infty$.

Za djelovanje sile prednapinjanja od $P=1.0$ kN duž cijelog nosača (uz zanemarivanje unosa sile prednapinjanja na krajevima nosača) dobiju se rezne sile:

$$N_{P=1kN} = -1 \text{ kN}$$

$$M_{P=1kN} = z_p \cdot (N_{P=1kN}) = 0,1541 \cdot (-1) = -0,1541 \text{ kNm}$$

Moment u sredini polja za čestu kombinaciju djelovanja:



$$M_{Ed, freq}^{polje} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + \psi_{1,Q} \cdot M_Q + \psi_{1,q} \cdot M_q + \psi_{2,T} \cdot M_T = 786,6 + 112,10 + 0,75 \cdot 490,80 + 0,4 \cdot 200,6 + 0,5 \cdot 396,60 = 1545,34 kNm \rightarrow MJERODAVNO$$

$$M_{Ed, freq}^{polje} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + \psi_{1,T} \cdot M_T + \psi_{2,Q} \cdot M_Q + \psi_{2,q} \cdot M_q = 786,6 + 112,10 + 0,6 \cdot 396,60 + 0 \cdot 490,80 + 0 \cdot 200,6 = 1136,66 kNm$$

Uvjet za zadovoljavanje dokaza dekompresije za čestu kombinaciju djelovanja:

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{M_{Ed, freq}^{polje}}{W_d} + \frac{N_{Pk, inf}}{A_c} + \frac{M_{Pk, inf}}{W_d} = 0$$

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{1545,34}{0,1849} + P_{k, inf} \left[\frac{-1}{0,4400} + \frac{-0,1541}{0,1849} \right] = 0$$

$$\text{potrebno} \rightarrow P_{k, inf} = 2690,70 kN$$

Potrebna srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku t=0:

$$P_{m0} = \frac{P_{k, inf}}{0,8 \cdot r_{inf}} = \frac{2690,70}{0,8 \cdot 0,95} = 3540,40 kN$$

Koeficijenti za određivanje karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja prema EN 1992-1-1:2013 za prethodno prednapinjanje iznose:

$$r_{inf} = 0,95$$

$$r_{sup} = 1,05$$

Uz pretpostavku da se natege mogu prednapeti do naprezanja:

$$\sigma_{p, m0} = 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 1640 = 1394,0 N / mm^2$$

Potrebna površina prednapete armature:

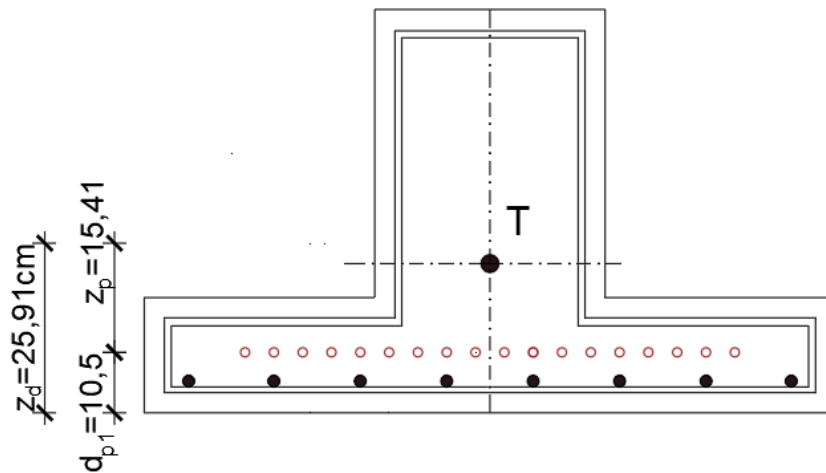
$$A_{p, potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{p, m0, max}} = \frac{3540,40}{139,4} = 25,40 cm$$

Potreban broj užadi prednapete armature:

$$n_p = \frac{A_{p, potr}}{A_p} = \frac{25,40}{1,5} = 16,93$$

$$ODABRANO \Rightarrow 18 \text{ UŽADI } A_p = 18 \times 150 = 2700 mm^2 = 0,0027 m^2$$

Ponovljen proračun:



Slika 121. T nosač s pretpostavljenim nategama- ponovljeni proračun

$$d_{p1} = c_{nom} + \varphi_v + \frac{\varphi_u}{2} + u_{p,v} + \frac{u_{p,v}}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} + 5 = 10,5 \text{ cm}$$

$$z_d = 25,91 \text{ cm}$$

$$z_p = z_d - d_{p1} = 29,44 - 10,5 = 15,41 \text{ cm}$$

Za odabrano težište potrebno je ponovno provjeriti broj natega.

Uvjet za zadovoljavanje dokaza dekompresije za čestu kombinaciju djelovanja:

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d} + \frac{N_{Pk,inf}}{A_c} + \frac{M_{Pk,inf}}{W_d} = 0$$

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{1545,34}{0,1849} + P_{k,inf} \left[\frac{-1}{0,4400} + \frac{-0,1541}{0,1849} \right] = 0$$

$$\text{potrebno} \rightarrow P_{k,inf} = 2690,70 \text{ kN}$$

Potrebna srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku $t=0$:

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,8 \times r_{inf}} = \frac{2690,70}{0,8 \times 0,95} = 3540,40 \text{ kN}$$

Koeficijenti za određivanje karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja prema EN 1992-1-1:2013 za prethodno prednapinjanje iznose:

$$r_{inf} = 0,95$$

$$r_{sup} = 1,05$$

Uz pretpostavku da se natege mogu prednapeti do naprezanja:

$$\sigma_{p,m0} = 0,85 \times f_{p0,1k} = 0,85 \times 1640 = 1394,0 \text{ N/mm}^2$$

Potrebna površina prednapete armature:

$$A_{p, \text{potr}} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{p, m0, \text{max}}} = \frac{3540,40}{139,4} = 25,40 \text{ cm}$$

Potreban broj užadi prednapete armature:

$$n_p = \frac{A_{p, \text{potr}}}{A_p} = \frac{25,40}{1,5} = 16,93$$

ODABRANO $\Rightarrow$ 18 UŽADI $A_p = 18 \times 150 = 1500 \text{ mm}^2 = 0,0027 \text{ m}^2$

3.4.1.4. Idealni poprečni presjek

Uzimaju se u obzir poprečni presjeci čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\alpha_{e,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{37000} = 5,41$$

Površina idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} A_{ci} &= A_c + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s = \\ &= 0,4400 + (5,27 - 1) \cdot 0,0027 + (5,41 - 1) \cdot 0,0025 = 0,4626 m^2 \end{aligned}$$

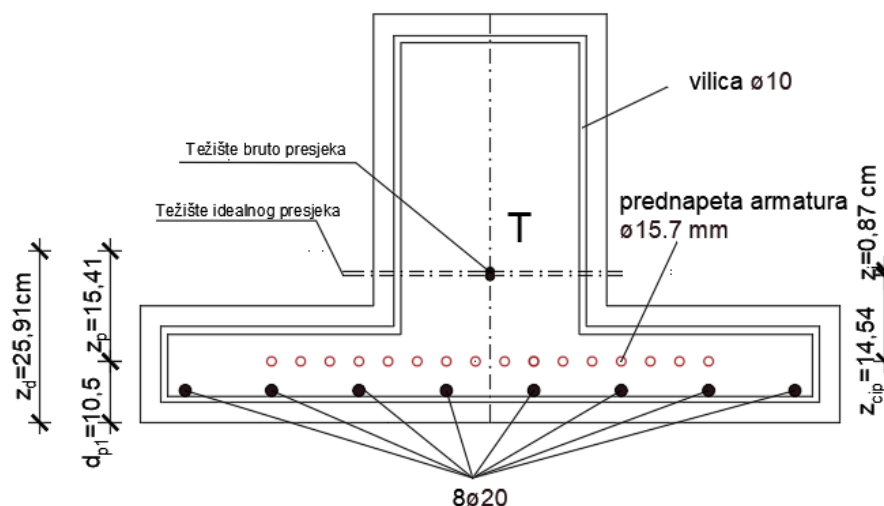
Udaljenost težišta bruto presjeka i težišta idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} z_i &= (\alpha_{e,p} - 1) \cdot z_p \cdot \frac{A_p}{A_{ci}} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot z_s \cdot \frac{A_s}{A_{ci}} = \\ &= (5,27 - 1) \cdot 0,1541 \cdot \frac{0,0027}{0,4613} + (5,41 - 1) \cdot 0,2041 \cdot \frac{0,0025}{0,4613} = 0,0087 m \end{aligned}$$

$$z_{cip} = z_p - z_i = 0,1541 - 0,0087 = 0,1454 m$$

Moment tromosti idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} I_{ci} &\cong I + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p \cdot z_p \cdot z_{cip} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s \cdot z_s \cdot z_{cis} = \\ &= 0,0479 + (5,27 - 1) \cdot 0,0027 \cdot 0,1541 \cdot 0,1454 + (5,41 - 1) \cdot 0,0025 \cdot 0,2041 \cdot 0,1958 = \\ &= 0,0479 + 0,0026 + 0,00044 = 0,0509 m^4 \end{aligned}$$



Slika 122. Idealni poprečni presjek obrnutog T nosača

3.4.1.5. Idealni spregnuti poprečni presjek

Uzimaju se u obzir poprečni presjeci čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\alpha_{e,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{37000} = 5,41$$

Površina idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} A_{ci}' &= A_c' + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s = \\ &= 1,0282 + (5,27 - 1) \cdot 0,0027 + (5,41 - 1) \cdot 0,0025 = 1,0508 m^2 \end{aligned}$$

Udaljenost težišta bruto presjeka i težišta idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} z_i' &= (\alpha_{e,p} - 1) \cdot z_p \cdot \frac{A_p}{A_{ci}'} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot z_s \cdot \frac{A_s}{A_{ci}'} = \\ &= (5,27 - 1) \cdot 0,3383 \cdot \frac{0,0027}{1,0508} + (5,41 - 1) \cdot 0,3783 \cdot \frac{0,0025}{1,0508} = 0,0078 m \end{aligned}$$

$$z_{cip}' = z_p - z_i' = 0,3383 - 0,0078 = 0,3305 m$$

Moment tromosti idealnog poprečnog presjeka:

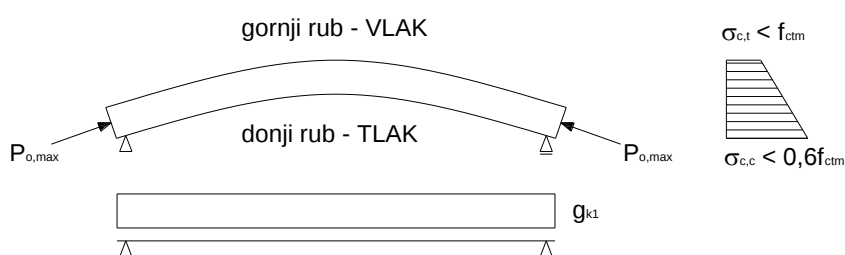
$$\begin{aligned} I_{ci}' &\cong I' + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p \cdot z_p \cdot z_{cip}' + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s \cdot z_s \cdot z_{cis}' = \\ &= 0,2313 + (5,27 - 1) \cdot 0,0027 \cdot 0,3383 \cdot 0,3305 + (5,41 - 1) \cdot 0,0025 \cdot 0,3783 \cdot 0,3705 = \\ &= 0,2313 + 0,0013 + 0,0015 = 0,2341 m^4 \end{aligned}$$

3.4.1.6. Dopušteno područje sile prednapinjanja – Magelova grafička metoda

Predgotovljeni nosač prolazi kroz nekoliko faza izgradnje, stoga je potrebno provjeriti, hoće li se u tim različitim fazama u nosaču pojaviti naprezanja veća od dopuštenih. Magelova grafička metoda omogućuje da odaberemo silu prednapinjanja koja će za odabrani krak sile rezultirati takvim naprezanjima koja zadovoljavaju početno zadane uvjete. Provjeriti će se da li je odabrani broj užadi i njemu pripadajući krak sile unutar dopuštenog područja sile prednapinjanja.

1. Faza – Transport

Dok je prednapeti nosač u fazi transporta za njega moramo ispuniti slijedeće uvjete:

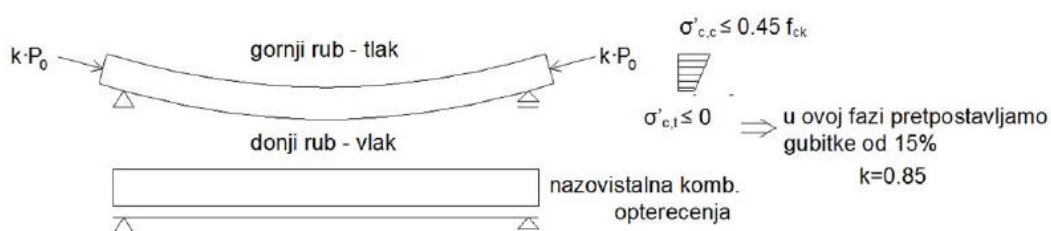


$$\text{- gornji rub: } \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0}}{A_c} - \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0} \cdot z_{\text{tran}}}{W_g} + \frac{M_{gk1}}{W_g} = \sigma_{c,t} \leq f_{ctm} \quad \text{vlak (1)}$$

$$\text{- donji rub: } \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0}}{A_c} + \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0} \cdot z_{\text{tran}}}{W_d} - \frac{M_{gk1}}{W_d} = \sigma_{c,c} \leq 0,6 \cdot f_{ck} \quad \text{tlak (2)}$$

2. Faza - Uporaba

U konačnom stanju uporabe naprezanja na nosaču moraju ispunjavati sljedeće uvjete:



$$\text{- gornji rub: } \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}}}{A_{\text{c}}'} - \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}} \cdot z}{W_{\text{g}}'} + \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{g}}'} = \sigma_{\text{c,c}}' \leq 0,45 \cdot f_{\text{ck}} \quad \text{tlak (3)}$$

$$\text{- donji rub: } \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}}}{A_{\text{c}}'} + \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}} \cdot z}{W_{\text{d}}'} - \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{d}}'} = \sigma_{\text{c,t}}' \leq 0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{vlak (4)}$$

Preformuliranjem izraza 1 - 4 dobivamo izraze koji nam služe za crtanje Maginelovih pravaca koji predstavljaju odnose $1/P_{\text{m0}}$ i kraka sile prednapinjanja z .

$$\text{iz (3) pravac 1 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}'} - \frac{z}{W_{\text{g}}'} \right)}{\left(0,45 \cdot f_{\text{ck}} - \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{g}}'} \right)} \quad \text{gornji rub – uporaba}$$

$$\text{iz (1) pravac 2 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{r_{\text{sup}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} - \frac{z_{\text{tran}}}{W_{\text{g}}} \right)}{\left(f_{\text{ctm}} - \frac{M_{\text{gk1}}}{W_{\text{g}}} \right)} \quad \text{gornji rub - transport}$$

$$\text{iz (4) pravac 3 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}'} + \frac{z}{W_{\text{d}}'} \right)}{\left(\sigma_{\text{c,t}}' + \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{d}}'} \right)} \quad \text{donji rub - uporaba}$$

$$\text{iz (2) pravac 4 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{r_{\text{sup}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} + \frac{z_{\text{tran}}}{W_{\text{d}}} \right)}{\left(0,6 \cdot f_{\text{ck}} + \frac{M_{\text{gk1}}}{W_{\text{d}}} \right)} \quad \text{donji rub – transport}$$

Pravac 1 (uporaba – gornji rub)

$$\frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{0,80 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{1}{0,4400} - \frac{z}{0,1086} \right)}{\left(0,45 \cdot 50000 - \frac{1545,34}{0,1086} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_1 \text{ pravca 1} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{\text{m0}}} = 20,89 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_1 \text{ pravca 1} \quad \rightarrow \quad z = k_d = \frac{I/A}{z_g} = 0,2469 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 0 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 2 (transport – gornji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \geq \frac{1,05 \cdot \left(\frac{1}{0,4400} - \frac{z}{0,1086} \right)}{\left(-4100 - \frac{786,60}{0,1086} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_2 \text{ pravca 2} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = -21,04 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_2 \text{ pravca 2} \quad \rightarrow \quad z = k_d = 0,2469 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 0 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 3 (uporaba – donji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \leq \frac{0,8 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{z}{0,1849} \right)}{\left(0 + \frac{1545,34}{0,1849} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_3 \text{ pravca 3} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 20,68 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_3 \text{ pravca 3} \quad \rightarrow \quad z = k_d = 0,2469 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 32,81 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 4 (transport – donji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \leq \frac{1,05 \cdot \left(\frac{1}{0,440} + \frac{z}{0,1849} \right)}{\left(0,6 \cdot 50000 + \frac{786,60}{0,1849} \right)} \cdot 10^5$$

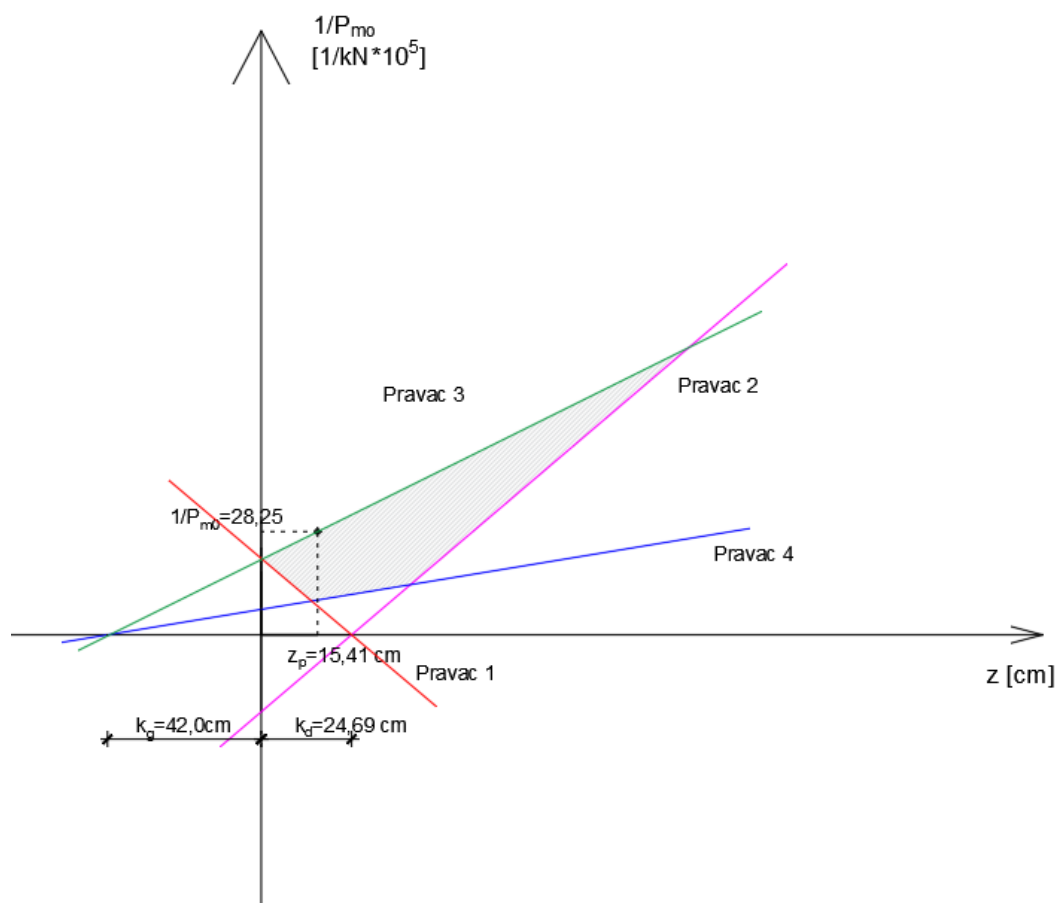
$$\text{- točka } A_4 \text{ pravca 4} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 6,97 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_4 \text{ pravca 4} \rightarrow z = k_d = 0,2469 \text{ m} \rightarrow \frac{1}{P_{m0}} = 11,06 \text{ kN}^{-1}$$

Provjera da li je potrebna sila prednapinjanja unutar dopuštenog područja:

$$\frac{1}{P_{p,m0,potrebno}} = \frac{1}{3540,40} \cdot 10^5 = 28,25 \text{ kN}^{-1}$$

krak sile = 15,41 cm $\rightarrow$ ZADOVOLJAVA



Slika 125. Dopusšteno područje sile prednapinjanja za T nosač

3.4.1.7. Gubici sile prednapinjanja kod prethodnog prednapinjanja

3.4.1.7.1. Trenutni gubici sile prednapinjanja

Trenutni gubici događaju se tijekom napinjanja užadi te prije i kod prijenosa naprezanja na betonski element.

Elastični gubici sile prednapinjanja (elastično skraćanje betonskog elementa)

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\rho_{pi} = \frac{A_p}{A_{ci}} = \frac{0,0024}{0,4626} = 0,0052$$

$$I_{ci} = 0,0509m^4$$

$$z_{cip} = 0,1454m$$

$$A_p = 0,0027m^2$$

$$\frac{P_{m0}}{P_{max}} = 1 - \alpha_{e,p} \left(\rho_{pi} + \frac{A_p \times z_{cip}^2}{I_{ci}} \right) = 1 - 5,27 \left(0,0052 + \frac{0,0027 \times 0,1454^2}{0,0509} \right) = 0,967$$

Nakon elastičnog skraćanja betonskog elementa kod punog iskorištavanja užadi $\sigma_{p0,max}$ (naprezanje u užetu nakon trenutnog gubitka) iznosi:

$$\sigma_{pm0,el} = (\sigma_{p,max}) \times \left(\frac{P_{m0}}{P_{max}} \right) = 1476 \times 0,967 = 1427,71N / mm^2$$

Dopušteno naprezanje $\sigma_{pm0} = 1394,0N / mm^2$ je premašeno, u daljnjem proračunu se koristi

$\sigma_{pm0} = 1394,0N / mm^2$ kao mjerodavno .

3.4.1.7.2. Vremenski gubici sile prednapinjanja

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}$$

$\Delta\sigma_{pr}$ - apsolutna vrijednost promjene naprezanja u kabelu na mjestu x , u trenutku t , uslijed opuštanja prednapetog čelika. Određuje se za naprezanje $\sigma_p = \sigma_p (G + P_{m0} + \psi_2 Q)$ što je početno naprezanje u užetu od početnog prednapinjanja i nazovistalnog djelovanja.

$\varphi(t, t_0)$ - koeficijent puzanja u trenutku t i za primjenu opterećenja u trenutku t_0

$\sigma_{c,QR}$ - naprezanja u betonu, uz užad, od vlastite težine i početnog prednapinjanja i ostalih nazovi stalnih djelovanja koja su važna

ε_{cs} - proračunata deformacija od skupljanja (apsolutna vrijednost)

E_p – modul elastičnosti prednapete armature

E_{cm} – modul elastičnosti betona

A_c – površina betonskog presjeka

A_p – površina svih prednapetih natega na mjestu x

I_c – moment tromosti betonskog presjeka

z_{cp} – udaljenost između težišta betonskog presjeka i težišta užadi

- Skupljanje betona

Ukupna deformacija prouzročena skupljanjem:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 1,828 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-4} = 2,828 \times 10^{-4} = 0.283 \text{‰}$$

ε_{cd} - deformacija skupljanja zbog sušenja, razvija se polagano jer ovisi o migraciji vode kroz očvrsnuli beton

ε_{ca} - deformacija autogenog skupljanja, razvija se tijekom očvršćavanja betona a veći dio se događa u prvim danima nakon betoniranja

Konačna vrijednost deformacije skupljanja zbog sušenja:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,864 \cdot 2,115 \cdot 10^{-4} = 1,828 \times 10^{-4}$$

k_h – koeficijent ovisan o srednjem polumjeru presjeka h_0 prema EN 1992-1-1:2013 tablici 3.3

Tablica 12. Vrijednost k_h [8]

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$\varepsilon_{cd,0}$ - osnovna deformacija skupljanja sušenjem može se uzeti iz tablice 3.2 prema EN 1992-1-1, gdje je dana srednja vrijednost s koeficijentom varijacije od oko 30 % (nominalna

vrijednost u ‰ za beton sa cementom CEM razreda N) ili se proračuna prema formuli (Dodatak B) :

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

gdje je; f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona (MPa)

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{80}{100} \right)^3 \right] = 0,756$$

- koeficijent za razred N cementa (CEM II 32.5R)

$$\alpha_{ds,1} = 4$$

$$\alpha_{ds,2} = 0,12$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{-0,12 \cdot \frac{58}{10}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 0,756 = 2,115 \cdot 10^{-4} = 0,21 \text{ ‰}$$

Razvoj deformacije skupljanja sušenjem:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds} \cdot (t, t_s) \cdot \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h$$

t – starost betona u danima u trenutku promatranja

t_s – starost betona (u danima) na početku skupljanja sušenjem (obično na kraju njege – 7 dana)

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(30000 - 7)}{(30000 - 7) + 0,04 \sqrt{191^3}} = 0,997 \approx 1,0$$

Srednji polumjer presjeka:

$$h_0 = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 0,4400}{4,600} = 0,191m = 191mm$$

Autogena deformacija skupljanja dana je izrazom:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot [f_{ck} - 10] \cdot 10^{-6} = \varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot [50 - 10] \cdot 10^{-6} = 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp[-0,2 \cdot t^{0,5}]$$

$$t = \infty \rightarrow \beta_{as}(\infty) = 1 - e^{[-0,2 \times \infty^{0,5}]} = 1 - e^{[\infty]} \approx 1,0$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = 1 \cdot 1,00 \cdot 10^{-4} = 1,0 \cdot 10^{-4}$$

- Puzanje betona

Koeficijent puzanja: $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$

Osnovna vrijednost: $\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$

Koeficijenti tlačne čvrstoće betona:

$$\alpha_1 = (35 / f_{cm})^{0,7} = (35 / 58)^{0,7} = 0,702$$

$$\alpha_2 = (35 / f_{cm})^{0,2} = (35 / 58)^{0,2} = 0,904$$

$$\alpha_3 = (35 / f_{cm})^{0,5} = (35 / 58)^{0,5} = 0,777$$

Koeficijenti koji uzimaju u obzir učinak tlačne čvrstoće betona:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{58}} = 2,206$$

Tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 50 + 8 = 58 \text{ N / mm}^2$$

Koeficijent relativne vlažnosti zraka (za $f_{cm} > 35 \text{ Mpa}$):

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - \frac{80}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{191}} \cdot 0,702 \right] \cdot 0,904 = 1,124$$

Srednji polumjer presjeka:

$$h_o = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 0,4400}{4,600} = 0,191m = 191mm$$

Koeficijent koji uzima u obzir starost betona u trenutku nanošenja opterećenja:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 20^{0,2}} = 0,521$$

Koeficijent koji uzima u obzir razvoj puzanja nakon opterećenja

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

$t - t_0$ – vrijeme djelovanja opterećenja u danima = starost betona u trenutku promatranja – starost betona u trenutku primjene opterećenja ($t_0 = 20$)

Koeficijent ovisan o relativnoj vlažnosti (RH u %) i h_0 (mm)

- za $f_{cm} > 35$ Mpa:

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + \left(1,2 \cdot \frac{RH}{100} \right)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + \left(1,2 \cdot \frac{80}{100} \right)^{18} \right] \cdot 191 + 250 \cdot 0,777 \leq 1500 \cdot 0,777$$

$$\beta_H = 618,16 \leq 1165,5$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,124 \times 2,206 \times 0,521 = 1,292$$

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi(30000, 20) = \varphi_0 \times \beta_c(30000, 20) = 1,292 \times \left[\frac{(30000 - 20)}{618,16 + (30000 - 20)} \right]^{0,3} = 1,284$$

- Promjena naprezanja zbog relaksacije čelika

Proračun gubitaka zbog opuštanja čelika za prednapinjanje treba temeljiti na vrijednosti ρ_{1000} , tj. vrijednosti gubitka zbog opuštanja 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temperaturi od 20°C. Prema tehničkom dopuštenju za odabranu prednapetu armaturu maksimalni gubitak od relaksacije iznosi 2,5% nakon 1000 sati pri naprezanju od $0,7 f_{pk}$. Za razred 2 prema EN 1992-1-1:2013 apsolutna vrijednost gubitka sile prednapinjanja uslijed relaksacije iznosi:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \times \left(0.66 \times \rho_{1000} \times e^{9.1 \times \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75 \times (1-\mu)} \times 10^{-5} \right)$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_{p, \max} = 0,9 \times 1640 = 1476 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1476}{1860} = 0,794$$

σ_{pi} -maksimalno vlačno naprezanje u užetu umanjeno za vrijednost trenutnog gubitka (zbog trenja na zavojima natega i gubitaka zbog prokliznuća klina na uređaju za prednapinjanje)

t – vrijeme nakon prednapinjanja u satima

ρ_{1000} - gubitak uslijed relaksacije, 1000 sati nakon prednapinjanja pri temperaturi od 20°C

Konačan gubitak uslijed relaksacije prednapete armature može se uzeti za vrijednost

$t_{\infty} = 500000$ sati (približno 57 godina)

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pr} &= \sigma_{pi} \times \left(0.66 \times \rho_{1000} \times e^{9.1 \times \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75 \times (1-\mu)} \times 10^{-5} \right) = \\ &= 1476 \times \left(0.66 \times 2.5 \times e^{9.1 \times 0,794} \left(\frac{500000}{1000} \right)^{0.75 \times (1-0,794)} \times 10^{-5} \right) = 87,40 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Naprezanje u razini užadi za nazovistalnu kombinaciju djelovanja i početnu silu prednapinjanja

$$\sigma_{c,QP} = -P_{m0} \times \left[\frac{1}{A_c} + \frac{z_p}{\frac{I_c}{z_p}} \right] + \frac{M_{gk1} + M_{\Delta gk1}}{\frac{I_c}{z_p}} = -(\sigma_{pm0,el} \times A_p) \times \left[\frac{1}{A_c} + \frac{z_p}{\frac{I_c}{z_p}} \right] + \frac{M_{gk1} + M_{\Delta gk1}}{\frac{I_c}{z_p}} =$$

$$= -(1394 \times 2700) \times \left[\frac{1}{0,4400 \times 10^6} + \frac{154,1}{\frac{4,79 \times 10^{10}}{154,1}} \right] + \frac{(786,60 + 112,10) \times 10^6}{\frac{4,79 \times 10^{10}}{154,1}} = -6,60 N / mm^2$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \phi(30000, 20) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \phi(30000, 20)]} =$$

$$= \frac{-2,828 \times 10^{-4} \cdot 195000 - 0,8 \cdot 87,40 + \frac{195000}{37000} \cdot 1,284 \cdot (-6,60)}{1 + \frac{195000}{37000} \cdot \frac{2700}{0,4400 \times 10^6} \cdot \left(1 + \frac{0,4400 \times 10^6}{4,79 \times 10^{10}} \cdot 154,1^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 1,284]} =$$

$$= -\frac{169,728}{1,079} = -157,30 N / mm^2$$

Srednja vrijednost naprezanja čelika za prednapinjanje u $t=\infty$ iznosi:

$$\sigma_{pm,\infty} = \sigma_{pm0,el} + \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 1394 - 157,30 = 1236,70 N / mm^2$$

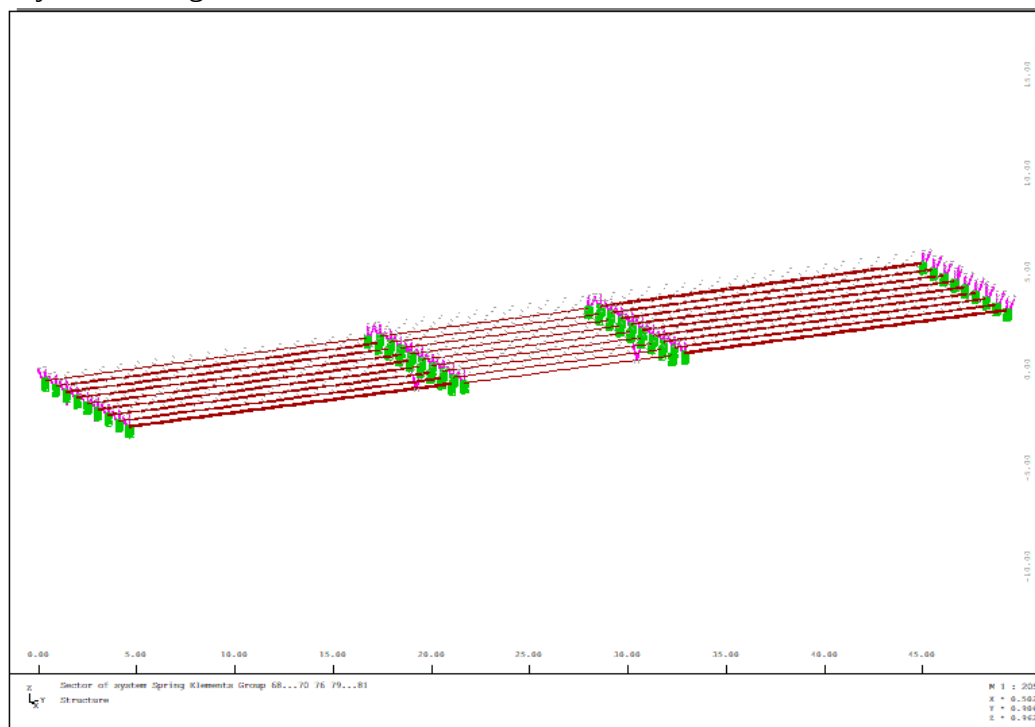
Ukupni gubitak sile prednapinjanja:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_{p,c+s+r}}{\sigma_{pm0,el}} = \frac{157,30}{1394} = 0,113 = 11,30\%$$

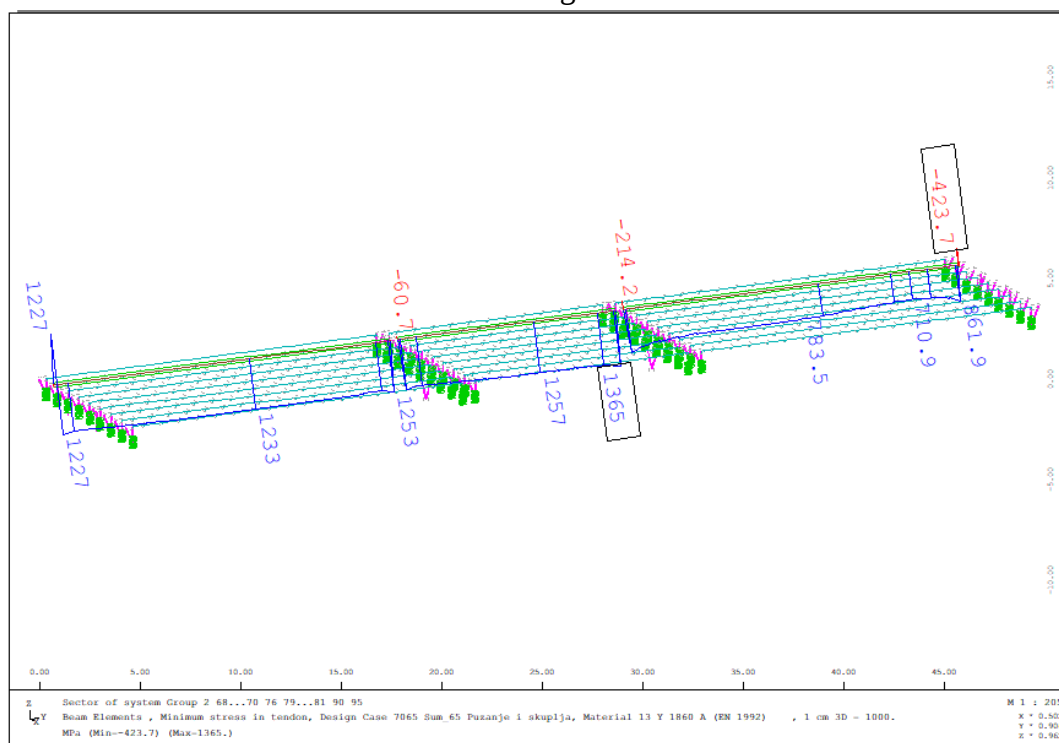
Dobiveni gubitak sile prednapinjanja u granicama je pretpostavljenih vrijednosti.

Usporedba računski rezultata i rezultata iz modela:

Izračunao se potreban broj natega, te su se te vrijednosti uvrstile u model. Nakon prolaska kroz „CSM“ fazu i uzimanje u obzir svih gubitaka puzanja i skupljanja tijekom izvedbe dobila su se naprezanja u prednapetoj armaturi koje približno odgovaraju računski dobivenim naprezanjima nakon gubitaka.



Slika 126. Natega u modelu



Slika 127. Naprezanje u prednapetoj armaturi nakon CSM faze

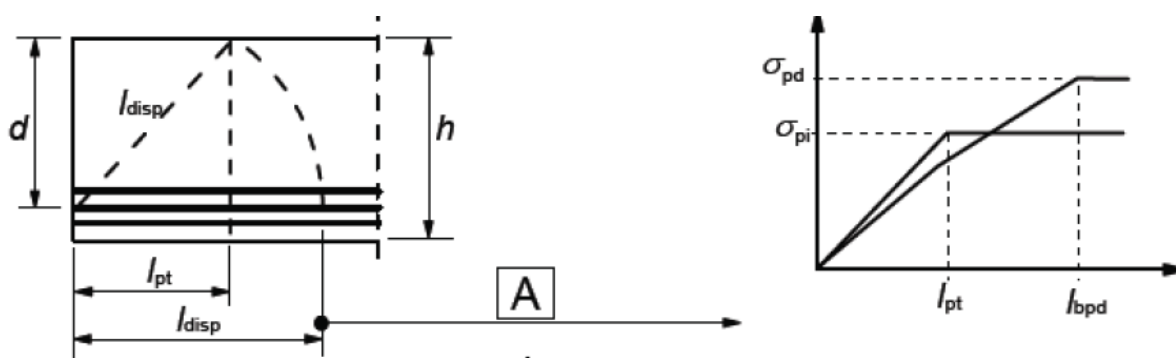
3.4.1.8. Duljina prijenosa i duljina sidrenja

U sidrenim područjima prethodno napetih natega treba u obzir uzeti sljedeće parametre duljina:

l_{pt} – duljina prijenosa preko koje se sila prednapinjanja P_0 potpuno prenosi na beton.

l_{disp} – duljina rasipanja preko koje se naprezanja u betonu postupno rasipaju na linearnu raspodjelu preko poprečnog presjeka betona.

l_{bpd} – duljina sidrenja preko koje je sila užeta F_{pd} u graničnom stanju nosivosti u potpunosti sidri u beton



Slika 128. Prijenos prednapinjanja u prethodno napregnutim elementima [8]

Pri opuštanju kabela, pretpostavlja se da se prednapinjanje prenosi na beton konstantnim naprezanjem prijanjanja:

$$f_{bpt} = \eta_{pl} \cdot \eta_l \cdot f_{ctd}(t) = 3,2 \cdot 1,0 \cdot 1,913 = 6,122 \text{ N/mm}^2$$

Prema EN 1992-1-1:2013 koeficijent kojim se uzima u obzir tip natega i prijanjanje pri opuštanju za užad s 3 ili 7 žica $\eta_{pl} = 3,2$, te za dobre uvijete prijanjanja $\eta_l = 1,0$.

Proračunska vrijednost vlačne čvrstoće u vrijeme otpuštanja:

$$f_{ctd}(t) = \frac{\alpha_{ct} \cdot 0,7 \cdot f_{ctm}(t)}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 0,7 \cdot 4,1}{1,5} = 1,913 \text{ N/mm}^2$$

$\alpha_{ct} = 1$ - koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni učinci na vlačnu čvrstoću, uslijed načina primjene opterećenja.

Osnovna vrijednost duljine prijenosa:

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \Phi \cdot \sigma_{pm0}}{f_{bpt}} = \frac{1,0 \cdot 0,19 \cdot 15,7 \cdot 1394,0}{6,122} = 679,24 \text{ mm}$$

Prema EN 1992-1-1:2013 dani su koeficijenti:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1 & \text{-za postupno opuštanje} \\ 1,25 & \text{-za naglo opuštanje} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,25 & \text{-za natege kružnog poprečnog presjeka} \\ 0,19 & \text{za užad s 3 ili 7 žica} \end{cases}$$

σ_{pm0} - naprezanje kabela neposredno nakon opuštanja

Φ - nazivni promjer natege

Proračunska vrijednost duljine prijenosa uzima se kao nepovoljnija od sljedeće dvije:

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt} = 0,8 \times 679,24 = 543,39 \text{ mm} \quad \text{- za provjere lokalnih naprezanja pri opuštanju}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt} = 1,2 \times 679,24 = 815,09 \text{ mm} \quad \text{-GSN (posmik, sidrenja)}$$

Linearna raspodjela u betonu može se uzeti iza duljine rasipanja l_{disp} .

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2}$$

Ukupna duljina sidrenja za sidrenje užadi s naprežanjem σ_{pd} iznosi:

$$\begin{aligned} l_{bpd} &= l_{pt2} + \frac{\alpha_2 \cdot \Phi \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty})}{f_{bpd}} \\ &= 815,09 + \frac{0,19 \cdot 15,7 \cdot (1093,33 - 1236,70)}{2,296} = 628,82 \text{ mm} \end{aligned}$$

l_{pt2} – gornja vrijednost duljine prijenosa

$\alpha_2=0,19$ -za uže od 3 ili 7 žica

Φ – nazivni promjer užeta

σ_{pd} - naprezanje užeta u danom presjeku

$$\sigma_{pd} = \frac{f_{p0lk}}{\gamma_p} = \frac{1640}{1,5} = 1093,33 \text{ N/mm}^2$$

$\sigma_{pm,\infty}$ - prednapinjanje poslije svih gubitaka

f_{bpd} - čvrstoća prijanjanja za GSN

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} = 1,2 \times 1,0 \times 1,913 = 2,296 \text{ N/mm}^2$$

$\eta_{p2}=1,2$ -za užad od 7 žica

$\eta_1=1$ -za povoljne uvjete prednapinjanja

ODABRANO: $l_{bpd}=650 \text{ mm}$

3.4.1.9. Neutralizacija užadi

Uvrštavanjem broja natega u jednadžbu, dobivamo potrebnu površinu:

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 8$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 8 \rightarrow A_{p,potr} = 8 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 8 \cdot 1,5 = 12,0 \text{ cm}^2$$

Nakon toga provodimo postupak iz poglavlja 3.4.2., obrnutim redoslijedom, te dobivamo pripadni moment savijanja:

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = 12,0 \cdot 139,40 = 1672,8 \text{ kN}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 1672,80 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 1271,33 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 1271,33 \times 0,1849 \times \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 730,16 \text{ kNm}$$

Dobiven je moment savijanja za čije je preuzimanje dovoljno 8 natega, isti će se postupak ponoviti za 10, 12, 14, 16 i 18 natega.

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 10$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 10 \rightarrow A_{p,potr} = 10 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 10 \cdot 1,5 = 15,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 15,0 \cdot 139,40 = 2091,0 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 2091,0 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 1589,16 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 1589,16 \cdot 0,1849 \cdot \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 912,70 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 12$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 12 \rightarrow A_{p,potr} = 12 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 12 \cdot 1,5 = 18,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 18,0 \cdot 139,40 = 2509,20 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 2509,20 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 1906,99 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 1906,99 \cdot 0,1849 \cdot \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 1095,24 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 14$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 14 \rightarrow A_{p,potr} = 14 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 14 \cdot 1,5 = 21,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 21,0 \cdot 139,40 = 2927,40 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 2927,40 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 2224,82 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 2224,82 \times 0,1849 \times \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 1277,77 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 16$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 16 \rightarrow A_{p,potr} = 16 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 16 \cdot 1,5 = 24,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 24,0 \cdot 139,40 = 3345,6 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 3345,6 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 2542,66 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 2542,66 \times 0,1849 \times \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 1460,32 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 18$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 18 \rightarrow A_{p,potr} = 18 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 18 \cdot 1,5 = 27,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 27,0 \cdot 139,40 = 3345,6 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 3763,80 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 2860,49 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 2860,49 \times 0,1849 \times \left(\frac{1}{0,4400} + \frac{0,1541}{0,1849} \right) = 1642,86 \text{ kNm}$$

Tablica 13. Neutralizacija užadi za T nosač

broj natega	n_{potr}	A_{potr} [cm ²]	P_{m0} [kN]	P_{inf} [kN]	M_{Ed} [kNm]
18	18	27,0	3345,60	2860,49	1642,86
16	16	24,0	3345,60	2542,66	1460,32
14	14	21,0	2927,40	2224,82	1277,77
12	12	18,0	2509,20	1906,99	1095,24
10	10	15,0	2091,0	1589,16	912,70
8	8	12,0	1672,80	1271,33	730,16

3.4.2. Prednapinjanje L nosača

3.4.2.1. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka L nosača

A – Površina poprečnog presjeka prednapetog betona

z_g – udaljenost od težišta do gornjeg ruba presjeka

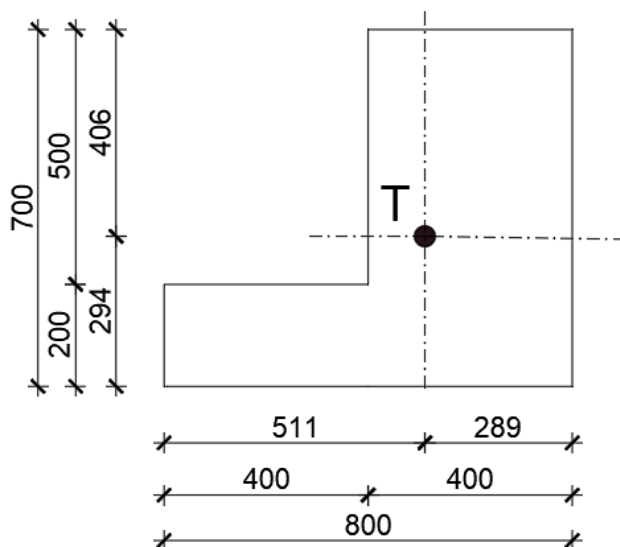
z_d – udaljenost od težišta do donjeg ruba presjeka

I – moment tromosti poprečnog presjeka

$$W_g = \frac{I}{z_g} \text{ - moment otpora gornjeg dijela presjeka}$$

$$W_d = \frac{I}{z_d} \text{ - moment otpora donjeg dijela presjeka}$$

Geometrijske karakteristike nosača	Bruto poprečni presjek
A	0,3600 m ²
z_d	0,2944 m
z_g	0,4056 m
I	0,0468 m ⁴
W_g	0,1154 m ³
W_d	0,1590 m ³



Slika 129. Poprečni presjek L nosača

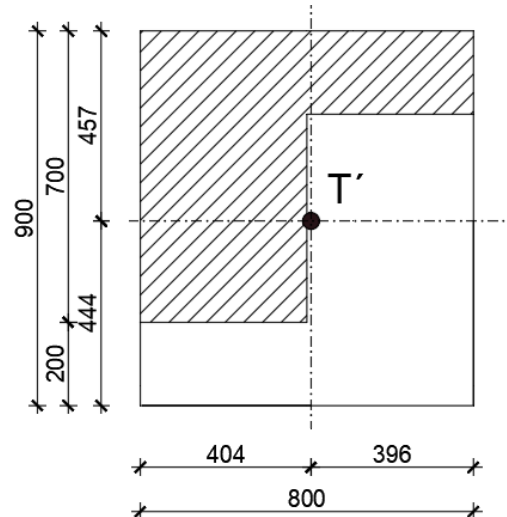
3.4.2.2. Geometrijske karakteristike spregnutog presjeka

S obzirom da su predgotovljeni nosač i dobetonirane ploče različite kvalitete, vrijednosti površina dobetoniranog dijela valja pomnožiti omjerom sekantnih modula elastičnosti dvaju različitih betona.

$$\text{- nosač} \quad \text{C50/60} \quad \rightarrow \quad E_{cm} = 37000 \text{ N / mm}^2$$

$$\text{- ploča} \quad \text{C35/45} \quad \rightarrow \quad E_{cm} = 34000 \text{ N / mm}^2$$

$$\alpha = \frac{34000}{37000} = 0,919$$



Slika 130. Poprečni presjek spregnutog nosača

$$A'_c = A_c + \alpha \cdot d_{pl} \cdot b_{pl} = 0,3600 + 0,919(0,4 \cdot 0,7 + 0,2 \cdot 0,4) = 0,6908 \text{ m}^2$$

$$z'_d = \frac{\sum A_{ci} \cdot y_{di}}{A'_c} = \frac{0,8 \cdot 0,2 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,45 + 0,919 \cdot (0,4 \cdot 0,7 \cdot 0,55 + 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,8)}{0,6908} = 0,4435 \text{ m}^2$$

$$z'_g = h - z'_d = 0,9 - 0,4435 = 0,4565 \text{ m}$$

$$I'_c = I_{c0} + \sum A_{ci} \cdot y_{ti}^2 = 0,0468 + 0,3600 \cdot (0,4435 - 0,2944)^2 + 0,919 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 0,7^3}{12} + 0,28 \cdot (0,4565 - 0,35)^2 \right) + 0,919 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 0,2^3}{12} + 0,08 \cdot (0,4565 - 0,1)^2 \right) = 0,1648 \text{ m}^4$$

$$W'_d = \frac{I'_c}{z'_d} = \frac{0,1648}{0,4435} = 0,3716 \text{ m}^3$$

$$W'_g = \frac{I'_c}{z'_g} = \frac{0,1648}{0,4565} = 0,3610 \text{ m}^3$$

3.4.2.3. Određivanje potrebnog broja natega

Momenti dobiveni u Sofistiku:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 530,60 kNm$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 75,40 kNm$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 100,20 kNm$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 282,30 kNm$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 283,30 kNm$

Samom određivanju broja užadi u glavnom nosaču prethodi odabir sustava prednapinjanja.

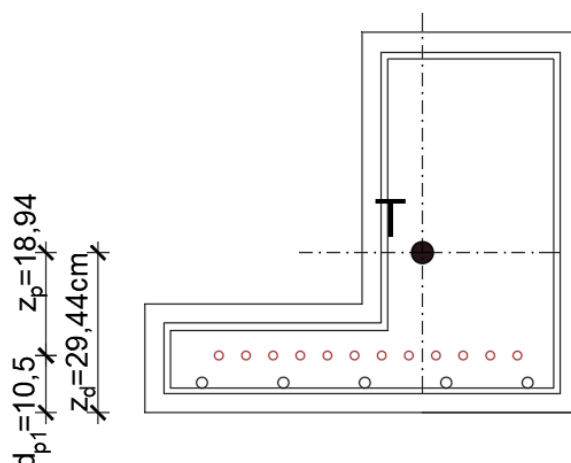
Koristiti će se sustav prednapinjanja DYWIDAG i to uže spleteno od 7 žica, pri

čemu je promjer užeta $d_p = 15,7 \text{ mm}$, a površina poprečnog presjeka užeta $A_p = 150 \text{ mm}^2$.

Potreban broj užadi za prednapinjanje predgotovljenog nosača se ne može unaprijed odrediti bez pojedinih pretpostavki.

Budući da je u preliminarnom odabiru potrebnog broja užadi u nosaču (a time i ukupnu silu prednapinjanja u nosaču) potrebno poznavati krak sile prednapinjanja (udaljenost od težišta poprečnog presjeka nosača do zajedničkog težišta svih užadi za prednapinjanje) treba pretpostaviti broj užadi kako bi znali odrediti njihovo zajedničko težište. Zbog navedenog, postupak preliminarnog odabira potrebnog broja natega u nosaču je iterativni proces, koji zahtjeva barem dva koraka. Užad se duž cijelog nosača vodi u pravcu.

Određivanje udaljenosti težišta užadi od donjeg ruba nosača:



Slika 131. L nosač s pretpostavljenim nategama

$$d_{p1} = c_{nom} + \varphi_v + \frac{\varphi_u}{2} + u_{p,v} + \frac{u_{p,v}}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} + 5 = 10,5 \text{ cm}$$

$$z_d = 29,44 \text{ cm}$$

$$z_p = z_d - d_{p1} = 29,44 - 10,5 = 18,94 \text{ cm}$$

Najveća sila kojom se napreže natega P_0 (sila na aktivnom kraju $x=0$), neposredno nakon prednapinjanja ne smije premašiti vrijednost $P_0 = A_p \times \sigma_{p,max}$.

$$\sigma_{p,max} = \min \begin{cases} 0,80 \cdot f_{pk} = 0,80 \times 1860 = 1488 \text{ N/mm}^2 \\ 0,90 \cdot f_{p0,1k} = 0,90 \times 1640 = 1476 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{p,max} = 1476 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalna sila u užetu neposredno nakon prednapinjanja:

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{p,max} = 150 \cdot 1476 = 221400 \text{ N} = 221,40 \text{ kN}$$

Naprezanje u natezi neposredno nakon prednapinjanja ili prijenosa:

$$\sigma_{p,m0} = \min \begin{cases} 0,75 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1860 = 1395,0 \text{ N/mm}^2 \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 1640 = 1394,0 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{p,m0} = 1394,0 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalna sila u užetu neposredno nakon prijenosa naprezanja:

$$P_{m0} = A_p \cdot \sigma_{p,m0} = 150 \cdot 1394,0 = 209100 \text{ N} = 209,10 \text{ kN}$$

Za približno određivanje broja užadi (površina čelika za prednapinjanje) provjeravamo rastlačenje (dekompresiju).

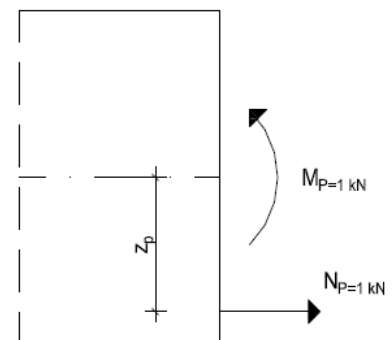
Za razred XC4 i XD1 i čestu kombinaciju djelovanja na užadi bližim rubu ne smiju se pojaviti **vlačna naprezanja**. Za ovu razinu proračuna gubici sile prednapinjanja se pretpostavljaju sa 20 %. Mjerodavan je proračunski presjek u polju u trenutku $t = \infty$.

Za djelovanje sile prednapinjanja od $P=1.0 \text{ kN}$ duž cijelog nosača (uz zanemarivanje unosa sile prednapinjanja na krajevima nosača) dobiju se rezne sile:

$$N_{P=1kN} = -1 \text{ kN}$$

$$M_{P=1kN} = z_p \cdot (N_{P=1kN}) = 0,1894 \cdot (-1) = -0,1894 \text{ kNm}$$

Moment u sredini polja za čestu kombinaciju djelovanja:



$$M_{Ed, freq}^{polje} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + M_{gk,3} + \psi_{1,Q} \cdot M_Q + \psi_{1,q} \cdot M_q + \psi_{2,T} \times M_T = 530,60 + 75,4 + 0,75 \cdot 282,30 + 0,4 \cdot 100,2 + 0,5 \cdot 283,30 = 999,46 kNm$$

$$M_{Ed, freq}^{polje} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + \psi_{1,T} \times M_T + \psi_{2,Q} \cdot M_Q + \psi_{2,q} \cdot M_q = 530,60 + 75,40 + 0,6 \cdot 283,30 + 0 \cdot 282,30 + 0 \cdot 100,20 = 775,98 kNm$$

Uvjet za zadovoljavanje dokaza dekompresije za čestu kombinaciju djelovanja:

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{M_{Ed, freq}^{polje}}{W_d} + \frac{N_{Pk, inf}}{A_c} + \frac{M_{Pk, inf}}{W_d} = 0$$

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{999,46}{0,1590} + P_{k, inf} \left[\frac{-1}{0,3600} + \frac{-0,1894}{0,1590} \right] = 0$$

$$\text{potrebno} \rightarrow P_{k, inf} = 1583,76 kN$$

Potrebna srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku $t=0$:

$$P_{m0} = \frac{P_{k, inf}}{0,8 \times r_{inf}} = \frac{1583,76}{0,8 \cdot 0,95} = 2083,90 kN$$

Koeficijenti za određivanje karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja prema EN 1992-1-1:2013 za prethodno prednapinjanje iznose:

$$r_{inf} = 0.95$$

$$r_{sup} = 1.05$$

Uz pretpostavku da se natege mogu prednapeti do naprezanja:

$$\sigma_{p, m0} = 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 1640 = 1394,0 N / mm^2$$

Potrebna površina prednapete armature:

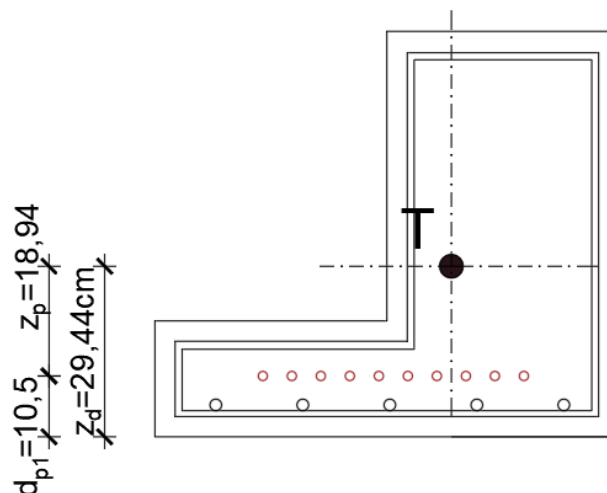
$$A_{p, potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{p, m0, max}} = \frac{2083,90}{139,4} = 14,95 cm$$

Potreban broj užadi prednapete armature:

$$n_p = \frac{A_{p, potr}}{A_p} = \frac{14,95}{1,5} = 9,95$$

$$\text{ODABRANO} \Rightarrow 10 \text{ UŽADI } A_p = 10 \times 150 = 1500 mm^2 = 0,0015 m^2$$

Ponovljen proračun:



Slika 132. L nosač s pretpostavljenim nategama- ponovljeni proračun

$$d_{p1} = c_{nom} + \varphi_v + \frac{\varphi_u}{2} + u_{p,v} + \frac{u_{p,v}}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} + 5 = 10,5 \text{ cm}$$

$$z_d = 29,44 \text{ cm}$$

$$z_p = z_d - d_{p1} = 29,44 - 10,5 = 18,94 \text{ cm}$$

Za odabrano težište potrebno je ponovno provjeriti broj natega.

Uvjet za zadovoljavanje dokaza dekompresije za čestu kombinaciju djelovanja:

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{M_{Ed, freq}^{polje}}{W_d} + \frac{N_{Pk, inf}}{A_c} + \frac{M_{Pk, inf}}{W_d} = 0$$

$$\sigma_{d,t=\infty} = \frac{999,46}{0,1590} + P_{k, inf} \left[\frac{-1}{0,3600} + \frac{-0,1894}{0,1590} \right] = 0$$

$$\text{potrebno} \rightarrow P_{k, inf} = 1583,76 \text{ kN}$$

Potrebna srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku $t=0$:

$$P_{m0} = \frac{P_{k, inf}}{0,8 \cdot r_{inf}} = \frac{1583,76}{0,8 \cdot 0,95} = 2083,90 \text{ kN}$$

Koeficijenti za određivanje karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja prema EN 1992-1-1:2013 za prethodno prednapinjanje iznose:

$$r_{inf} = 0.95$$

$$r_{sup} = 1.05$$

Uz pretpostavku da se natege mogu prednapeti do naprezanja:

$$\sigma_{p,m0} = 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 1640 = 1394,0 \text{ N / mm}^2$$

Potrebna površina prednapete armature:

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{p,m0,max}} = \frac{2083,90}{139,4} = 14,95 \text{ cm}$$

Potreban broj užadi prednapete armature:

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p} = \frac{14,95}{1,5} = 9,95$$

ODABRANO $\Rightarrow$ 10 UŽADI $A_p = 10 \times 150 = 1500 \text{ mm}^2 = 0,0015 \text{ m}^2$

3.4.2.4. Idealni poprečni presjek

Uzimaju se u obzir poprečni presjeci čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\alpha_{e,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{37000} = 5,41$$

Površina idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} A_{ci} &= A_c + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s = \\ &= 0,3600 + (5,27 - 1) \cdot 0,0015 + (5,41 - 1) \cdot 0,00157 = 0,3733 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

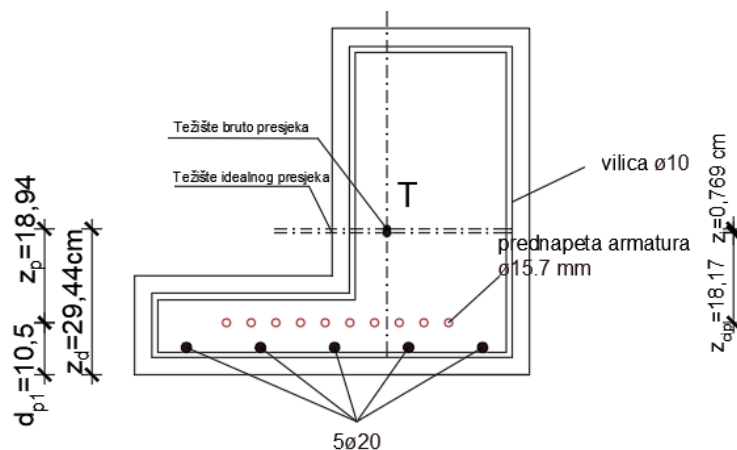
Udaljenost težišta bruto presjeka i težišta idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} z_i &= (\alpha_{e,p} - 1) \cdot z_p \cdot \frac{A_p}{A_{ci}} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot z_s \cdot \frac{A_s}{A_{ci}} = \\ &= (5,27 - 1) \cdot 0,1894 \cdot \frac{0,0015}{0,3733} + (5,41 - 1) \cdot 0,2394 \cdot \frac{0,00157}{0,3733} = 0,00325 + 0,00444 = 0,0077 \text{ m} \end{aligned}$$

$$z_{cip} = z_p - z_i = 0,1894 - 0,00769 = 0,1817 \text{ m}$$

Moment tromosti idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} I_{ci} &\cong I + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p \cdot z_p \cdot z_{cip} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s \cdot z_s \cdot z_{cis} = \\ &= 0,0468 + (5,27 - 1) \cdot 0,0015 \cdot 0,1894 \cdot 0,1817 + (5,41 - 1) \cdot 0,00157 \cdot 0,2394 \cdot 0,2317 = \\ &= 0,0468 + 0,00022 + 0,000384 = 0,0474 \text{ m}^4 \end{aligned}$$



Slika 133. Idealni poprečni presjek L nosača

3.4.2.5. Idealni spregnuti poprečni presjek

Uzimaju se u obzir poprečni presjeci čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje:

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\alpha_{e,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{37000} = 5,41$$

Površina idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} A_{ci}' &= A_c' + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s = \\ &= 0,6908 + (5,27 - 1) \cdot 0,0015 + (5,41 - 1) \cdot 0,00157 = 0,7041 m^2 \end{aligned}$$

Udaljenost težišta bruto presjeka i težišta idealnog poprečnog presjeka:

$$\begin{aligned} z_i' &= (\alpha_{e,p} - 1) \cdot z_p \cdot \frac{A_p}{A_{ci}'} + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot z_s \cdot \frac{A_s}{A_{ci}'} = \\ &= (5,27 - 1) \cdot 0,3385 \cdot \frac{0,0015}{0,7041} + (5,41 - 1) \cdot 0,3785 \cdot \frac{0,00157}{0,7041} = 0,0068 m \end{aligned}$$

$$z_{cip}' = z_p - z_i' = 0,3385 - 0,0068 = 0,3317 m$$

Moment tromosti idealnog poprečnog presjeka:

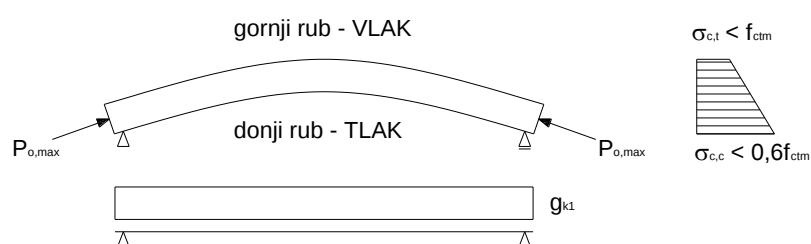
$$\begin{aligned} I_{ci}' &\cong I' + (\alpha_{e,p} - 1) \cdot A_p \cdot z_p \cdot z_{cip}' + (\alpha_{e,s} - 1) \cdot A_s \cdot z_s \cdot z_{cis} = \\ &= 0,1648 + (5,27 - 1) \cdot 0,0015 \cdot 0,3385 \cdot 0,3317 + (5,41 - 1) \cdot 0,00157 \cdot 0,3785 \cdot 0,3717 = \\ &= 0,1648 + 0,0007 + 0,0010 = 0,1665 m^4 \end{aligned}$$

3.4.2.6. Dopušteno područje sile prednapinjanja – Magneleva grafička metoda

Predgotovljeni nosač prolazi kroz nekoliko faza izgradnje, stoga je potrebno provjeriti, hoće li se u tim različitim fazama u nosaču pojaviti naprezanja veća od dopuštenih. Magneleva grafička metoda omogućuje da odaberemo silu prednapinjanja koja će za odabrani krak sile rezultirati takvim naprezanjima koja zadovoljavaju početno zadane uvjete. Provjeriti će se da li je odabrani broj užadi i njemu pripadajući krak sile unutar dopuštenog područja sile prednapinjanja.

1. Faza – Transport

Dok je prednapeti nosač u fazi transporta za njega moramo ispuniti sljedeće uvjete:

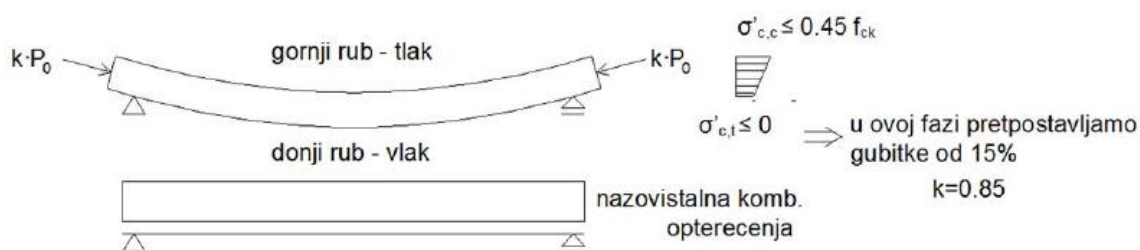


$$\text{- gornji rub: } \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0}}{A_c} - \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0} \cdot z_{\text{tran}}}{W_g} + \frac{M_{gk1}}{W_g} = \sigma_{c,t} \leq f_{ctm} \quad \text{vlak (1)}$$

$$\text{- donji rub: } \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0}}{A_c} + \frac{r_{\text{sup}} \cdot P_{m0} \cdot z_{\text{tran}}}{W_d} - \frac{M_{gk1}}{W_d} = \sigma_{c,c} \leq 0,6 \cdot f_{ck} \quad \text{tlak (2)}$$

2. Faza - Uporaba

U konačnom stanju uporabe naprezanja na nosaču moraju ispunjavati sljedeće uvjete:



$$\text{- gornji rub: } \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}}}{A_{\text{c}}'} - \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}} \cdot z}{W_{\text{g}}'} + \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{g}}'} = \sigma_{\text{c,c}}' \leq 0,45 \cdot f_{\text{ck}} \quad \text{tlak (3)}$$

$$\text{- donji rub: } \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}}}{A_{\text{c}}'} + \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot P_{\text{m0}} \cdot z}{W_{\text{d}}'} - \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{d}}'} = \sigma_{\text{c,t}}' \leq 0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{vlak (4)}$$

Preformuliranjem izraza 1 - 4 dobivamo izraze koji nam služe za crtanje Magelovih pravaca koji predstavljaju odnose $1/P_{\text{m0}}$ i kraka sile prednapinjanja z .

$$\text{iz (3) pravac 1 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} - \frac{z}{W_{\text{g}}} \right)}{\left(0,45 \cdot f_{\text{ck}} - \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{g}}} \right)} \quad \text{gornji rub – uporaba}$$

$$\text{iz (1) pravac 2 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{r_{\text{sup}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} - \frac{z_{\text{tran}}}{W_{\text{g}}} \right)}{\left(f_{\text{ctm}} - \frac{M_{\text{gk1}}}{W_{\text{g}}} \right)} \quad \text{gornji rub - transport}$$

$$\text{iz (4) pravac 3 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{k \cdot r_{\text{inf}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} + \frac{z}{W_{\text{d}}} \right)}{\left(\sigma_{\text{c,t}}' + \frac{M_{\text{d,n.s.}}^{\text{polje}}}{W_{\text{d}}} \right)} \quad \text{donji rub - uporaba}$$

$$\text{iz (2) pravac 4 } \frac{1}{P_{\text{m0}}} \geq \frac{r_{\text{sup}} \cdot \left(\frac{1}{A_{\text{c}}} + \frac{z_{\text{tran}}}{W_{\text{d}}} \right)}{\left(0,6 \cdot f_{\text{ck}} + \frac{M_{\text{gk1}}}{W_{\text{d}}} \right)} \quad \text{donji rub – transport}$$

Pravac 1 (uporaba – gornji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \geq \frac{0,80 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} - \frac{z}{0,1154} \right)}{\left(0,45 \cdot 50000 - \frac{857,81}{0,1154} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_1 \text{ pravca 1} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 14,0 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_1 \text{ pravca 1} \quad \rightarrow \quad z = k_d = \frac{I/A}{z_g} = 0,3205 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 0 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 2 (transport – gornji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \geq \frac{1,05 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} - \frac{z}{0,1154} \right)}{\left(-4100 - \frac{530,60}{0,1154} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_2 \text{ pravca 2} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = -33,53 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_2 \text{ pravca 2} \quad \rightarrow \quad z = k_d = 0,3205 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 0 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 3 (uporaba – donji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \leq \frac{0,8 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{z}{0,1590} \right)}{\left(0 + \frac{857,81}{0,1590} \right)} \cdot 10^5$$

$$\text{- točka } A_3 \text{ pravca 3} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 39,13 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_3 \text{ pravca 3} \quad \rightarrow \quad z = k_d = 0,3205 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 67,52 \text{ kN}^{-1}$$

PRAVAC 4 (transport – donji rub)

$$\frac{1}{P_{m0}} \leq \frac{1,05 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{z}{0,1590} \right)}{\left(0,6 \cdot 50000 + \frac{530,60}{0,1590} \right)} \cdot 10^5$$

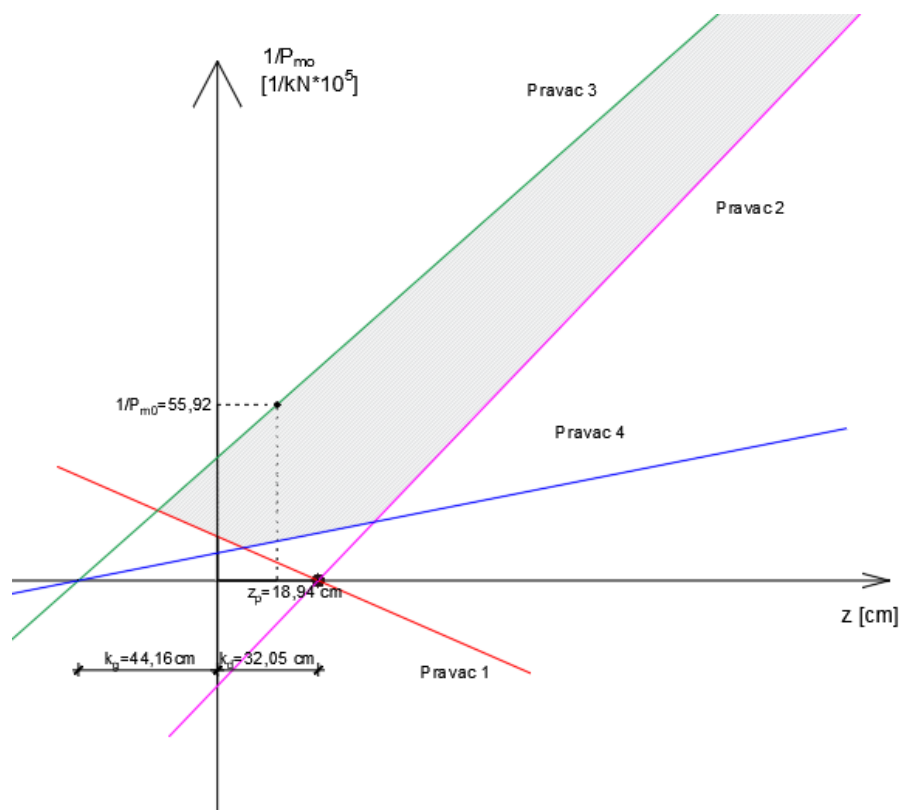
$$\text{- točka } A_4 \text{ pravca 4} \quad \rightarrow \quad z = 0 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 8,75 \text{ kN}^{-1}$$

$$\text{- točka } B_4 \text{ pravca 4} \quad \rightarrow \quad z = k_d = 0,3205 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{P_{m0}} = 15,10 \text{ kN}^{-1}$$

Provjera da li je potrebna sila prednapinjanja unutar dopuštenog područja:

$$\frac{1}{P_{p,m0,potrebno}} = \frac{1}{1788,14} \cdot 10^5 = 55,92 \text{ kN}^{-1}$$

krak sile = 18,94 cm $\rightarrow$ ZADOVOLJAVA



Slika 136. Dopušteno područje sile prednapinjanja za L nosač

3.4.2.7. Gubici sile prednapinjanja kod prethodnog prednapinjanja

3.4.2.7.1. Trenutni gubici sile prednapinjanja

Trenutni gubici događaju se tijekom napinjanja užadi te prije i kod prijenosa naprezanja na betonski element.

Elastični gubici sile prednapinjanja (elastično skraćanje betonskog elementa)

$$\alpha_{e,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{37000} = 5,27$$

$$\rho_{pi} = \frac{A_p}{A_{ci}} = \frac{0,0015}{0,3733} = 0,0040$$

$$I_{ci} = 0,0474 m^4$$

$$z_{cip} = 0,1817 m$$

$$A_p = 0,0015 m^2$$

$$\frac{P_{m0}}{P_{max}} = 1 - \alpha_{e,p} \left(\rho_{pi} + \frac{A_p \cdot z_{cip}^2}{I_{ci}} \right) = 1 - 5,27 \left(0,0040 + \frac{0,0015 \cdot 0,1817^2}{0,0474} \right) = 0,973$$

Nakon elastičnog skraćanja betonskog elementa kod punog iskorištavanja užadi $\sigma_{p0,max}$ (naprezanje u užetu nakon trenutnog gubitka) iznosi:

$$\sigma_{pm0,el} = \left(\sigma_{p,max} \right) \times \left(\frac{P_{m0}}{P_{max}} \right) = 1476 \cdot 0,973 = 1436,15 N / mm^2$$

Dopušteno naprezanje $\sigma_{pm0} = 1394,0 N / mm^2$ je premašeno, u daljnjem proračunu se koristi $\sigma_{pm0} = 1394,0 N / mm^2$ kao mjerodavno .

3.4.2.7.2. Vremenski gubici sile prednapinjanja

$$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]}$$

$\Delta \sigma_{pr}$ - apsolutna vrijednost promjene naprezanja u kabelu na mjestu x, u trenutku t, uslijed

opuštanja prednapetog čelika. Određuje se za naprezanje $\sigma_p = \sigma_p (G + P_{m0} + \psi_2 Q)$ što je početno naprezanje u užetu od početnog prednapinjanja i nazovistalnog djelovanja.

$\varphi(t, t_0)$ - koeficijent puzanja u trenutku t i za primjenu opterećenja u trenutku t_0

$\sigma_{c,qp}$ - naprezanja u betonu, uz užad, od vlastite težine i početnog prednapinjanja i ostalih nazovi stalnih djelovanja koja su važna

ε_{cs} - proračunata deformacija od skupljanja (apsolutna vrijednost)

E_p – modul elastičnosti prednapete armature

E_{cm} – modul elastičnosti betona

A_c – površina betonskog presjeka

A_p – površina svih prednapetih natega na mjestu x

I_c – moment tromosti betonskog presjeka

z_{cp} – udaljenost između težišta betonskog presjeka i težišta užadi

- Skupljanje betona

Ukupna deformacija prouzročena skupljanjem:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 1,833 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-4} = 2,833 \times 10^{-4} = 0,233 \text{ ‰}$$

ε_{cd} - deformacija skupljanja zbog sušenja, razvija se polagano jer ovisi o migraciji vode kroz očvršnuli beton

ε_{ca} - deformacija autogenog skupljanja, razvija se tijekom očvršćavanja betona a veći dio se događa u prvim danima nakon betoniranja

Konačna vrijednost defomacije skupljanja zbog sušenja:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,867 \cdot 2,115 \cdot 10^{-4} = 1,833 \times 10^{-4}$$

k_h – koeficijent ovisan o srednjem polumjeru presjeka h_0 prema EN 1992-1-1:2013 tablici 3.3

Tablica 14. Vrijednost k_h [8]

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$\varepsilon_{cd,0}$ - osnovna deformacija skupljanja sušenjem može se uzeti iz tablice 3.2 prema EN 1992-1-1, gdje je dana srednja vrijednost s koeficijentom varijacije od oko 30 % (nominalna

vrijednost u ‰ za beton sa cementom CEM razreda N) ili se proračuna prema formuli (Dodatak B) :

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

gdje je; f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona (MPa)

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{80}{100} \right)^3 \right] = 0,756$$

- koeficijent za razred N cementa (CEM II 32.5R)

$$\alpha_{ds,1} = 4$$

$$\alpha_{ds,2} = 0,12$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{-0,12 \cdot \frac{58}{10}} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 0,756 = 2,115 \cdot 10^{-4} = 0,21 \text{ ‰}$$

Razvoj deformacije skupljanja sušenjem:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds} \cdot (t, t_s) \cdot \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h$$

t – starost betona u danima u trenutku promatranja

t_s – starost betona (u danima) na početku skupljanja sušenjem (obično na kraju njege – 7 dana)

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(30000 - 7)}{(30000 - 7) + 0,04 \sqrt{189^3}} = 0,997 \approx 1,0$$

Srednji polumjer presjeka:

$$h_0 = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 0,3600}{3,800} = 0,189m = 189mm$$

Autogena deformacija skupljanja dana je izrazom:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot [f_{ck} - 10] \cdot 10^{-6} = \varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot [50 - 10] \cdot 10^{-6} = 1,0 \cdot 10^{-4}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp[-0,2 \cdot t^{0,5}]$$

$$t = \infty \rightarrow \beta_{as}(\infty) = 1 - e^{[-0,2 \times \infty^{0,5}]} = 1 - e^{[\infty]} \approx 1,0$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = 1 \cdot 1,00 \cdot 10^{-4} = 1,0 \cdot 10^{-4}$$

- Puzanje betona

Koeficijent puzanja: $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$

Osnovna vrijednost: $\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$

Koeficijenti tlačne čvrstoće betona:

$$\alpha_1 = (35 / f_{cm})^{0,7} = (35 / 58)^{0,7} = 0,702$$

$$\alpha_2 = (35 / f_{cm})^{0,2} = (35 / 58)^{0,2} = 0,904$$

$$\alpha_3 = (35 / f_{cm})^{0,5} = (35 / 58)^{0,5} = 0,777$$

Koeficijenti koji uzimaju u obzir učinak tlačne čvrstoće betona:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{58}} = 2,206$$

Tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 50 + 8 = 58 \text{ N / mm}^2$$

Koeficijent relativne vlažnosti zraka (za $f_{cm} > 35 \text{ Mpa}$):

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - \frac{80}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{189}} \cdot 0,702 \right] \cdot 0,904 = 1,125$$

Srednji polumjer presjeka:

$$h_o = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 0,3600}{3,800} = 0,189m = 189mm$$

Koeficijent koji uzima u obzir starost betona u trenutku nanošenja opterećenja:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 20^{0,2}} = 0,521$$

Koeficijent koji uzima u obzir razvoj puzanja nakon opterećenja

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

$t - t_0$ – vrijeme djelovanja opterećenja u danima = starost betona u trenutku promatranja – starost betona u trenutku primjene opterećenja ($t_0 = 20$)

Koeficijent ovisan o relativnoj vlažnosti (RH u %) i h_0 (mm)

- za $f_{cm} > 35$ Mpa:

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + \left(1,2 \cdot \frac{RH}{100} \right)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + \left(1,2 \cdot \frac{80}{100} \right)^{18} \right] \cdot 189 + 250 \cdot 0,777 \leq 1500 \cdot 0,777$$

$$\beta_H = 613,72 \leq 1165,5$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,125 \times 2,206 \times 0,521 = 1,293$$

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi(30000, 20) = \varphi_0 \times \beta_c(30000, 20) = 1,293 \times \left[\frac{(30000 - 20)}{613,72 + (30000 - 20)} \right]^{0,3} = 1,285$$

- Promjena naprezanja zbog relaksacije čelika

Proračun gubitaka zbog opuštanja čelika za prednapinjanje treba temeljiti na vrijednosti ρ_{1000} , tj. vrijednosti gubitka zbog opuštanja 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temperaturi od 20°C. Prema tehničkom dopuštenju za odabranu prednapetu armaturu maksimalni gubitak od relaksacije iznosi 2,5% nakon 1000 sati pri naprezanju od 0,7 fpk. Prema formuli 3.29 za razred 2 prema EN 1992-1-1:2013 apsolutna vrijednost gubitka sile prednapinjanja uslijed relaksacije iznosi:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \times \left(0.66 \times \rho_{1000} \times e^{9.1 \times \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75 \times (1-\mu)} \times 10^{-5} \right)$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_{p, \max} = 0.9 \times 1640 = 1476 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1476}{1860} = 0.794$$

σ_{pi} -maksimalno vlačno naprezanje u užetu umanjeno za vrijednost trenutnog gubitka (zbog trenja na zavojima natega i gubitaka zbog prokliznuća klina na uređaju za prednapinjanje)

t – vrijeme nakon prednapinjanja u satima

ρ_{1000} - gubitak uslijed relaksacije, 1000 sati nakon prednapinjanja pri temperaturi od 20°C

Konačan gubitak uslijed relaksacije prednapete armature može se uzeti za vrijednost

$t_{\infty} = 500000$ sati (približno 57 godina)

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pr} &= \sigma_{pi} \times \left(0.66 \times \rho_{1000} \times e^{9.1 \times \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75 \times (1-\mu)} \times 10^{-5} \right) = \\ &= 1476 \times \left(0.66 \times 2.5 \times e^{9.1 \times 0.794} \left(\frac{500000}{1000} \right)^{0.75 \times (1-0.794)} \times 10^{-5} \right) = 87.40 \text{ kN} \end{aligned}$$

Naprezanje u razini užadi za nazovistalnu kombinaciju djelovanja i početnu silu prednapinjanja

$$\begin{aligned}\sigma_{c,QP} &= -P_{m0} \times \left[\frac{1}{A_c} + \frac{z_p}{\frac{I_c}{z_p}} \right] + \frac{M_{gk1} + M_{\Delta gk1}}{\frac{I_c}{z_p}} = -(\sigma_{pm0,el} \times A_p) \times \left[\frac{1}{A_c} + \frac{z_p}{\frac{I_c}{z_p}} \right] + \frac{M_{gk1} + M_{\Delta gk1}}{\frac{I_c}{z_p}} = \\ &= -(1394 \times 1500) \times \left[\frac{1}{0,3600 \times 10^6} + \frac{189,4}{\frac{4,68 \times 10^{10}}{189,4}} \right] + \frac{(530,6 + 75,40) \times 10^6}{\frac{4,68 \times 10^{10}}{189,4}} = -4,96 N / mm^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{p,c+s+r} &= \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \phi(30000, 20) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \phi(30000, 20)]} = \\ &= \frac{-2,833 \times 10^{-4} \cdot 195000 - 0,8 \cdot 87,40 + \frac{195000}{37000} \cdot 1,285 \cdot (-4,96)}{1 + \frac{195000}{37000} \cdot \frac{1500}{0,3600 \times 10^6} \cdot \left(1 + \frac{0,3600 \times 10^6}{4,68 \times 10^{10}} \cdot 189,4^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 1,285]} = \\ &= -\frac{158,686}{1,057} = -150,13 N / mm^2\end{aligned}$$

Srednja vrijednost naprezanja čelika za prednapinjanje u $t=\infty$ iznosi:

$$\sigma_{pm,\infty} = \sigma_{pm0,el} + \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 1394 - 150,13 = 1243,87 N / mm^2$$

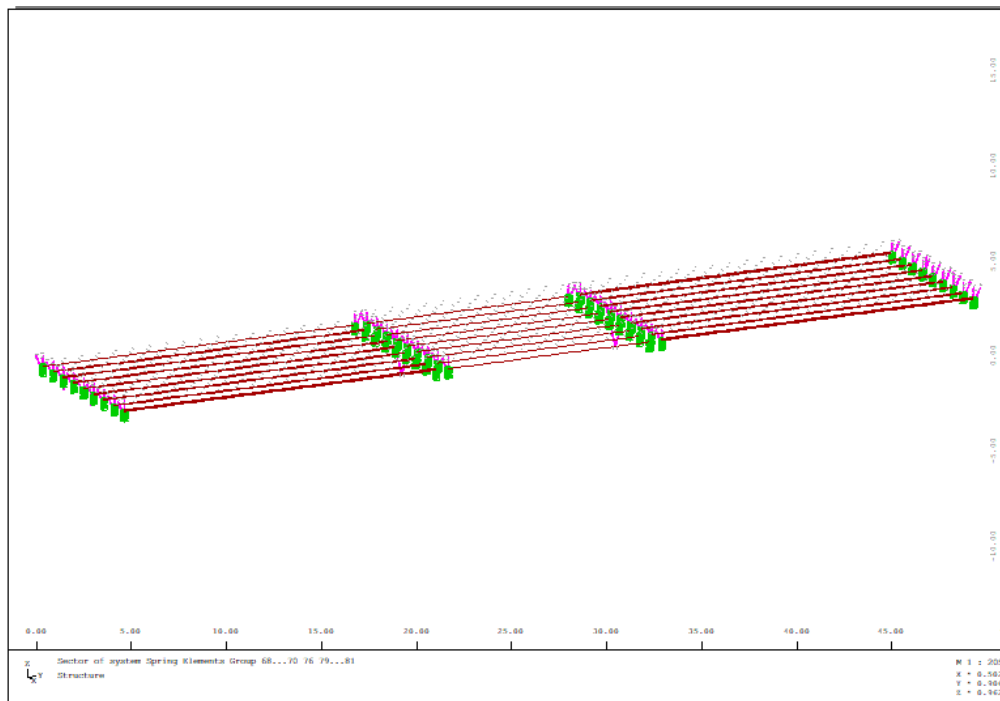
Ukupni gubitak sile prednapinjanja:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_{p,c+s+r}}{\sigma_{pm0,el}} = \frac{150,13}{1394} = 0,108 = 10,8\%$$

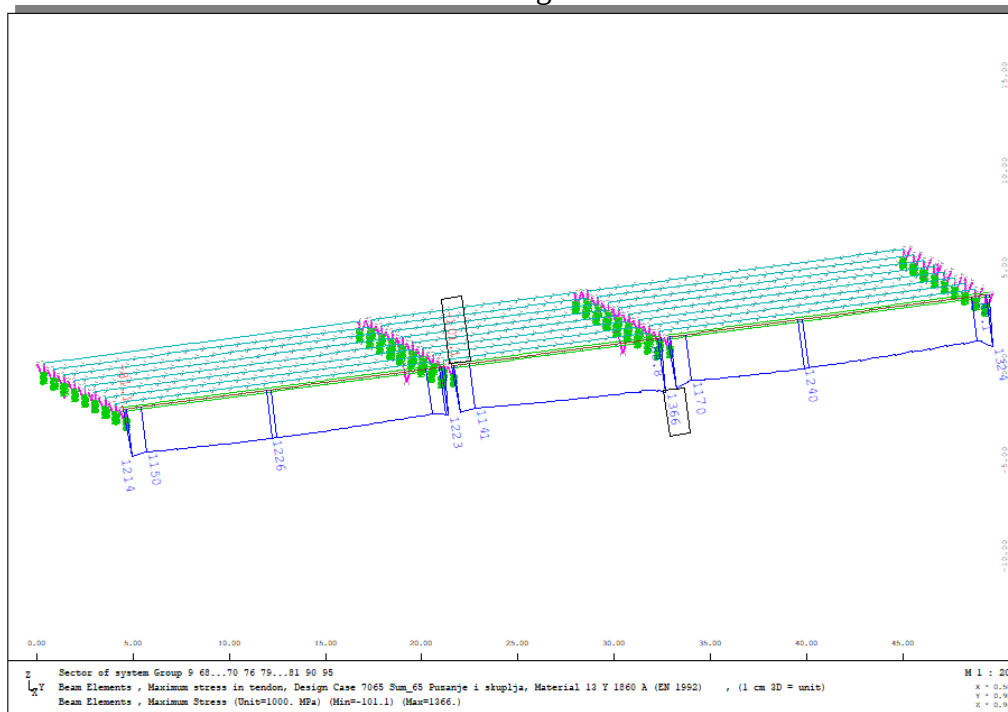
Dobiveni gubitak sile prednapinjanja u granicama je pretpostavljenih vrijednosti.

Usporedba računski rezultata i rezultata iz modela:

Izračunao se potreban broj natega, te su se te vrijednosti uvrstile u model. Nakon prolaska kroz „CSM“ fazu i uzimanje u obzir svih gubitaka puzanja i skupljanja tijekom izvedbe dobila su se naprezanja u prednapetoj armaturi koje približno odgovaraju računski dobivenim naprezanjima nakon gubitaka.



Slika 137. Natege u modelu



Slika 138. Naprezanje u prednapetoj armaturi nakon CSM faze

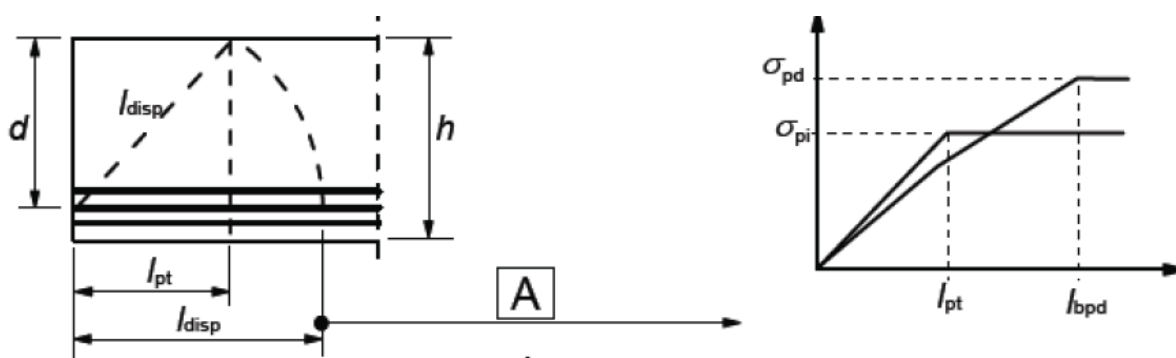
3.4.2.8. Duljina prijenosa i duljina sidrenja

U sidrenim područjima prethodno napetih natega treba u obzir uzeti sljedeće parametre duljina:

l_{pt} – duljina prijenosa preko koje se sila prednapinjanja P_0 potpuno prenosi na beton.

l_{disp} – duljina rasipanja preko koje se naprezanja u betonu postupno rasipaju na linearnu raspodjelu preko poprečnog presjeka betona.

l_{bpd} – duljina sidrenja preko koje je sila užeta F_{pd} u graničnom stanju nosivosti u potpunosti sidri u beton



Slika 139. Prijenos prednapinjanja u prethodno napregnutim elementima

Pri opuštanju kabela, pretpostavlja se da se prednapinjanje prenosi na beton konstantnim naprezanjem prijanjanja:

$$f_{bpt} = \eta_{pl} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t) = 3,2 \cdot 1,0 \cdot 1,913 = 6,122 \text{ N/mm}^2$$

Prema EN 1992-1-1:2013 koeficijent kojim se uzima u obzir tip natege i prijanjanje pri opuštanju za užad s 3 ili 7 žica $\eta_{pl} = 3,2$, te za dobre uvijete prijanjanja $\eta_1 = 1,0$.

Proračunska vrijednost vlačne čvrstoće u vrijeme otpuštanja:

$$f_{ctd}(t) = \frac{\alpha_{ct} \cdot 0,7 \cdot f_{ctm}(t)}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 0,7 \cdot 4,1}{1,5} = 1,913 \text{ N/mm}^2$$

$\alpha_{ct} = 1$ - koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni učinci na vlačnu čvrstoću, uslijed načina primjene opterećenja.

Osnovna vrijednost duljine prijenosa:

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \Phi \cdot \sigma_{pm0}}{f_{bpt}} = \frac{1,0 \cdot 0,19 \cdot 15,7 \cdot 1394,0}{6,122} = 679,24 \text{ mm}$$

Prema EN 1992-1-1:2013 dani su koeficijenti:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1 & \text{-za postupno opuštanje} \\ 1,25 & \text{-za naglo opuštanje} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,25 & \text{-za natege kružnog poprečnog presjeka} \\ 0,19 & \text{za užad s 3 ili 7 žica} \end{cases}$$

σ_{pm0} - naprezanje kabela neposredno nakon opuštanja

Φ - nazivni promjer natege

Proračunska vrijednost duljine prijenosa uzima se kao nepovoljnija od sljedeće dvije:

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt} = 0,8 \times 679,24 = 543,39 \text{ mm} \quad \text{- za provjere lokalnih naprezanja pri opuštanju}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt} = 1,2 \times 679,24 = 815,09 \text{ mm} \quad \text{-GSN (posmik, sidrenja)}$$

Linearna raspodjela u betonu može se uzeti iza duljine rasipanja l_{disp} .

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2}$$

Ukupna duljina sidrenja za sidrenje užadi s naprezanjem σ_{pd} iznosi:

$$\begin{aligned} l_{bpd} &= l_{pt2} + \frac{\alpha_2 \cdot \Phi \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty})}{f_{bpd}} \\ &= 815,09 + \frac{0,19 \cdot 15,7 \cdot (1093,33 - 1333,98)}{2,296} = 502,43 \text{ mm} \end{aligned}$$

l_{pt2} – gornja vrijednost duljine prijenosa

$\alpha_2 = 0,19$ -za uže od 3 ili 7 žica

Φ – nazivni promjer užeta

σ_{pd} - naprezanje užeta u danom presjeku

$$\sigma_{pd} = \frac{f_{p0lk}}{\gamma_p} = \frac{1640}{1,5} = 1093,33 \text{ N/mm}^2$$

$\sigma_{pm,\infty}$ - prednapinjanje poslije svih gubitaka

f_{bpd} - čvrstoća prijanjanja za GSN iznosi

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} = 1,2 \times 1,0 \times 1,913 = 2,296 \text{ N/mm}^2$$

$\eta_{p2} = 1,2$ -za užad od 7 žica

$\eta_1 = 1$ -za povoljne uvjete prednapinjanja

ODABRANO: $l_{bpd} = 550 \text{ mm}$

3.4.2.9. Neutralizacija užadi

Uvrštavanjem broja natega u jednadžbu, dobivamo potrebnu površinu:

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 4$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 8 \rightarrow A_{p,potr} = 4 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 4 \cdot 1,5 = 6,0 \text{ cm}^2$$

Nakon toga provodimo postupak iz poglavlja 3.4.9., obrnutim redoslijedom, te dobivamo pripadni moment savijanja:

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = 6,0 \cdot 139,40 = 836,40 \text{ kN}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 836,40 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 635,66 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 635,66 \cdot 0,1590 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{0,1894}{0,1590} \right) = 401,14 \text{ kNm}$$

Dobiven je moment savijanja za čije je preuzimanje dovoljno 4 natega, isti će se postupak ponoviti za 6, 8, i 10 natega.

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 6$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 6 \rightarrow A_{p,potr} = 6 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 6 \cdot 1,5 = 9,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 9,0 \cdot 139,40 = 1254,60 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 1254,6 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 953,50 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 953,50 \cdot 0,1590 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{0,1894}{0,1590} \right) = 601,72 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 8$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 8 \rightarrow A_{p,potr} = 8 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 8 \cdot 1,5 = 12,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 12,0 \cdot 139,40 = 1672,80 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 1672,80 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 1271,33 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 1271,33 \cdot 0,1590 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{0,1894}{0,1590} \right) = 802,29 \text{ kNm}$$

$$n_p = \frac{A_{p,potr}}{A_p}; \quad n_p = 10$$

$$\frac{A_{p,potr}}{A_p} = 10 \rightarrow A_{p,potr} = 10 \cdot A_p$$

$$A_{p,potr} = 10 \cdot 1,5 = 15,0 \text{ cm}^2$$

$$P_{m0} = 15,0 \cdot 139,40 = 2091,0 \text{ kN}$$

$$A_{p,potr} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0,max}} \rightarrow P_{m0} = A_{p,potr} \cdot \sigma_{pm0,max}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{0,80 \cdot r_{inf}} \rightarrow P_{k,inf} = P_{m0} \cdot 0,80 \cdot r_{inf}$$

$$P_{k,inf} = 2091,0 \cdot 0,80 \cdot 0,95 = 1589,16 \text{ kN}$$

$$P_{k,inf} = \frac{M_{Ed,freq}^{polje}}{W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)} \rightarrow M_{Ed,freq}^{polje} = P_{k,inf} \cdot W_d \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z}{W_d} \right)$$

$$M_{Ed,freq}^{polje} = 1589,16 \cdot 0,1590 \cdot \left(\frac{1}{0,3600} + \frac{0,1894}{0,1590} \right) = 1002,87 \text{ kNm}$$

Tablica 15. Neutralizacija užadi L nosač

broj natega	n_{potr}	A_{potr} [cm ²]	P_{m0} [kN]	P_{inf} [kN]	M_{Ed} [kNm]
10	10	15,0	2091,0	1589,16	1002,87
8	8	12,0	1672,80	1271,33	802,29
6	9	9,0	1254,60	935,50	601,72
4	4	6,0	836,4	635,66	401,14

4. Dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti

4.1. Granično stanje nosivosti za obrnuti T nosač

4.1.1. Sila prednapinjanja

U tablici su dane karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja i momenti dobiveni iz naprezanja čelika za prednapinjanje za 16 odabranih užadi. Momenti su dobiveni proračunom za idealne geometrijske karakteristike presjeka i površinu prednapete užadi $A_p=2700 \text{ mm}^2$.

Tablica 16. Karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja i momenata

	N [kN]	M [kNm]	σ [N/mm ²]
P_0	3985,20	579,45	1476,0
P_{m0}	3763,80	547,26	1394,0
$P_{m\infty}$	3339,10	523,69	1236,70

Parcijalni koeficijent sigurnosti za GSN za silu prednapinjanja: $\gamma_p=1,0$.

4.1.2. Armatura za robusnost presjeka

Armatura za robusnost presjeka osigurava duktilno ponašanje nosača, a proračunava se na granični moment otvaranja pukotina presjeka bez sile prednapinjanja.

Uzima se u obzir srednja osna vlačna čvrstoća betona koja za razred C50/60 iznosi:

$$f_{ctm}=4,1 \text{ N/mm}^2 \text{ (tablica 3.1, EN 1992-1-1:2013)}$$

Karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje iznosi:

$$f_{yk}=500 \text{ N/mm}^2$$

4.1.2.1. Presjek u sredini raspona

Granični moment otvaranja pukotina u sredini raspona:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot W_{cd,i} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{ci}'}{z_{cdi}} = 4100 \cdot \frac{0,2341}{0,4355} = 2203,93 \text{ kNm}$$

z_{cdi} – udaljenost od težišta do donjeg ruba idealnog presjeka

$$z_{cdi} = z_d - z_i = 0,4433 - 0,0078 = 0,4355 \text{ m}$$

Pretpostavljeni krak sile:

$$z_s = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,843 = 0,759 \text{ m}$$

$$d = h - c_{\text{nom}} - \Phi_v - \frac{\Phi_s}{2} = 90 - 3,5 - 1,0 - \frac{2,5}{2} = 84,3 \text{ cm} = 0,843 \text{ m}$$

U polju treba predvidjeti minimalnu armaturu:

$$\min A_s = \frac{M_{\text{cr}}}{f_{\text{yk}} \cdot z_s} = \frac{2203,93}{5 \cdot 10^5 \cdot 0,759} = 2,688 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 48,45 \text{ cm}^2$$

U potrebnu najmanju količinu armature može se uzeti u obzir trećina užadi koje nisu udaljene od armature više od:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot h = 0,2 \cdot 700 = 140 \text{ mm} \\ 250 \text{ mm} \end{array} \right\} = 140 \text{ mm}$$

Ovaj uvjet zadovoljavaju sve ugrađene užadi.

Naprezanja čelika za prednapinjanje ograničeno je na $f_{\text{yk}} = 500 \text{ N/mm}^2$ pa je potreban broj užadi:

$$n_p = \frac{\min A_s}{A_p \times \frac{1}{3}} = \frac{48,45}{2,7 \times \frac{1}{3}} = 53,83 \approx 54$$

Broj užadi nije dovoljan da zadovolji najmanju potrebnu armaturu za robusnost presjeka.

$$\text{ODABRANO: } 10\Phi 25 \rightarrow A_{s,\text{prov}} = 10 \times 4,91 = 49,09 \text{ cm}^2$$

4.1.2.2. Presjek nad ležajem

Granični moment otvaranja pukotina presjeka nad ležajem:

$$M_{\text{cr}} = f_{\text{ctm}} \cdot W_{\text{cgi}} = f_{\text{ctm}} \cdot \frac{I_{\text{ci}}}{z_{\text{cgi}}} = 4100 \cdot \frac{0,2341}{0,4645} = 2066,33 \text{ kNm}$$

z_{cgi} – udaljenost do gornjeg ruba od težišta idealnog presjeka

$$z_{\text{cgi}} = z_g + z_i = 0,4567 + 0,0078 = 0,4645 \text{ m}$$

Minimalna armatura nad ležajem

$$\min A_s = \frac{M_{\text{cr}}}{f_{\text{yk}} \cdot z_s} = \frac{2066,33}{5 \cdot 10^5 \cdot 0,759} = 4,430 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 44,3 \text{ cm}^2$$

$$\text{ODABRANO: } \Phi 25 / 10,0 \text{ cm} \rightarrow A_{s,\text{prov}} = 49,09 \text{ cm}^2$$

4.1.3. Dimenzioniranje presjeka za uporabu ($t=\infty$) – savijanje s uzdužnom silom

Sila prednapinjanja se promatra kao uzdužna sila koja djeluje u osi natege.

Proračunska vrijednost najvećeg momenta savijanja u sredini raspona od vanjskih djelovanja bez prednapinjanja iznosi:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 786,6 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 112,10 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 200,60 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 490,80 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 396,60 \text{ kNm}$

Stalna ili prolazna proračunska situacija:

$$M_{Ed} = 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot (M_{qk} + M_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot M_{Tk} =$$

$$= 1,35 \cdot (786,60 + 112,10) + 1,50 \cdot (200,60 + 490,80) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 396,60 = 2607,29 \text{ kNm}$$

→ MJERODAVNO

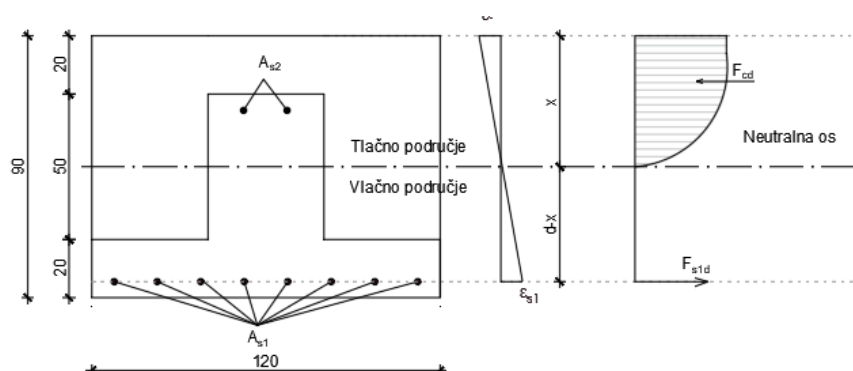
$$M_{Ed} = 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot M_{Tk} + 1,50 \cdot 0,75 \cdot M_{Qk} + 1,50 \cdot 0,4 \cdot M_{qk} =$$

$$= 1,35 \cdot (786,60 + 112,10) + 1,50 \cdot 396,60 + 1,50 \cdot 0,75 \cdot 490,8 + 1,50 \cdot 0,40 \cdot 200,6 = 2480,67 \text{ kNm}$$

Položaj zajedničkog težišta prednapete i pretpostavljene armature (pretpostavka: $8\phi 20$):

$$d_{p,s} = \frac{27,0 \times 10,5 + 8 \times 3,14 \times (3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2})}{27,0 + 25,12} = 8,09 \text{ cm}$$

$$d = 90 - 8,09 = 81,91 \text{ cm}$$



Slika 140. Poprečni presjek s raspodjelom tlačnih naprezanja u betonu

Moment savijanja od užadi u odnosu na težište ukupne armature (užad + šipke armature)

$$M_{Ed,p} = P_{m,\infty} \cdot \Delta d = 3339,10 \cdot 0,0241 = 80,47 \text{ kNm}$$

Δd - udaljenost između težišta užadi i zajedničkog težišta užadi i armature

Ukupna proračunska vrijednost momenta u $L/2$

$$M_{Ed,uk} = M_{Ed} + M_{Ed,p} = 2607,29 + 80,47 = 2687,76 \text{ kNm}$$

Računska tlačna čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{50}{1,5} = 33,333 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2687,76 \cdot 10^2}{120,0 \cdot 81,91^2 \cdot 3,333} = 0,101$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,103 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -3,2 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,138 \\ \zeta = 0,944 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{z}{d} \Rightarrow z = \zeta \cdot d = 0,944 \cdot 81,91 = 77,32 \text{ cm}$$

$$\xi = \frac{x}{d} \Rightarrow x = \xi \cdot d = 0,138 \cdot 81,91 = 11,30 \text{ cm}$$

Radi se provjera:

$$A_{s1} \cdot \sigma_{s1d} + A_{p1} \cdot \Delta \sigma_{p1d} \geq \frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$$

Gdje je:

$$N_{Ed} = A_{p1} \times \sigma_{p1}^{(0)} - \text{sila prednapinjanja kao normalna sila}$$

$$N_{Rd,p1} = A_{p1} \times \Delta \sigma_{p1d} - \text{prirast sile prednapinjanja od dodatnog izduženja}$$

$$\sigma_{p1d} = \sigma_{p1}^{(0)} + \Delta \sigma_{p1d} - \text{proračunska vrijednost naprezanja čelika za prednapinjanje}$$

Iz toga provjera glasi:

$$A_{s1,req} \geq \left(\frac{M_{Ed}}{z} - A_{p1} \cdot \sigma_{p1d} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_{s1d}}$$

Naprezanja čelika za armiranje i prednapinjanje ovise o produljenju ε .

Naprezanje čelika za armiranje: $\varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰}$

$$\sigma_{s1} = \varepsilon_{s1} \times E_s = 0,02 \cdot 200000 = 4000 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ODABRANO: } \sigma_{s1d} = f_{yd} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje čelika za prednapinjanje:

Deformacije čelika za prednapinjanje čine početna i dodatna deformacija.

Početna deformacija se može proračunati iz sile prednapinjanja:

$$\varepsilon_{pm\infty}^{(0)} = \frac{P_{m\infty}}{P_{m0}} \cdot \frac{P_0}{E_p \cdot A_p} = \frac{3339,10}{3763,80} \cdot \frac{3985,20 \cdot 10^3}{195000 \cdot 27,0} = 0,0067 \text{ ‰}$$

Dodatnu deformaciju vanjskog djelovanja možemo uzeti približno jednaku deformaciji čelika za armiranje:

$$\Delta\varepsilon_{p1} \approx \varepsilon_{s1} = 4,5 \text{ ‰}$$

Ukupna deformacija:

$$\varepsilon_{p,min} = \varepsilon_{pm\infty}^{(0)} + \Delta\varepsilon_{p1} = 6,7 + 4,5 = 11,2 \text{ ‰}$$

Maksimalna deformacija iz maksimalnog naprezanje čelika za prednapinjanje :

$$\sigma_{pd} = \frac{f_{p01k}}{\gamma_p} = \frac{1640}{1,15} = 1426,10 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{p,min} = 11,2 \text{ ‰} > \frac{\sigma_{pd}}{E_p} = \frac{1426,10}{195000} = 0,00731 = 7,31 \text{ ‰}$$

$$\sigma_{pd} = 1426,10 \text{ N/mm}^2$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1,req} = \frac{\frac{M_{Ed,uk}}{Z} - A_{p,u} \cdot \sigma_{pd}}{\sigma_{s1d}} = \frac{\frac{2687,76 \cdot 10^2}{77,32} - 27,0 \cdot 142,61}{43,478} = 11,09 \text{ cm}^2$$

$$\text{ODABRANO : } 4\Phi 20 \rightarrow A_{s,prov} = 2 \cdot 3,14 = 12,57 \text{ cm}^2$$

Armatura za robusnost presjeka izračunata u točki 4.1.2. ($A_{s,prov} = 49,09 \text{ cm}^2$)

je mjerodavnija od ovdje izračunate armature ($A_{s,prov} = 12,57 \text{ cm}^2$).

4.1.4. Dokaz predstlačenog vlačnog područja

4.1.4.1. Sredina raspona za vrijeme gradnje

Za fazu građenja potrebno je dokazati nosivost vlačnog područja za kombinaciju djelovanja vlastite težine i prednapinjanja.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti:

$\gamma_g=1.0$ - povoljno djelovanje vlastite težine

$\gamma_p=1.0$ – prednapinjanje

Proračun se provodi u sredini raspona za savijanje s uzdužnom silom u trenutku $t=0$.

Proračunska vrijednost momenta u polju od vlastite težine:

$$M_{Ed,gk1} = 1,0 \cdot M_{gk1} = 1,0 \cdot 786,60 = 786,60 \text{ kNm}$$

Proračunska vrijednost sile prednapinjanja:

$$P_{m0} = 3763,80 \text{ kN} \Rightarrow N_{Ed} = -P_{m0} = -3763,80 \text{ kN}$$

Udaljenost čelika za armiranje od gornjeg ruba nosača:

$$d_{s2} = c_{nom} + \Phi_v + \frac{\Phi_s}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} = 5,5 \text{ cm}$$

Moment od sile prednapinjanja u razini gornje armature:

$$M_{Ed} = P_{m0} \cdot (h - d_{s2} - d_{p1}) = -3763,80 \cdot (0,7 - 0,055 - 0,105) = -2032,45 \text{ kNm}$$

Računski moment u polju:

$$M_{Ed} = M_{Ed,gk1} + M_{Ed,p} = 786,60 + (-2032,45) = -1245,85 \text{ kNm}$$

Statička visina presjeka:

$$d = h - d_{s2} = 70 - 5,5 = 64,50 \text{ cm}$$

$$b = 40,0 \text{ cm}$$

Bezdimenzionalni moment savijanja:

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1245,85 \cdot 10^2}{40,0 \cdot 64,5^2 \cdot 3,33} = 0,225$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,232 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -3,5 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 7,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,333 \\ \zeta = 0,861 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{Z}{d} \Rightarrow z = \zeta \cdot d = 0,861 \cdot 64,5 = 55,53 \text{ cm}$$

$$\xi = \frac{x}{d} \Rightarrow x = \xi \cdot d = 0,333 \cdot 64,5 = 21,48 \text{ cm}$$

Površina potrebne armature:

$$A_{s1,req} = \frac{\left(\frac{|M_{Ed}|}{z} + N_{Ed} \right)}{\sigma_{sd}} = \frac{\frac{1245,85}{55,53} - 3763,8}{43,478} = -86,05 \text{ cm}^2 < 0$$

Iz dobivenog zaključujemo da je za fazu građenja i transporta nosača u sredini raspona i gornjoj zoni poprečnog presjeka potrebna samo konstruktivna armatura.

4.1.4.2. Područje oslonca za vrijeme gradnje

Promatra se presjek $x = l_{pt2} = 0,81509 \text{ m}$ u kojem djeluje 8 od 18 užadi.

Računska vrijednost momenta od vlastite težine:

$$M_{Ed,gk1} = 245,4 \cdot 0,81509 = 200,02 \text{ kNm}$$

Računska vrijednost sile prednapinjanja

$$P_{m0} = \frac{8}{18} \cdot 3763,80 = 1672,80 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = -P_{m0} = -1672,80 \text{ kN}$$

Računska vrijednost ukupnog momenta savijanja za $x = 0,81509 \text{ m}$ u razini gornje armature:

$$M_{Ed} = M_{Ed,gk1} + M_{Ed,p} = 200,02 - 1672,80 \cdot (0,7 - 0,055 - 0,105) = -703,29 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{703,29 \cdot 10^2}{40,0 \cdot 64,5^2 \cdot 3,33} = 0,127$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,128 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -3,5 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 17,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,171 \\ \zeta = 0,929 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{z}{d} \Rightarrow z = \zeta \times d = 0,929 \times 65,4 = 60,76 \text{ cm}$$

Površina potrebne armature:

$$A_{s1,req} = \frac{\left(\frac{|M_{Ed}|}{z} + N_{Ed} \right)}{\sigma_{sd}} = \frac{\frac{703,29}{60,76} - 1672,80}{43,478} = -38,21 \text{ cm}^2 < 0$$

Iz dobivenog zaključujemo da je za fazu građenja i transporta nosača u blizini oslonca, u gornjoj zoni poprečnog presjeka potrebna samo konstruktivna armatura.

4.1.5. Provjera na poprečnu silu na udaljenosti d od oslonca

Reducirana vrijednost poprečne sile proračunava se iz duljine ležaja $a=0,30$ m i udaljenosti težišta užadi od gornjeg ruba $d=90-10,5=79,50$ cm.

Vlastita težina (Slika 61): $V_{gk,1} = 245,4 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 64) : $V_{gk,2} = 48,10 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 93): $V_{qk} = 74,90 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 98): $V_{Qk} = 146,60 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 115): $V_{Tk} = 16,80 \text{ kNm}$

$$V_{Ed}^{t=0} = 1,0 \cdot V_{gk1} = 1,0 \times 245,5 = 245,5 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}^{t=\infty} = 1,35 \cdot (V_{gk1} + V_{gk2}) + 1,5 \cdot (V_{qk} + V_{Qk}) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot V_{Tk} =$$

$$1,35 \cdot (245,5 + 48,1) + 1,5 \cdot (74,9 + 146,6) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 16,8 = 743,73 \text{ kN} \quad \text{-- MJERODAVNO}$$

$$V_{Ed}^{t=\infty} = 1,35 \cdot (V_{gk1} + V_{gk2}) + 1,5 \cdot V_{Tk} + 1,5 \cdot 0,75 \cdot V_{Qk} + 1,5 \cdot 0,4 \cdot V_{qk} =$$

$$1,35 \cdot (245,4 + 48,1) + 1,5 \cdot 16,8 + 1,5 \cdot 0,75 \cdot 146,6 + 1,5 \cdot 0,4 \cdot 74,9 = 630,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - (a/2 + d) \cdot (\gamma_g \cdot (g_{gk1} + g_{gk2}) + \gamma_q \cdot q_{q,k}) =$$

$$= 743,73 - (0,15/2 + 0,795) \cdot (1,35 \cdot (8,10 + 3,43) + 1,50 \cdot 7,8) = 720,0 \text{ kN}$$

Potrebno je provjeriti dali je presjek raspucao, tj. dali su vlačna naprezanja manja od

$$f_{ctk,0.05} / \gamma_c \cdot$$

U promatranom presjeku djeluje 8 od 16 užadi i sila prednapinjanja djeluje u punom iznosu jer je promatrani presjek izvan duljine uvođenja sile prednapinjanja.

Računska vrijednost momenta od vanjskog djelovanja u presjeku :

$$x = a/2 + d = 0,30/2 + 59,5 = 0,5965 \text{ m}$$

$$x = a/2 + d = 0,30/2 + 79,5 = 0,7965 \text{ m}$$

$$M_{Ed,(x=0,5965)}^{t=0} = 245,4 \times 0,5965 = 146,21 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,(x=0,7965)}^{t=\infty} = 743,73 \times 0,7965 = 591,86 \text{ kNm}$$

4.1.5.1. Naprezanja na gornjem rubu za $t=0$:

$$\sigma_{cg,d0} = \frac{M_{Ed}}{W_{cig}} - P_{m0} \cdot \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cig}} \right] = -\frac{146,21}{0,0509} - \frac{8}{18} \cdot 3763,80 \cdot \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{0,0509} \right] =$$

$$= 1291,47 - 1467,67 = -176,19 \text{ kN/m}^2 = -0,02 \text{ N/mm}^2 < \frac{f_{ctk,0.05}}{1,5} = \frac{2,9}{1,5} = 1,93 \text{ N/mm}^2$$

Presjek nije raspucao.

4.1.5.2. Naprezanja na donjem rubu za $t=\infty$:

$$\sigma_{cg,d0} = \frac{M_{Ed}}{W_{cid}} - P_{m\infty} \cdot \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cid}} \right] = \frac{59186}{0,2341} - \frac{8}{18} \cdot 3339,10 \times \left[\frac{1}{1,0508} + \frac{0,3305}{0,2341} \right] =$$

$$= 1101,05 - 2324,74 = -1223,69 \text{ kN/m}^2 = -1,22 \text{ N/mm}^2 < \frac{f_{ctk,0.05}}{1,5} = \frac{2,9}{1,5} = 1,93 \text{ N/mm}^2$$

Presjek nije raspucao.

4.1.5.3. Nosivost prednapetog betonskog elementa bez posmične armature

U područjima koja nisu raspucala od savijanja $V_{Rd,c}$ iznosi:

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}$$

I – moment tromosti presjeka (bruto)

b_w - najmanja širina poprečnog presjeka (širina hrpta)

S – statički moment površine iznad težišne osi

$$S = 40 \cdot 26,45 \cdot 13,23 + 2 \cdot 0,919 \cdot 46,45 \cdot 40 \cdot 23,23 + 0,919 \cdot 40 \cdot 20 \cdot 36,45 = 120126 \text{ cm}^3 = 0,12 \text{ m}^3$$

$$\alpha_1 = \frac{L_x}{l_{pt2}} \leq 1 \Rightarrow \alpha_1 = \frac{12 + d}{l_{pt2}} = \frac{12 + 79,5}{81,509} = 1,12 \Rightarrow \alpha_1 = 1,0$$

L_x – Udaljenost promatranog presjeka od početne točke duljine prijenosa l_{pt}

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{18}{1,0508} \cdot 3339,10 = 1412,3 \text{ kN/m}^2 = 1,41 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,2341 \cdot 1,2}{0,12} \cdot \sqrt{(1933)^2 + 1,0 \cdot 1412,3 \cdot 1933} = 5952,98 \text{ kN} > V_{Ed,red} = 720,0 \text{ kN}$$

Nije potrebno proračunati posmičnu armaturu, postaviti će se konstruktivna armatura.

4.1.5.4. Maksimalna nosivost na poprečnu silu, ograničenu drobljenjem betona $V_{Rd,max}$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta)}$$

α_{cw} – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu

$$= 1 \quad \rightarrow \text{bez prednapinjanja}$$

$$= \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) \quad \rightarrow 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd}$$

$$= 1,25 \quad \rightarrow 0,25 \times f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 \cdot f_{cd}$$

$$= 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \right) \rightarrow 0,5 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0 \cdot f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{1,41}{50,0} = 1,03$$

$$v_1 = v \Rightarrow v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{50}{250} \right) = 0,48$$

$$1 \leq \text{ctg}\theta \leq 2,5$$

$$\text{ctg}\theta = 2$$

$$\text{tg}\theta = \frac{1}{2}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1,03 \cdot 120 \cdot 79,5 \cdot 0,9 \cdot 0,48 \cdot 5,00}{\left(2 + \frac{1}{2} \right)} = 8489,84 \text{ kN} > 720,0 \text{ kN}$$

ZADOVOLJAVA

Maksimalni razmak spona (minimalna poprečna armatura):

Prema tablici 4,13. [9], najveći uzdužni razmak spona:

$$\text{-za:} \quad V_{Ed} = 720,0 \text{ kN} < 0,3 \cdot V_{Rd,max} = 0,3 \cdot 8489,84 = 2546,95 \text{ kN}$$

$$\text{-slijedi:} \quad s_{l,max} = 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 79,5 = 59,6 \text{ cm} > 30,0 \text{ cm}$$

Mjerodavni maksimalni razmak spona prema uvjetu iznosi **30,0 cm**

ODABRANO: $\phi 12 / 25 \text{ cm}, m = 2$

U polju će se vilice postaviti na razmaku od 25 cm, dok će se nad ležajem progustiti na 10 cm.

4.1.6. Dimenzioniranje presjeka nad ležajem

Momenti nad ležajem:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 781,2 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 136,2 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 92): $M_{qk} = 239,5 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 97): $M_{Qk} = 393,8 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 114): $M_{Tk} = 320,0 \text{ kNm}$

Stalna ili prolazna proračunska situacija:

$$\begin{aligned} M_{\text{Ed, supp}} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot (M_{qk} + M_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot M_{Tk} = \\ &= 1,35 \cdot (781,2 + 136,2) + 1,50 \cdot (239,5 + 393,8) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 320,0 = 2476,44 \text{ kNm} \\ &\rightarrow \text{MJERODAVNO} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{Ed, supp}} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot M_{Tk} + 1,50 \cdot 0,75 \cdot M_{Qk} + 1,50 \cdot 0,4 \cdot M_{qk} = \\ &= 1,35 \cdot (781,2 + 136,2) + 1,50 \cdot 320,0 + 1,50 \cdot 0,75 \cdot 393,8 + 1,50 \cdot 0,40 \cdot 239,5 = 2305,22 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{Ed, supp}} &= 1,35 \cdot (R_{gk,1} + R_{gk,2}) + 1,50 \cdot (R_{qk} + R_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot R_{Tk} = \\ &= 1,35 \cdot (254,4 + 48,1) + 1,50 \cdot 74,0 + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 17,6 = 535,22 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\Delta M_{\text{Ed, supp}} = R_{\text{Ed, supp}} \cdot \frac{b_{\text{supp}}}{8} = 535,22 \cdot \frac{0,3}{8} = 20,07 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Ed}}^{\text{supp}} = 2476,44 - 20,07 = 2456,37 \text{ kNm}$$

Statička visina presjeka:

$$d = h - c_{\text{nom}} - \Phi_v - \frac{\Phi_s}{2} = 90 - 3,5 - 1,0 - \frac{2,5}{2} = 84,25 \text{ cm} = 0,843 \text{ m}$$

Bezdimenzijski moment savijanja:

$$\mu_{\text{Ed}} = \frac{M_{\text{Ed}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}} = \frac{2456,37 \cdot 10^2}{120 \cdot 84,3^2 \cdot 3,33} = 0,086 < \mu_{\text{lim}} = 0,296$$

$$\text{Za } \mu_{\text{Rd}} = 0,089 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -2,8 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,123 \\ \zeta = 0,951 \end{cases}$$

Potrebna površina armature:

$$A_{s1, \text{req}} = \frac{M_{\text{Ed}}^{\text{supp}}}{\zeta \cdot d \cdot f_{\text{yd}}} = \frac{2456,3 \cdot 10^2}{0,951 \cdot 84,3 \cdot 43,478} = 45,47 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s1, \text{min}} = 0,26 \cdot \frac{f_{\text{ctm}}}{f_{\text{yk}}} \cdot b \cdot d = 0,26 \cdot \frac{4,1}{500} \cdot 120 \cdot 84,3 = 21,61 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1, \text{min}} = 0,0013 \cdot b \cdot d = 0,0013 \cdot 120 \cdot 84,3 = 13,18 \text{ cm}^2$$

ODABRANO: $\phi 25 / 15,0 \text{ cm}$ ($A_{s1, \text{prov}} = 49,09 \text{ cm}^2$)

Armatura za robusnost presjeka izračunata u točki 4.2.1. ($A_{s, \text{prov}} = 49,09 \text{ cm}^2$)

je jednaka ovdje izračunatoj armaturi ($A_{s, \text{prov}} = 49,09 \text{ cm}^2$).

4.2. Granično stanje nosivosti za L nosač

4.2.1. Sila prednapinjanja

U tablici su dane karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja i momenti dobiveni iz naprezanja čelika za prednapinjanje za 16 odabranih užadi. Momenti su dobiveni proračunom za idealne geometrijske karakteristike presjeka $z_{cip}=0,1817$ m i površinu prednapete užadi $A_p=1500$ mm².

Tablica 17. Karakteristične vrijednosti sile prednapinjanja i momenata

	N [kN]	M [kNm]	σ [N/mm ²]
P_0	2214,0	402,28	1476,0
P_{m0}	2091,0	379,93	1394,0
$P_{m\infty}$	1865,80	339,0	1243,87

Parcijalni koeficijent sigurnosti za GSN za silu prednapinjanja: $\gamma_p=1,0$.

4.2.2. Armatura za robusnost presjeka

Armatura za robusnost presjeka osigurava duktilno ponašanje nosača, a proračunava se na granični moment otvaranja pukotina presjeka bez sile prednapinjanja.

Uzima se u obzir srednja osna vlačna čvrstoća betona koja za razred C50/60 iznosi:

$$f_{ctm}=4,1 \text{ N/mm}^2 \text{ (tablica 3.1, EN 1992-1-1:2013)}$$

Karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje iznosi:

$$f_{yk}=500 \text{ N/mm}^2$$

4.2.2.1. Presjek u sredini raspona

Granični moment otvaranja pukotina u sredini raspona:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot W_{cd,i} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{ci}}{z_{cdi}} = 4100 \cdot \frac{0,1665}{0,4367} = 1563,20 \text{ kNm}$$

z_{cdi} – udaljenost od težišta do donjeg ruba idealnog presjeka

$$z_{cdi} = z_d - z_i = 0,4435 - 0,0068 = 0,4367 \text{ m}$$

Pretpostavljeni krak sile:

$$z_s = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,843 = 0,759 \text{ m}$$

$$d = h - c_{\text{nom}} - \Phi_v - \frac{\Phi_s}{2} = 90 - 3,5 - 1,0 - \frac{2,5}{2} = 84,3 \text{ cm} = 0,843 \text{ m}$$

U polju treba predvidjeti minimalnu armaturu:

$$\min A_s = \frac{M_{\text{cr}}}{f_{yk} \cdot z_s} = \frac{1563,2}{5 \cdot 10^5 \cdot 0,759} = 3,32 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 33,2 \text{ cm}^2$$

U potrebnu najmanju količinu armature može se uzeti u obzir trećina užadi koje nisu udaljene od armature više od:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot h = 0,2 \cdot 700 = 140 \text{ mm} \\ 250 \text{ mm} \end{array} \right\} = 140 \text{ mm}$$

Ovaj uvjet zadovoljavaju sve ugrađene užadi.

Naprezanja čelika za prednapinjanje ograničeno je na $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ pa je potreban broj užadi:

$$n_p = \frac{\min A_s}{A_p \times \frac{1}{3}} = \frac{31,2}{1,5 \times \frac{1}{3}} = 62$$

Broj užadi nije dovoljan da zadovolji najmanju potrebnu armaturu za robusnost presjeka.

$$\text{ODABRANO: } 7\Phi 25 \rightarrow A_{s,\text{prov}} = 7 \times 4,91 = 34,36 \text{ cm}^2$$

4.2.2.2. Presjek nad ležajem

Granični moment otvaranja pukotina presjeka nad ležajem:

$$M_{\text{cr}} = f_{\text{ctm}} \cdot W_{\text{cgi}} = f_{\text{ctm}} \cdot \frac{I_{\text{ci}}}{z_{\text{cgi}}} = 4100 \cdot \frac{0,1665}{0,4632} = 1473,77 \text{ kNm}$$

z_{cgi} – udaljenost do gornjeg ruba od težišta idealnog presjeka

$$z_{\text{cgi}} = z_g + z_i = 0,4565 + 0,0068 = 0,4632 \text{ m}$$

Minimalna armatura nad ležajem

$$\min A_s = \frac{M_{\text{cr}}}{f_{yk} \cdot z_s} = \frac{1473,77}{5 \cdot 10^5 \cdot 0,759} = 3,188 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 31,88 \text{ cm}^2$$

$$\text{ODABRANO: } \Phi 25 / 15\text{cm} \rightarrow A_{s,\text{prov}} = 32,72 \text{ cm}^2$$

4.2.3. Dimenzioniranje presjeka za uporabu ($t=\infty$) – savijanje s uzdužnom silom

Sila prednapinjanja se promatra kao uzdužna sila koja djeluje u osi natege.

Proračunska vrijednost najvećeg momenta savijanja u sredini raspona od vanjskih djelovanja bez prednapinjanja iznosi:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 530,60 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 75,40 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 100,20 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 282,30 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 283,30 \text{ kNm}$

Stalna ili prolazna proračunska situacija:

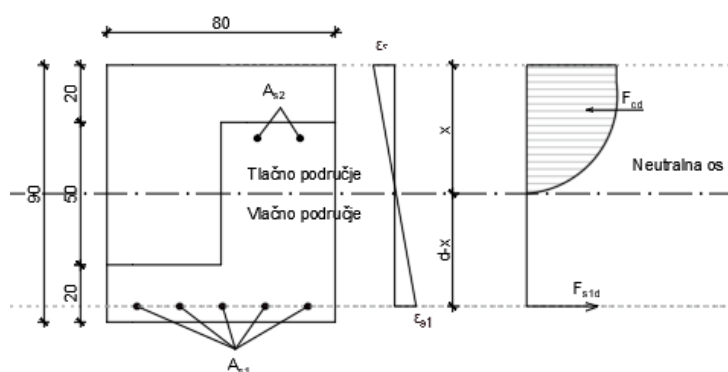
$$\begin{aligned} M_{Ed} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot (M_{qk} + M_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot M_{Tk} = \\ &= 1,35 \cdot (530,6 + 75,4) + 1,50 \cdot (100,20 + 282,20) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 283,30 = 1646,67 \text{ kNm} \\ &\rightarrow \text{MJERODAVNO} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot M_{Tk} + 1,50 \cdot 0,75 \cdot M_{Qk} + 1,50 \cdot 0,4 \cdot M_{qk} = \\ &= 1,35 \cdot (530,6 + 75,40) + 1,50 \cdot 283,30 + 1,50 \cdot 0,75 \cdot 282,30 + 1,50 \cdot 0,40 \cdot 100,2 = 1620,76 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Položaj zajedničkog težišta prednapete i pretpostavljene armature (pretpostavka: $8\phi 20$):

$$d_{p,s} = \frac{15,0 \times 10,5 + 5 \times 3,14 \times (3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2})}{15,0 + 15,7} = 7,94 \text{ cm}$$

$$d = 90 - 7,94 = 82,06 \text{ cm}$$



Slika 141. Poprečni presjek s raspodelom tlačnih naprezanja u betonu

Moment savijanja od užadi u odnosu na težište ukupne armature (užad + šipke armature)

$$M_{Ed,p} = P_{m,\infty} \cdot \Delta d = 1865,8 \cdot 0,0256 = 47,76 \text{ kNm}$$

Δd - udaljenost između težišta užadi i zajedničkog težišta užadi i armature

Ukupna proračunska vrijednost momenta u L/2

$$M_{Ed,uk} = M_{Ed} + M_{Ed,p} = 1646,67 + 47,76 = 1694,43 \text{ kNm}$$

Računska tlačna čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \alpha \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \times \frac{50}{1,5} = 33,333 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1694,43 \cdot 10^2}{80,0 \cdot 82,06^2 \cdot 3,333} = 0,094$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,096 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -3,0 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,130 \\ \zeta = 0,947 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{z}{d} \Rightarrow z = \zeta \times d = 0,947 \times 82,06 = 77,71 \text{ cm}$$

$$\xi = \frac{x}{d} \Rightarrow x = \xi \times d = 0,130 \times 82,06 = 10,67 \text{ cm}$$

Radi se provjera:

$$A_{s1} \times \sigma_{s1d} + A_{p1} \times \Delta \sigma_{p1d} \geq \frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$$

Gdje je:

$$N_{Ed} = A_{p1} \times \sigma_{p1}^{(0)} - \text{sila prednapinjanja kao normalna sila}$$

$$N_{Rd,p1} = A_{p1} \times \Delta \sigma_{p1d} - \text{prirast sile prednapinjanja od dodatnog izduženja}$$

$$\sigma_{p1d} = \sigma_{p1}^{(0)} + \Delta \sigma_{p1d} - \text{proračunska vrijednost naprezanja čelika za prednapinjanje}$$

Iz toga provjera glasi:

$$A_{s1,req} \geq \left(\frac{M_{Ed}}{z} - A_{p1} \times \sigma_{p1d} \right) \times \frac{1}{\sigma_{s1d}}$$

Naprezanja čelika za armiranje i prednapinjanje ovise o produljenju ε .

Naprezanje čelika za armiranje: $\varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰}$

$$\sigma_{s1} = \varepsilon_{s1} \times E_s = 0,02 \times 200000 = 4000 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ODABRANO: } \sigma_{s1d} = f_{yd} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje čelika za prednapinjanje:

Deformacije čelika za prednapinjanje čine početna i dodatna deformacija.

Početna deformacija se može proračunati iz sile prednapinjanja:

$$\varepsilon_{pm\infty}^{(0)} = \frac{P_{m\infty}}{P_{m0}} \times \frac{P_0}{E_p \times A_p} = \frac{1865,8}{2091,0} \times \frac{2214,0 \times 10^3}{195000 \times 15,0} = 0,0068 \text{ ‰}$$

Dodatnu deformaciju vanjskog djelovanja možemo uzeti približno jednaku deformaciji čelika za armiranje:

$$\Delta\varepsilon_{p1} \approx \varepsilon_{s1} = 4,5 \text{ ‰}$$

Ukupna deformacija:

$$\varepsilon_{p,min} = \varepsilon_{pm\infty}^{(0)} + \Delta\varepsilon_{p1} = 6,8 + 4,5 = 11,3 \text{ ‰}$$

Maksimalna deformacija iz maksimalnog naprezanje čelika za prednapinjanje :

$$\sigma_{pd} = \frac{f_{p01k}}{\gamma_p} = \frac{1640}{1,15} = 1426,10 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{p,min} = 11,3 \text{ ‰} > \frac{\sigma_{pd}}{E_p} = \frac{1426,10}{195000} = 0,007 = 7,31 \text{ ‰} \quad \sigma_{pd} = 1426,10 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1,req} = \frac{\frac{M_{Ed,uk}}{Z} - A_{p,u} \times \sigma_{pd}}{\sigma_{s1d}} = \frac{\frac{1694,43 \times 10^2}{77,71} - 15,0 \times 142,61}{43,478} = 1,46 \text{ cm}^2$$

$$\text{ODABRANO:} \quad 2\Phi 20 \rightarrow A_{s,prov} = 2 \times 3,14 = 6,28 \text{ cm}^2$$

Armatura za robusnost presjeka izračunata u točki 4.2.2. ($A_{s,prov} = 34,36 \text{ cm}^2$)

je mjerodavnija od ovdje izračunate armature ($A_{s,prov} = 6,28 \text{ cm}^2$).

4.2.4. Dokaz predstlačenog vlačnog područja

4.2.4.1. Sredina raspona za vrijeme gradnje

Za fazu građenja potrebno je dokazati nosivost vlačnog područja za kombinaciju djelovanja vlastite težine i prednapinjanja.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti:

$\gamma_g = 1.0$ - povoljno djelovanje vlastite težine

$\gamma_p = 1.0$ – prednapinjanje

Proračun se provodi u sredini raspona za savijanje s uzdužnom silom u trenutku $t=0$.

Proračunska vrijednost momenta u polju od vlastite težine:

$$M_{Ed, gk1} = 1,0 \cdot M_{gk1} = 1,0 \cdot 530,6 = 530,6 \text{ kNm}$$

Proračunska vrijednost sile prednapinjanja:

$$P_{m0} = 2091,0 \text{ kN} \Rightarrow N_{Ed} = -P_{m0} = -2091,0 \text{ kN}$$

Udaljenost čelika za armiranje od gornjeg ruba nosača:

$$d_{s2} = c_{nom} + \Phi_v + \frac{\Phi_s}{2} = 3,5 + 1,0 + \frac{2,0}{2} = 5,5 \text{ cm}$$

Moment od sile prednapinjanja u razini gornje armature:

$$M_{Ed} = P_{m0} \cdot (h - d_{s2} - d_{p1}) = -2091,0 \cdot (0,7 - 0,055 - 0,105) = -1129,14 \text{ kNm}$$

Računski moment u polju:

$$M_{Ed} = M_{Ed, gk1} + M_{Ed, p} = 530,6 + (-1129,14) = -598,54 \text{ kNm}$$

Statička visina presjeka:

$$d = h - d_{s2} = 70 - 5,5 = 64,50 \text{ cm}$$

$$b = 40,0 \text{ cm}$$

Bezdimenzionalni moment savijanja:

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{598,54 \cdot 10^2}{40,0 \cdot 64,5^2 \cdot 3,33} = 0,108$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,110 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -3,4 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,145 \\ \zeta = 0,940 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{z}{d} \Rightarrow z = \zeta \cdot d = 0,940 \cdot 64,5 = 60,63 \text{ cm}$$

$$\xi = \frac{x}{d} \Rightarrow x = \xi \cdot d = 0,145 \cdot 64,5 = 9,35 \text{ cm}$$

Površina potrebne armature:

$$A_{s1,req} = \frac{\left(\frac{|M_{Ed}|}{z} + N_{Ed} \right)}{\sigma_{sd}} = \frac{\frac{598,54}{60,63} - 2091,0}{43,478} = -47,87 \text{ cm}^2 < 0$$

Iz dobivenog zaključujemo da je za fazu građenja i transporta nosača u sredini raspona i gornjoj zoni poprečnog presjeka potrebna samo konstruktivna armatura.

4.2.4.2. Područje oslonca za vrijeme gradnje

Promatra se presjek $x = l_{pt2} = 0,81509 \text{ m}$ u kojem djeluje 4 od 10 užadi.

Računska vrijednost momenta od vlastite težine:

$$M_{Ed,gk1} = 173,5 \cdot 0,81509 = 141,42 \text{ kNm}$$

Računska vrijednost sile prednapinjanja

$$P_{m0} = \frac{4}{10} \cdot 2091,0 = 836,40 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = -P_{m0} = -836,40 \text{ kN}$$

Računska vrijednost ukupnog momenta savijanja za $x = 0,81509 \text{ m}$ u razini gornje armature:

$$M_{Ed} = M_{Ed,gk1} + M_{Ed,p} = 141,42 - 836,40 \cdot (0,7 - 0,055 - 0,105) = -310,24 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{310,24 \cdot 10^2}{40,0 \cdot 65,4^2 \cdot 3,33} = 0,054$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,055 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -1,9 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,087 \\ \zeta = 0,968 \end{cases}$$

$$\zeta = \frac{z}{d} \Rightarrow z = \zeta \times d = 0,968 \times 65,4 = 63,31 \text{ cm}$$

Površina potrebne armature:

$$A_{s1,req} = \frac{\left(\frac{|M_{Ed}|}{z} + N_{Ed} \right)}{\sigma_{sd}} = \frac{\frac{282,53}{63,31} - 836,40}{43,478} = -19,13 \text{ cm}^2 < 0$$

Iz dobivenog zaključujemo da je za fazu građenja i transporta nosača u blizini oslonca, u gornjoj zoni poprečnog presjeka potrebna samo konstruktivna armatura.

4.2.5. Provjera na poprečnu silu na udaljenosti d od oslonca

Reducirana vrijednost poprečne sile proračunava se iz duljine ležaja $a=0,3$ m i udaljenosti težišta užadi od gornjeg ruba $d=90-10,5=79,50$ cm.

Vlastita težina (Slika 61): $V_{gk,1} = 173,5 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 64): $V_{gk,2} = 37,0 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 93): $M_{qk} = 24,50 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 98): $M_{Qk} = 61,50 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 115): $V_{Tk} = 14,1 \text{ kNm}$

$$V_{Ed}^{t=0} = 1,0 \cdot V_{gk1} = 1,0 \times 173,5 = 173,5 \text{ kN}$$

$$V_{Ed}^{t=\infty} = 1,35 \cdot (V_{gk1} + V_{gk2}) + 1,5 \cdot (V_{qk} + V_{Qk}) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot V_{Tk} =$$

$$1,35 \cdot (173,5 + 37,0) + 1,5 \cdot (24,5 + 61,5) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 14,1 = 425,87 \text{ kN} \quad \text{-- MJERODAVNO}$$

$$V_{Ed}^{t=\infty} = 1,35 \cdot (V_{gk1} + V_{gk2}) + 1,5 \cdot V_{Tk} + 1,5 \cdot 0,75 \cdot V_{Qk} + 1,5 \cdot 0,4 \cdot V_{qk} =$$

$$1,35 \cdot (173,5 + 37,0) + 1,5 \cdot 14,1 + 1,5 \cdot 0,75 \cdot 61,5 + 1,5 \cdot 0,4 \cdot 24,5 = 389,21 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - (a/2 + d) \cdot (\gamma_g \cdot (g_{gk1} + g_{gk2}) + \gamma_q \cdot q_{q,k}) =$$

$$= 425,87 - (0,15/2 + 0,795) \cdot (1,35 \cdot (5,40 + 1,62) + 1,50 \cdot 3,0) = 413,71 \text{ kN}$$

Potrebno je provjeriti dali je presjek raspucao, tj. dali su vlačna naprezanja manja od

$$f_{ctk,0.05} / \gamma_c \cdot$$

U promatranom presjeku djeluje 4 od 10 užadi i sila prednapinjanja djeluje u punom iznosu jer je promatrani presjek izvan duljine uvođenja sile prednapinjanja.

Računska vrijednost momenta od vanjskog djelovanja u presjeku

$$x = a/2 + d = 0,3/2 + 0,595 = 0,5965 \text{ m}$$

$$x = a/2 + d = 0,3/2 + 79,5 = 0,7965 \text{ m}$$

$$M_{Ed,(x=0,5965)}^{t=0} = 173,5 \times 0,5965 = 103,37 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,(x=0,7965)}^{t=\infty} = 425,87 \times 0,7965 = 338,91 \text{ kNm}$$

4.2.5.1. Naprezanja na gornjem rubu za $t=0$:

$$\sigma_{cg,d0} = \frac{M_{Ed}}{W_{cig}} - P_{m0} \cdot \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cig}} \right] = \frac{103,37}{0,0474} - \frac{4}{10} \cdot 20910 \cdot \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= 901,33 - 915,43 = -14,1 \text{ kN/m}^2 = -0,01 \text{ N/mm}^2 < \frac{f_{ctk,0.05}}{1,5} = \frac{2,9}{1,5} = 1,93 \text{ N/mm}^2$$

Presjek nije raspucao.

4.2.5.2. Naprezanja na donjem rubu za $t=\infty$:

$$\sigma_{cg,d0} = \frac{M_{Ed}}{W_{cid}} - P_{m\infty} \cdot \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cid}} \right] = \frac{338,91}{0,7041} - \frac{4}{10} \cdot 1865,8 \times \left[\frac{1}{0,7041} + \frac{0,3317}{0,7041} \right] =$$

$$= 210,2 - 1213,5 = -1003,3 \text{ kN/m}^2 = -1,0 \text{ N/mm}^2 < \frac{f_{ctk,0.05}}{1,5} = \frac{2,9}{1,5} = 1,93 \text{ N/mm}^2$$

Presjek nije raspucao.

4.2.5.3. Nosivost prednapetog betonskog elementa bez posmične armature

U područjima koja nisu raspucala od savijanja $V_{Rd,c}$ iznosi:

$$V_{Rd,c} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}$$

I – moment tromosti presjeka (bruto)

b_w - najmanja širina poprečnog presjeka (širina hrpta)

S – statički moment površine iznad težišne osi

$$S = 40 \cdot 26,32 \cdot 13,16 + 0,919 \cdot 40 \cdot 46,32 \cdot 23,16 + 0,919 \cdot 40 \cdot 26,32 \cdot 33,16 = 85372,98 \text{ cm}^3 = 0,0854 \text{ m}^3$$

$$\alpha_1 = \frac{L_x}{l_{pt2}} \leq 1 \Rightarrow \alpha_1 = \frac{12 + d}{l_{pt2}} = \frac{12 + 79,50}{81,509} = 1,12 < 1 \Rightarrow \alpha_1 = 1,0$$

L_x – Udaljenost promatranog presjeka od početne točke duljine prijenosa l_{pt}

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{10}{0,7041} \cdot 20910 = 1187,89 \text{ kN/m}^2 = 1,19 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,1665 \cdot 1,2}{0,0854} \cdot \sqrt{(1933)^2 + 1,0 \cdot 1187,89 \cdot 1933} = 7182,95 \text{ kN} > V_{Ed,red} = 413,71 \text{ kN}$$

Nije potrebno proračunati posmičnu armaturu, ugraditi će se konstruktivna armatura.

4.2.5.4. Maksimalna nosivost na poprečnu silu, ograničenu drobljenjem betona $V_{Rd,max}$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{tg}\theta)}$$

α_{cw} – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu

$$= 1 \quad \rightarrow \text{bez prednapinjanja}$$

$$= \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \quad \rightarrow 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd}$$

$$= 1,25 \quad \rightarrow 0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 \cdot f_{cd}$$

$$= 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \rightarrow 0,5 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0 \cdot f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{1,19}{50,0} = 1,02$$

$$v_1 = v \Rightarrow v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{50}{250}\right) = 0,48$$

$$1 \leq \operatorname{ctg}\theta \leq 2,5$$

$$\operatorname{ctg}\theta = 2$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{2}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1,02 \cdot 120 \cdot 79,5 \cdot 0,9 \cdot 0,48 \cdot 5,00}{\left(2 + \frac{1}{2}\right)} = 8407,41 \text{ kN} > 413,71 \text{ kN}$$

ZADOVOLJAVA

4.2.5.5. Maksimalni razmak spona (minimalna poprečna armatura):

Prema tablici 4,13. [9], najveći uzdužni razmak spona:

$$\text{-za:} \quad V_{Ed} = 413,71 \text{ kN} < 0,3 \cdot V_{Rd,max} = 0,3 \cdot 7182,95 = 2154,88 \text{ kN}$$

$$\text{-slijedi:} \quad s_{l,max} = 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 79,5 = 59,6 \text{ cm} > 30,0 \text{ cm}$$

Mjerodavni maksimalni razmak spona prema uvjetu iznosi **30,0 cm**

ODABRANO: $\phi 12 / 25 \text{ cm}, m = 2$

U polju će se vilice postaviti na razmaku od 25 cm, dok će se nad ležajem progustiti na 10 cm.

4.2.6. Dimenzioniranje presjeka nad ležajem

Momenti nad ležajem:

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 536,4 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 96,3 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 92): $M_{qk} = 88,0 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 97): $M_{Qk} = 186,7 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 223,6 \text{ kNm}$

Stalna ili prolazna proračunska situacija:

$$\begin{aligned} M_{Ed, \text{supp}} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot (M_{qk} + M_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot M_{Tk} = \\ &= 1,35 \cdot (536,4 + 96,3) + 1,50 \cdot (88,0 + 186,7) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 223,6 = 1467,43 \text{ kNm} \\ &\rightarrow \text{MJERODAVNO} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Ed, \text{supp}} &= 1,35 \cdot (M_{gk,1} + M_{gk,2}) + 1,50 \cdot M_{Tk} + 1,50 \cdot 0,75 \cdot M_{Qk} + 1,50 \cdot 0,4 \cdot M_{qk} = \\ &= 1,35 \cdot (536,4 + 96,3) + 1,50 \cdot 223,6 + 1,50 \cdot 0,75 \cdot 186,7 + 1,50 \cdot 0,40 \cdot 88,0 = 1452,38 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{Ed, \text{supp}} &= 1,35 \cdot (R_{gk,1} + R_{gk,2}) + 1,50 \cdot (R_{qk} + R_{Qk}) + 1,50 \cdot 0,6 \cdot R_{Tk} = \\ &= 1,35 \cdot (173,5 + 37,0) + 1,50 \cdot 24,5 + 1,50 \cdot 0,6 \cdot 14,1 = 333,62 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\Delta M_{Ed, \text{supp}} = R_{Ed, \text{supp}} \cdot \frac{b_{\text{supp}}}{8} = 333,62 \cdot \frac{0,3}{8} = 12,51 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}^{\text{supp}} = 1467,43 - 12,51 = 1454,92 \text{ kNm}$$

Statička visina presjeka:

$$d = h - c_{\text{nom}} - \Phi_v - \frac{\Phi_s}{2} = 90 - 3,5 - 1,0 - \frac{2,5}{2} = 84,3 \text{ cm} = 0,843 \text{ m}$$

Bezdimenzijski moment savijanja:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{1454,92 \cdot 10^2}{80 \cdot 84,3^2 \cdot 3,33} = 0,076 < \mu_{\text{lim}} = 0,296$$

$$\text{Za } \mu_{Rd} = 0,078 \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = -2,5 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰} \\ \xi = 0,111 \\ \zeta = 0,957 \end{cases}$$

Potrebna površina armature u polju:

$$A_{s1, \text{req}} = \frac{M_{\text{Ed}}^{\text{supp}}}{\zeta \cdot d \cdot f_{\text{yd}}} = \frac{1454,92 \cdot 10^2}{0,957 \cdot 84,3 \cdot 43,478} = 28,76 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura:

$$A_{s1, \text{min}} = 0,26 \cdot \frac{f_{\text{ctm}}}{f_{\text{yk}}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot d = 0,26 \cdot \frac{4,1}{500} \cdot 80 \cdot 84,3 = 14,41 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1, \text{min}} = 0,0013 \cdot b_{\text{eff}} \cdot d = 0,0013 \cdot 80 \cdot 84,3 = 8,78 \text{ cm}^2$$

ODABRANO: $\phi 25 / 15 \text{ cm}$ ($A_{s1, \text{prov}} = 32,72 \text{ cm}^2$)

Armatura za robusnost presjeka izračunata u točki 4.2.2. ($A_{s, \text{prov}} = 32,72 \text{ cm}^2$)

je jednaka ovdje izračunatoj armaturi ($A_{s, \text{prov}} = 32,72 \text{ cm}^2$).

5. Dimenzioniranje prema graničnom stanju uporabivosti

5.1. Granično stanje uporabivosti za obrnuti T nosač

5.1.1. Provjera raspucalosti presjeka

Da bi mogli pristupiti provjeri naprezanja u karakterističnom presjeku nosača, moramo utvrditi u kojem stanju raspucalosti se nalazi presjek kojeg promatramo.

Presjek može biti:

- Neraspucali presjek
- Raspucali presjek

Raspucali su svi presjeci u kojima je za karakterističnu kombinaciju djelovanja prekoračena srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona f_{ctm} .

5.1.1.1. Presjek u sredini rapona (uporaba, $t=\infty$)

Najveća vlačna naprezanja na donjem rubu konstrukcije javljaju se u sredini raspona u trenutku $t=\infty$.

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 786,6 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 112,10 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 200,60 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 490,80 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 396,60 \text{ kNm}$

Moment savijanja za rijetku kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + M_{qk} + M_{Qk} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 786,6 + 112,1 + 200,6 + 490,8 + 0,6 \cdot 396,6 = 1828,06 \text{ kNm} \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + M_{Tk} + 0,75 \cdot M_{Qk} + 0,4 \cdot M_{qk} = 786,6 + 112,1 + 396,6 + 0,75 \cdot 490,8 + 0,4 \cdot 200,6 = 1743,64 \text{ kNm}$$

$$P_{k,inf} = P_{m,\infty} \times r_{inf} = 3339,1 \times 0,95 = 3172,15 \text{ kN}$$

Naprezanje na donjem rubu presjeka:

$$\sigma_{cd,rare} = \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cd,i}} - P_{k,inf} \times \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cd,i}} \right] = \frac{1828,06}{0,2341} - 3172,15 \times \left(\frac{1}{1,0508} + \frac{0,3305}{0,2341} \right) =$$

$$= 3398,43 - 4967,8 = -1569,37 \text{ kN/m}^2 = -1,57 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

Iz dobivenog zaključujemo da presjek u sredini nije raspucao, odnosno nije potrebna provjera širine pukotina i proračun armature za osiguravanje širine pukotina.

5.1.1.2. Presjek u blizini oslonca (građenje, $t=0$)

U fazi građenja vlačna naprezanja u području u blizini oslonca javljaju se na gornjem rubu presjeka jer nasuprot negativnom momentu od prednapinjanja djeluje samo vlastita težina nosača.

Promatra se presjek na dužini l_{pt2} u kojem je aktivno 8 od ukupno 18 užadi, te svaki ostali presjek u kojem je aktivan novi broj užadi s pripadnom minimalnom vrijednošću momenta savijanja.

$$M_{Ed,rare,(x=0,81509m)} = M_{g,k,(x=0,81509m)} = 229,7 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{8}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{8}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 1756,44 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{229,7}{0,0509} - 1756,44 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{0,0509} \right] =$$

$$= -2028,94 - 1541,06 = -3570,0 \text{ kN/m}^2 = -3,57 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

Ovo provjeru je potrebno napraviti na mjestu aktivacije svakog novog broja užadi s pripadnom vrijednošću momenta savijanja od vanjskog djelovanja.

5.1.1.3. Presjek $x=2,91$ m u kojem je aktivno 10 od ukupno 14 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=2,91m)} = M_{g,k,(x=2,91m)} = 519,20 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{10}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{10}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 2195,55 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{519,2}{\frac{0,0509}{0,4496}} - 2195,55 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] =$$

$$= -4586,1 - 1926,32 = -6512,42 \text{ kN/m}^2 = -6,51 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.1.1.4. Presjek $x=3,71 \text{ m}$ u kojem je aktivno 12 od ukupno 18 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=3,71m)} = M_{g,k,(x=3,71m)} = 597,5 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{12}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{12}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 2634,66 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{597,5}{\frac{0,0509}{0,4496}} - 2634,66 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] =$$

$$= -5277,72 - 2311,59 = -7589,31 \text{ kN/m}^2 = -7,59 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.1.1.5. Presjek $x=4,58 \text{ m}$ u kojem je aktivno 14 od ukupno 18 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=4,58m)} = M_{g,k,(x=4,58m)} = 664,6 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{14}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{14}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 3073,77 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{664,6}{\frac{0,0509}{0,4496}} - 3073,77 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] =$$

$$= -5870,42 - 2696,85 = -8567,27 \text{ kN/m}^2 = -8,58 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.1.1.6. Presjek $x=5,56$ m u kojem je aktivno 16 od ukupno 18 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=5,56m)} = M_{g,k,(x=5,56m)} = 721,4 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{16}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{16}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 3512,88 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,rare} &= -\frac{721,4}{\frac{0,0509}{0,4496}} - 3512,88 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] = \\ &= -6372,13 - 3082,12 = -9454,25 \text{ kN/m}^2 = -9,45 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.1.1.7. Presjek $x=6,78$ m u kojem je aktivno 18 od ukupno 18 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=6,78m)} = M_{g,k,(x=6,78m)} = 768,3 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{18}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{18}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 3952,0 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,rare} &= -\frac{768,3}{\frac{0,0509}{0,4496}} - 3952 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] = \\ &= -6786,4 - 3467,39 = -10253,79 \text{ kN/m}^2 = -10,25 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.1.2. Dokaz tlačnih naprezanja u betonu

Tlačna naprezanja u betonu ne smiju prijeći $0.6f_{ck}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja.

Kad tlačno naprezanje betona prijeđe vrijednost $\sigma_{c,max} = 0.45f_{ck}$ za nazovistalnu kombinaciju, potrebno je razmotriti nelinearno puzanje.

5.1.2.1. Uporaba, sredina raspona ($t=\infty$)

Najveća tlačna naprezanja na gornjem rubu presjeka javljaju se u sredini raspona.

Moment u sredini raspona za karakterističnu kombinaciju:

$$M_{Ed,rare} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + M_{qk} + M_{Qk} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 786,6 + 112,1 + 200,6 + 490,8 + 0,6 \cdot 396,6 = 1828,06 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,rare} &= -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{1828,06}{\frac{0,2341}{0,4645}} - 3172,15 \left[\frac{1}{1,0508} - \frac{0,3305}{\frac{0,2341}{0,4645}} \right] = \\ &= -3627,23 - 938,57 = -4565,80 \text{ kN/m}^2 = -4,57 \text{ N/mm}^2 \\ &= |-4,57| \text{ N/mm}^2 < |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Moment u sredini raspona za nazovistalnu kombinaciju:

$$M_{Ed,perm} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,5 \cdot M_{Tk} = 786,6 + 112,1 + 0,5 \cdot 396,60 = 1097,0 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,rare} &= -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{1097,0}{\frac{0,2341}{0,4645}} - 3172,15 \left[\frac{1}{1,0508} - \frac{0,3305}{\frac{0,2341}{0,4645}} \right] = \\ &= -2176,66 - 938,57 = -3115,23 \text{ kN/m}^2 = -3,12 \text{ N/mm}^2 \\ &= |-3,12| \text{ N/mm}^2 < |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.1.2.2. Oslonac, faza građenja ($t=0$)

Najveća tlačna naprezanja javljaju se na donjem rubu presjeka od djelovanja najveće sile prednapinjanja i najmanjeg vanjskog djelovanja, stoga provjeravamo područje oslonca u fazi gradnje.

Provjera se provodi u presjeku $x=0,81509$ m, gdje djeluje 8 od 18 užadi, te u presjeku $x=0,153 \times L=2,91$ m

$$M_{Ed,rare,(x=0,81509m)} = 229,7 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm,(x=0,81509m)} = 229,7 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare,(x=2,91m)} = 519,2 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm,(x=2,91m)} = 519,2 \text{ kNm}$$

a) $x=0,81509$ m

$$P_{k,sup} = \frac{8}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{8}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 1756,44 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cd,rare} = \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cdi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{229,7}{0,0509} - 1756,44 \left[\frac{1}{0,4626} + \frac{0,1454}{0,0509} \right] =$$

$$= 1129,99 - 5053,25 = -3923,26 \text{ kN/m}^2 = -3,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow |-3,92| \text{ N/mm}^2 < |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow |-3,92| \text{ N/mm}^2 < |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2$$

b) $x=2,91$ m

$$P_{k,sup} = \frac{10}{18} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{10}{18} \times 3763,8 \times 1,05 = 2195,55 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cd,rare} = \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cdi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{519,2}{0,0509} - 2195,55 \left[\frac{1}{0,4626} + \frac{0,1454}{0,0509} \right] =$$

$$= 2554,18 - 6316,60 = -3762,42 \text{ kN/m}^2 = -3,76 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow |-3,76| \text{ N/mm}^2 < |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow |-3,76| \text{ N/mm}^2 < |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2$$

5.1.3. Provjera naprezanja u čeliku za prednapinjanje

Ograničenje naprezanja čelika za prednapinjanje na $0,75 \times f_{pk}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja i srednju vrijednost sile prednapinjanja.

$$\sigma_p \leq 0,75 f_{pk}$$

Najveća naprezanja čelika za prednapinjanje provjeravaju se u sredini raspona za najveći moment od vanjskog djelovanja.

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \sigma_{m,\infty} + \alpha_{e,p} \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cd,i}} = \sigma_{m,\infty} + \alpha_{e,p} \frac{M_{Ed,rare}}{\frac{I_{ci}}{Z_{cip}}} \\ &= 1236,7 + 5,27 \times \frac{1828,06 \times 10^6}{\frac{0,2341 \times 10^{12}}{0,4355 \times 10^3}} = 1254,62 \text{ N/mm}^2 < 0,75 \times 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Naprezanja u užadi su manja od dopuštenih. U slučaju da ovaj uvjet nije zadovoljen, odnosno da su naprezanja u užadi veća od dopuštenih potrebno je smanjiti vrijednost početnog naprezanja užadi.

5.1.4. Provjera dekompresije

Za usvojeni razred izloženosti XC4 i XD1 provjera dekompresije se provodi za čestu kombinaciju djelovanja.

Na užadi bližem rubu presjeka ne smiju se pojaviti vlačna naprezanja.

Užadi moraju od nul-točke naprezanja biti udaljene najmanje 10 cm, odnosno 1/10 visine presjeka.

Zahtjeva se da svi dijelovi natega s prijanjanjem ili cijevi leže min 25 mm u tlačnom području betona.

a) Predstlačeno vlačno područje (uporaba)

Područje poprečnog presjeka u kojem vanjska djelovanja bez prednapinjanja izazivaju vlačna naprezanja, a prednapinjanje izaziva tlačna naprezanja.

Mjerodavan je dokaz u sredini raspona za najveća vanjska djelovanja i najmanju silu prednapinjanja.

$$M_{Ed, freq} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,4 \cdot M_{qk} + 0,75 \cdot M_{Qk} + 0,5 \cdot M_{Tk} = 786,6 + 112,1 + 0,4 \cdot 200,6 + 0,75 \cdot 490,8 + 0,5 \cdot 396,6 = 1545,34 \text{ kNm} \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

$$M_{Ed, freq} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 786,6 + 112,1 + 0,6 \cdot 396,6 = 1136,66 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cd, freq} = \frac{M_{Ed, freq}}{W_{cdi}} - P_{k, inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{1545,34}{\frac{0,2341}{0,4355}} - 3172,15 \left[\frac{1}{1,0508} + \frac{0,3305}{\frac{0,2341}{0,4355}} \right] =$$

$$= 2874,82 - 4969,14 = -2094,32 \text{ kN/m}^2 = -2,09 \text{ N/mm}^2 < 0$$

b) Vlak u tlačnom području (građenje)

Provjera se radi u presjeku $x=0,1 \times L=1,9 \text{ m}$.

Potrebno je osigurati minimalni razmak užadi od 25 mm od nultočke naprezanja.

Dokaz se provodi za fazu građenja.

Naprezanje na donjem rubu:

$$M_{k, (x=1,9m)} = M_{g,k, (x=1,9m)} = 394,7 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_k}{W_{cdi}} - P_{k, sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{394,7}{\frac{0,0509}{0,2504}} - \frac{8}{18} \times 3763,8 \times 1,05 \left[\frac{1}{0,4626} + \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,2504}} \right] =$$

$$= 1941,71 - 5053,25 = -3111,54 \text{ kN/m}^2 = -3,11 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanja na gornjem rubu:

$$\sigma_{cg} = -\frac{M_k}{W_{cgi}} - P_{k, sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{394,7}{\frac{0,0509}{0,4496}} - \frac{8}{18} \times 3763,8 \times 1,05 \left[\frac{1}{0,4626} - \frac{0,1454}{\frac{0,0509}{0,4496}} \right] =$$

$$= -2603,09 + 2255,0 = -1203,47 \text{ kN/m}^2 = -1,20 \text{ N/mm}^2$$

Cijeli poprečni presjek je u tlačnom području.

5.1.5. Proračun armature za ograničavanje širine pukotina

Provjeru minimalne količine armature za ograničavanje širine pukotina nije potrebno provoditi ako je za karakterističnu kombinaciju djelovanja i silu prednapinjanja vlačno naprezanje na donjem rubu presjeka manje od vlačne čvrstoće betona $f_{ctm}=f_{ct,eff}$.

$f_{ct,eff}$ – srednje vlačno naprezanje betona kod kojeg očekujemo pojavu prve pukotine ($f_{ctm}=f_{ct,eff}$) ili niže ($f_{ctm}(t)$) ako se raspucavanje očekuje prije 28 dana)

Provjera raspucalosti presjeka u sredini raspona je napravljena u poglavlju 5.1.1. Dobiveno naprezanje je manje od vlačne čvrstoće betona (C 50/60) tako da nije potrebno proračunavati armaturu za osiguranje širine pukotina.

Da su naprezanja na donjem rubu presjeka veća od vlačne čvrstoće betona (odnosno ako je potrebna kontrola širine pukotina) trebalo bi izračunati minimalno potrebnu armaturu za osiguranje širine pukotina.

5.2. Granično stanje uporabivosti za L nosač

5.2.1. Provjera raspucalosti presjeka

Da bi mogli pristupiti provjeri naprezanja u karakterističnom presjeku nosača, moramo utvrditi u kojem stanju raspucalosti se nalazi presjek kojeg promatramo.

Presjek može biti:

- Neraspucali presjek
- Raspucali presjek

Raspucali su svi presjeci u kojima je za karakterističnu kombinaciju djelovanja prekoračena srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona f_{ctm} .

5.2.1. Presjek u sredini raspona (uporaba, $t=\infty$)

Najveća vlačna naprezanja na donjem rubu konstrukcije javljaju se u sredini raspona u trenutku $t=\infty$.

Vlastita težina (Slika 60): $M_{gk,1} = 530,60 \text{ kNm}$

Dodatno stalno (Slika 63): $M_{gk,2} = 75,40 \text{ kNm}$

Kontinuirano prometno opterećenje (Slika 91): $M_{qk} = 100,20 \text{ kNm}$

Osovinsko prometno opterećenje (Slika 96): $M_{Qk} = 282,30 \text{ kNm}$

Temperatura (Slika 113): $M_{Tk} = 283,30 \text{ kNm}$

Moment savijanja za rijetku kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + M_{qk} + M_{Qk} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 530,6 + 75,4 + 100,2 + 282,3 + 0,6 \cdot 283,3 = 1158,48 \text{ kNm} \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} + M_{gk,2} + M_{Tk} + 0,75 \cdot M_{Qk} + 0,4 \cdot M_{qk} = 530,6 + 75,4 + 283,3 + 0,75 \cdot 282,3 + 0,4 \cdot 100,2 = 1141,11 \text{ kNm}$$

$$P_{k,inf} = P_{m,\infty} \times r_{inf} = 1865,8 \times 0,95 = 1772,51 \text{ kN}$$

Naprezanje na donjem rubu presjeka:

$$\sigma_{cd,rare} = \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cd,i}} - P_{k,inf} \times \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cd,i}} \right] = \frac{1158,48}{0,1665} - 1772,51 \times \left(\frac{1}{0,7041} + \frac{0,3317}{0,1665} \right) =$$

$$= 3038,48 - 1542,32 = 1496,16 \text{ kN/m}^2 = 1,50 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

Iz dobivenog zaključujemo da presjek u sredini nije raspucao, odnosno nije potrebna provjera širine pukotina i proračun armature za osiguravanje širine pukotina.

5.2.2. Presjek u blizini oslonca (građenje, $t=0$)

U fazi građenja vlačna naprezanja u području u blizini oslonca javljaju se na gornjem rubu presjeka jer nasuprot negativnom momentu od prednapinjanja djeluje samo vlastita težina nosača.

Promatra se presjek na dužini l_{pt2} u kojem je aktivno 4 od ukupno 10 užadi, te svaki ostali presjek u kojem je aktivan novi broj užadi s pripadnom minimalnom vrijednošću momenta savijanja.

$$M_{Ed,rare,(x=0,8151m)} = M_{g,k,(x=0,8151m)} = 104,20 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{4}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{4}{10} \times 2091,0 \times 1,05 = 878,22 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{104,2}{\frac{0,0474}{0,4133}} - 878,22 \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{\frac{0,0474}{0,4133}} \right] =$$

$$= -908,56 - 916,21 = -1824,77 \text{ kN/m}^2 = -1,82 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

Ovo provjeru je potrebno napraviti na mjestu aktivacije svakog novog broja užadi s pripadnom vrijednošću momenta savijanja od vanjskog djelovanja.

5.2.3. Presjek $x=2,60$ m u kojem je aktivno 6 od ukupno 10 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=2,6m)} = M_{g,k,(x=2,6m)} = 300,6 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{6}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{6}{10} \times 2091,0 \times 1,05 = 1317,33 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{\frac{300,6}{0,0474}}{0,4133} - 1317,33 \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= -2621,05 - 1443,32 = -4064,37 \text{ kN/m}^2 = -4,06 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.2.4. Presjek $x=4,05 \text{ m}$ u kojem je aktivno 8 od ukupno 10 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=4,05m)} = M_{g,k,(x=4,05m)} = 412,7 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{8}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{8}{10} \times 2091,0 \times 1,05 = 1756,44 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{\frac{412,7}{0,0474}}{0,4133} - 1756,44 \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= -3598,5 - 1924,43 = -5522,93 \text{ kN/m}^2 = -5,52 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.2.5. Presjek $x=5,78 \text{ m}$ u kojem je aktivno 10 od ukupno 10 užadi (građenje, $t=0$)

$$M_{Ed,rare,(x=5,72m)} = M_{g,k,(x=5,72m)} = 495,2 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right]$$

$$P_{k,sup} = \frac{10}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{10}{10} \times 2091,0 \times 1,05 = 2195,55 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cg,rare} = -\frac{\frac{495,2}{0,0474}}{0,4133} - 2195,55 \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= -4317,85 - 2403,01 = -6720,87 \text{ kN/m}^2 = -6,72 \text{ N/mm}^2 < f_{ctm} = 4,1 \text{ N/mm}^2$$

5.2.2. Dokaz tlačnih naprezanja u betonu

Tlačna naprezanja u betonu ne smiju prijeći $0.6f_{ck}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja. Kad tlačno naprezanje betona prijeđe vrijednost $\sigma_{c,max} = 0.45f_{ck}$ za nazovistalnu kombinaciju, potrebno je razmotriti nelinearno puzanje.

5.2.2.1. Uporaba, sredina raspona ($t=\infty$)

Najveća tlačna naprezanja na gornjem rubu presjeka javljaju se u sredini raspona.

Moment u sredini raspona za karakterističnu kombinaciju:

$$M_{Ed,rare} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + M_{qk} + M_{Qk} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 530,6 + 75,4 + 100,2 + 282,3 + 0,6 \cdot 283,3 = 1158,48 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,rare} &= -\frac{M_{Ed,rare}}{W_{cgi}} - P_{k,inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{1158,48}{\frac{0,1665}{0,4633}} - 1772,51 \left[\frac{1}{0,7041} - \frac{0,3317}{\frac{0,1665}{0,4633}} \right] = \\ &= -3233,57 - 881,42 = -4114,98 \text{ kN/m}^2 = -4,11 \text{ N/mm}^2 \\ &= |-4,11| \text{ N/mm}^2 < |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Moment u sredini raspona za nazovistalnu kombinaciju:

$$M_{Ed,perm} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,5 \cdot M_{Tk} = 530,6 + 75,4 + 0,5 \cdot 283,3 = 747,65 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cg,perm} &= -\frac{M_{Ed,perm}}{W_{cgi}} - P_{k,inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{747,65}{\frac{0,1665}{0,4633}} - 1772,51 \left[\frac{1}{0,7041} - \frac{0,3317}{\frac{0,1665}{0,4633}} \right] = \\ &= -2080,4 - 881,42 = -2961,82 \text{ kN/m}^2 = -2,96 \text{ N/mm}^2 \\ &= |-2,96| \text{ N/mm}^2 < |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.2.2.2. Oslonac, faza građenja ($t=0$)

Najveća tlačna naprezanja javljaju se na donjem rubu presjeka od djelovanja najveće sile prednapinjanja i najmanjeg vanjskog djelovanja, stoga provjeravamo područje oslonca u fazi gradnje.

Provjera se provodi u presjeku $x=0,8151 \text{ m}$, gdje djeluje 4 od 10 užadi, te u presjeku $x=0,137 \times L=2,60 \text{ m}$

$$M_{Ed,rare,(x=0,8151m)} = 104,2 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm,(x=0,8151m)} = 104,2 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare,(x=2,6m)} = 300,6 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm,(x=2,6m)} = 300,6 \text{ kNm}$$

a) $x=0,8151 \text{ m}$

$$P_{k,sup} = \frac{4}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{4}{10} \times 2091 \times 1,05 = 878,22 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cd,rare} &= \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cdi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \\ &= \frac{104,2}{\frac{0,0474}{0,2867}} - 878,22 \left[\frac{1}{0,3733} + \frac{0,1817}{\frac{0,0474}{0,2867}} \right] = \\ &= 630,26 - 3317,76 = -2687,5 \text{ kN/m}^2 = -2,69 \text{ N/mm}^2 \\ \Rightarrow |-2,69| \text{ N/mm}^2 &< |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2 \\ \Rightarrow |-2,69| \text{ N/mm}^2 &< |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

b) $x=2,60 \text{ m}$

$$P_{k,sup} = \frac{6}{10} \times P_{m0} \times r_{sup} = \frac{6}{10} \times 2091 \times 1,05 = 1317,33 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cd,rare} &= \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cdi}} - P_{k,sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \\ &= \frac{300,6}{\frac{0,0474}{0,2867}} - 1317,33 \left[\frac{1}{0,3733} + \frac{0,1817}{\frac{0,0474}{0,2867}} \right] = \\ &= 1818,18 - 4976,65 = -3158,45 \text{ kN/m}^2 = -3,16 \text{ N/mm}^2 \\ \Rightarrow |-3,16| \text{ N/mm}^2 &< |0,6 f_{ck}| = |30| \text{ N/mm}^2 \\ \Rightarrow |-3,16| \text{ N/mm}^2 &< |0,45 f_{ck}| = |22,5| \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.2.3. Provjera naprezanja u čeliku za prednapinjanje

Ograničenje naprezanja čelika za prednapinjanje na $0,75 \times f_{pk}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja i srednju vrijednost sile prednapinjanja.

$$\sigma_p \leq 0,75 f_{pk}$$

Najveća naprezanja čelika za prednapinjanje provjeravaju se u sredini raspona za najveći moment od vanjskog djelovanja.

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \sigma_{m,\infty} + \alpha_{e,p} \frac{M_{Ed,rare}}{W_{cd,i}} = \sigma_{m,\infty} + \alpha_{e,p} \frac{M_{Ed,rare}}{\frac{I_{ci}}{Z_{cip}}} \\ &= 1243,87 + 5,27 \times \frac{1158,48 \times 10^6}{\frac{0,1665 \times 10^{12}}{0,4367 \times 10^3}} = 1259,82 \text{ N/mm}^2 < 0,75 \times 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Naprezanja u užadi su manja od dopuštenih. U slučaju da ovaj uvjet nije zadovoljen, odnosno da su naprezanja u užadi veća od dopuštenih potrebno je smanjiti vrijednost početnog naprezanja užadi.

5.2.4. Provjera dekompresije

Za usvojeni razred izloženosti XC4 i XD1 provjera dekompresije se provodi za čestu kombinaciju djelovanja.

Na užadi bližem rubu presjeka ne smiju se pojaviti vlačna naprezanja.

Užadi moraju od nul-točke naprezanja biti udaljene najmanje 10 cm, odnosno 1/10 visine presjeka.

Zahtjeva se da svi dijelovi natega s prijanjanjem ili cijevi leže min 25 mm u tlačnom području betona.

a) Predstlačeno vlačno područje (uporaba)

Područje poprečnog presjeka u kojem vanjska djelovanja bez prednapinjanja izazivaju vlačna naprezanja, a prednapinjanje izaziva tlačna naprezanja.

Mjerodavan je dokaz u sredini raspona za najveća vanjska djelovanja i najmanju silu prednapinjanja.

$$M_{Ed, freq} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,4 \cdot M_{qk} + 0,75 \cdot M_{Qk} + 0,5 \cdot M_{Tk} = 530,6 + 75,4 + 0,4 \cdot 100,2 + 0,75 \cdot 282,3 + 0,5 \cdot 283,3 = 999,46 \text{ kNm} \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

$$M_{Ed, freq} = M_{g,k1} + M_{g,k2} + 0,6 \cdot M_{Tk} = 530,6 + 75,4 + 0,6 \cdot 283,3 = 775,98 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cd, freq} = \frac{M_{Ed, freq}}{W_{cdi}} - P_{k, inf} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{999,46}{0,0474} - 1772,51 \left[\frac{1}{0,3733} + \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= 6045,26 - 6696,24 = -650,98 \text{ kN/m}^2 = -0,651 \text{ N/mm}^2 < 0$$

b) Vlak u tlačnom području (izvedba)

Provjera se radi u presjeku $x=0,1 \times L=1,9 \text{ m}$.

Potrebno je osigurati minimalni razmak užadi od 10 mm od nultočke naprezanja.

Dokaz se provodi za fazu građenja.

Naprezanje na donjem rubu:

$$M_{k, (x=1,9m)} = M_{g, k, (x=1,9m)} = 230,72 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_k}{W_{cdi}} - P_{k, sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} + \frac{z_{cip}}{W_{cdi}} \right] = \frac{230,72}{0,0474} - \frac{4}{10} \times 2091,0 \times 1,05 \left[\frac{1}{0,3733} + \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= 1395,52 - 3317,76 = -1922,24 \text{ kN/m}^2 = -1,92 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanja na gornjem rubu:

$$\sigma_{cg} = -\frac{M_k}{W_{cgi}} - P_{k, sup} \left[\frac{1}{A_{ci}} - \frac{z_{cip}}{W_{cgi}} \right] = -\frac{230,72}{0,0474} - \frac{4}{10} \times 2091 \times 1,05 \left[\frac{1}{0,3733} - \frac{0,1817}{0,0474} \right] =$$

$$= -2011,74 + 962,22 = -1049,52 \text{ kN/m}^2 = -1,05 \text{ N/mm}^2$$

Cijeli poprečni presjek je u tlačnom području.

5.2.5. Proračun armature za ograničavanje širine pukotina

Provjeru minimalne količine armature za ograničavanje širine pukotina nije potrebno provoditi ako je za karakterističnu kombinaciju djelovanja i silu prednapinjanja vlačno naprezanje na donjem rubu presjeka manje od vlačne čvrstoće betona $f_{ctm}=f_{ct,eff}$.

$f_{ct,eff}$ – srednje vlačno naprezanje betona kod kojeg očekujemo pojavu prve pukotine

($f_{ctm}=f_{ct,eff}$) ili niže ($f_{ctm}(t)$) ako se raspucavanje očekuje prije 28 dana)

Provjera raspucalosti presjeka u sredini raspona je napravljena u poglavlju 5.1.1. Dobiveno naprezanje je manje od vlačne čvrstoće betona (C 50/60) tako da nije potrebno proračunavati armaturu za osiguranje širine pukotina.

Da su naprezanja na donjem rubu presjeka veća od vlačne čvrstoće betona (odnosno ako je potrebna kontrola širine pukotina) trebalo bi izračunati minimalno potrebnu armaturu za osiguranje širine pukotina.

6. Vođenje natega i raspored armature

6.1. Rekapitulacija odabrane armature za obrnuti T nosač

Prednapeta armatura :

- odabrano: 18 užadi, 1640/1860, $d_p=15,7$ mm, $A_p=150$ mm²

Uzdužna nenapeta armatura:

- u polju donji rub nosača (mjerodavna je provjera nosivosti za otkazivanje bez najave) – odabrano: 10 ϕ 25
- nad ležajem u ploči – odabrano: ϕ 25/10,0 cm

Poprečna armatura (konstruktivna)

- na ležaju – odabrano: ϕ 12, $m = 2$, $s_w = 10$ cm
- u polju – odabrano: ϕ 12, $m = 2$, $s_w = 25$ cm

Postaviti će se konstruktivna armatura ϕ 10 zbog kontrole raspucavanja unutar spona na bočnim licima grede i ploče.

Određivanje duljine sidrenja l_0 i duljine preklopa l_s armaturnih šipki

Proračunska duljina sidrenja prema EN 1992-1-1 određuje prema sljedećem normiranom izrazu:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

Radi jednostavnosti proračuna uzet ćemo da je vrijednost svih koeficijenata α_i jednaka 1,0 osim koeficijenta α_4 koji iznosi 0,70. Ta pretpostavka ujedno je i na strani sigurnosti.

Osnovna duljina sidrenja $l_{b,rqd}$, određuje se prema sljedećem izrazu:

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

gdje je σ_{sd} proračunsko naprezanje šipke na položaju od kojeg se mjeri sidrenje, a f_{bd} je proračunska čvrstoća prijanjanja koja se očitava iz tablice 3.13. [9] zavisno o tlačnoj čvrstoći betona i uvjetima prijanjanja.

$$\sigma_{sd} = \frac{f_{yd}}{\gamma_s} = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

Određivanje proračunske čvrstoće prianjanja:

- Kolnička ploča: $f_{bd} = 3,3 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C35/45; dobra prionjivost)
- Hrbat nosača: $f_{bd} = 3,04 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C50/60; umjerena prionjivost)
- Donja pojasnica nosača: $f_{bd} = 4,35 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C50/60; dobra prionjivost)

Armatura za donji pojas:

$$l_{b,rqd} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{4,35} = 62,68 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 62,68 \text{ cm} = 47,0 \text{ cm}$$

$$l_b = 50 \text{ cm}$$

Armatura za ploču:

$$l_{b,rqd} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{3,3} = 82,34 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 82,34 \text{ cm} = 61,75 \text{ cm}$$

$$l_b = 75 \text{ cm}$$

Potpovršinska armatura za hrbat:

$$l_{b,rqd} = \frac{10}{4} \cdot \frac{434,78}{3,04} = 35,75 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 35,75 \text{ cm} = 26,81 \text{ cm}$$

$$l_b = 30 \text{ cm}$$

Za sidrenje u vlačnom području minimalna duljina sidrenja iznosi:

$$l_{b,\min} \geq \max \{0,3 \cdot l_{b,req}; 10 \cdot \phi; 100 \text{ mm}\}$$

Ovaj uvjet je ispunjen za sve armaturne šipke.

Preklopi šipki moraju osigurati prijenos sila od jedne šipke na drugu tako da se ne događa odlamanje betona u susjedstvu spoja i da se ne pojavljuju pukotine koje djeluju na ponašanje konstrukcije. Proračunska duljina preklopa l_0 se određuje izrazom:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{0,\min}$$

gdje je $l_{b,rqd}$ zahtijevana duljina sidrenja izračunata u prethodnom odlomku.

Radi jednostavnosti proračuna, uzimamo najnepovoljnije vrijednosti faktora α_i . Sve faktore uzimamo sa vrijednošću 1,0, osim faktora α_6 kojeg ćemo uzeti sa vrijednošću 1,5.

Armatura za donji pojas:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 62,68 \text{ cm} = 95 \text{ cm}$$

Armatura za ploču:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 82,34 \text{ cm} = 125 \text{ cm}$$

Potpovršinska armatura za hrbat:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 35,75 \text{ cm} = 55 \text{ cm}$$

Minimalna duljina preklopa određuje se prema izrazu:

$$l_{b,\min} \geq \max \{0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}; 15 \cdot \phi; 200 \text{ mm}\}$$

Ovaj uvjet je ispunjen za sve armaturne šipke.

6.2. Rekapitulacija odabrane armature za L nosač

Prednapeta armatura :

- odabrano: 10 užadi, 1640/1860, $d_p=15,7$ mm, $A_p=150$ mm²

Uzdužna nenapeta armatura:

- u polju donji rub nosača (mjerodavna je provjera nosivosti za otkazivanje bez najave) – odabrano: 7 ϕ 25
- nad ležajem u ploči – odabrano: ϕ 25/15,0 cm

Poprečna armatura (konstruktivna)

- na ležaju – odabrano: ϕ 12, $m = 2$, $s_w = 10$ cm
- u polju – odabrano: ϕ 12, $m = 2$, $s_w = 25$ cm

Postaviti će se konstruktivna armatura ϕ 10 zbog kontrole raspucavanja unutar spona na bočnim licima grede i ploče.

Određivanje duljine sidrenja l_0 i duljine preklopa l_s armaturnih šipki

Proračunska duljina sidrenja prema EN 1992-1-1 određuje prema sljedećem normiranom izrazu:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

Radi jednostavnosti proračuna uzet ćemo da je vrijednost svih koeficijenata α_i jednaka 1,0 osim koeficijenta α_4 koji iznosi 0,70. Ta pretpostavka ujedno je i na strani sigurnosti.

Osnovna duljina sidrenja $l_{b,rqd}$, određuje se prema sljedećem izrazu:

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

gdje je σ_{sd} proračunsko naprezanje šipke na položaju od kojeg se mjeri sidrenje, a f_{bd} je proračunska čvrstoća prijanjanja koja se očitava iz tablice 3.13. [9] zavisno o tlačnoj čvrstoći betona i uvjetima prijanjanja.

$$\sigma_{sd} = \frac{f_{yd}}{\gamma_s} = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 434,78 \text{ N/mm}^2$$

Određivanje proračunske čvrstoće prianjanja:

- Kolnička ploča: $f_{bd} = 3,3 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C35/45; dobra prionjivost)
- Hrbat nosača: $f_{bd} = 3,04 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C50/60; umjerena prionjivost)
- Donja pojasnica nosača: $f_{bd} = 4,35 \text{ N} / \text{mm}^2$ (C50/60; dobra prionjivost)

Armatura za donji pojas:

$$l_{b,rqd} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{4,35} = 62,46 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 62,68 \text{ cm} = 47,0 \text{ cm}$$

$$l_b = 50 \text{ cm}$$

Armatura za ploču:

$$l_{b,rqd} = \frac{25}{4} \cdot \frac{434,78}{3,3} = 82,34 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 82,34 \text{ cm} = 61,75 \text{ cm}$$

$$l_b = 75 \text{ cm}$$

Potpovršinska armatura za hrbat:

$$l_{b,rqd} = \frac{10}{4} \cdot \frac{434,78}{3,04} = 35,75 \text{ cm}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 0,75 \cdot 35,75 \text{ cm} = 26,81 \text{ cm}$$

$$l_b = 30 \text{ cm}$$

Za sidrenje u vlačnom području minimalna duljina sidrenja iznosi:

$$l_{b,\min} \geq \max \{0,3 \cdot l_{b,req}; 10 \cdot \phi; 100 \text{ mm}\}$$

Ovaj uvjet je ispunjen za sve armaturne šipke.

Preklopi šipki moraju osigurati prijenos sila od jedne šipke na drugu tako da se ne događa odlamanje betona u susjedstvu spoja i da se ne pojavljuju pukotine koje djeluju na ponašanje konstrukcije. Proračunska duljina preklopa l_0 se određuje izrazom:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{0,\min}$$

gdje je $l_{b,rqd}$ zahtijevana duljina sidrenja izračunata u prethodnom odlomku.

Radi jednostavnosti proračuna, uzimamo najnepovoljnije vrijednosti faktora α_i . Sve faktore uzimamo sa vrijednošću 1,0, osim faktora α_6 kojeg ćemo uzeti sa vrijednošću 1,5.

Armatura za donji pojas:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 62,68 \text{ cm} = 95 \text{ cm}$$

Armatura za ploču:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 82,34 \text{ cm} = 125 \text{ cm}$$

Potpovršinska armatura za hrbat:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} = 1,5 \cdot 35,75 \text{ cm} = 55 \text{ cm}$$

Minimalna duljina preklopa određuje se prema izrazu:

$$l_{b,\min} \geq \max \{0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}; 15 \cdot \phi; 200 \text{ mm}\}$$

Ovaj uvjet je ispunjen za sve armaturne šipke.

7. Zaključak

Predgotovljeni betonski elementi u mostogradnji se koriste već niz godina, a njihova glavna prednost je brza i ekonomična izvedba. Izvedbom montažnih elemenata u pogonima kontrolira se kvaliteta koja je ujednačena s obzirom na njegu betona i tvorničku kontrolu kvalitete, te se rad odvija neovisno od atmosferskih uvjeta. Predgotovljeni elementi koji se mogu koristiti u mostogradnji su gotovo svi dijelovi gornjeg i donjeg ustroja, no najčešće se koriste elementi za izvedbu glavnih nosača.

Podloga ovog rada je projekt Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za most Kamenjača na zaobilaznici kod Drniša. Rasponski sklop predmetnog mosta sastoji se od montažnih prednapetih betonskih nosača obrnutog T presjeka, te dva rubna L nosača. Na položene nosače se betonira ploča in situ. Statički sustav je kontinuirana greda, a rasponski sklop je monolitno spojen sa stupovima. Nakon razrade dispozicije vršio se odabir zaštitnog sloja prednapete i nenapete armature, te odabir materijala koji su uzeti kao i u projektu radi usporedbe oba rješenja. Napravljen je proračun analize opterećenja za vlastitu težinu, dodatno stalno, prometno opterećenje, vjetar, temperaturu i potres prema smjernicama Eurokoda za lokaciju Drniš. Konstrukcija je modelirana u programskom paketu *Sofistik 2018* korištenjem štapnog roštiljnog modela. U uzdužnom smjeru zadani su štapovi sa karakteristikama poprečnih presjeka nosača i djela betonske ploče određene širine za koju se smatra da nosi zajedno s nosačem, a u poprečnom smjeru fiktivni štapovi koji zamjenjuju djelovanje ploče u poprečnom smjeru. Fiktivni poprečni nosači postavljaju se jer u stvarnosti betonska ploča ima značajnu krutost u oba horizontalna smjera. Nad upornjakom je zadan poprečni nosač, a nad stupom naglavna greda sa karakteristikama njihovih poprečnih presjeka. Nosač tijekom izvedbe prolazi kroz dvije faze. U prvoj fazi je prosta greda oslonjena na naglavnu gredu i poprečni nosač nad upornjakom. Dakle, njegovu čitavu težinu, i težinu svježeg betona kolničke ploče preuzima sustav proste grede. U drugoj fazi se nalazi kao kontinuirani nosač preko tri raspona, nakon ostvarivanja kontinuiteta. Ležajevi su modelirani kao stalni i privremeni ovisno u kojoj fazi izvedbe su potrebni za stabilizaciju mosta. Stalni ležajevi su postavljeni nad upornjacima, a nad stupom je upeta veza rasponskog sklopa i stupa. Privremeni ležajevi koji se uklanjaju u pojedinim fazama izvedbe, služe kako bi stabilizirali nosač dok je u fazi proste grede i dok se ne uspostavi kontinuitet. U modulu CSM su se definirale faze izvedbe mosta. Ovim se simulira gradnja po fazama, te za svaku fazu se definiraju aktivni elementi. Posebno su se razmatrale faze izvođenja donjeg ustroja, izvedba i

prednapinjanje glavnih nosača, betoniranje i očvršćavanje ploče, dodatnog stalnog opterećenja, puštanja mosta u promet i na kraju životnog vijeka mosta. Za sve faze koje uključuju betoniranje elemenata razmatrala se podfaza utjecaji skupljanja i puzanja, te vrijeme trajanja procesa za pojedinu fazu. Zatim su se zadala opterećenja koja su proračunata u analizi. Dodatna težina nenosivih elemenata kao što su hodnik, vijenac, kolnik, ograde i hidroizolacija uzeti su u obzir te ovisno o vrsti ubačeni u model kao površinsko ili linijsko opterećenje. Opterećenja vjetrom uzeta su za sva tri smjera (dva horizontalna i uzgon) prema normi, a promatrana je situacija kada se na mostu odvija promet i kada se ne odvija promet. Zbog malih vrijednosti momenata i poprečnih sila vjetar nije uzet u daljnji proračun rasponskog sklopa. Temperatura je sukladno lokaciji i uvjetima koji su postavljeni na izvedbu mosta izračunata i nanesena u model. Razmatrala se jednolika i nejednolika temperatura, kao i njihova kombinacija. Opterećenje prometom razmatrano je za model opterećenja 1 prema kojem se most po širini dijeli u trake. Zasebno je zadano kontinuirano, a zasebno tandem vozila (koncentrirane sile). Na kraju su u proračunu kombinirane trake tako da daju najnepovoljniju situaciju za proračun. Potres je proračunat korištenjem višemodalne spektralne analize, no kako nije predmet ovog diplomskog rada nije uzet u daljnji proračun nosača. Iz modela izvadili su se rezultati potrebni za ručno dimenzioniranje glavnih nosača. Iterativnim postupkom se odabrao broj užadi za karakteristični obrnuti T i L nosač. U preliminarnom odabiru potrebnog broja užadi, a time i ukupne sile prednapinjanja u nosaču potrebno je poznavati krak sile, odnosno pretpostaviti broj užadi kako bi znali odrediti njihovo zajedničko težište. Koristi se sustav prednapinjanja DYWIDAG DYWIDAG i to uže spleteno od 7 žica, pri čemu je promjer užeta $d_p=15.7$ mm, a površina poprečnog presjeka užeta $A_p=150$ mm². Potreban broj užadi za obrnuti T nosač iznosi 18 dok u projektu iznosi 24, može se zaključiti da zbog manjih dimenzija poprečnog presjeka nosač preuzima manje opterećenja i ima manju vlastitu težinu što utječe i na potreban broj užadi. Potreban broj užadi u L nosaču iznosi 10, te se užad vodi duž cijelog nosača u pravcu. Također izračunati su trenutni i vremenski gubici sile prednapinjanja te su uspoređeni sa vrijednostima dobivenim u software-u. Karakteristični glavni nosači dimenzionirali su se prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabivosti. Armatura za robusnost presjeka osigurava duktilno ponašanje nosača, a proračunava se na granični moment otvaranja pukotina presjeka bez sile prednapinjanja, dimenzioniranje na savijanje s uzdužnom silom kao silom prednapinjanja koja djeluje u osi natege, dimenzioniranje na poprečne sile na udaljenosti d od oslonca i dimenzioniranje presjeka nad ležajem su potrebne provjere za GSN iz kojih dobijemo

potrebnu površinu uzdužne i poprečne armature u polju i nad ležajem. U graničnom stanju uporabivosti potrebno je provjeriti da je li presjek tokom izvedbe i uporabe raspucao, odnosno da li je potrebna provjera širine pukotina i proračun armature za osiguravanje širine pukotina, što ovdje nije bio slučaj. Potrebno je i provjeriti da li su tlačna naprezanja u betonu manja od $0,6 f_{ck}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja i $0,45 f_{ck}$ za nazovistalnu kombinaciju djelovanja, te da li su naprezanja u čeliku za prednapinjanje manja od $0,75 f_{pk}$ za karakterističnu kombinaciju djelovanja i srednju vrijednost sile prednapinjanja. Na kraju za čestu kombinaciju djelovanja potrebno je provjeriti dekompresiju i to za predstlačeno vlačno područje tijekom uporabe i vlak u tlačnom području tijekom izvedbe. Oba nosača su zadovoljili određene kriterije vezane za nosivost i uporabivost, te na temelju toga su napravljeni armaturni nacrti.

Literatura

- [1] Vlašić, A., Srbić, M. (2017./2018.) Analiza opterećenja, Separat 03, Mostovi II, Zagreb: Katedra za mostove Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
- [2] HRN EN 1991-2 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -2. dio: Prometna opterećenja mostova
- [3] HRN EN 1991-1-5 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-5: Opća djelovanja- Toplinska djelovanja
- [4] HRN EN 1991-1-4 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-4: Opća djelovanja- Djelovanje vjetra
- [5] <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>
- [6] HRN EN 1998-1 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade
- [7] HRN EN 1990 Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija
- [8] HRN EN 1992-1 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [9] Sorić, Z., Kišiček, T. (2014.), Betonske konstrukcije 1. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [10] Mandić Ivanković, A., Kontinuirane i djelomično kontinuiranje grede, Separat s predavanja, Prednapeti beton, Zagreb: Katedra za mostove Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
- [11] Mandić Ivanković, A., Elementi izloženi savijanju, Separat s predavanja, Prednapeti beton, Zagreb: Katedra za mostove Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
- [12] Vlašić, A., Srbić, M. (2017./2018.) Prednapeti betonski gredni mostovi od predgotovljenih nosača, Separat 01, Mostovi II, Zagreb: Katedra za mostove Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
- [13] International Federation for Structural Task grup 6.4, (2004.), Precast concrete bridges, Switzerland, International Federation for Structural Concrete

Popis slika

Slika 1. Viaduktovi karakteristični tipovi nosača [12]	2
Slika 2. Osnovni oblici presjeka [11]	3
Slika 3. Most sastavljen od obrnutih T nosača [13]	4
Slika 4. Izvedba mosta sastavljenog od obrnutih T nosača [13]	4
Slika 5. Poprečni presjek mosta Kamenjača	5
Slika 6. Poprečni presjek mosta	6
Slika 7. Vlastita težina nosača i ploče	13
Slika 8. Dodatna stalna opterećenja	14
Slika 9. Pripadajuća širina za dodatno stalno opterećenje srednjeg nosača	15
Slika 10. Sheme prometnog opterećenja za glavne nosive elemente	17
Slika 11. Uzdužni i tlocrtni raspored prometnog opterećenja prema prometnim trakovima ...	17
Slika 12. Karta najviših temperatura Republike Hrvatske [1].....	19
Slika 13. Karta Najnižih temperatura zraka Republike Hrvatske [1].....	20
Slika 14. Ovisnost najniže/najviše temperature zraka u hladu ($T_{\min}/T_{\max}$) i najniže/najviše komponente jednolične temperature mosta ($T_{e,\max}/T_{e,\min}$) [3]	20
Kombinacija jednolike i nejednolike linearno promijenjive temperature	22
Slika 15. Osnovna brzina vjetra $v_{b,0}$ za Republiku Hrvatsku [1].....	24
Slika 16. Smjerovi djelovanja vjetra na rasponski sklop [1].....	24
Slika 17. Grafički prikaz faktora izloženosti $c_e(z)$ [4].....	25
Slika 18. Koeficijent sile za mostove $c_{fx,0}$ [4]	26
Slika 19. Koeficijent sile za mostove $c_{fx,0}$ [4]	27
Slika 20. Referentna visina na koju djeluje pritisak vjetra	27
Slika 21. Koeficijenta sile za pravokutne profile s ostrim uglovima i bez toka preko slobodnog	29
Slika 22. Vrijednosti proračunske vitkosti za kružne valjke, poligonalne presjeke, pravokutne presjeke, profile s ostrim rubovima i rešetkaste konstrukcije [4].....	30
Slika 23. Orijentacijske vrijednosti faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće (za stupove bez otvora $\varphi=1,0$) i vitkosti ($\lambda=\infty$) [4]	30
Slika 24. Karta potresnih područja Republike Hrvatske [5]	32
Slika 25. Preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 za temeljna tla tipa A do E (5%-tno prigušenje) [6]	33
Slika 26. Horizontalni spektar odgovora	35
Slika 27. Vertikalni spektar odgovora	35

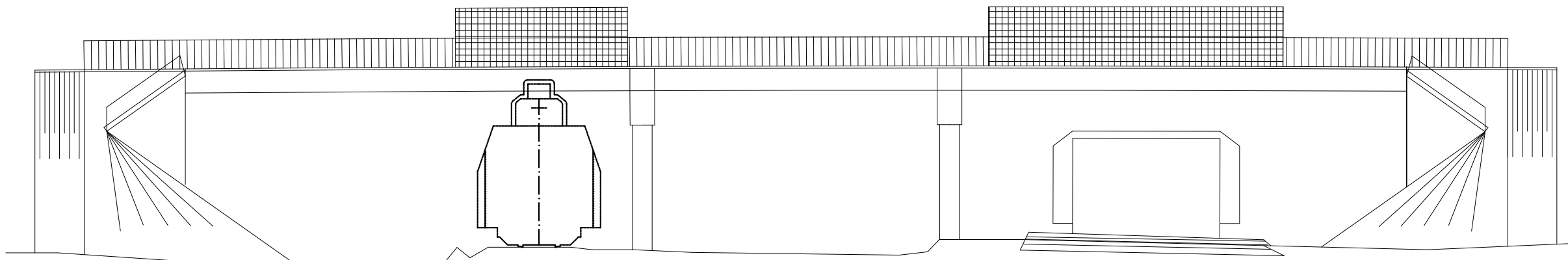
Slika 28. Model mosta.....	36
Slika 29. Roštiljni model mosta u Softiplus-u.....	36
Slika 30. Dispozicija ležajeva	39
Slika 31. Stalni ležajevi nad upornjakom.....	39
Slika 32. Pomoćni ležajevi nad upornjakom u modelu	40
Slika 34. Pomoćni ležajevi nad stupom u modelu	41
Slika 35. Pomoćni ležajevi nad stupom	41
Slika 36. Materijali	42
Slika 37. Dijagram naprezanje- deformacija betona C50/60	42
Slika 38. Beton glavnih nosača	42
Slika 39. Dijagram naprezanje- deformacija betona C35/40	43
Slika 40. Beton kolničke polče.....	43
Slika 42. Beton naglavne grede.....	44
Slika 43. Beton poprečnog nosača	44
Slika 44. Dijagram naprezanje- deformacija betona C40/50	44
Slika 46. Dijagram naprezanje - deformacija čelika B500B	45
Slika 47. Armaturni čelik	45
Slika 48. Izvedba „L“ nosača (lijevo)	46
Slika 50. Izvedba „obnutog T“ nosača.....	48
Slika 51. Poprečni presjek „obnutog T“ nosača.....	49
Slika 52. Izvedba „L“ nosača (desno)	50
Slika 53. Poprečni presjek „L“ nosača (desno)	51
Slika 55. Poprečni presjek naglavne grede.....	53
Slika 56. Poprečni presjek stupa	54
Slika 57. Poprečni presjek poprečnog nosača na upornjaku	55
Slika 58. Faze građenja	56
Slika 59. Grupe elemenata za aktivaciju u pojedinoj fazi	57
Slika 62. Dodatno stalno opterećenje u modelu	59
Slika 65. Puzanje i skupljanje 30 dana (My) [kNm]	60
Slika 88. Puzanje i skupljanje nakon puštanja u promet (5) (Vz) [kN]	72
Slika 95. Prikaz osovinskog prometnog opterećenja za rubni trak (odabran samo jedan prikaz radi preglednosti jer se ista vrijednost proteže duž cijelog mosta).....	76
Slika 99. Vjetar na neopterećeni most poprečno	78

Slika 100. Vjetar na neopterećeni most poprečno (My) [kNm]	78
Slika 101. Vjetar na neopterećeni most uzdužno	79
Slika 102. Vjetar uzdužno na neopterećeni most (my) [kNm]	79
Slika 106. Vjetar na opterećeni most poprečno.....	81
Slika 107. Vjetar poprečno na opterećeni most (my) [kNm]	82
Slika 108. Vjetar na opterećeni most uzdužno	82
Slika 109. Vjetar uzdužno na opterećeni most (My) [kNm]	83
Slika 115. Temperatura (Vz) [kN]	86
Slika 118. Poprečni presjek obrnutog T nosača	89
Slika 121. T nosač s pretpostavljenim nategama- ponovljeni proračun.....	94
Slika 122. Idealni poprečni presjek obrnutog T nosača	96
Slika 123. Nosač u fazi transporta.....	98
Slika 124. Nosač u fazi uporabe.....	98
Slika 125. Dopusšteno područje sile prednapinjanja za T nosač	101
Slika 128. Prijenos prednapinjanja u prethodno napregnutim elementima [8]	110
Slika 129. Poprečni presjek L nosača.....	116
Slika 131. L nosač s pretpostavljenim nategama	118
Slika 132. L nosač s pretpostavljenim nategama- ponovljeni proračun.....	121
Slika 133. Idealni poprečni presjek L nosača.....	123
Slika 134. Nosač u fazi transporta.....	125
Slika 135. Nosač u fazi uporabe	125
Slika 136. Dopusšteno područje sile prednapinjanja za L nosač	128
Slika 137. Natege u modelu	136
Slika 138. Naprezanje u prednapetoj armaturi nakon CSM faze	136
Slika 139. Prijenos prednapinjanja u prethodno napregnutim elementima.....	137
Slika 140. Poprečni presjek s raspodjelom tlačnih naprezanja u betonu.....	144
Slika 141. Poprečni presjek s raspodjelom tlačnih naprezanja u betonu.....	156

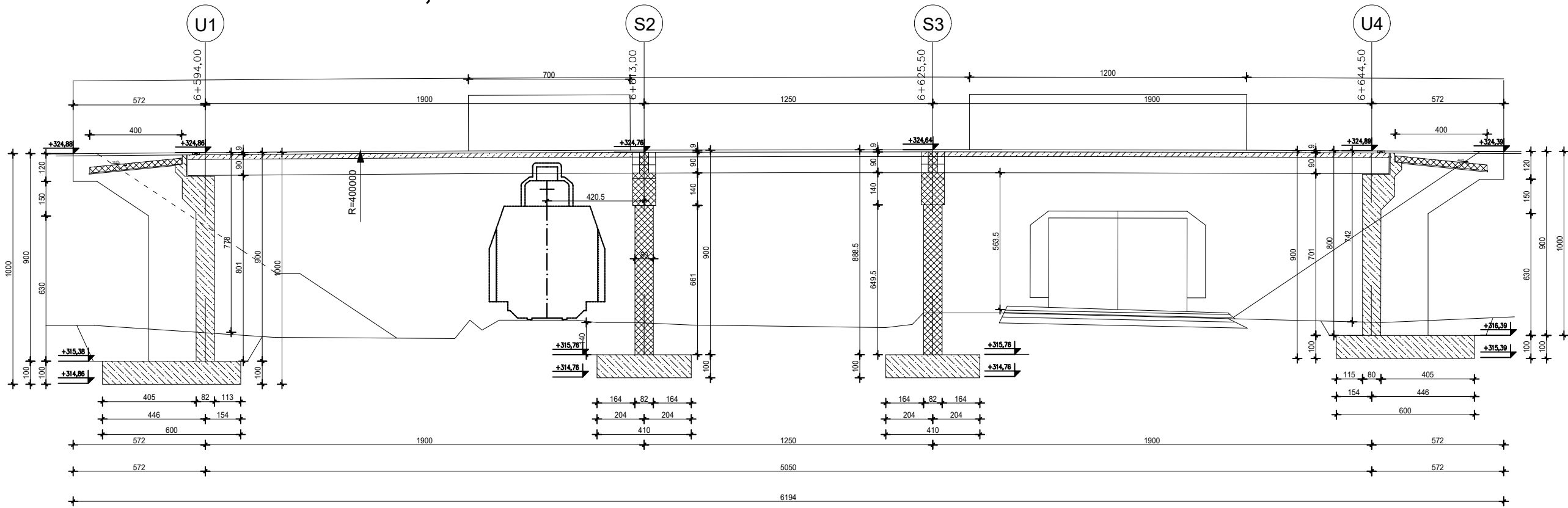
Popis tablica

Tablica 1. Odabrani razredi izloženosti.....	7
Tablica 2. Odarana nominalna debljina zaštitnog sloja za nenapetu armaturu	8
Tablica 3. Odabrana nominalna debljina zaštitnog sloja za prednapetu armaturu.....	9
Tablica 4. Broj i širina proračunskih trakova [2]	16
Tablica 5. Model opterećenja 1: karakteristike vrijednosti [2]	16
Tablica 6. Preporučene vrijednosti komponente linearne temperaturne razlike za različite vrste rasponskih sklopova cestovnih, pješačkih i željezničkih mostova [3]	21
Tablica 7. Preporučene vrijednosti faktora k_{sur} za različite debljine kolnika zastora [3]	22
Tablica 8. Tipovi temeljnog tla [6].....	32
Tablica 9. Vrijednosti parametara koji opisuju elastični spektar odziva tipa 1 [6].....	33
Tablica 10. Vrijednosti parametara koji opisuju vertikalni elastični spektar odziva [6].....	33
Tablica 11. Vrijednosti odziva $S_d(T)$	34
Tablica 12. Vrijednost k_h [8]	103
Tablica 13. Neutralizacija užadi za T nosač.....	115
Tablica 14. Vrijednost k_h [8]	130
Tablica 15. Neutralizacija užadi L nosač	141
Tablica 16. Karakteristične vrijednosti sile prednapinajnja i momenata	142
Tablica 17. Karakteristične vrijednosti sile prednapinajnja i momenata	154

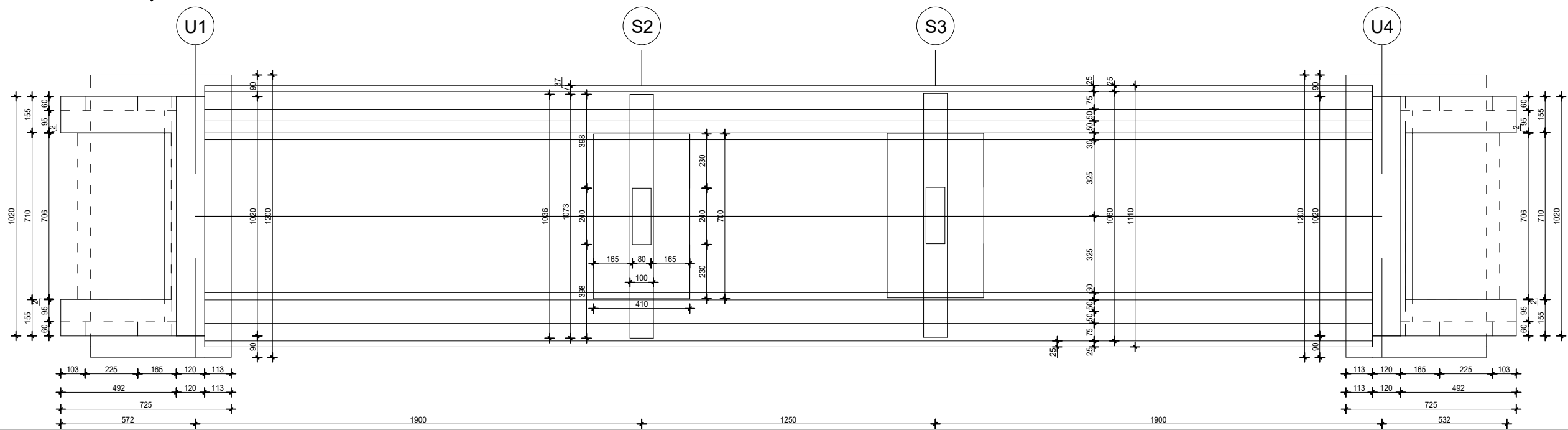
POGLED NA NADVOŽNJAK, MJ. 1:200



UZDUŽNI PRESJEK, MJ 1:200



TLOCRT, MJ. 1:200



GF		SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
SADRŽAJ NACRTA: Pogled na most, Uzdužni presjek, Tlocrt			
DIPLOMSKI RAD			
<i>Most sastavljen od obrnutih prednapetih predgotovljenih T nosača</i>			
BROJ NACRTA:		1	
MENTOR:		izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković	
STUDENTICA:		Dora Salopek	
DATUM:		Rujan 2019.	MJERILO: 1:200
AK. GODINA: 2018./2019.			

[illegible][illegible][illegible]

This technical drawing illustrates the roof plan of a building, detailing its geometry, dimensions, and structural components. The plan includes a central vertical axis labeled "OS. CESTE".

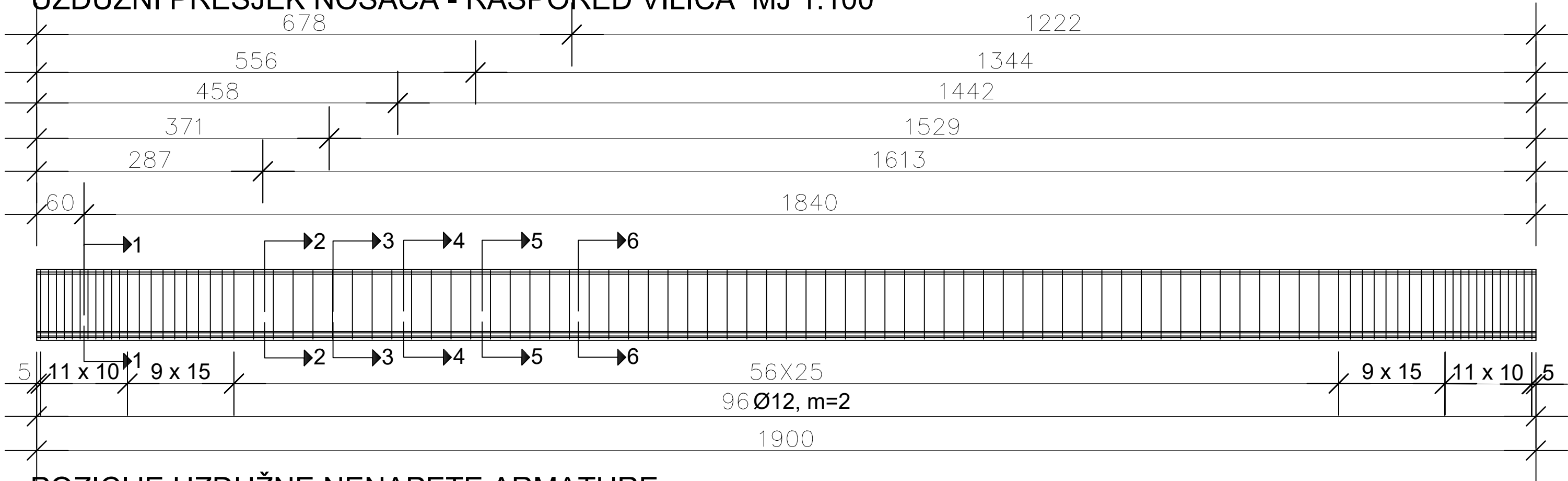
Dimensions:

- Overall Width:** 1110 units.
- Roof Slope:** Indicated by a 2.5% slope on both sides.
- Horizontal Segments (from left edge):** 25, 175, 30, 325, 710, 325, 30, 175, 25.
- Vertical Segments (from top edge):** 20, 90, 140, 648, 240, 518, 1047, 240, 230, 700, 100.
- Internal Horizontal Dimensions:** 410, 240, 398, 530, 518, 230, 240, 230.

Structural Details:

- The drawing shows various mechanical elements such as pipes, valves, and structural supports along the edges and centerline.
- A series of rectangular structures are depicted along the bottom edge, likely representing internal partitions or equipment footprints.

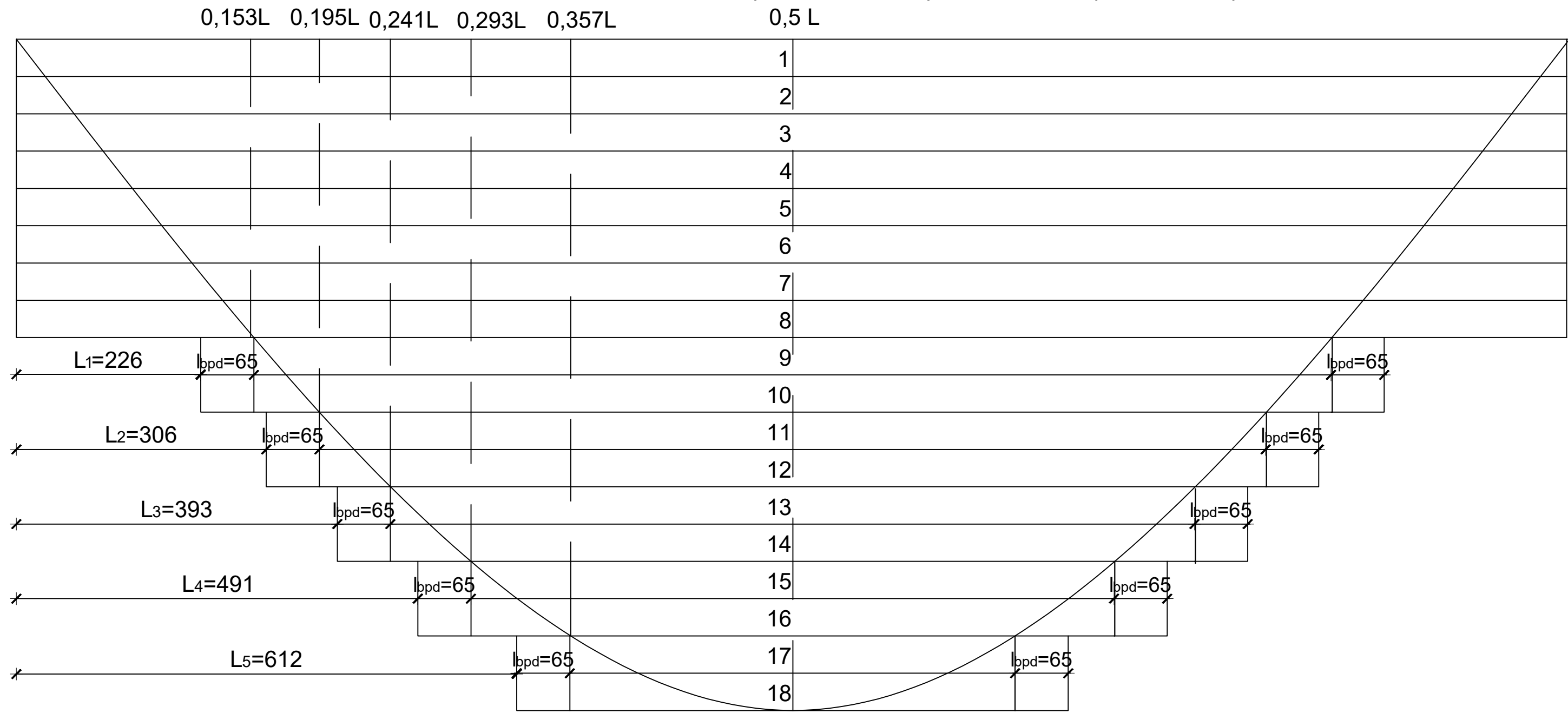
UZDUŽNI PRESJEK NOSAČA - RASPORED VILICA MJ 1:100



POZICIJE UZDUŽNE NENAPETE ARMATURE

5 Ø25, L=4.45, kom=10	7 Ø25, L=12, kom=10	5
6 Ø25, L=4.75, kom=13	8 Ø12, L=12, kom=9	6
9 Ø10, L=4.05, kom=12	11 Ø10, L=12, kom=12	9
10 Ø10, L=4.75, kom=3	12 Ø10, L=12, kom=3	10
13 Ø10, L=4.05, kom=12	14 Ø10, L=12, kom=12	13
15 Ø10, L=4.05, kom=7	16 Ø10, L=12, kom=7	9

POKRIVANJE MOMENTNOG DIJAGRAMA, MJ 1:100(horizontalno), MJ 1:200 (vertikalno)



ISKAZ PREDNAPETE ARMATURE			
Užad	L (m)	Kom	Ukupno (m)
0,62" 1640/1860	19	18	342,00
UKUPNO (m)			342,00
Masa (kg/m)			1.47
Sveukupno (kg) za jedan nosač			502,70

ISKAZ CIJEVI ZA NEUTRALIZACIJU			
Cijevi	L (m)	Kom	Ukupno (m)
1	2,26	2	4,52
2	3,06	2	6,12
3	3,93	2	7,86
4	4,91	2	9,82
5	6,12	2	12,24
UKUPNO (m)			40,60

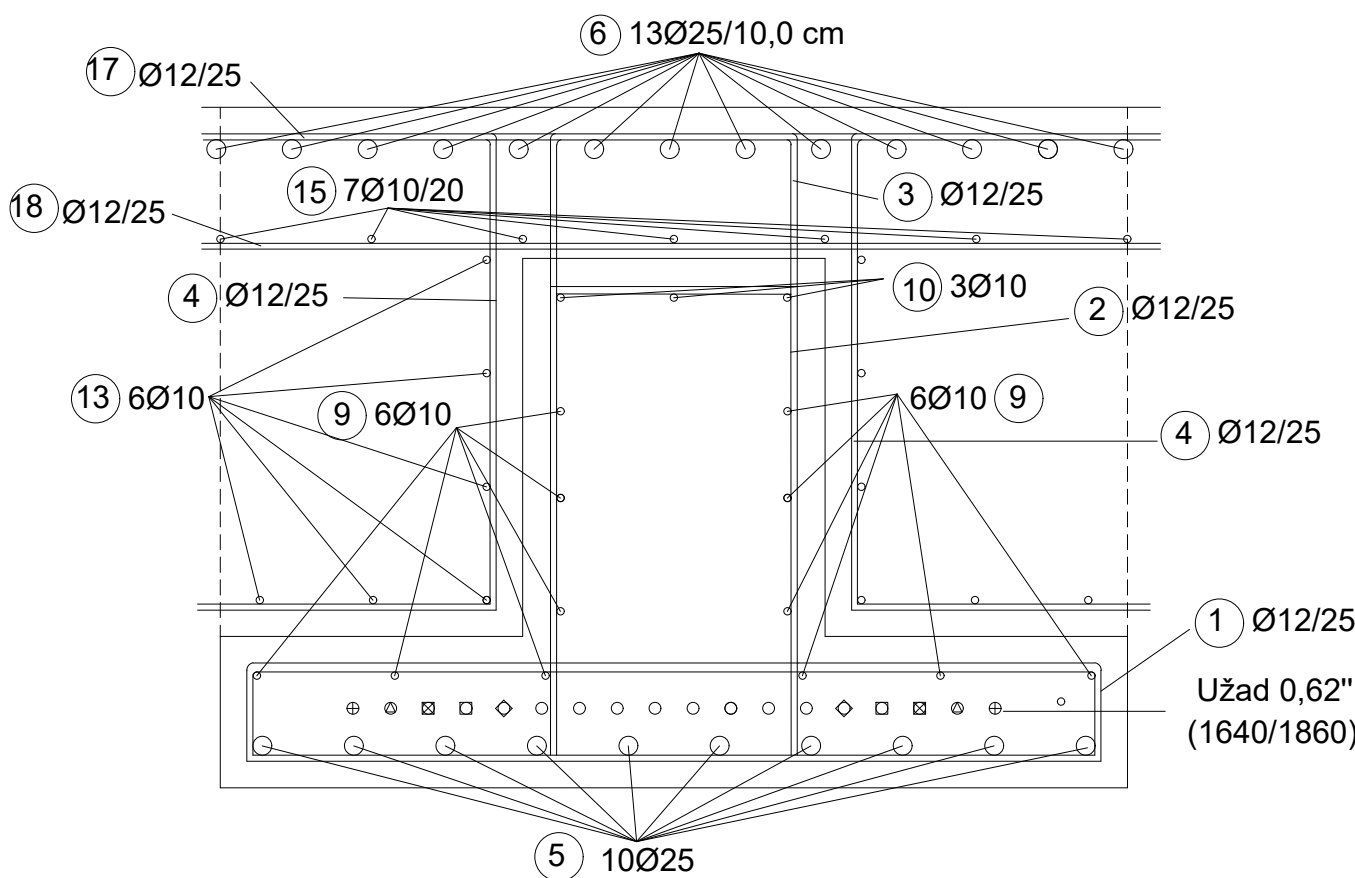
ISKAZ ARMATURE PO m³ BETONA	
MEKA ARMATURA	123,3
PREDNAPETA ARMATURA	20,10
UKUPNO (kg/m³)	143,4

ISKAZ MEKE ARMATURE B500B (za 1 nosač)						
POZ	Ø (mm)	L (m)	KOM	UKUPNA DULJINA (m)		
				Ø10	Ø12	Ø25
①	12	2,85	96		273,6	
②	12	2,55	96		244,8	
③	12	2,85	96		273,6	
④	12	1,35	96		129,6	
⑤	25	8,90	10			89,0
⑥	25	9,50	13			123,5
⑦	25	12,00	10			120,0
⑧	12	12,00	9		108,0	
⑨	10	8,10	24	194,4		
⑩	10	9,50	6	57,0		
⑪	10	12,0	12	144,0		
⑫	10	12,0	3	36,0		
⑬	10	8,10	24	194,4		
⑭	10	12,0	12	144,0		
⑮	10	8,10	14	113,4		
⑯	10	12,0	7	84,0		
⑰	12	1,25	96		120,0	
⑱	12	1,25	96		120,0	
UKUPNO (m)				967,2	1269,6	332,5
MASA (kg/m)				0.634	0.911	3,951
UKUPNO - po profilima (kg)				613,2	1156,6	1313,7
UKUPNO (kg) za jedan nosač				3083,5		

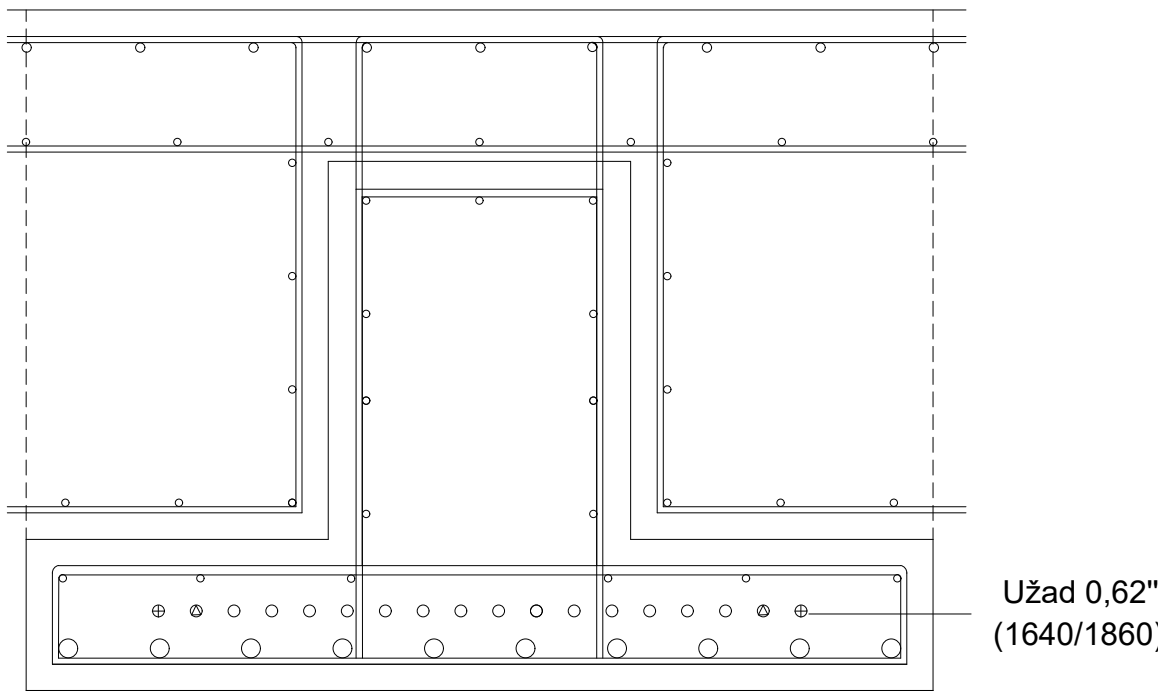
GF		SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
SADRŽAJ NACRTA:		Uzdužni presjek obrnutog T nosača	
DIPLOMSKI RAD			
Most sastavljen od obrnutih prednapetih predgotovljenih T nosača			
BROJ NACRTA:		3	
MENTOR:		izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković	
STUDENTICA:		Dora Salopek	
DATUM:		Rujan 2019.	MJERILO: 1:100
AK. GODINA: 2018./2019.			

POPREČNI PRESJECI
MJ 1:10

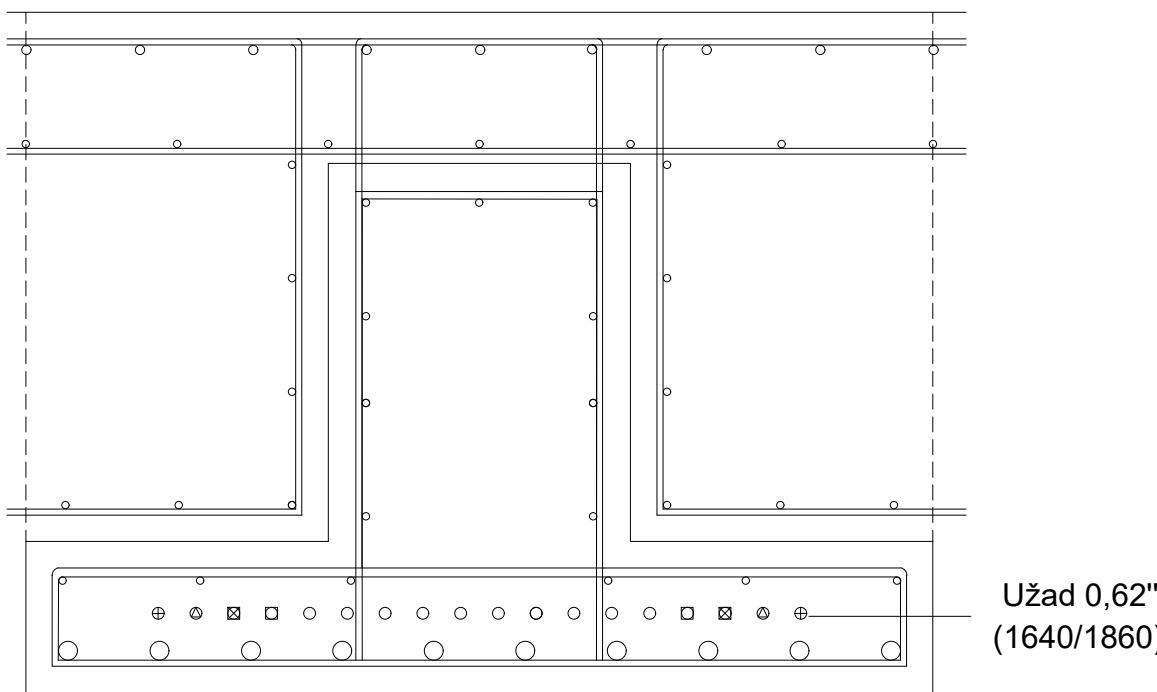
POPREČNI PRESJEK 1-1



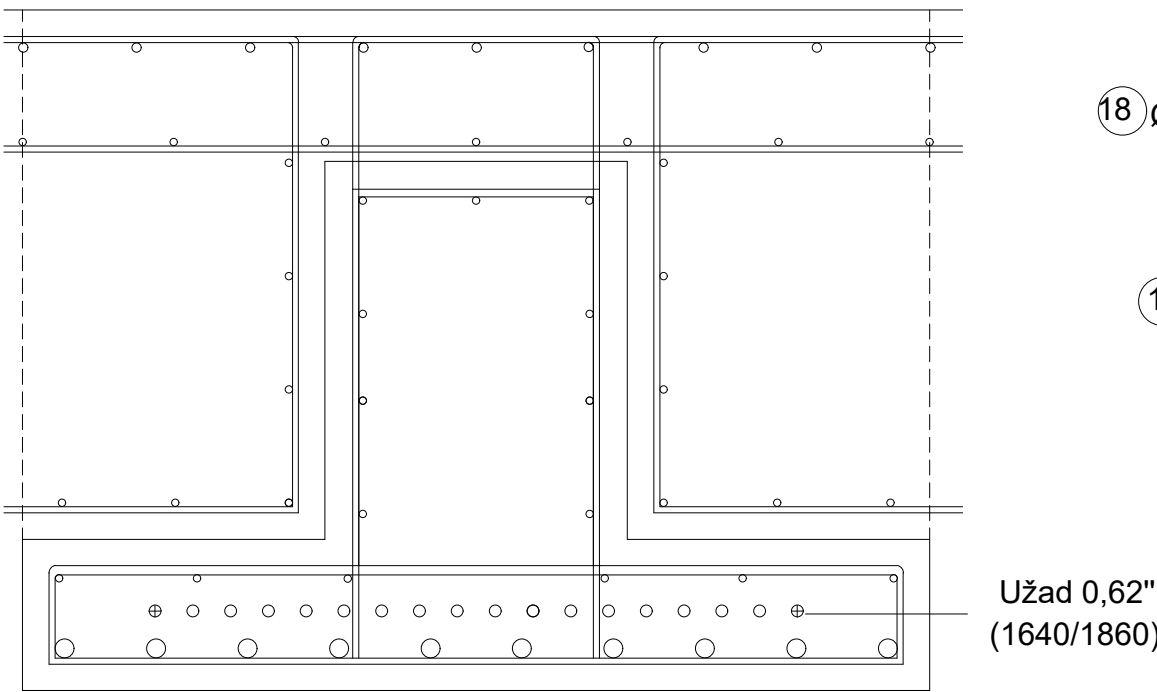
POPREČNI PRESJEK 4-4



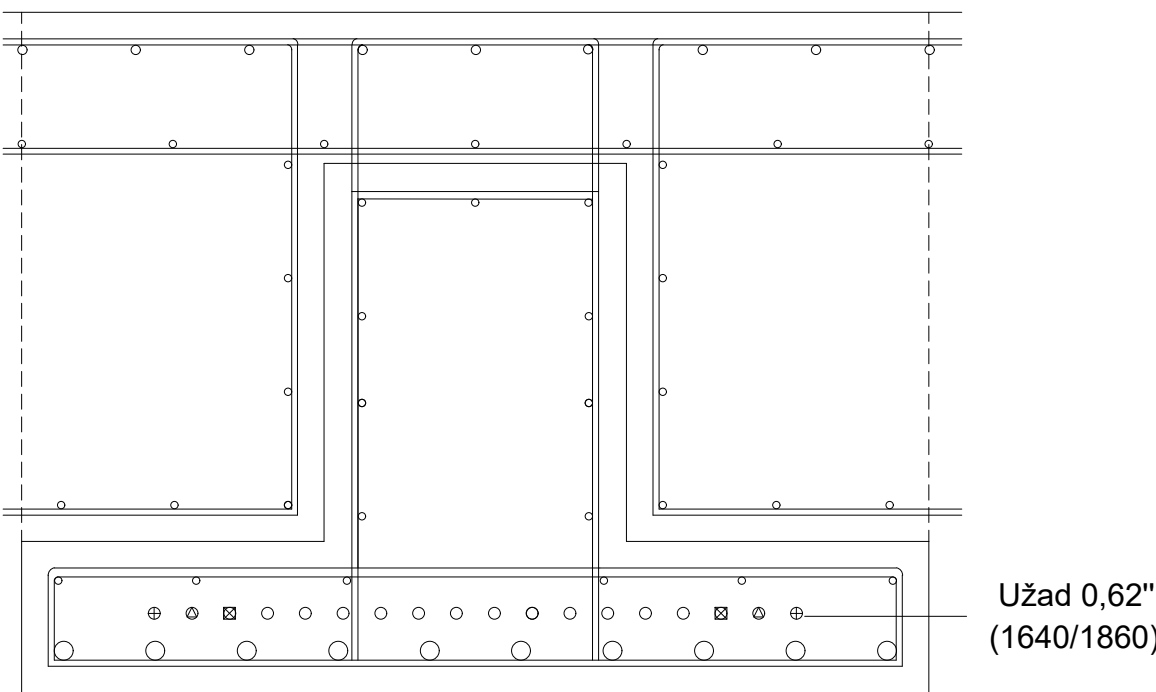
POPREČNI PRESJEK 2-2



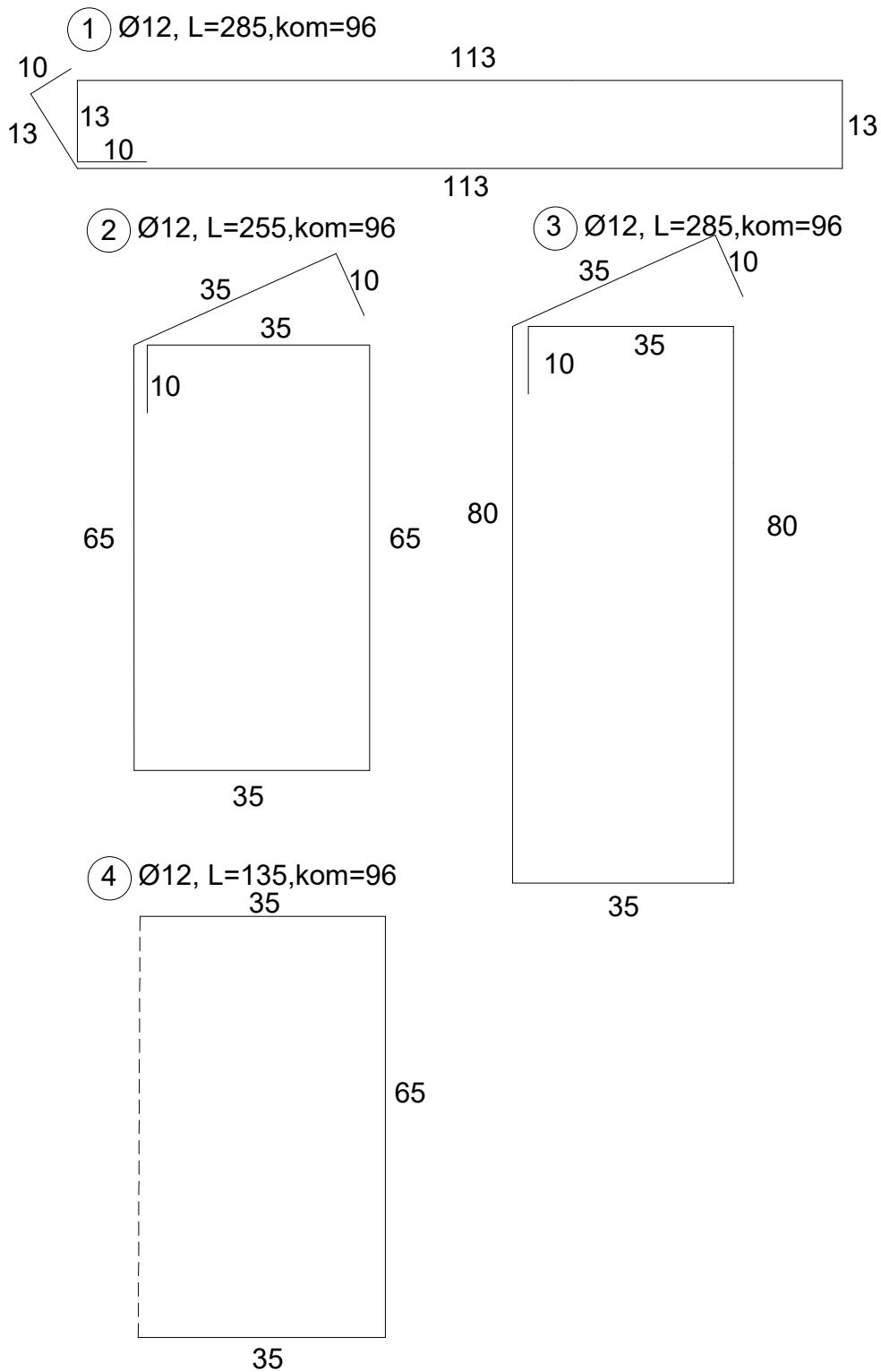
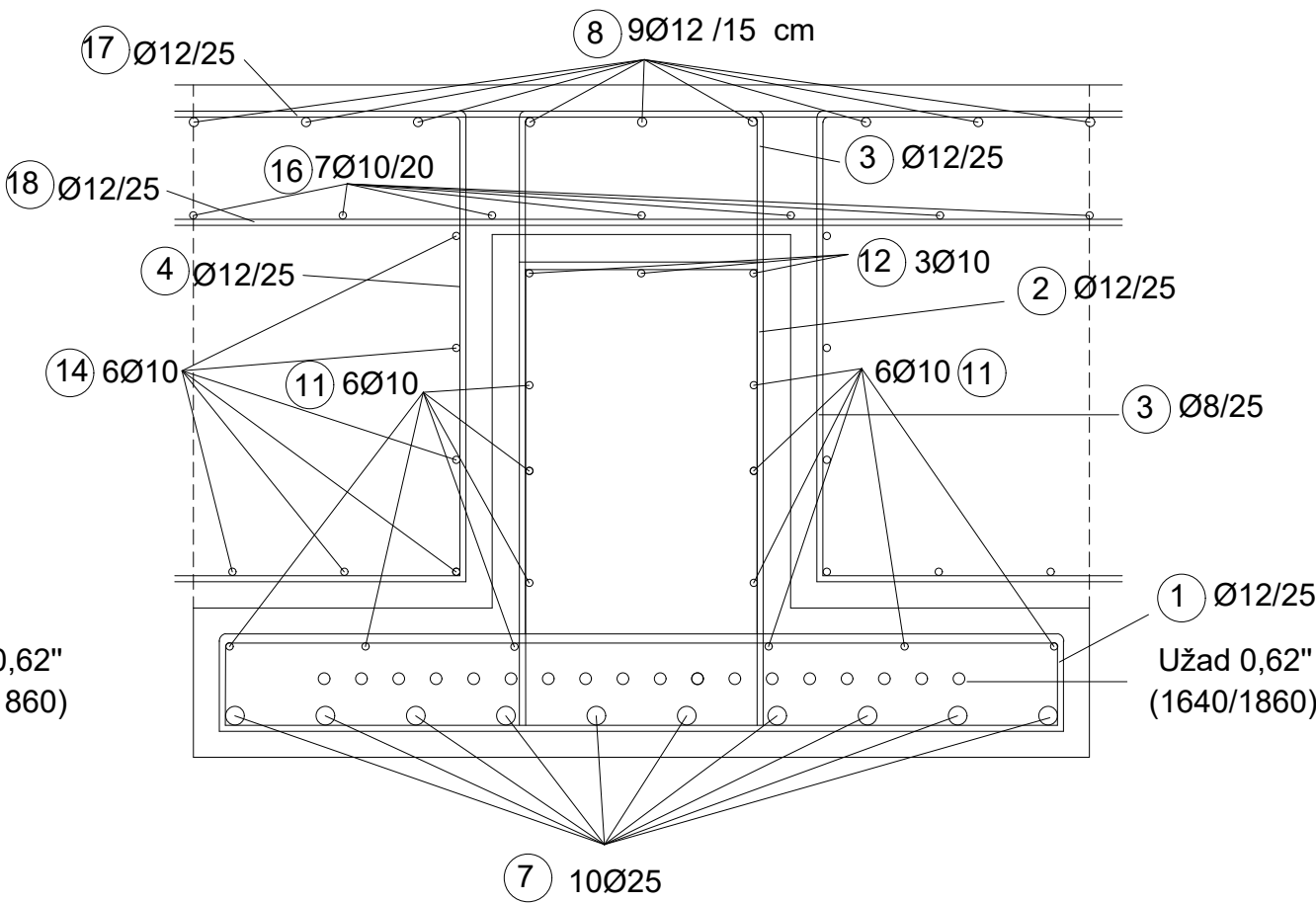
POPREČNI PRESJEK 5-5



POPREČNI PRESJEK 3-3

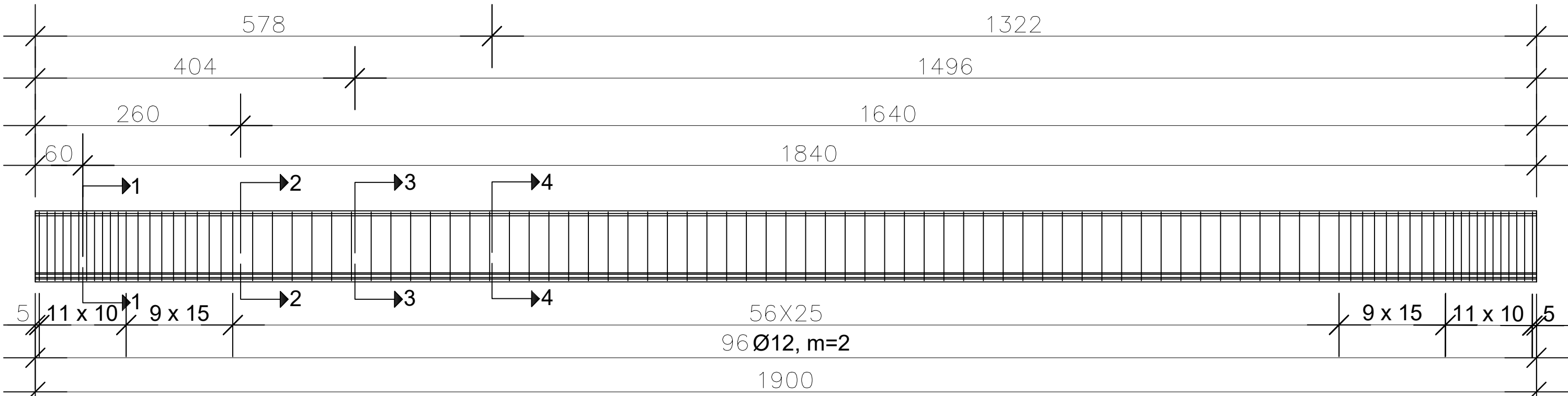


POPREČNI PRESJEK 6-6

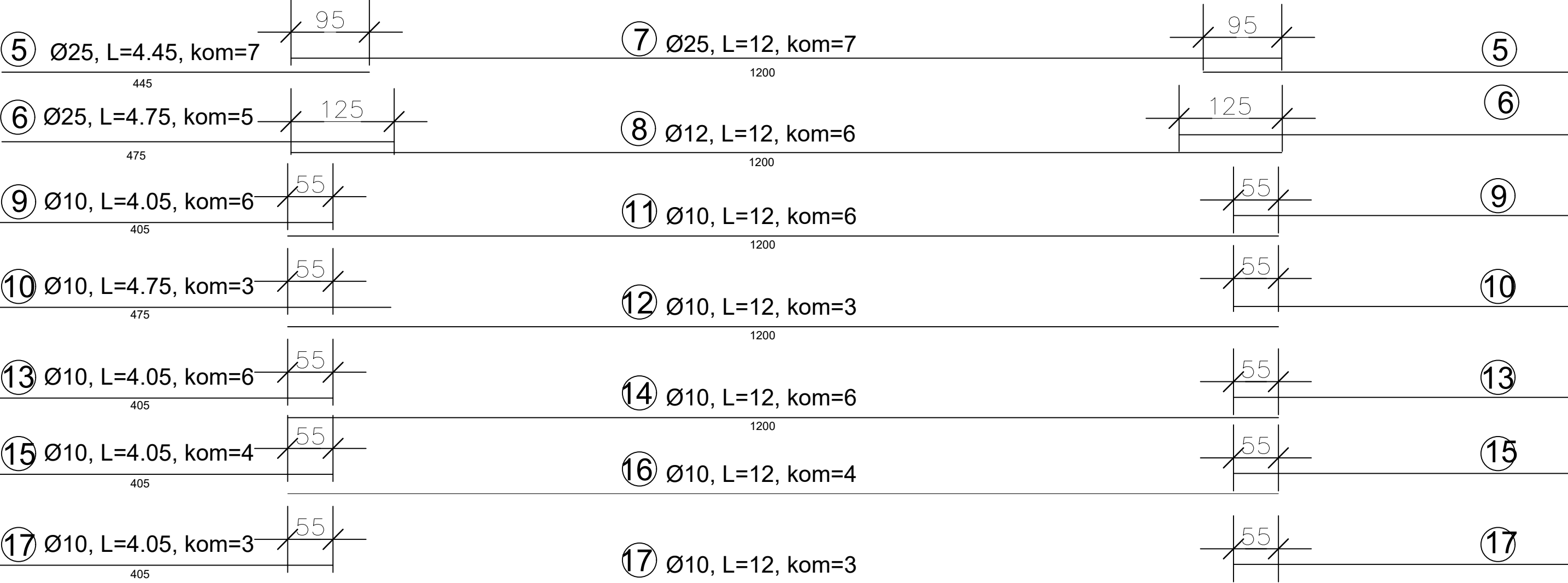


NAPOMENA
užad s izoliranom duljinom $L_1=2,26$ m
užad s izoliranom duljinom $L_2=3,06$ m
užad s izoliranom duljinom $L_3=3,93$ m
užad s izoliranom duljinom $L_4=4,91$ m
+ užad s izoliranom duljinom $L_5=6,52$ m
neizolirana užad

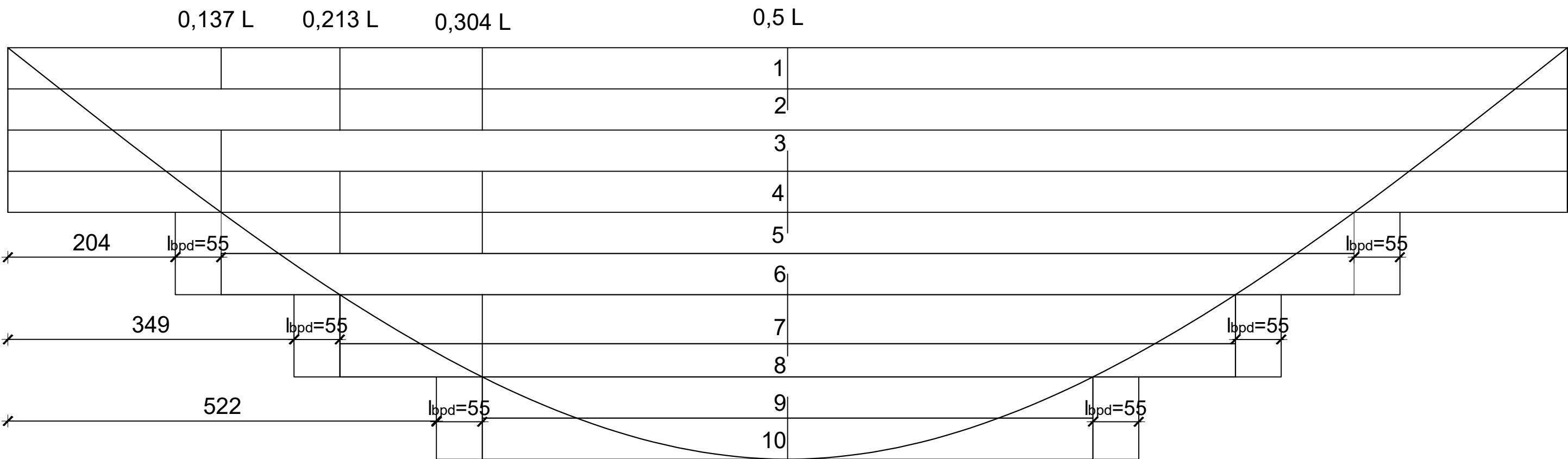
GF		SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
SADRŽAJ NACRTA:		Poprečni presjek obrnutog T nosača	
DIPLOMSKI RAD		4	
Mentor:		izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković	
Studentica:		Dora Salopek	
Datum:		Rujan 2019.	
AK. GODINA: 2018./2019.		MJERILO: 1:10	



POZICIJE UZDUŽNE NENAPETE ARMATURE



POKRIVANJE MOMENTNOG DIJAGRAMA, MJ 1:100(horizontalno), MJ 1:200 (vertikalno)



ISKAZ PREDNAPETE ARMATURE			
Užad	L (m)	Kom	Ukupno (m)
0,62" 1640/1860	19	10	190,00
UKUPNO (m)			190,00
Masa (kg/m)			1.47
Sveukupno (kg) za jedan nosač			279,3

ISKAZ CIJEVI ZA NEUTRALIZACIJU			
Cijevi	L (m)	Kom	Ukupno (m)
1	2,40	2	4,80
2	3,49	2	6,98
3	5,22	2	10,44
UKUPNO (m)			22,22

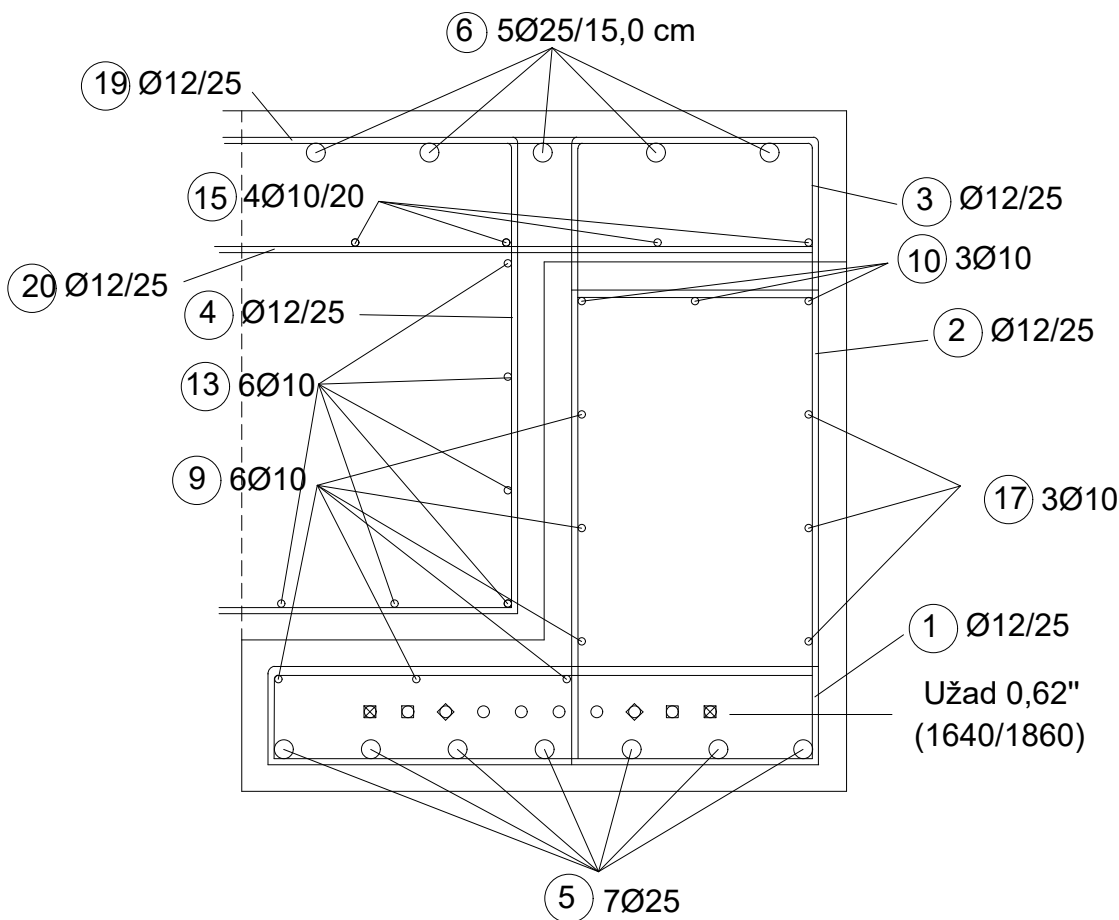
ISKAZ ARMATURE PO m³ BETONA	
MEKA ARMATURA	83,1
PREDNAPETA ARMATURA	11,2
UKUPNO (kg/m³)	94,3

ISKAZ MEKE ARMATURE B500B (za 1 nosač)						
POZ	Ø (mm)	L (m)	KOM	UKUPNA DULJINA (m)		
				Ø10	Ø12	Ø25
①	12	2,05	96		196,8	
②	12	2,55	96		244,8	
③	12	2,85	96		273,6	
④	12	1,35	96		129,6	
⑤	25	8,90	7			62,3
⑥	25	9,50	5			47,5
⑦	25	12,00	7			84,0
⑧	12	12,00	6		72,0	
⑨	10	8,10	12	97,2		
⑩	10	9,50	6	57,0		
⑪	10	12,0	6	72,0		
⑫	10	12,0	3	36,0		
⑬	10	8,10	12	97,2		
⑭	10	12,0	6	72,0		
⑮	10	8,10	8	64,8		
⑯	10	12,0	4	48,0		
⑰	12	0,75	96		72,0	
⑱	12	0,75	96		72,0	
UKUPNO (m)				544,2	1060,8	193,8
MASA (kg/m)				0,634	0,911	3,951
UKUPNO - po profilima (kg)				345,0	966,4	765,7
UKUPNO (kg) za jedan nosač					2077,1	

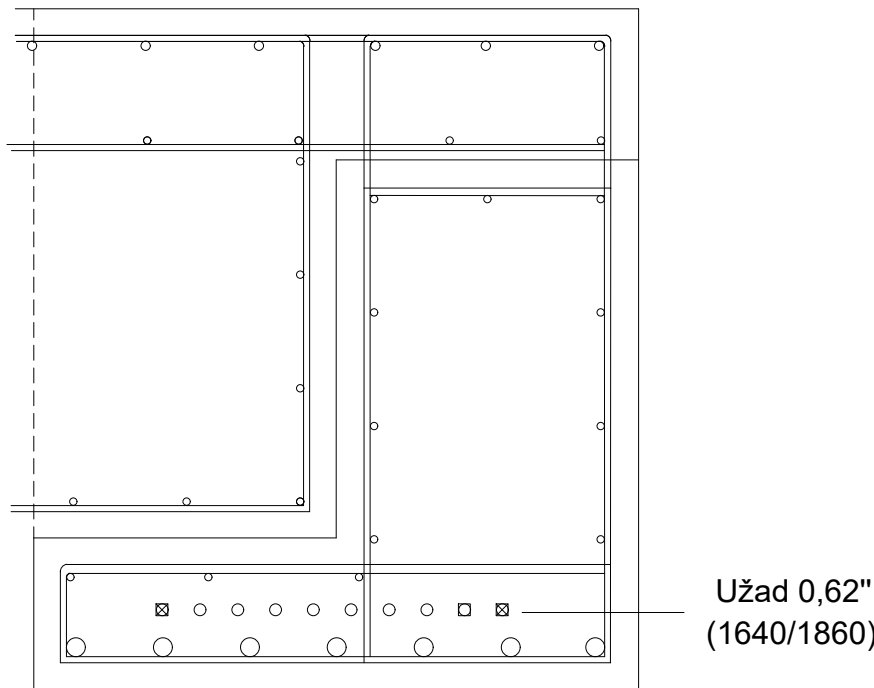
GF		SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	
SADRŽAJ NACRTA:		Uzdužni presjek L nosača	
DIPLOMSKI RAD			
Most sastavljen od obrnutih prednapetih predgotovljenih T nosača			
BROJ NACRTA:		5	
MENTOR:		izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković	
STUDENTICA:		Dora Salopek	
DATUM:		Rujan 2019.	
AK. GODINA: 2018./2019.		MJERILO: 1:100	

POPREČNI PRESJECI NOSAČA, NENAPETA I PREDNAPETA ARMATURA, MJ 1:10

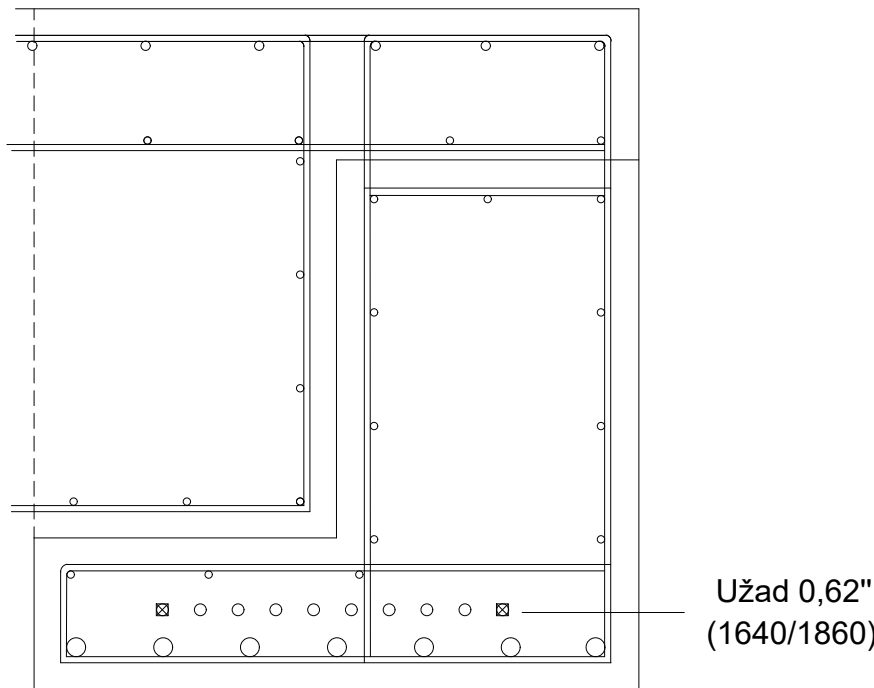
POPREČNI PRESJEK 1-1



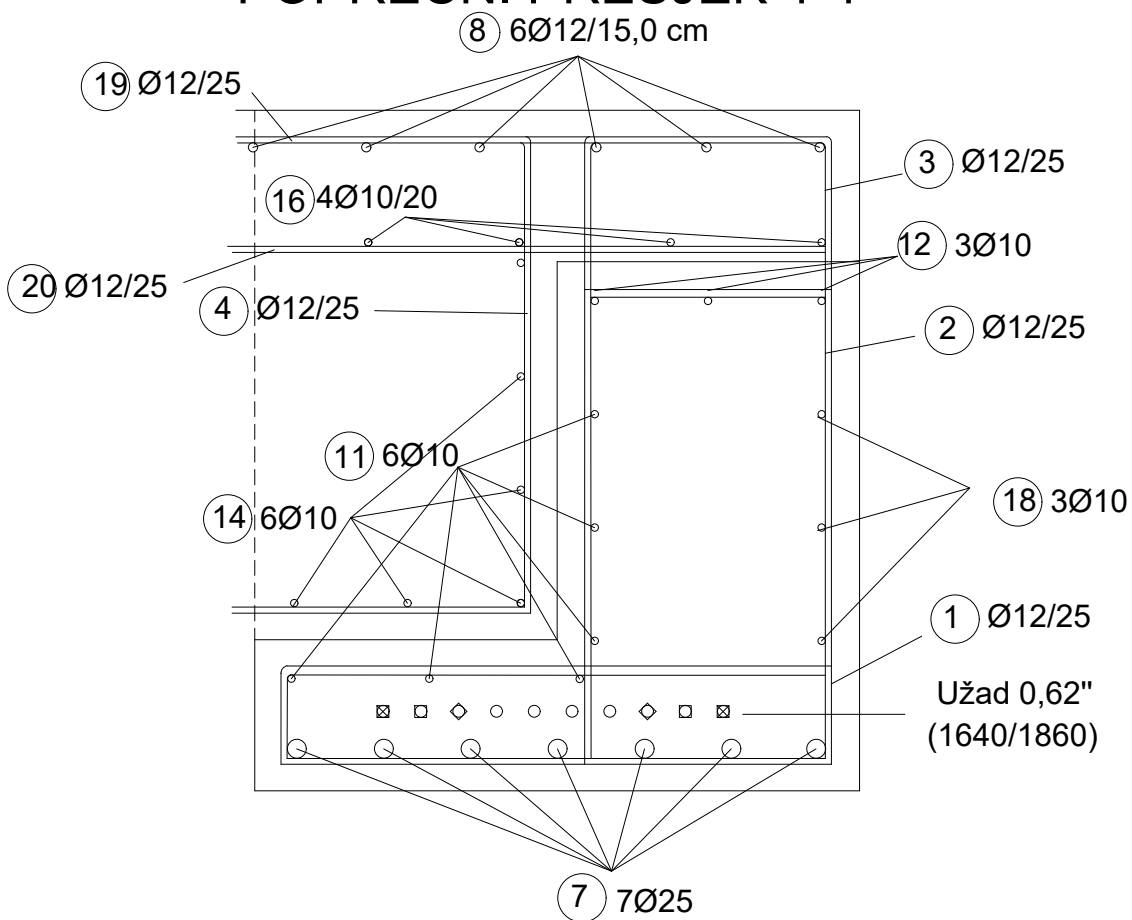
POPREČNI PRESJEK 2-2



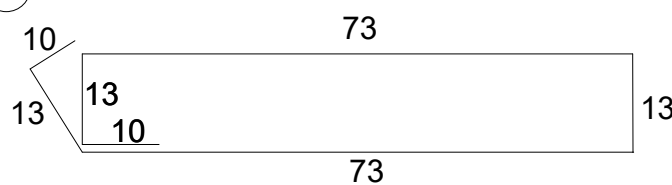
POPREČNI PRESJEK 3-3



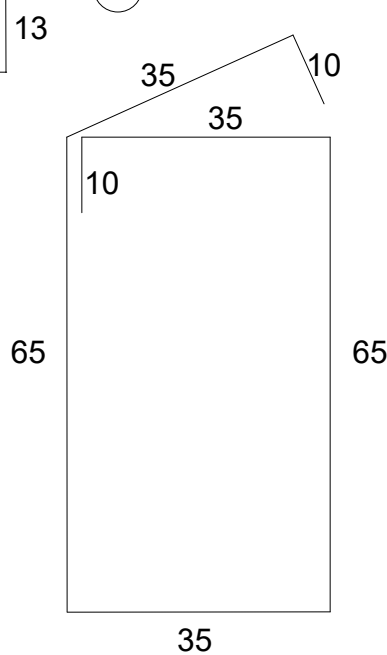
POPREČNI PRESJEK 4-4



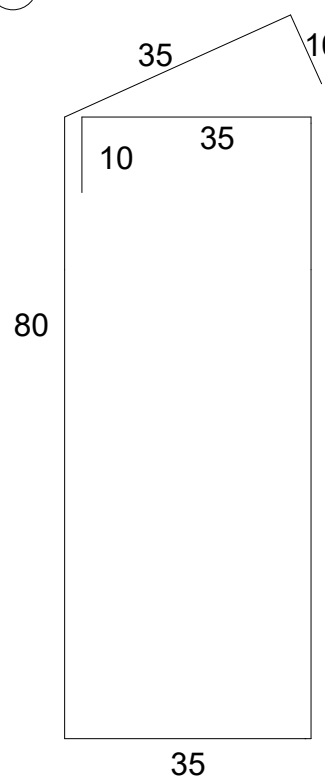
1 Ø12, L=205,kom=96



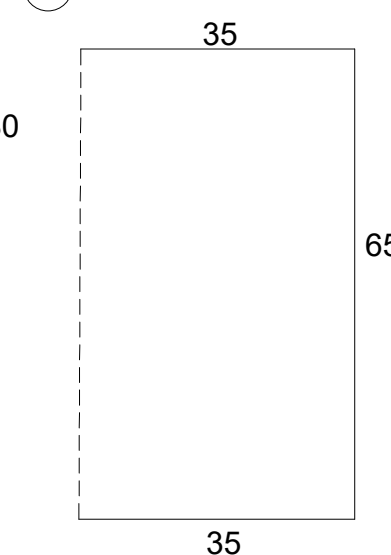
2 Ø12, L=200,kom=96



3 Ø12, L=230,kom=96



4 Ø12, L=135,kom=86



NAPOMENA
užad s izoliranom duljinom $L_1=2,04$ m
užad s izoliranom duljinom $L_2=3,49$ m
užad s izoliranom duljinom $L_3=5,22$ m
neizolirana užad

GF

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

SADRŽAJ NACRTA: Poprečni presjek L nosača

DIPLOMSKI RAD

Most sastavljen od obnutih prednapetih predgotovljenih T nosača

BROJ NACRTA: 6

MENTOR: izv.prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković

STUDENTICA: Dora Salopek

DATUM: Rujan 2019.

AK. GODINA: 2018./2019. MJERILO: 1:10