

# Dimenzioniranje spregnutog prednapetog nosača

---

**Pranjić, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:015960>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Matija Pranjić**

**Dimenzioniranje spregnutog prednapetog nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Smjer konstrukcije  
Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije**

**Matija Pranjić  
JMBAG: 0114032479**

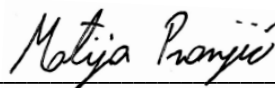
**Dimenzioniranje spregnutog prednapetog nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



---

Matija Pranjić

U Rijeci, 18.09.2024.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru, dr. sc. Željku Smolčiću na iznimnom mentorstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada. Želim izraziti zahvalnost za sve osigurane materijale, preneseno znanje, savjete, strpljenje te komunikaciju koja je olakšala proces izrade rada.

Također, želim se zahvaliti svim profesorima i asistentima Građevinskog fakulteta u Rijeci na suradnji i stečenom znanju.

Želim zahvaliti kolegama i prijateljima koji su svojim društvom i podrškom olakšali cjelokupno studiranje.

Posebna zahvalnost ide mojim roditeljima, sestri i obitelji na njihovoj neizmjernoj podršci i razumijevanju tijekom mog školovanja.

## **SAŽETAK:**

U diplomskom radu obrađena je tema „Dimenzioniranje spregnutog prednapetog nosača“. Proveden je statički proračun i dimenzioniranje glavnog nosača te armiranobetonske ploče poslovno–proizvodne hale. Glavni nosač je predgotovljeni i prednapeti element „T“ presjeka koji je spregnut dobetoniranom armiranobetonskom pločom. Poslovno–proizvodna hala je pravilnog tlocrtnog oblika dimenzija 25 m x 15 m. Dio proračuna je proveden pomoću računalnog programa Mathcad i Gala Reinforcement. Proračun djelovanja i dimenzioniranje provedeno je u skladu s važećim normama i nacionalnim dodacima. Za sve dimenzionirane elemente izrađeni su nacrti armature te iskaz armature.

Ključne riječi: statički proračun, dimenzioniranje, predgotovljeni element, spregnuti element, prednapinjanje, armiranobetonska ploča

## **SUMMARY:**

The thesis addresses the topic of "Design of a Composite Prestressed Beam." A static analysis and design of the main beam and the reinforced concrete slab for a business–production hall were conducted. The main beam is a prefabricated and prestressed "T" section element, composite with a cast-in-place reinforced concrete slab. The business–production hall has a regular floor plan with dimensions of 25 m x 15 m. Part of the analysis was carried out using the software Mathcad and Gala Reinforcement. The load analysis and design were performed in accordance with the relevant standards and national annexes. For all the designed elements, reinforcement drawings and a reinforcement schedule were prepared.

Keywords: static analysis, design, prefabricated element, composite element, prestressing, reinforced concrete slab

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	TEHNIČKI OPIS.....	3
2.1	Općenito .....	3
2.2	Konstruktivski sustav.....	3
2.3	Materijali.....	4
2.3.1	Beton 30/37 .....	4
2.3.2	Čelik za armiranje B500A .....	5
2.3.3	Čelik za prednapinjanje 1640/1860.....	5
3.	SPREGNUTI PREDNAPETI NOSAČ.....	7
3.1	Općenito .....	7
3.2	Geometrijske karakteristike presjeka .....	11
3.2.1	Prednapeti presjek .....	11
3.2.2	Spregnuti prednapeti presjek .....	15
3.3	Analiza opterećenja i kombinacije djelovanja.....	20
3.3.1	Stalno djelovanje .....	21
3.3.2	Promjenjivo djelovanje – snijeg.....	23
3.3.3	Momenti savijanja na sredini raspona.....	24
3.3.4	Kombinacije djelovanja .....	25
3.4	Prednapinjanje .....	26
3.4.1	Sila prednapinjanja nakon svih gubitaka ( $t=\infty$ ).....	28
3.4.2	Najveća naprezanja u natezi .....	29
3.5	Gubici sile prednaprezanja .....	31
3.5.1	Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije .....	31
3.5.2	Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja .....	31

3.5.3	Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina .....	32
3.5.4	Vremenski gubici.....	38
3.6	Granično stanje nosivosti .....	47
3.6.1	Savijanje s uzdužnom silom .....	47
3.6.2	Proračunska nosivost na poprečnu silu .....	56
3.6.3	Proračunski potrebna poprečna armatura .....	58
3.6.4	Dokaz čvrstoće tlačnih štapova .....	62
3.6.5	Najmanja potrebna poprečna armatura .....	63
3.6.6	Posmik na spojnoj površini betona koji su izvedeni u različito vrijeme	66
3.7	Granično stanje uporabljivosti .....	68
3.7.1	Provjera ograničenja naprezanja za karakterističnu kombinaciju .....	68
3.7.2	Provjera ograničenja naprezanja za nazovistalnu kombinaciju .....	77
4.	ARMIRANOBETONSKA PLOČA .....	85
4.1	Analiza opterećenja .....	85
4.2	Proračun statičke visine.....	91
4.3	Dimenzioniranje na moment savijanja .....	93
4.3.1	Polje 1 .....	93
4.3.2	Oslonac B.....	94
4.3.3	Polje 2 .....	94
4.3.4	Oslonac C .....	95
4.3.5	Polje 3 .....	95
4.3.6	Razdjelna armatura.....	96
4.4	Dimenzioniranje na poprečnu silu.....	97
4.4.1	Proračunski potrebna poprečna armatura .....	97
4.4.2	Dokaz čvrstoće tlačnih štapova .....	99
5.	DULJINE SIDRENJA I PRIJEKLOPA ŠIPKI ARMIRANOBETONSKE PLOČE .....	100
5.1	Granično stanje prijanjanja.....	100



5.2	Duljina sidrenja .....	100
5.2.1	Sidrenje donje armature na krajnjem ležaju .....	102
5.2.2	Sidrenje gornje armature na krajnjem ležaju .....	104
5.2.3	Sidrenje gornje armature na srednjim ležajima .....	104
5.3	Duljina prijeklopa .....	105
5.3.1	Prijeklop donje armature na srednjim ležajima .....	106
5.3.2	Prijeklop razdjelne armature .....	106
5.4	Skraćivanje uzdužne vlačne armature .....	107
5.4.1	Polje 1 .....	107
5.4.2	Oslonac B .....	107
5.4.3	Polje 2 .....	108
5.4.4	Oslonac C .....	108
5.4.5	Polje 3 .....	109
6.	DULJINE SIDRENJA, PRIJEKLOPA I RAZMACI ŠIPKI SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA .....	110
6.1	Granično stanje prijanjanja .....	110
6.2	Duljina sidrenja .....	110
6.3	Duljina prijeklopa .....	111
6.4	Razmak šipki .....	113
7.	ISKAZ ARMATURE .....	114
8.	ZAKLJUČAK .....	116
9.	LITERATURA .....	117
10.	GRAFIČKI PRILOZI .....	118

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Geometrijske karakteristike prednapetog presjeka (I.faza).....	14
Tablica 2. Geometrijske karakteristike spregnutog prednapetog presjeka (II.faza).....	20
Tablica 3. Dodatno stalno opterećenje od krovne konstrukcije .....	22
Tablica 4. Koeficijenti kombinacije za određenu kombinaciju djelovanja .....	25
Tablica 5. Gubici sile prednapinjanja zbog trenja .....	32
Tablica 6. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka [ $P_{m0x} > P_{m0, max}$ ].....	34
Tablica 7. Prikaz dobivenih vrijednosti iz programa Mathcad .....	36
Tablica 8. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka [ $P_{m0x} \leq P_{m0, max}$ ].....	38
Tablica 9. Vrijednost $k_h$ [6].....	39
Tablica 10. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon svih gubitaka .....	47
Tablica 11. Iskaz armature armiranobetonske ploče .....	114
Tablica 12. Iskaz armature jednog spregnutog prednapetog nosača.....	115

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz osnovnog tlocrta.....	3
Slika 2. Prikaz presjeka prednapetog poprečnog nosača (I.faza) .....	11
Slika 3. Prikaz presjeka spregnutog prednapetog nosača (II.faza).....	15
Slika 4. Sudjelujuća širina T-presjeka [6] .....	15
Slika 5. Statički sustav i prikaz opterećenja na ploču .....	20
Slika 6. Prikaz opterećenja na nosač .....	21
Slika 7. Slojevi neprohodnog krova .....	22
Slika 8. Položaj natege u nosaču.....	27
Slika 9. Detalj položaja natege u poprečnom presjeku.....	27
Slika 10. Dijagram gubitaka prednapinjanja [ $P_{m0x} > P_{m0, max}$ ].....	34
Slika 11. Postupak rješavanja problema [ $P_{m0x} > P_{m0, max}$ ] .....	35
Slika 12. Dijagram gubitaka prednapinjanja [ $P_{m0x} \leq P_{m0, max}$ ].....	37

Slika 13. Prikaz naprezanja za uvjet $Pm0 = Pm\infty$ .....	46
Slika 14. Prikaz presjeka s veličinama potrebnim za proračun u računalnom programu Gala Reinforcement.....	48
Slika 15. Prikaz početnog prozora računalnog programa Gala Reinforcement s zadanim uvjetima potrebnih za proračun .....	50
Slika 16. Prikaz prozora računalnog programa Gala Reinforcement s odabranim mjernim jedinicama.....	50
Slika 17. Prikaz prozora s vrijednostima betona u računalnom programu Gala Reinforcement.....	51
Slika 18. Prikaz prozora s vrijednostima čelika u računalnom programu Gala Reinforcement.....	52
Slika 19. Prikaz prozora s presjekom u računalnom programu Gala Reinforcement.....	52
Slika 20. Prikaz prozora s pozicijama armature u računalnom programu Gala Reinforcement.....	53
Slika 21. Prikaz prozora s zadanim opterećenjem u računalnom programu Gala Reinforcement.....	53
Slika 22. Prikaz prozora s rješenjem u računalnom programu Gala Reinforcement .....	54
Slika 23. Prikaz prozora s grafičkim rješenjem u računalnom programu Gala Reinforcement.....	54
Slika 24. Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile .....	57
Slika 25. Raspodjela spona .....	66
Slika 26. Prikaz dijelova presjeka u kojima se proračunava naprezanje u betonu za određeni trenutak.....	69
Slika 27. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm0 + GI$ " ) .....	72
Slika 28. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm0 + GI$ " .....	72
Slika 29. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm\infty + GI + GII$ ").....	73

Slika 30. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII$ ") .....	73
Slika 31. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub dobetonirane ploče te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ") .....	74
Slika 32. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub dobetonirane ploče te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ").....	74
Slika 33. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ").....	75
Slika 34. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ") .....	75
Slika 35. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_0 + GI$ ") .....	80
Slika 36. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_0 + GI$ ") .....	80
Slika 37. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII$ ").....	81
Slika 38. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII$ ") .....	81
Slika 39. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub dobetonirane ploče te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ") .....	82
Slika 40. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub dobetonirane ploče te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ").....	82
Slika 41. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ").....	83
Slika 42. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $Pm_{\infty} + GI + GII + \Delta G + Q$ ") .....	83
Slika 43. Statički sustav armiranobetonske ploče i prikaz opterećenja na ploču .....	85
Slika 44. Prikaz dijagrama poprečnih sila i momenata savijanja .....	91
Slika 45. Prikaz statičke visine armature u donjoj zoni ploče .....	93
Slika 46. Prikaz statičke visine armature u gornjoj zoni ploče.....	93

Slika 47. Prikaz veličina potrebnih za proračun umanjene poprečne sile..... 97

## 1. UVOD

Cilj ovog diplomskog rada je dimenzioniranje spregnutog prednapetog nosača za poslovno–proizvodnu halu. Čitateljima će biti opisan beton kao građevinski materijal, prednapinjanje i spregnuti prednapeti betonski nosač. Također će biti predstavljene osnovne formule i koraci potrebni za uspješno projektiranje prednapetih spregnutih predgotovljenih elemenata, kao i armiranobetonske ploče.

Ovaj rad obuhvaća proračun nosivosti te analizu svih ključnih faktora prema važećim normama i nacionalnim dodacima, čime se omogućuje bolje razumijevanje ovakvih konstrukcija u građevinskoj praksi. Koristi se statički proračun i analiza opterećenja, uključujući stalna te promjenjiva opterećenja kao što su težina konstrukcija i snijeg. Za proračun je korišten računalni program Mathcad koji je omogućio precizan proračun i analizu.

Rad je podijeljen u deset glavnih poglavlja. Nakon prvog, uvodnog poglavlja, slijedi drugo poglavlje koje se odnosi na tehnički opis. U njemu su navedeni opis konstrukcije, dimenzije poslovno–proizvodne hale, karakteristike elemenata i svojstva materijala. Treće poglavlje je podijeljeno na sedam manjih potpoglavlja. U prvom potpoglavljju opisani su prednapeti i spregnuti elementi. U drugom potpoglavljju izračunate su geometrijske karakteristike presjeka za prednapeti i spregnuti prednapeti presjek. U trećem potpoglavljju provedena je analiza opterećenja i kombinacija djelovanja, nakon čega je određena vrijednost momenta savijanja u sredini raspona. Četvrto potpoglavljje sadrži proračun strelice parabole natege i potrebne površine kablova, čime je određen potreban broj užadi. Peto potpoglavljje obuhvaća proračun svih gubitaka sile prednapinjanja, kao što su gubici zbog elastične deformacije, trenja, prokliznuća klina te vremenski gubici. Također, određene su deformacije skupljanja i puzanja betona. U šestom potpoglavljju provjerava se granično stanje nosivosti. Savijanje s uzdužnom provjereno je uz pomoć računalnog programa Gala Reinforcement, dok je „ručno“ provjerena nosivost na poprečnu silu i posmik na spojnoj površini betona izvedenih u različito vrijeme, nakon čega je odabrana potrebna armatura.

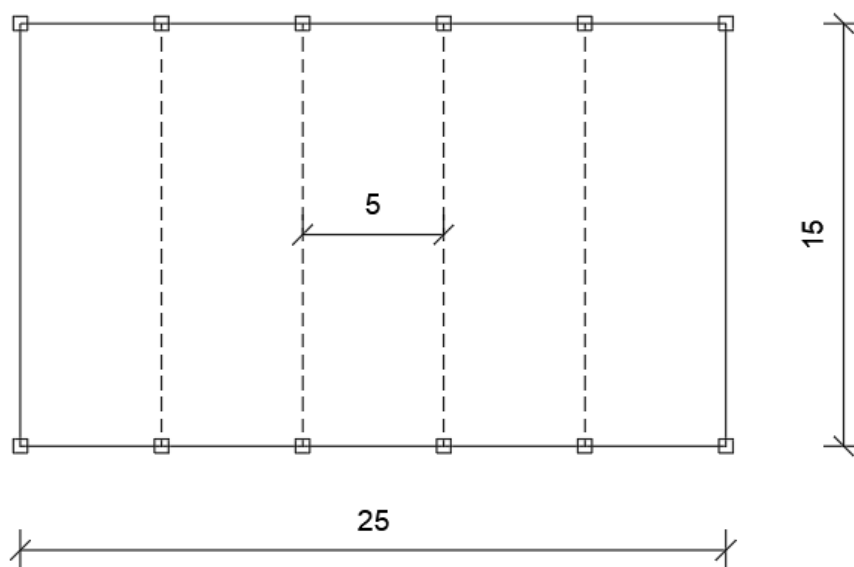
Granično stanje uporabljivosti provjereno je u sedmom potpoglavlju. Provedena je provjera ograničenja naprezanja za karakterističnu i nazovistalnu kombinaciju. Četvrto poglavlje obuhvaća proračun armiranobetonske ploče koje je podijeljeno na četiri manja potpoglavlja. U prvom potpoglavlju provedena je analiza opterećenja i proračun reznih sila, dok je proračun statičke visine obrađen u drugom potpoglavlju. Treće i četvrto potpoglavlje sadrže proračun momenta savijanja i poprečne sile te odabir armature. U petom i šestom poglavlju određene su duljine sidrenja, prijeklopi i razmak šipki u armiranobetonskoj ploči i spregnutom prednapetom nosaču. Iskaz armature armiranobetonske ploče i jednog spregnutog prednapetog nosača je prikazan u sedmom poglavlju. Zaključak diplomskog rada iznosi se u osmom poglavlju, dok su literatura i grafički prilozi prikazani na kraju rada.

## 2. TEHNIČKI OPIS

### 2.1 Općenito

Predviđa se gradnja poslovno–proizvodne hale sastavljena od prednapetih betonskih predgotovljenih elemenata i stupova. Geografski položaj promatranog objekta je III. snježna zona (kontinentalna Hrvatska) te nadmorske visine od 160,00 m.n.m [1].

Osne dimenzije montažne hale su 25 m x 15 m, a ukupna visina iznosi oko 9,57 m. Ploština prizemlja iznosi oko 375 m<sup>2</sup>.



Slika 1. Prikaz osnog tlocrta

### 2.2 Konstrukcijski sustav

Glavni nosači su predgotovljene slobodno oslonjene „T“ grede raspona 15 m i visine 110 cm, te su postavljeni na rasteru od 5 m (I.faza). Na grede se izvodi in-situ armiranobetonska ploča debljine 15 cm (II.faza). Armiranobetonska ploča je kontinuirani nosač preko 5 polja. Nosači i ploča su izvedeni od betona C30/37 te su armirani armaturom B500A. Nosači se naknadno prednapinju prednapetom armaturom



1640/1860. Prednapinjanje se izvodi uz sprezanje ostvareno naknadnim injektiranjem cementnog morta.

Krovna konstrukcija je izvedena kao ravni neprohodni krov.

Stupovi su konzole predviđenog kvadratnog poprečnog presjeka 50/50 cm.

Dimenzioniranje stupova nije tema diplomskog rada.

Temelji su predviđeni kao temelji samci koji se sastoje od čašice i stope kvadratnog oblika.

Također, dimenzioniranje temelja nije tema diplomskog rada.

## **2.3 Materijali**

### **2.3.1 Beton 30/37**

$f_{ck}$  – karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana

$f_{cm}$  – srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka

$f_{ctm}$  – srednja osna vlačna čvrstoća betona

$E_{cm}$  – modul elastičnosti betona

za C30/37 →  $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$

$f_{cm} = 38 \text{ N/mm}^2$

$f_{ctm} = 2,9 \text{ N/mm}^2$

$E_{cm} = 33\,000 \text{ N/mm}^2$

Proračunska tlačna čvrstoća:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 1 \cdot \frac{30}{1,5}$$

$$f_{cd} = 20 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je:

$\alpha_{cc}$  – koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj dugotrajnog opterećenja na tlačnu čvrstoću betona i ostali nepovoljni utjecaji

$\gamma_c$  – parcijalni koeficijent za beton

### **2.3.2 Čelik za armiranje B500A**

$f_{yk}$  – karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje

$E_s$  – modul elastičnosti čelika za armiranje

- razred duktilnosti A, obična duktilnost

za B500A →  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$

$$E_{cm} = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

Proračunska granica popuštanja:

$$f_{yd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_s}$$

$$f_{yd} = 1 \cdot \frac{500}{1,15}$$

$$f_{yd} = 434,8 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je:

$\gamma_s$  – parcijalni koeficijent za čelik za armiranje

### **2.3.3 Čelik za prednapinjanje 1640/1860**

$f_{p0,1k}$  – karakteristično naprežanje čelika pri 0,1 % - tnoj zaostaloj deformaciji

$f_{pk}$  – karakteristična vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje

$E_p$  – modul elastičnosti čelika za prednapinjanje

za 1640/1860 →  $f_{p0,1k} = 1640 \text{ N/mm}^2$

$f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$

$E_p = 195\,000 \text{ N/mm}^2$

- jedan kabel ima 7 užadi (jedno uže je površine  $1,5 \text{ cm}^2$ , cijev promjera  $\phi 6,5 \text{ cm}$ )

### **3. SPREGNUTI PREDNAPETI NOSAČ**

#### **3.1 Općenito**

Kako bi se pravilno opisao spregnuti prednapeti betonski nosač, važno je poznavati materijalne karakteristike betona. Beton je jedan od najvažnijih građevinskih materijala zbog svoje velike tlačne čvrstoće, otpornosti na vlagu, vatru i dugotrajnosti. Međutim, jedan od nedostataka betona je mala vlačna čvrstoća. Zbog temperaturnih razlika, skupljanja betona i djelovanja vanjskog opterećenja dolazi do naprezanja koja mogu dosegnuti vlačnu čvrstoću, što rezultira do pojave pukotina. Iako se beton u pravilu kombinira s armaturom kako bi se povećala njegova otpornost na vlačna naprezanja, armirani beton i dalje pokazuje nedostatak, posebno prilikom skupljanja i puzanja. Kako bi se riješio problem male vlačne čvrstoće betona, uvedeno je prednapinjanje. Prednapinjanje se temelji na tome da se na umjetni način, prije pojave vanjskog opterećenja, stvori stanje naprezanja u kojem će cijeli betonski presjek sudjelovati u preuzimanju naprezanja. Na temelju te ideje razvijena je tehnika punog prednapinjanja koja unaprijed stvara tlačna naprezanja u betonu kako bi neutralizirala vlačna naprezanja. Uz to, razvijena je i tehnika djelomičnog prednapinjanja, gdje su vlačna naprezanja dopuštena, ali su ograničena propisima. Prednosti prednapetih elemenata su povećana nosivost, smanjena pojava pukotina, manji progib, manja vlastita težina i mogućnost izgradnje konstrukcija većih raspona [2].

Spregnuti nosači predstavljaju kombinaciju dvaju različitih materijala. U ovom slučaju, radi se o predgotovljenom prednapetom betonskom nosaču i armiranobetonskoj ploči koja se naknadno izvodi na gradilištu (in-situ). Predgotovljeni element dizajniran je da nosi vlastitu težinu i težinu svježeg betona ploče izvedene na gradilištu. Nakon stvrdnjavanja betona u ploči, nosač i ploča djeluju kao jedinstvena cjelina, odnosno spregnuti element. Spregnuto djelovanje između nosača i ploče postiže se grubom obradom površine predgotovljenog prednapetog elementa ili pomoću spona koje strše iz njega. Prednosti korištenja spregnute konstrukcije uključuju strogu kontrolu kvalitete

proizvodnje predgotovljenog elementa. Predgotovljeni element također služi kao trajna oplata za armiranobetonsku ploču, što dovodi do smanjenja troškova. Izgradnja spregnutih konstrukcija je brža zbog montažnog načina izgradnje. Korištenjem laganog betona u ploči smanjuje se ukupna vlastita težina konstrukcije. Zahvaljujući spregnutom djelovanju, moguće je smanjiti dimenzije predgotovljenih elemenata. Važna karakteristika korištenja spregnutih prednapetih betonskih elemenata jest to što ploča preuzima tlačne sile, dok predgotovljeni prednapeti element preuzima vlačne sile [3] [4].

Pri projektiranju spregnutih prednapetih nosača potrebno je provjeriti naprezanja u različitim fazama kako bi se osigurala sigurnost i funkcionalnost konstrukcije. U radu su provjerena tri trenutka.

„Trenutak 1“ je faza kada se ugrađuje predgotovljeni prednapeti element, tj. postavljanje nosača na stup. U ovoj fazi potrebno je izračunati naprezanje koje se stvara u nosaču zbog sile prednapinjanja nakon početnih gubitaka i vlastite težine nosača. Naprezanje se izračunava prema formulama [3]:

za gornji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_a = \frac{P_0}{A_{pc}} - \frac{P_0 \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} + \frac{M_{pc}}{Z_{a,p}}$$

za donji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_b = \frac{P_0}{A_{pc}} + \frac{P_0 \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} - \frac{M_{pc}}{Z_{a,p}}$$

U „trenutku 2“ potrebno je izračunati naprezanje koje se stvara zbog sile prednapinjanja nakon svih gubitaka (nakon beskonačno godina), vlastite težine nosača i vlastite težine dobetonirane armiranobetonske ploče. Naprezanje se izračunava prema formulama [3]:

za gornji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_a = \frac{P_e}{A_{pc}} - \frac{P_e \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} + \frac{M_{pc}}{Z_{a,p}}$$

za donji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_b = \frac{P_e}{A_{pc}} + \frac{P_e \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} - \frac{M_{pc}}{Z_{b,p}}$$

U „trenutku 3“ potrebno je izračunati naprezanje koje se stvara zbog sile prednapinjanja nakon svih gubitaka (nakon beskonačno godina), vlastite težine nosača i dobetonirane armiranobetonske ploče, dodatnog stalnog opterećenja (slojevi krova) te pokretnog opterećenja. Naprezanje se izračunava prema formulama [3]:

za gornji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_a = \frac{P_e}{A_{pc}} - \frac{P_e \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} + \frac{(M_{pc} + M_{CI})}{Z_{a,p}} + \frac{(M_{SIDL} + M_{LL})}{Z_{a,t}}$$

za donji rub predgotovljenog elementa:

$$\sigma_b = \frac{P_e}{A_{pc}} + \frac{P_e \cdot e_{s,p}}{Z_{a,p}} - \frac{(M_{pc} + M_{CI})}{Z_{b,p}} - \frac{(M_{SIDL} + M_{LL})}{Z_{b,t}}$$

za gornji rub armiranobetonske ploče:

$$\sigma_c = m_c \cdot \frac{(M_{SIDL} + M_{LL})}{Z_{c,t}}$$

za donji rub armiranobetonske ploče:

$$\sigma_d = m_c \cdot \frac{(M_{SIDL} + M_{LL})}{Z_{d,t}}$$

Gdje je:

$P_0$  – sila prednapinjanja nakon početnih gubitaka

$A_{pc}$  – ukupna površina prednapetog poprečnog presjeka

$e_{s,p}$  – ekscentricitet

$Z_{a,p}$  – moment otpora gornjeg dijela presjeka (predgotovljeni element)

$M_{pc}$  – moment savijanja u sredini raspona zbog vlastite težine predgotovljenog nosača

$P_e$  – sila prednapinjanja nakon svih gubitaka

$Z_{b,p}$  – moment otpora donjeg dijela presjeka (predgotovljeni element)

$M_{CI}$  – moment savijanja u sredini raspona zbog vlastite težine dobetonirane ploče

$M_{SIDL}$  – moment savijanja u sredini raspona zbog stalnog opterećenja

$M_{LL}$  – moment savijanja u sredini raspona zbog promjenjivog opterećenja

$m_c$  – omjer modula elastičnosti

$Z_{a,t} = Z_{d,t}$  – moment otpora na mjestu spoja prednapetog presjeka i dobetonirane ploče

$Z_{b,t}$  – moment otpora donjeg dijela presjeka (kompozitni)

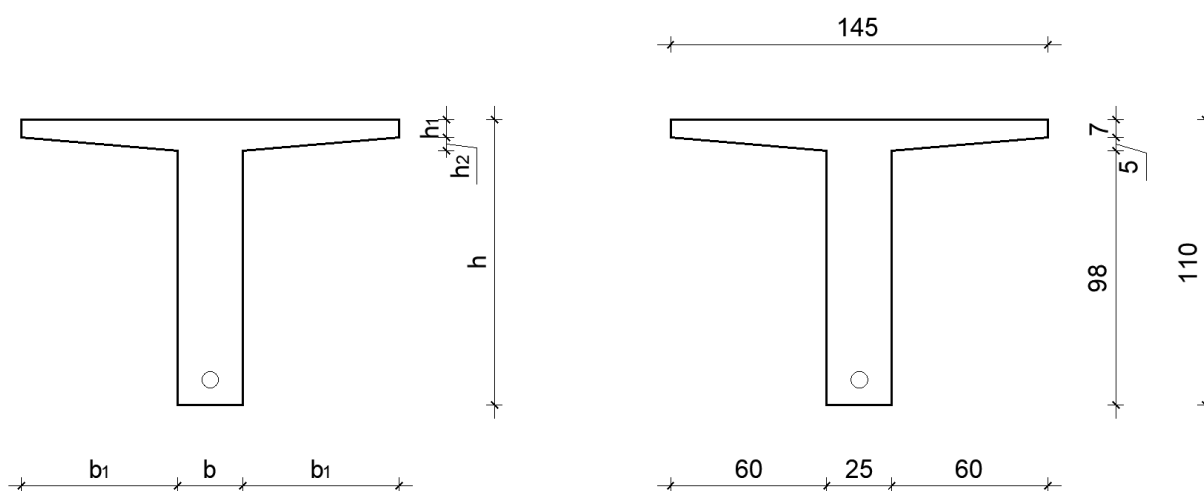
$Z_{c,t}$  – moment otpora gornjeg dijela presjeka (kompozitni)

Važno je napomenuti da su gore navedene formule u nastavku rada prilagođene prema oznakama i specifičnostima korištenima u ovom radu.

## 3.2 Geometrijske karakteristike presjeka

Poprečni presjek je predgotovljeni element izabran iz kataloga [5]. Sve dimenzije su unaprijed određene katalogom, a usvojena visina dobetonirane armiranobetonske ploče iznosi 15 cm.

### 3.2.1 Prednapeti presjek



Slika 2. Prikaz presjeka prednapetog poprečnog nosača (I.faza)

Površina poprečnog presjeka dobivena je zbrojem površina segmenata poprečnog presjeka:

$$A_1 = b \cdot h$$

$$A_1 = 25 \cdot 110$$

$$A_1 = 0,275 \text{ m}^2$$

$$A_2 = b_1 \cdot h_1$$

$$A_2 = 60 \cdot 7$$

$$A_2 = 0,042 \text{ m}^2$$



$$A_3 = \frac{1}{2}(b_1 \cdot h_2)$$

$$A_3 = \frac{1}{2}(60 \cdot 5)$$

$$A_3 = 0,015 \text{ m}^2$$

$$A_{C,I} = A_1 + 2 \cdot (A_2 + A_3)$$

$$A_{C,I} = 0,275 + 2 \cdot (0,042 + 0,015)$$

$$A_{C,I} = 0,389 \text{ m}^2$$

Gdje je:

$A_1, A_2, A_3$  – površine segmenata poprečnog presjeka

$A_{C,I}$  – ukupna površina prednapetog poprečnog presjeka (I faza)

Udaljenosti između težišta betona i donjeg/gornjeg ruba:

$$z_1 = \frac{h}{2}$$

$$z_1 = \frac{110}{2}$$

$$z_1 = 0,55 \text{ m}$$

$$z_2 = h - \frac{h_1}{2}$$

$$z_2 = 110 - \frac{7}{2}$$

$$z_2 = 1,065 \text{ m}$$

$$z_3 = h - h_1 - \frac{h_2}{3}$$

$$z_3 = 110 - 7 - \frac{5}{3}$$

$$z_3 = 1,013333 \text{ m}$$

$$z_{d,I} = \frac{A_1 \cdot z_1 + 2 \cdot (A_2 \cdot z_2 + A_3 \cdot z_3)}{A_{C,I}}$$

$$z_{d,I} = \frac{0,275 \cdot 0,55 + 2 \cdot (0,042 \cdot 1,065 + 0,015 \cdot 1,013333)}{0,389}$$

$$z_{d,I} = 0,696941 \text{ m}$$

$$z_{g,I} = h - z_{d,I}$$

$$z_{g,I} = 1,10 - 0,696941$$

$$z_{g,I} = 0,403059 \text{ m}$$

Gdje je:

$z_1, z_2, z_3$  – udaljenosti težišta segmenata od donjeg ruba

$z_{d,I}$  – udaljenost od težišta do donjeg ruba presjeka

$z_{g,I}$  – udaljenost od težišta do gornjeg ruba presjeka

Moment tromosti i moment otpora poprečnog presjeka:

$$I_{C,I} = \left[ \frac{b \cdot h^3}{12} + A_1 \cdot (z_{d,I} - z_1)^2 \right] + 2 \cdot \left[ \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + A_2 \cdot (z_{d,I} - z_2)^2 \right] + 2 \cdot \left[ \frac{b_1 \cdot h_2^3}{36} + A_3 \cdot (z_{d,I} - z_3)^2 \right]$$

$$I_{C,I} = \left[ \frac{0,25 \cdot 1,10^3}{12} + 0,275 \cdot (0,696941 - 0,55)^2 \right] + 2 \cdot \left[ \frac{0,60 \cdot 0,07^3}{12} + 0,042 \cdot (0,696941 - 1,065)^2 \right] + 2 \cdot \left[ \frac{0,60 \cdot 0,05^3}{36} + 0,015 \cdot (0,696941 - 1,013333)^2 \right]$$

$$I_{C,I} = 0,048088 \text{ m}^4$$

$$W_{g,I} = \frac{I_{C,I}}{z_{g,I}}$$

$$W_{g,I} = \frac{0,048088}{0,403059}$$

$$W_{g,I} = 0,119307 \text{ m}^3$$

$$W_{d,I} = \frac{I_{C,I}}{z_{d,I}}$$

$$W_{d,I} = \frac{0,048088}{0,696941}$$

$$W_{d,I} = 0,068998 \text{ m}^3$$

Gdje je:

$I_{c,I}$  – moment tromosti poprečnog presjeka

$W_{g,I}$  – moment otpora gornjeg dijela presjeka

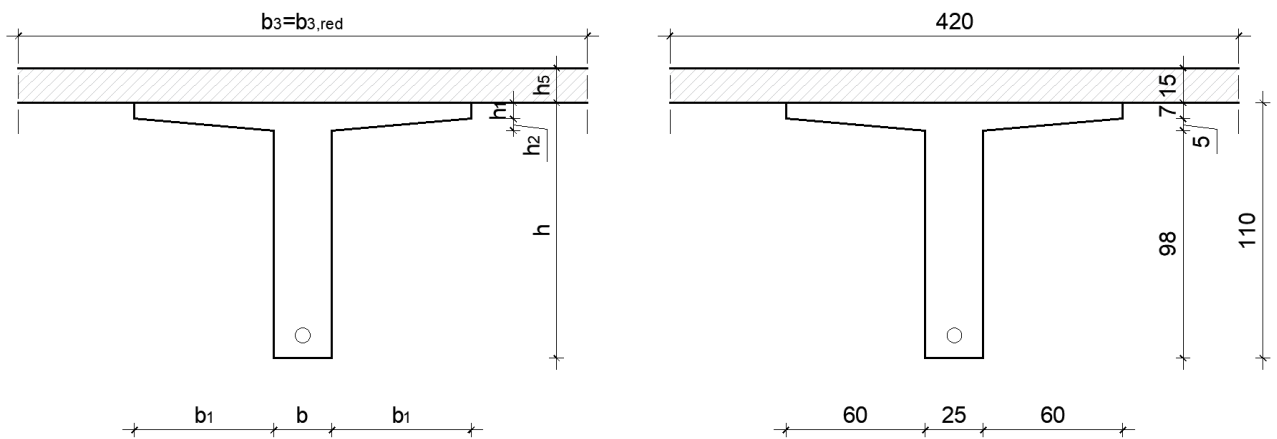
$W_{d,I}$  – moment otpora donjeg dijela presjeka

Tablica 1 prikazuje konačne vrijednosti geometrijskih karakteristika prednapetog presjeka (I.faza):

*Tablica 1. Geometrijske karakteristike prednapetog presjeka (I.faza)*

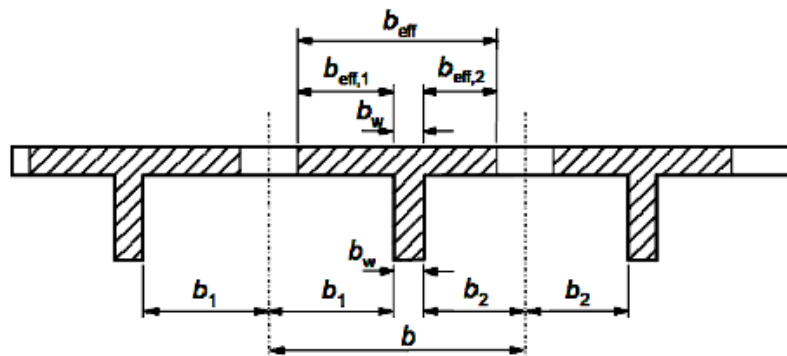
$A_{c,I}$	0,389 m <sup>2</sup>
$z_{g,I}$	0,403059 m
$z_{d,I}$	0,696941 m
$I_{c,I}$	0,048088 m <sup>4</sup>
$W_{g,I}$	0,119304 m <sup>3</sup>
$W_{d,I}$	0,068998 m <sup>3</sup>

### 3.2.2 Spregnuti prednapeti presjek



Slika 3. Prikaz presjeka spregnutog prednapetog nosača (II.faza)

Slika 4. prikazuje proračun sudjelujuće širine:



Slika 4. Sudjelujuća širina T-presjeka [6]

$$b = 5 \text{ m}$$

$$b_w = 25 \text{ cm}$$

$$b_1 = \frac{b - b_w}{2}$$

$$b_1 = \frac{5 - 0,25}{2}$$

$$b_1 = 2.375 \text{ m}$$

$$l_0 = l = 15 \text{ m}$$

$$b_{eff,11} = 0,2 \cdot b_1 + 0,1 \cdot l_0$$

$$b_{eff,11} = 0,2 \cdot 2,375 + 0,1 \cdot 15$$

$$b_{eff,11} = 1.975 \text{ m}$$

$$b_{eff,12} = 0,2 \cdot l_0$$

$$b_{eff,12} = 0,2 \cdot 15$$

$$b_{eff,12} = 3 \text{ m}$$

$$b_{eff,1} = \min(b_{eff,11}; b_{eff,12})$$

$$b_{eff,1} = \min(1.975; 3)$$

$$b_{eff,1} = 1,975 \text{ m}$$

$$b_{eff} = b_w + 2 \cdot b_{eff,1}$$

$$b_{eff} = 0,25 + 2 \cdot 1,975$$

$$b_{eff} = 4,2 \text{ m}$$

Uz uvjet da je  $b_{eff} \leq b \rightarrow 4,2 \text{ m} \leq 5 \text{ m}$

Gdje je:

$b$  – raspon

$b_w$  – širina hrpta

$b_1$  – polovica svijetlog razmaka rebara

$l_0=l$  – razmak nul-točaka momentnog dijagrama

$b_{eff}$  – sudjelujuća širina ploče

Sudjelujuća širina  $b_{eff}$  jednaka je reduciranoj širini  $b_{3,red}$  zbog jednakih modula elastičnosti betona prednapetog presjeka i dobetonirane ploče:

$$m_c = \frac{E_{II}}{E_I}$$

$$m_c = \frac{33}{33}$$

$$m_c = 1$$

$$b_{3,red} = m_c \cdot b_{eff}$$

$$b_{3,red} = 1 \cdot 4,2$$

$$b_{3,red} = 4,2 \text{ m} = b_{eff}$$

Gdje je:

$m_c$  – omjer modula elastičnosti

$E_{II}$  – modul elastičnosti dobetonirane ploče

$E_I$  – modul elastičnosti prednapetog presjeka

$b_{3,red}$  – reducirana širina

Površina spregnutog prednapetog poprečnog presjeka dobivena je zbrojem površine prednapetog presjeka (I. faza) i površine dobetonirane ploče (II faza):

$$A_6 = b_{3,red} \cdot h_5$$

$$A_6 = 4,2 \cdot 0,15$$

$$A_6 = 0,63 \text{ m}^2$$

$$A_{c,II} = A_6$$

$$A_{c,II} = 0,63 \text{ m}^2$$

$$A_{c,kom} = A_{c,I} + A_{c,II}$$

$$A_{c,kom} = 0,389 + 0,63$$

$$A_{c,kom} = 1,019 \text{ m}^2$$

Gdje je:

$A_{c,I}$  – površina prednapetog poprečnog presjeka (I. faza)

$A_{c,II}$  – površina dobetonirane ploče (II. faza)

$A_{c,kom}$  – ukupna površina spregnutog prednapetog poprečnog presjeka

Udaljenosti između težišta betona i donjeg/gornjeg ruba:

$$z_6 = h + \frac{h_5}{2}$$

$$z_6 = 110 + \frac{15}{2}$$

$$z_6 = 1,175 \text{ m}$$

$$z_{d,kom} = \frac{A_{c,I} \cdot z_{d,I} + A_{c,II} \cdot z_6}{A_{c,kom}}$$

$$z_{d,I} = \frac{0,389 \cdot 0,696941 + 0,63 \cdot 1,175}{1,019}$$

$$z_{d,kom} = 0,992502 \text{ m}$$

$$z_{g,kom} = (h + h_5) - z_{d,kom}$$

$$z_{g,kom} = (1,10 + 0,15) - 0,992502$$

$$z_{g,kom} = 0,257498 \text{ m}$$

Gdje je:

$z_6$  – udaljenosti težišta dobetonirane ploče od donjeg ruba

$z_{d,kom}$  – udaljenost od težišta do donjeg ruba presjeka

$z_{g,kom}$  – udaljenost od težišta do gornjeg ruba presjeka

Moment tromosti i moment otpora poprečnog presjeka:

$$I_{C,kom} = \left[ I_{C,I} + A_{c,I} \cdot (z_{d,kom} - z_{d,I})^2 \right] + \left[ \frac{b_{3,red} \cdot h_5^3}{12} + A_6 \cdot (z_{d,kom} - z_6)^2 \right]$$

$$I_{C,kom} = [0,048088 + 0,389 \cdot (0,992502 - 0,696941)^2] + \left[ \frac{4,2 \cdot 0,15^3}{12} + 0,63 \cdot (0,992502 - 1,175)^2 \right]$$

$$I_{C,kom} = 0,10423309 \text{ m}^4$$

$$W_{g,kom} = \frac{I_{C,kom}}{z_{g,kom}}$$

$$W_{g,kom} = \frac{0,10423309}{0,257498}$$

$$W_{g,kom} = 0,404793 \text{ m}^3$$

$$W_{d,kom} = \frac{I_{C,kom}}{z_{d,kom}}$$

$$W_{d,kom} = \frac{0,10423309}{0,992502}$$

$$W_{d,kom} = 0,10502 \text{ m}^3$$

$$W_{spoj,kom} = \frac{I_{C,kom}}{(z_{g,kom} - h_5)}$$

$$W_{spoj,kom} = \frac{0,10423309}{(0,257498 - 0,15)}$$

$$W_{spoj,kom} = 0,969632 \text{ m}^3$$

Gdje je:

$I_{c,kom}$  – moment tromosti spregnutog prednapetog poprečnog presjeka

$W_{g,kom}$  – moment otpora gornjeg dijela presjeka

$W_{d,kom}$  – moment otpora donjeg dijela presjeka



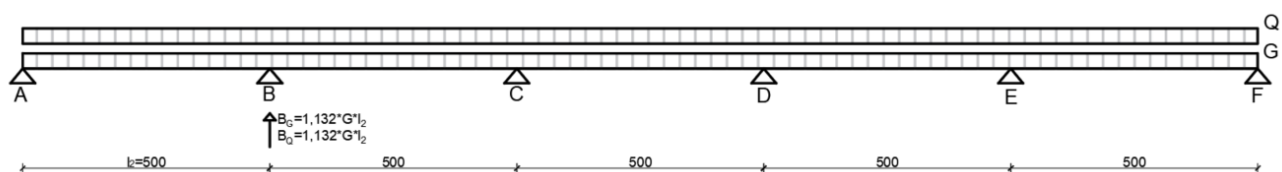
$W_{\text{spoj, kom}}$  – moment otpora na mjestu spoja prednapetog presjeka (I.faza) i dobetonirane ploče (II.faza)

Tablica 2. prikazuje konačne vrijednosti geometrijskih karakteristika spregnutog prednapetog presjeka:

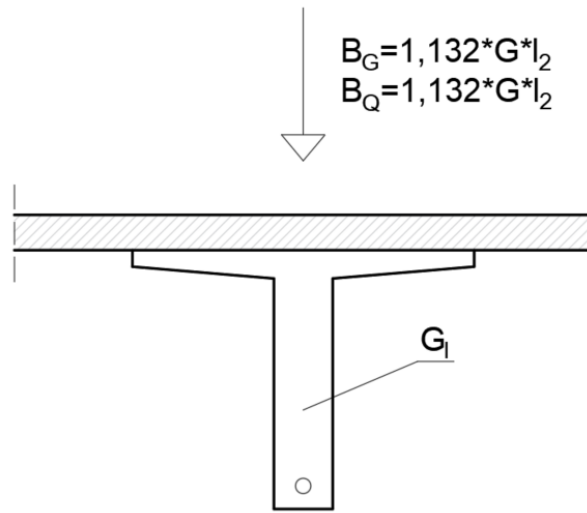
Tablica 2. Geometrijske karakteristike spregnutog prednapetog presjeka (II.faza)

$A_{c, \text{kom}}$	1,019 m <sup>2</sup>
$Z_{g, \text{kom}}$	0,992502 m
$Z_{d, \text{kom}}$	0,257498 m
$I_{c, \text{kom}}$	0,10423309 m <sup>4</sup>
$W_{g, \text{kom}}$	0,404793 m <sup>3</sup>
$W_{d, \text{kom}}$	0,10502 m <sup>3</sup>
$W_{\text{spoj, kom}}$	0,969632 m <sup>3</sup>

### 3.3 Analiza opterećenja i kombinacije djelovanja



Slika 5. Statički sustav i prikaz opterećenja na ploču



Slika 6. Prikaz opterećenja na nosač

### 3.3.1 Stalno djelovanje

Vlastita težina nosača (I.faza):

$$G_I = A_{c,I} \cdot \gamma_B$$

$$G_I = 0,389 \cdot 25$$

$$G_I = 9,725 \text{ kN/m}$$

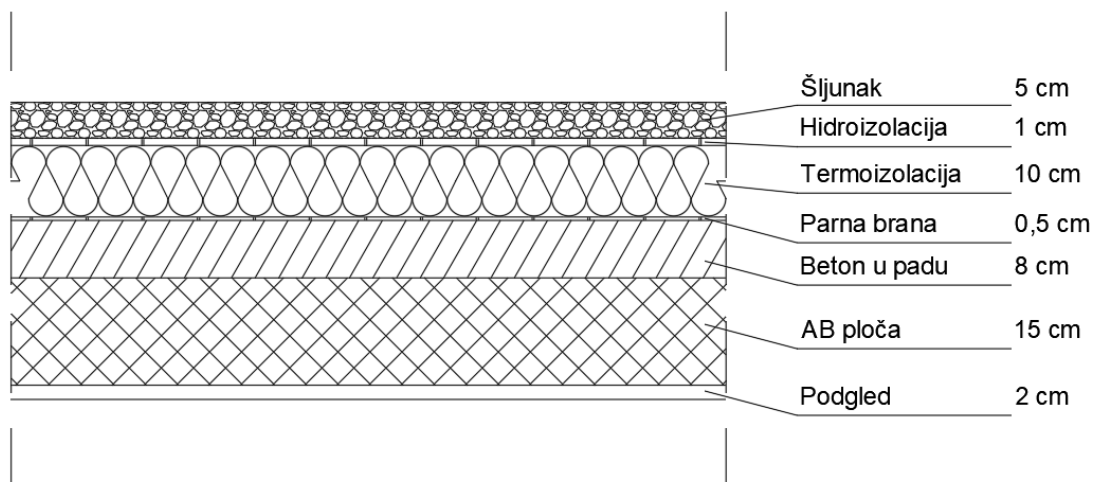
Gdje je:

$\gamma_B$ - zapreminska masa betona

Vlastita težina ploče (II.faza):

$$G_{II} = 0 \rightarrow \text{ploča je na podupiračima}$$

Dodatno stalno (krovnna konstrukcija):



Slika 7. Slojevi neprohodnog krova

Tablica 3. Dodatno stalno opterećenje od krovne konstrukcije

MATERIJAL	h [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$h \cdot \gamma$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Šljunak	0,05	18	0,9
Hidroizolacija + parna brana	0,015	20	0,3
Termoizolacija	0,1	0,4	0,04
Beton u padu	0,08	21	1,68
AB ploča	0,15	25	3,75
Podgled	0,02	19	0,38
UKUPNO			$\Sigma G = 7,05 \text{ kN/m}^2$

Reakcija  $B_G$  u osloncu B ploče iznosi:

$$B_G = 1,132 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$B_G = 1,132 \cdot 7,05 \cdot 5$$

$$B_G = 39,903 \text{ kN/m}$$

$$B_G = \Delta G = 39,903 \text{ kN/m}$$

### 3.3.2 Promjenjivo djelovanje – snijeg

Opterećenje snijegom određuje se izrazom:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Gdje je:

$s_k$  – karakteristična vrijednost opterećenja od snijega na tlo (kN/m<sup>2</sup>)

$\mu_i$  – koeficijent oblika opterećenja snijegom (učinak oblika krova)

$C_e$  – koeficijent izloženosti

$C_t$  – toplinski koeficijent

Geografski položaj promatranog objekta: III. snježna zona (kontinentalna Hrvatska),  
nadmorska visina  $H \leq 200,00$  m.n.m. [1]  $\rightarrow s_k = 1,25$  kN/m<sup>2</sup>

$$\mu_i = 0,8 \text{ (ravni krov, } \alpha < 30^\circ \text{)}$$

$$C_e = 1,00$$

$$C_t = 1,00$$

Opterećenje snijegom iznosi:

- I. slučaj (simetrično opterećenje)  $\rightarrow$  MJERODAVNO

$$s_I = 0,8 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,25$$

$$s_I = 1 \text{ kN/m}^2$$

- II. slučaj (nesimetrično opterećenje)

$$s_{1,II} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,25$$

$$s_{1,II} = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{2,II} = 0,8 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,25$$

$$s_{2,II} = 1 \text{ kN/m}^2$$

Reakcija  $B_Q$  u osloncu B ploče iznosi:

$$B_Q = 1,132 \cdot s_I \cdot l_2$$

$$B_Q = 1,132 \cdot 1 \cdot 5$$

$$B_Q = 5,66 \text{ kN/m}$$

$$B_Q = Q = 5,66 \text{ kN/m}$$

### **3.3.3 Momenti savijanja na sredini raspona**

Moment savijanja od vlastite težine nosača iznosi:

$$M_{G_I} = \frac{G_I \cdot l^2}{8}$$

$$M_{G_I} = \frac{9,725 \cdot 15^2}{8}$$

$$M_{G_I} = 273,52 \text{ kNm}$$

Moment savijanja od vlastite težine ploče iznosi:

$$M_{G_{II}} = \frac{G_{II} \cdot l^2}{8}$$

$$M_{G_{II}} = \frac{0 \cdot 15^2}{8}$$

$$M_{G_{II}} = 0 \text{ kNm}$$

Moment savijanja od dodatnog stalnog opterećenja iznosi:

$$M_{\Delta G} = \frac{\Delta G \cdot l^2}{8}$$

$$M_{\Delta G} = \frac{39,903 \cdot 15^2}{8}$$

$$M_{\Delta G} = 1122,27 \text{ kNm}$$

Moment savijanja od promjenjivog opterećenja iznosi:

$$M_Q = \frac{Q \cdot l^2}{8}$$

$$M_Q = \frac{5,66 \cdot 15^2}{8}$$

$$M_Q = 159,19 \text{ kNm}$$

### 3.3.4 Kombinacije djelovanja

Tablica 4. prikazuje koeficijente kombinacije za proračun:

Tablica 4. Koeficijenti kombinacije za određenu kombinaciju djelovanja

Kombinacije djelovanja	Koeficijenti kombinacije za opterećenje snijegom
Karakteristična	$\psi_{0,1}=0,50$
Česta	$\psi_{1,1}=0,20$
Nazovistalna	$\psi_{2,1}=0$

Karakteristična kombinacija:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + \sum_{j \geq 1} \psi_{0,1} Q_{k,i} \rightarrow \text{MJERODAVNO}$$

Gdje je:

$G_{k,j}$  – karakteristična vrijednost stalnog djelovanja  $j$

$P$  – odgovarajuća reprezentativna vrijednost prednapinjanja

$Q_{k,1}$  – karakteristična vrijednost prevladavajućega promjenjivog djelovanja 1

$Q_{k,i}$  – karakteristična vrijednost pratećega promjenjivog djelovanja  $i$

Česta kombinacija:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "\psi_{1,1} Q_{k,1}" + "\sum_{i > 1} \psi_{2,1} Q_{k,i}$$

Nazovistalna kombinacija:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "\sum_{i \geq 1} \psi_{2,1} Q_{k,i}$$

### 3.4 Prednapinjanje

Natega se vodi po paraboli, jednačba parabole je dana s:

$$z_{cp,l}(X) = 4 \cdot f \cdot \left( \frac{X}{l_{tot}} - \frac{X^2}{l_{tot}^2} \right)$$

Strelica parabole natege iznosi:

$$f = z_{d,l} - d_{1,p}$$

$$f = 69,694 - 9,75$$

$$f = 59,944 \text{ cm}$$

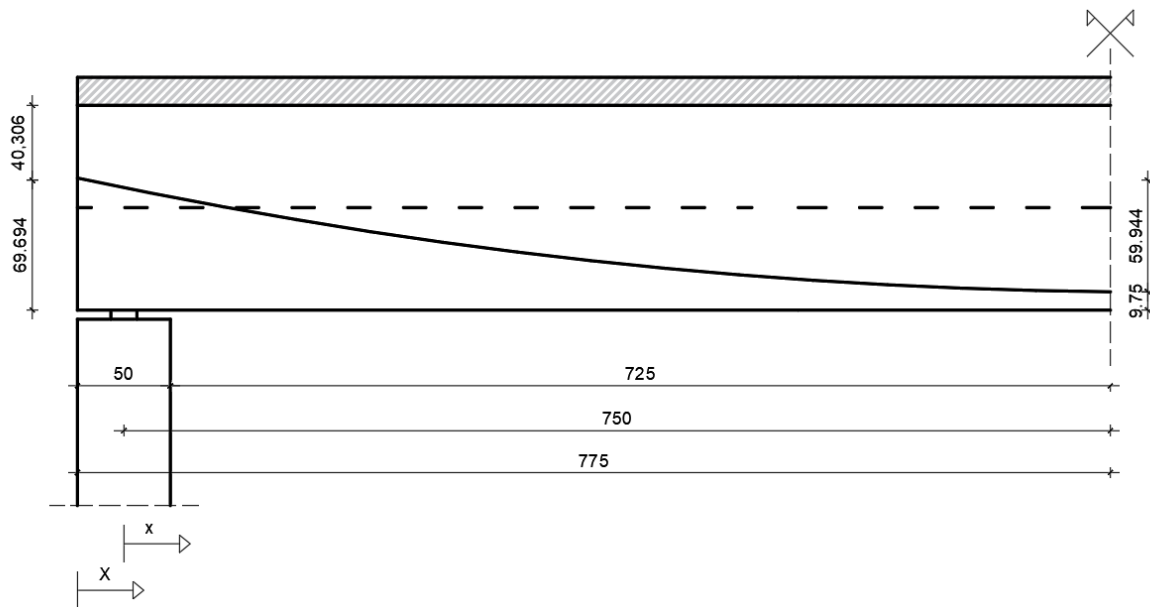
Gdje je:

$f$  – strelica parabole

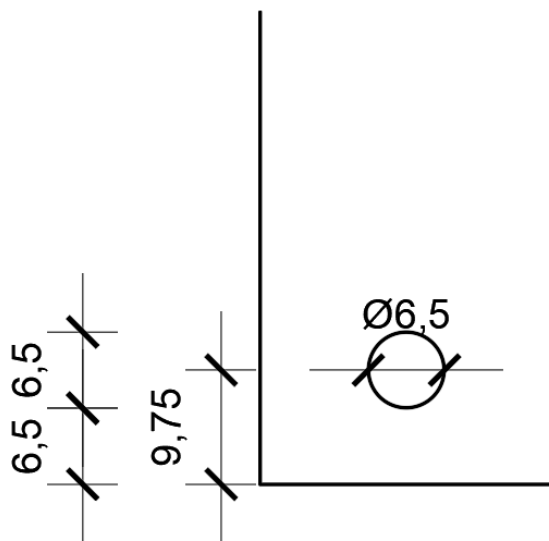
$l_{tot}$  – duljina nosača (15,5 m)

$d_{1,p}$  – udaljenost kabela od donjeg ruba na sredini raspona ( $6,5 + \frac{6,5}{2} = 9,75 \text{ cm}$ )

$X$  – udaljenost od početka nosača



Slika 8. Položaj natege u nosaču



Slika 9. Detalj položaja natege u poprečnom presjeku



### 3.4.1 Sila prednapinjanja nakon svih gubitaka ( $t=\infty$ )

Sila prednapinjanja nakon početnih gubitaka  $P_{m0}$  i sila prednapinjanja nakon svih gubitaka ( $t=\infty$ )  $P_{m\infty}$  su nepoznate. Stoga, pretpostavljeni gubici su 10% za početne gubitke te 15% za vremenske gubitke.

Za određivanje potrebne površine kablova mora se zadovoljiti uvjet da je za karakterističnu kombinaciju srednja osna vlačna čvrstoća betona  $f_{ctm}$  manja od naprezanja na donjem rubu presjeka faze I.  $\sigma_{c,3,I,d}$ , za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ".

Jednadžba za naprezanje na donjem rubu presjeka faze I.  $\sigma_{c,3,I,d}$ , za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ " glasi:

$$\sigma_{c,3,I,d} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{C,I}} - \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} \right] + \left( \frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{d,kom}} \right)$$

$$z_{cp,I} = z_{d,I} - d_{1,p}$$

$$z_{cp,I} = 69,694 - 9,75$$

$$z_{cp,I} = 59,944 \text{ cm}$$

Gdje je:

$z_{cp,I}$  – udaljenost težišta prednapete armature do težišta betonskog presjeka

$x$  – udaljenost od ležaja

Transformacijom jednadžbe naprezanja na donjem rubu presjeka faze I.  $\sigma_{c,3,I,d}$ , za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ " dobije se:

$$P_{m\infty} = \frac{\left[ \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} + \frac{(M_{\Delta G}(x) + M_Q(x))}{W_{d,kom}} - f_{ctm} \right]}{\left( \frac{1}{A_{C,I}} + \frac{z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} \right)}$$

Uvrštavanjem već izračunatih vrijednosti za polovicu raspona  $x = 7,5 \text{ m}$  dobije se:

$$P_{m\infty} = \frac{\left[ \frac{(273,52 + 0)}{0,068998} + \frac{(1122,27 + 159,19)}{0,10502} - 2900 \right]}{\left( \frac{1}{0,389} + \frac{0,59944}{0,068998} \right)}$$

$$P_{m\infty} = 1178,322 \text{ kN}$$

### 3.4.2 Najveća naprezanja u natezi

Najveće naprezanje u natezi (sila na preši):

$$\sigma_{p \text{ max,max}} = \min \begin{cases} k_1 \cdot f_{pk} = 0,8 \cdot 1860 = 1488 \text{ MPa} \\ k_2 \cdot f_{p \text{ 0.1,k}} = 0,9 \cdot 1640 = 1476 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\sigma_{p \text{ max,max}} = 1476 \text{ MPa}$$

Potrebna površina užadi:

$$A_{p,potrebno} = \frac{P_{m\infty}}{\delta \cdot m \cdot \sigma_{p \text{ max,max}}}$$

$$A_{p,potrebno} = \frac{11783,22}{0,9 \cdot 0,85 \cdot 1476}$$

$$A_{p,potrebno} = 10,44 \text{ cm}^2$$

Gdje je:

$\delta$  – početni gubici

$m$  – vremenski gubici

Potrebni broj užadi:

$$\frac{A_{p,potrebno}}{A_{p1}}$$

$$\frac{10,44}{1,5} = 6,96$$

Usvajamo kabel sa 7 užadi.

Gdje je:

$A_{p1}$  – ploština čelika za prednapinjanje jedne užadi

Najveća sila u natezi (sila na preši):

$$P_{max,max} = \sigma_{p\ max,max} \cdot A_P = 147,6 \cdot (7 \cdot 1,5) = 1549,80\ kN$$

Gdje je:

$A_p$  – ploština čelika za prednapinjanje

Napon u čeliku za prednapinjanje smije neposredno nakon napinjanja iznositi:

$$\sigma_{pm0,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_7 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1860 = 1395\ MPa \\ k_8 \cdot f_{p\ 0,1,k} = 0,85 \cdot 1640 = 1394\ MPa \end{array} \right.$$

$$\sigma_{pm0,max} = 1394\ MPa$$

Sila u čeliku za prednapinjanje smije neposredno nakon napinjanja iznositi:

$$P_{m0,max} = \sigma_{pm0,max} \cdot A_P = 139,4 \cdot (7 \cdot 1,5) = 1463,70\ kN$$

### 3.5 Gubici sile prednaprezanja

#### 3.5.1 Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

Natega se prednapinje u presjeku  $X = 0$  m tako da gubici zbog elastičnog skraćanja betona ostaju zanemarivo mali.

$$\Delta P_{el} = 0$$

Gdje je:

$\Delta P_{el}$  – gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

#### 3.5.2 Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

$$\Delta P_{\mu}(X) = P_{max}(1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)}) \rightarrow \frac{\Delta P_{\mu}(X)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)})$$

$$\theta(X) = \frac{8 \cdot X \cdot f}{l_{tot}^2}$$

$$\theta(X) = \frac{8 \cdot f \cdot X}{l_{tot}^2} = \frac{8 \cdot 0,59944 \cdot X}{15,50^2} = 0,01996 \cdot X$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(X)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)}) = 1 - e^{-\mu(0,01996 \cdot X + 0,0055 \cdot X)}$$

Gdje je:

$\Delta P_{\mu}$  – gubitak sile zbog trenja

$\mu = 0,21$  – koeficijent trenja između natege i cijevi

$\theta$  – zbroj kutova skretanja natege na duljini  $x$

$\theta(X)$  – kut skretanja natege

$k = 0,0055 \text{ m}^{-1}$  – neželjeni kut skretanja

Tablica 5 prikazuje gubitke sile prednapinjanja zbog trenja:

Tablica 5. Gubici sile prednapinjanja zbog trenja

X [m]	0	7,75	15,50
$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)})$	0	0,040589	0,079531

### 3.5.3 Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

Prokliznuće klina izaziva smanjenje početne sile prednapinjanja  $P_{max}$  u presjeku gdje se prednapinje za vrijednost  $\Delta P_{sl}$  duž duljine prokliznuća  $l_{sl}$ .

Potrebno je izračunati gubitak sile prednapinjanja  $\Delta P_{sl}$  i duljinu utjecaja prokliznuća klina  $l_{sl}$  kako bi se definiralo prednapinjanje duž natege.

Prema katalogu proizvođača, prokliznuće klina iznosi:

$$\Delta l_{sl} = 3 \text{ mm}$$

Kako bi se spriječilo prekoračenje sile na preši u trenutku  $t_0$ , vrijedi:

$$P_{max} = P_{max,max} = 1549,8 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \left( \frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k \right)}}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{0,003 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 10,5 \cdot 10^{-4}}{1549,8 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \left( \frac{8 \cdot 0,59944}{15,50^2} + 0,0055 \right)}}$$

$$l_{sl} = 8,61 \text{ m}$$

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot P_{max} \cdot \mu \cdot l_{sl} \cdot \left( \frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k \right)$$

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 1549,8 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot 8,61 \cdot \left( \frac{8 \cdot 0,59944}{15,50^2} + 0,0055 \right)$$

$$\Delta P_{sl} = 142,69 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{el} - \Delta P_{\mu}(X) - \Delta P_{sl}$$

$$\Delta P_{el} = 0$$

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{\mu}(X) - \Delta P_{sl}$$

Za X preko duljine djelovanja prokliznuća klina  $l_{sl}$  vrijedi:

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{\mu}(X) = P_{max} - P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)})$$

$$\Delta P_{\mu}(X) = P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)}) \quad X \geq l_{sl}$$

$$\Delta P_{\mu}(X) = 1549,8 \cdot (1 - e^{-\mu(0,01996 \cdot X + 0,0055 \cdot X)}) \quad X \geq 8,61 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 8,61) = 69,73 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 15,50) = 123,26 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(8,61) = 1549,8 - 69,73 = 1480,07 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,50) = 1549,8 - 123,26 = 1426,64 \text{ kN}$$

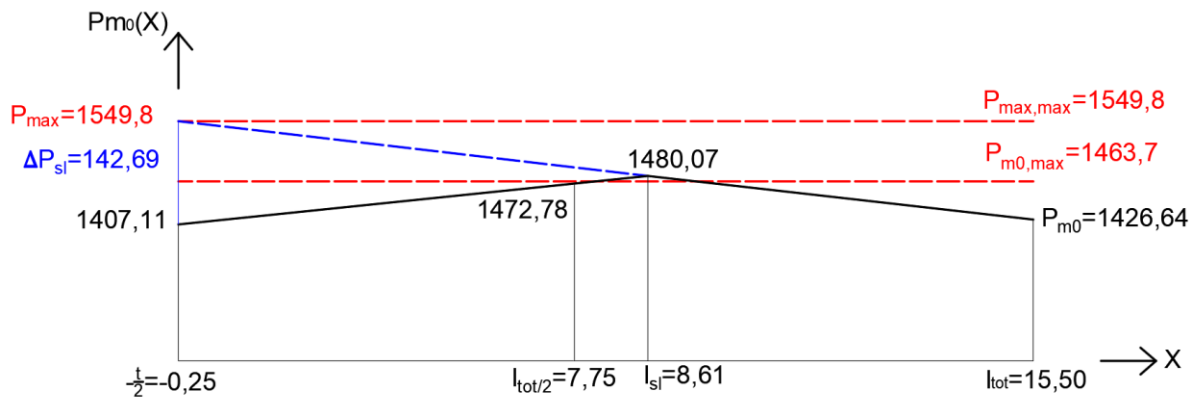
$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 1549,8 - 142,69 = 1407,11 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,75) = 1407,11 + \frac{1480,07 - 1407,11}{8,61} \cdot 7,75 = 1472,78 \text{ kN}$$

$$P_{m_0}(8,61) = 1480,07 \text{ kN} > P_{m_0,max} = 1463,7 \text{ kN} \rightarrow \text{potrebno smanjiti silu na preši}$$

$$\text{Uvjet: } P_{m_0}(X) \leq P_{m_0,max} = 1463,7 \text{ kN}$$

Slika 10. prikazuje dijagram gubitaka prednapinjanja:



Slika 10. Dijagram gubitaka prednapinjanja [ $P_{m_0}(X) > P_{m_0,max}$ ]

Tablica 6. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka [ $P_{m_0}(x) > P_{m_0,max}$ ]

X [m]	0	7,75	8,61	15,50
$P_{m_0}(X)$ [kN]	1407,11	1472,78	1480,07	1426,64

Slika 11. u nastavku prikazuje izrezak iz programa Mathcad pomoću kojeg je problem [ $P_{m_0}(X) > P_{m_0,max}$ ] riješen.

$$\begin{aligned} \Delta l_{s1} &:= 3 \cdot \text{mm} \\ E_p &:= 195000 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa} \\ A_p &:= 10.5 \cdot \text{cm}^2 && \text{- ulazni podaci} \\ \mu &:= 0.21 \\ k &:= 0.0055 \cdot \text{m}^{-1} \\ l_{\text{tot}} &:= 15.5 \cdot \text{m} \\ P_{\text{mo,max}} &:= 1463.7 \cdot 10^3 \cdot \text{N} \end{aligned}$$


---

$$\begin{aligned} f_1 &:= 0.59944 \cdot \text{m} \\ l_{s11} &:= 0 \cdot \text{m} && \text{- početne vrijednosti} \\ P_{\text{max1}} &:= P_{\text{mo,max}} \end{aligned}$$

Given

$$l_{s11} = \sqrt{\frac{\Delta l_{s1} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{\text{max1}} \cdot \mu \cdot \left( \frac{8 \cdot f_1}{l_{\text{tot}}^2} + k \right)}}$$

$$P_{\text{max1}} = P_{\text{mo,max}} \cdot e^{\mu \cdot \left( \frac{8 \cdot f_1 \cdot l_{s11}}{l_{\text{tot}}^2} + k \cdot l_{s11} \right)}$$

$$\begin{pmatrix} l_{s11} \\ P_{\text{max1}} \end{pmatrix} := \text{Find}(l_{s11}, P_{\text{max1}})$$

$$l_{s11} = 8.66 \text{ m}$$

$$P_{\text{max1}} = 1533.0 \cdot 10^3 \cdot \text{N}$$

$$\Delta P_{s11} := 2 \cdot P_{\text{max1}} \cdot l_{s11} \cdot \mu \cdot \left( \frac{8 \cdot f_1}{l_{\text{tot}}^2} + k \right)$$

$$\Delta P_{s11} = 141.9 \cdot 10^3 \cdot \text{N}$$

Slika 11. Postupak rješavanja problema  $[P_{m0}(x) > P_{m0,max}]$



Tablica 7. Prikaz dobivenih vrijednosti iz programa Mathcad

ZA UVJET: $P_{m0}(X) \leq P_{m0,max} = 1463,7 \text{ kN}$		
$P_{max} \text{ [kN]}$	$\Delta P_{sl} \text{ [kN]}$	$l_{sl} \text{ [m]}$
1533,00	141,90	8,66

Provjera:

$$P_{max} = 1533,00 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \left( \frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k \right)}}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{0,003 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 10,5 \cdot 10^{-4}}{1533,0 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \left( \frac{8 \cdot 0,59944}{15,50^2} + 0,0055 \right)}}$$

$$l_{sl} = 8,66 \text{ m}$$

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot P_{max} \cdot \mu \cdot l_{sl} \cdot \left( \frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k \right)$$

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 1533 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot 8,66 \cdot \left( \frac{8 \cdot 0,59944}{15,50^2} + 0,0055 \right)$$

$$\Delta P_{sl} = 141,9 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{el} - \Delta P_{\mu}(X) - \Delta P_{sl}$$

$$\Delta P_{el} = 0$$

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{\mu}(X) - \Delta P_{sl}$$

Za X preko duljine djelovanja prokliznuća klina  $l_{sl}$  vrijedi:

$$P_{m0}(X) = P_{max} - \Delta P_{\mu}(X) = P_{max} - P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)})$$

$$\Delta P_{\mu}(X) = P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot X)}) \quad X \geq l_{sl}$$

$$\Delta P_{\mu}(X) = 1533 \cdot (1 - e^{-\mu(0,01996 \cdot X + 0,0055 \cdot X)}) \quad X \geq 8,66 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 8,66) = 69,36 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 15,50) = 121,92 \text{ kN}$$

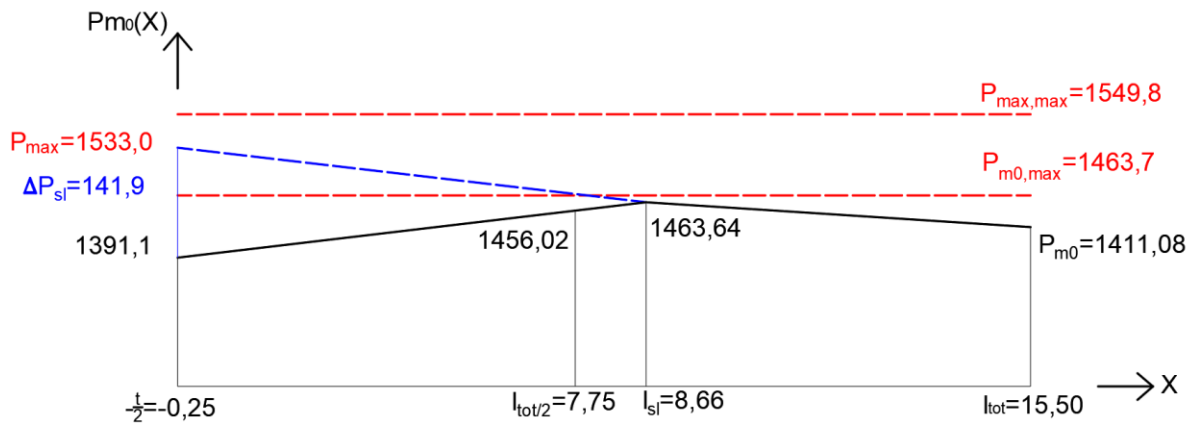
$$P_{m0}(8,66) = 1533 - 69,36 = 1463,64 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,50) = 1533 - 121,92 = 1411,08 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 1533 - 141,9 = 1391,10 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,75) = 1391,1 + \frac{1463,64 - 1391,1}{8,66} \cdot 7,75 = 1456,02 \text{ kN}$$

Slika 12. prikazuje dijagram gubitaka prednapinjanja:



Slika 12. Dijagram gubitaka prednapinjanja [ $P_{m0}(X) \leq P_{m0,max}$ ]

Tablica 8. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka [ $P_{m0}(X) \leq P_{m0,max}$ ]

X [m]	0	7,75	8,66	15,50
$P_{m0}(X)$ [kN]	1391,10	1456,02	1463,64	1411,08

### 3.5.4 Vremenski gubici

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

Gdje je:

$\Delta \sigma_{p,c+s+r}$  – apsolutna vrijednost promjene naprezanja u natezi zbog puzanja, skupljanja i opuštanja na mjestu  $x$  u trenutku  $t$

$\varepsilon_{cs}$  – procijenjena deformacija skupljanja

$\Delta \sigma_{pr}$  – apsolutna vrijednost promjene naprezanja u nategama na mjestu  $x$  u trenutku  $t$ , uslijed opuštanja čelika za prednapinjanje

$\rho(t, t_0)$  – koeficijenti puzanja

$\sigma_{c,QP}$  – naprezanje betona u visini natege od vlastite težine, prednapinjanja i ostalih nazovistalnih djelovanja

Prije proračuna vremenskih gubitaka potrebno je izračunati skupljanje betona. Za odabrani beton je korišten cement razreda „N“ (normalno stvrdnjavajući cement).

Eksponenti koji ovise o tipu cementu iznose:

$$\alpha_{ds1} = 4$$

$$\alpha_{ds2} = 0,12$$

Osnovna veličina deformacije od skupljanja uzrokovanog sušenjem proračunava se:

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{50}{100} \right)^3 \right]$$

$$\beta_{RH} = 1,356$$

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

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{(-0,12 \cdot \frac{38}{10})} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,00048224$$

Gdje je:

RH – relativna vlažnost okoline [%]

RH<sub>0</sub> – 100%

$\varepsilon_{cd,0}$  – osnovna deformacija skupljanja uzrokovanog sušenjem

$f_{cm0}$  = 10 MPa

Tablica 9. prikazuje određivanje koeficijenta koji  $k_h$  ovisi o prividnoj veličini  $h_0$ :

Tablica 9. Vrijednost  $k_h$  [6]

<b>h<sub>0</sub></b>	<b>k<sub>h</sub></b>
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$$u = (2 \cdot b_1 + b) + 2 \cdot h_1 + 2 \cdot \left( \sqrt{b_1^2 + h_2^2} \right) + 2 \cdot (h - h_1 - h_2) + b$$

$$u = (2 \cdot 60 + 25) + 2 \cdot 7 + 2 \cdot \left( \sqrt{60^2 + 5^2} \right) + 2 \cdot (110 - 7 - 5) + 25$$

$$u = 5,004159 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot 0,398}{5,004159}$$

$$h_0 = 155,471 \text{ m} \rightarrow k_h = 0,917 \text{ m}$$

Gdje je:

$u$  – opseg presjeka izložen sušenju

$h_0$  – prividna veličina poprečnog presjeka

Razvoj deformacija skupljanja zbog sušenja s vremenom proračunava se:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} \rightarrow 1,00$$

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

$$\varepsilon_{cd}(t) = 1,00 \cdot 0,917 \cdot 0,00048224$$

$$\varepsilon_{cd}(t) = 0,00044212$$

Gdje je:

$t$  – starost betona (u danima) u trenutku koji se promatra

$t_s$  – starost betona (u danima) na početku skupljanja zbog sušenja (ili bubrenja). U pravilu je to na kraju njege betona

$\varepsilon_{cd}(t)$  – konačna vrijednost deformacije skupljanja betona zbog sušenja

Autogena deformacija skupljanja proračunava se:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 0,00005$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot \infty^{0,5})}$$

$$\beta_{as}(\infty) = 1$$

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 1 \cdot 0,00005 = 0,00005$$

Gdje je vrijeme  $t$  u danima.

Ukupna deformacija skupljanja iznosi:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

$$\varepsilon_{cs} = 0,00044212 + 0,00005$$

$$\varepsilon_{cs} = 0,0049212$$

Također, osim skupljanja betona potrebno je izračunati i puzanje betona.

Koeficijent kojim se u obzir uzima učinak čvrstoće betona na zamišljeni koeficijent puzanja iznosi:

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

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{38}}$$

$$\beta(f_{cm}) = 2,725$$

Koeficijent kojim se u obzir uzima učinak starosti betona pri opterećenju na zamišljeni koeficijent puzanja iznosi:

$$\beta(t_o) = \frac{1}{(0,1 \cdot t_0^{0,20})}$$

$$\beta(t_o) = \frac{1}{(0,1 \cdot 28^{0,20})}$$

$$\beta(t_o) = 0,488$$

Gdje je:

$t_0$  - starost betona u danima na početku opterećenja (28)

Koeficijenti kojima se u obzir uzima čvrstoća betona iznose:

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7}$$

$$\alpha_1 = \left[ \frac{35}{38} \right]^{0,7}$$

$$\alpha_1 = 0,944$$

$$\alpha_2 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2}$$

$$\alpha_2 = \left[ \frac{35}{38} \right]^{0,2}$$

$$\alpha_2 = 0,984$$

$$\alpha_3 = \left[ \frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$

$$\alpha_3 = \left[ \frac{35}{38} \right]^{0,5}$$

$$\alpha_3 = 0,960$$

Koeficijent koji ovisi o relativnoj vlažnosti (RH u %) i zamišljenoj veličini elementa iznosi:

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 \quad \text{za } f_{cm} \geq 35$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot 50)^{18}] \cdot 155,471 + 250 \cdot 0,960 \leq 1500 \cdot 0,960$$

$$\beta_H = 473,158$$

Koeficijent koji opisuje razvoj puzanja s vremenom nakon opterećenja, a smije se procijeniti iz izraza:

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

$$\beta_c(t, t_0) = 1,00$$

Gdje je:

t – starost betona u danima u promatranom trenutku

t<sub>0</sub> – starost betona u danima na početku opterećenja

t – t<sub>0</sub> – neprilagođeno trajanje opterećenja u danima

Koeficijent kojim se u obzir uzima učinak relativne vlažnosti na zamišljeni koeficijent puzanja iznosi:

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

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{155,471}} \cdot 0,944 \right] \cdot 0,984$$

$$\varphi_{RH} = 1,847$$



Zamišljeni koeficijent puzanja koji se smije procijeniti iznosi:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_o)$$

$$\varphi_0 = 1,847 \cdot 2,725 \cdot 0,488$$

$$\varphi_0 = 2,459$$

Koeficijent puzanja iznosi:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta(t, t_0)$$

$$\varphi(t, t_0) = 2,459 \cdot 1$$

$$\varphi(t, t_0) = 2,459$$

Gubitak naprezanja zbog opuštanja za razred 2 računa se prema izrazu:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

Gdje je:

$\sigma_{pi}$  – za naknadno prednapinjanje je najveće vlačno naprezanje na kabel umanjeno za početne gubitke nastale uslijed procesa prednapinjanja

$t = 500\ 000$  – vrijeme nakon prednapinjanja (u satima)

$\rho_{1000} = 2,5$  (razred 2) – vrijednost relaksacijskog gubitaka (u %) kod 1000 sati nakon prednapinjanja i pri srednjoj temperaturi od 20°C

Naprezanje nakon početnih gubitaka u nategama na polovici raspona:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{m0}}{A_{p1}} = \frac{1456,02 \cdot 10^3}{10,5 \cdot 10^{-4}} = 1386,69 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1386,69}{1860} = 0,746$$

Gubitak naprezanja zbog opuštanja nakon 500 000 sati:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,746} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,746)} \cdot 10^{-5} = 0,048$$

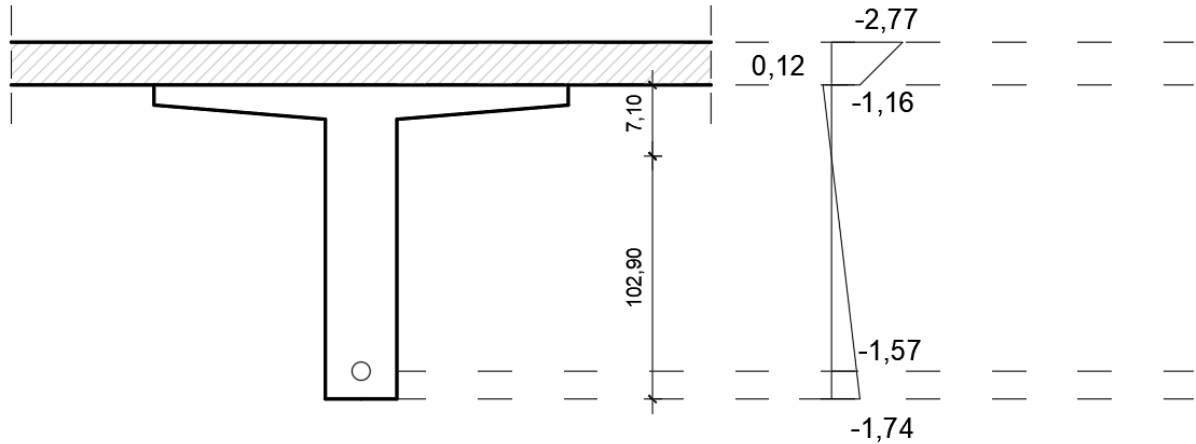
Konačna relaksacija – promjena napona uslijed relaksacije čelika nakon 500 000 sati:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \cdot \left[ 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \right]$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 1386,69 \cdot \left[ 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,746} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,746)} \cdot 10^{-5} \right] = 60,35 \text{ MPa}$$

Kako bi dobili naprezanje betona u visini natega od vlastite težine i početnog prednapinjanja i drugih nazovistalnih djelovanja  $\sigma_{c,QP}$ , pretpostavljamo da je gubitak sile prednapinjanja jedne natega  $\Delta P_{c+s+r} = 0 \text{ kN}$ . Tada vrijedi da je  $P_{m0} = P_{m\infty}$ .

Slika 13. prikazuje vrijednost naprezanja betona u visini natega od vlastite težine i početnog prednapinjanja i drugih nazovistalnih djelovanja  $\sigma_{c,QP}$ , čija se vrijednost dobiva iz sličnosti trokuta grafa naprezanja:



Slika 13. Prikaz naprezanja za uvjet  $P_{m0} = P_{m\infty}$ .

$$\frac{0,12}{d} = \frac{1,74}{(110 - d)} \rightarrow d = 7,10 \text{ cm}$$

$$\frac{-1,74}{102,9} = \frac{\sigma_{c,QP}}{(102,9 - 9,75)}$$

$$\sigma_{c,QP} = - 1,57 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$d$  - udaljenost gornjeg ruba T presjeka do  $\sigma_{c,QP} = 0 \text{ MPa}$

$\sigma_{c,QP}$  - naprezanje betona u visini natega od vlastite težine i početnog prednapinjanja i drugih nazovistalnih djelovanja

Promjena naprezanja koja je nastala zbog utjecaja puzanja, skupljanja i relaksacije:

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

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{0,00049212 \cdot 195000 + 0,8 \cdot 60,35 + \frac{195000}{200000} \cdot 2,459 \cdot 1,57}{1 + \frac{195000}{200000} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{-4}}{0,389} \cdot \left(1 + \frac{0,389}{0,048088} \cdot 0,59944^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 2,459]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 143,63 \text{ MPa}$$

- sve vrijednosti uzimaju se kao apsolutne vrijednosti, tj. sa pozitivnim predznakom

Gubitak sile prednapinjanja jedne natege u trenutku  $t = \infty$  iznosi:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \cdot \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 10,5 \cdot 10^{-4} \cdot 143,63 \cdot 10^3 = 150,81 \text{ kN}$$

Tablica 10. prikazuje vrijednosti sile prednapinjanja nakon svih gubitaka:

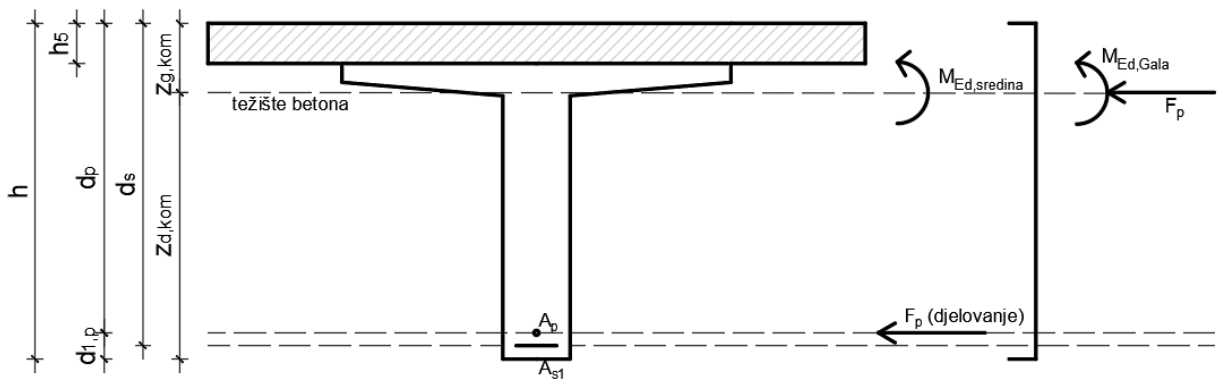
*Tablica 10. Vrijednosti sile prednapinjanja nakon svih gubitaka*

X [m]	0	7,75	8,66	15,50
$P_{m0}(X)$ [kN]	1391,10	1456,02	1463,64	1411,08
$P_{m\infty}(X) = P_{m0}(X) - \Delta P_{c+s+r}$ [kN]	1240,29	1305,21	1312,83	1260,27

### 3.6 Granično stanje nosivosti

#### 3.6.1 Savijanje s uzdužnom silom

Granično stanje nosivosti je provjereno s pomoću računalnog programa Gala Reinforcement. Slika 14. prikazuje potrebne veličine za proračun:



Slika 14. Prikaz presjeka s veličinama potrebnim za proračun u računalnom programu Gala Reinforcement

Ulazni podaci za računalni program „Gala Reinforcement“ su:

$$M_{Ed,sredina} = 1,35 \cdot \left[ \frac{(G_I + G_{II} + \Delta G) \cdot l^2}{8} \right] + 1,50 \cdot \left( \frac{Q \cdot l^2}{8} \right)$$

$$M_{Ed,sredina} = 1,35 \cdot \left[ \frac{(9,725 + 0 + 39,903) \cdot 15^2}{8} \right] + 1,50 \cdot \left( \frac{5,66 \cdot 15^2}{8} \right)$$

$$M_{Ed,sredina} = 2123,094 \text{ kNm}$$

$$f_{pd} = \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_s}$$

$$f_{pd} = \frac{1640}{1,15}$$

$$f_{pd} = 1426,087 \text{ MPa}$$

$$F_p = f_{pd} \cdot A_p$$

$$F_p = 1426,087 \cdot 10,5$$

$$F_p = 1497,391 \text{ kN}$$

$$d_p = (h + h_5) - d_{1,p}$$

$$d_p = (110 + 15) - 9,75$$

$$d_p = 115,25 \text{ cm}$$

$$M_{Ed_{Gala}} = M_{Ed_{sredina}} - F_p \cdot (d_p - z_{g, kom})$$

$$M_{Ed_{Gala}} = 2123,094 - 1497,391 \cdot (1,1525 - 0,257498)$$

$$M_{Ed_{Gala}} = 782,925 \text{ kNm}$$

Gdje je:

$M_{Ed_{sredina}}$  – moment savijanja u sredini raspona

$f_{pd}$  – proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje

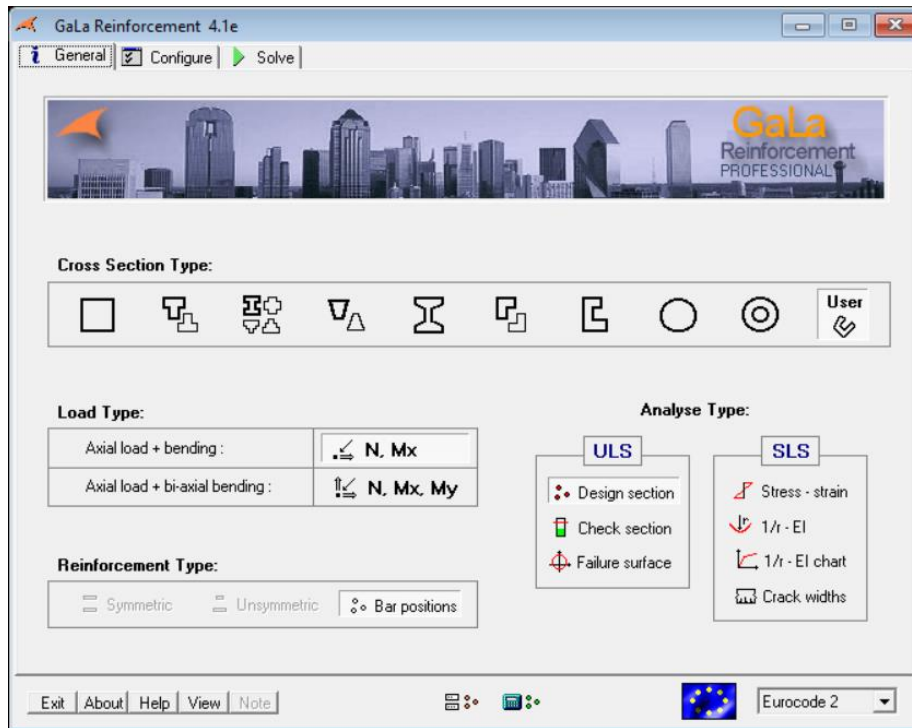
$\gamma_s$  – parcijalni koeficijent za čelik za prednapinjanje

$F_p$  – uzdužna sila s obzirom na težište betonskog presjeka

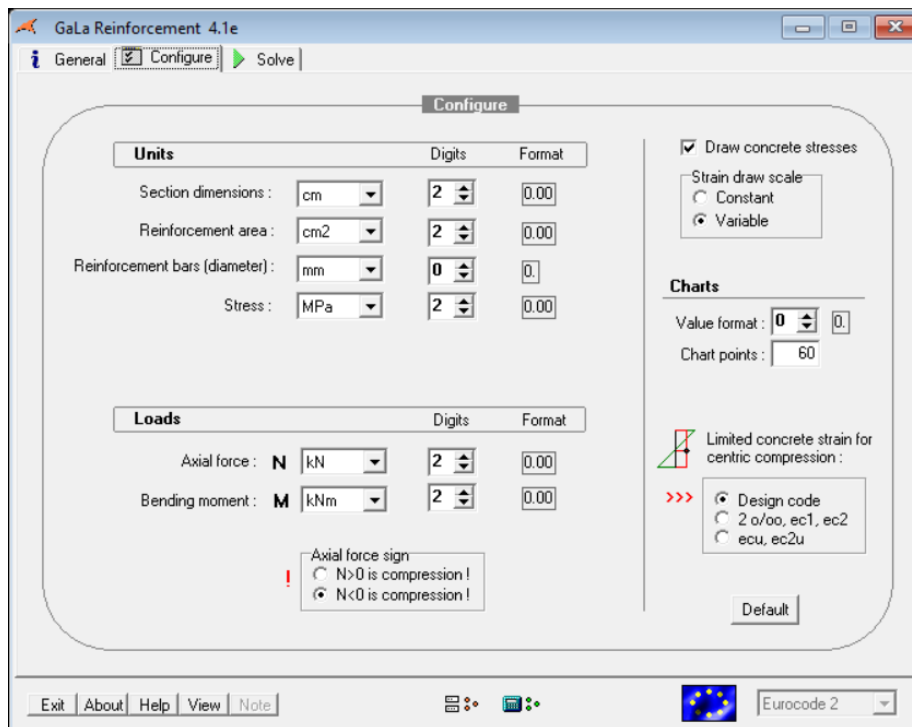
$d_p$  – statička visina čelika za prednapinjanje

$M_{Ed_{Gala}}$  – moment savijanja s obzirom na težište betonskog presjeka

Na slikama u nastavku je prikazan postupak te rješenje:

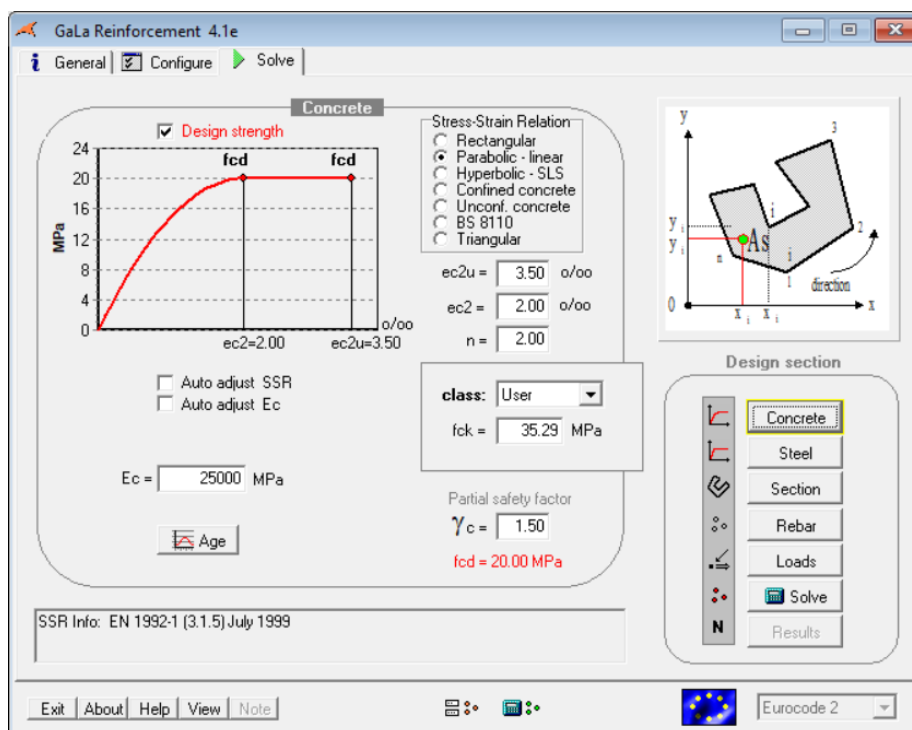


Slika 15. Prikaz početnog prozora računalnog programa GaLa Reinforcement s zadanim uvjetima potrebnih za proračun



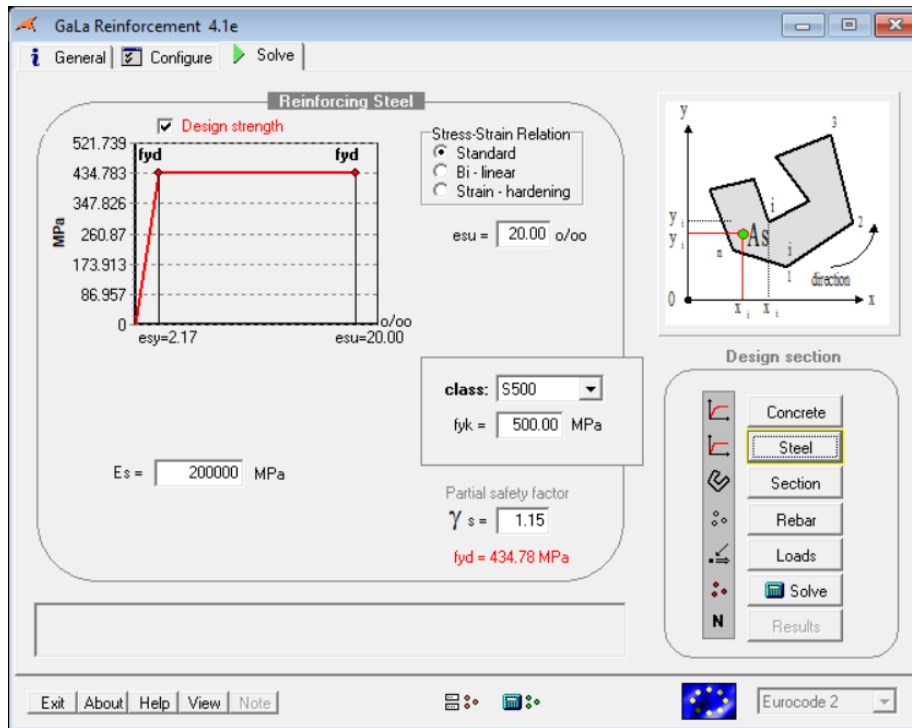
Slika 16. Prikaz prozora računalnog programa GaLa Reinforcement s odabranim mjernim jedinicama

Prilikom zadavanja  $f_{ck}$ , karakteristične tlačne čvrstoće betonskog valjka starog 28 dana potrebno je podijeliti vrijednost  $f_{ck}$  s 0,85 jer računalni program Gala Reinforcement koristi vrijednost  $\alpha_{cc} = 0,85$  dok je preporučena vrijednost  $\alpha_{cc} = 1$  za proračun  $f_{cd}$ , proračunske tlačne čvrstoće betonskog valjka.

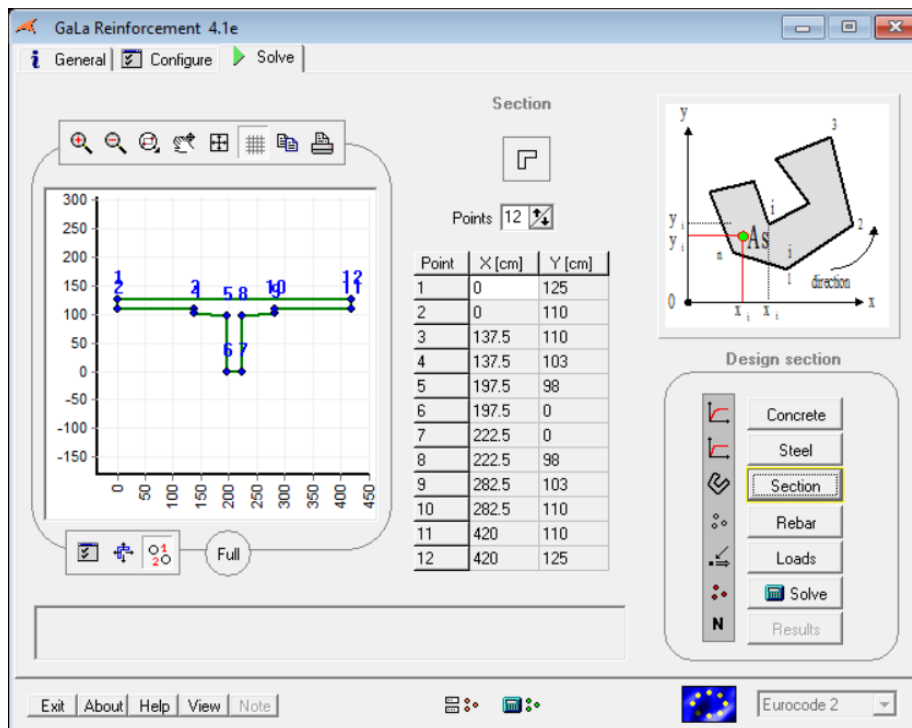


Slika 17. Prikaz prozora s vrijednostima betona u računalnom programu Gala Reinforcement

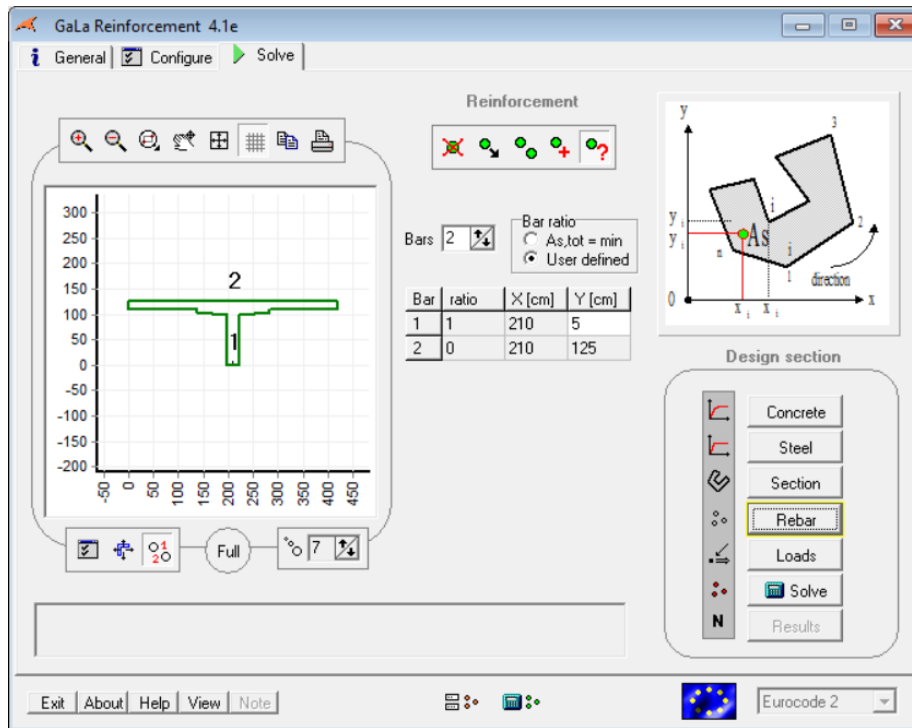




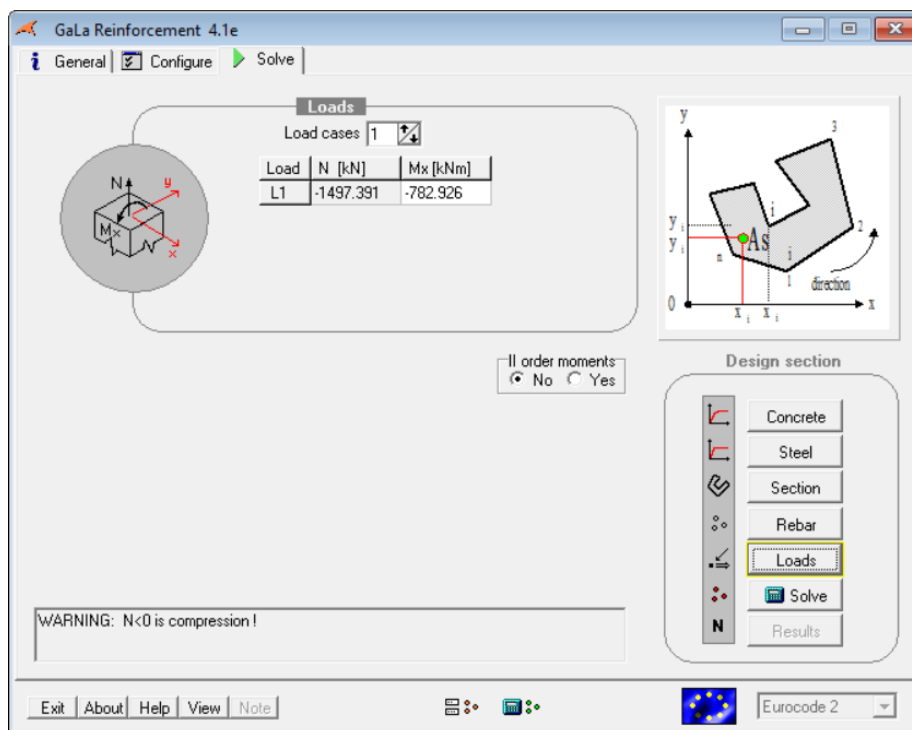
Slika 18. Prikaz prozora s vrijednostima čelika u računalnom programu Gala Reinforcement



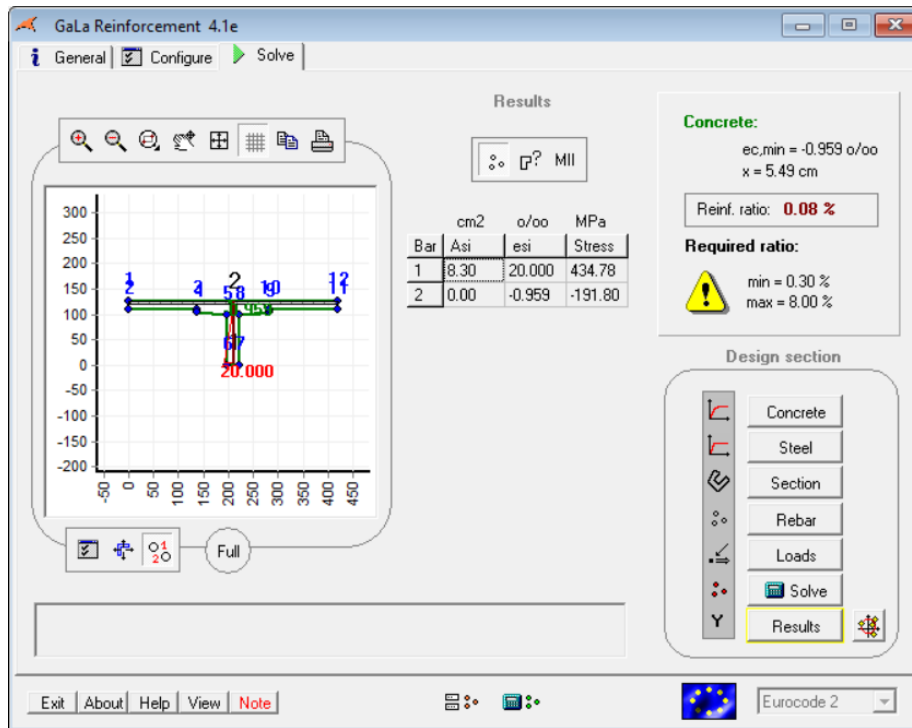
Slika 19. Prikaz prozora s presjekom u računalnom programu Gala Reinforcement



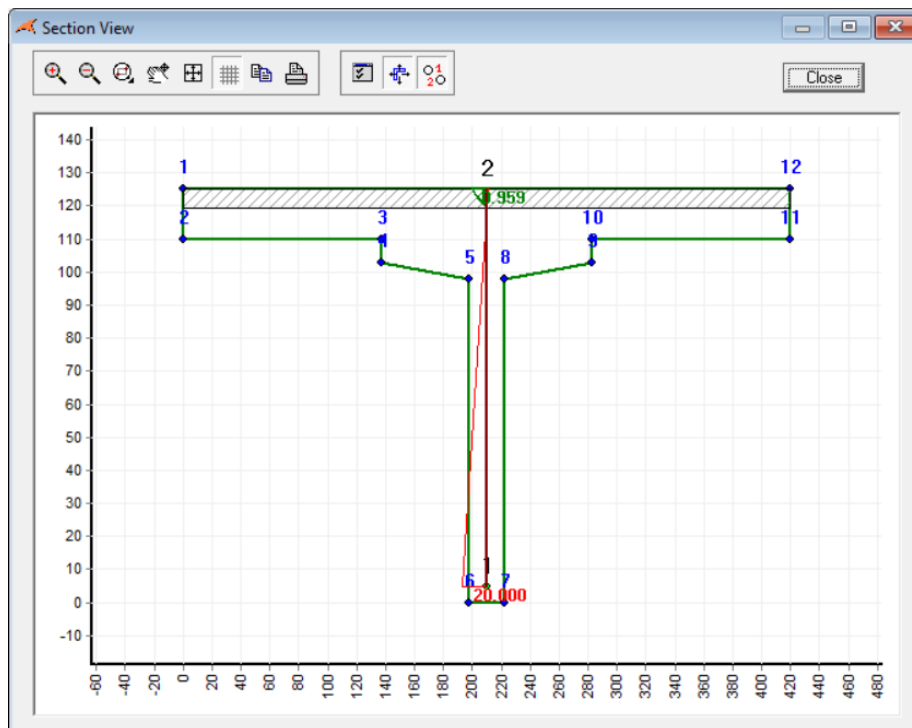
Slika 20. Prikaz prozora s pozicijama armature u računalnom programu Gala Reinforcement



Slika 21. Prikaz prozora s zadanim opterećenjem u računalnom programu Gala Reinforcement



Slika 22. Prikaz prozora s rješenjem u računalnom programu Gala Reinforcement



Slika 23. Prikaz prozora s grafičkim rješenjem u računalnom programu Gala Reinforcement

Najmanji postotak armiranja iznosi:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d_s \geq 0,0013 \cdot b \cdot d_s$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{2,9}{500} \cdot 25 \cdot 120 \geq 0,0013 \cdot 25 \cdot 120$$

$$A_{s,min} = 4,524 \text{ cm}^2 > 3,9 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = 4,524 \text{ cm}^2$$

Najveća armatura za grede T-presjeka s tlačno naprežanom pojasnicom iznosi [6]:

$$A_{s1,max} = 0,022 \cdot A_C$$

a) kada se rabi beton razreda čvrstoće manji ili jednak C50/60 i kada je:

$$0,45d \leq h_f, \text{ tada je: } A_C = h \cdot b_{eff}$$

b) kada se rabi beton razreda čvrstoće manji ili jednak C50/60 i kada je:

$$0,45d > h_f, \text{ tada je: } A_C = 2,5 \cdot h_f \cdot b_{eff}$$

c) kada se rabi beton razreda čvrstoće veći ili jednak C55/67 i kada je:

$$0,35d \leq h_f, \text{ tada je: } A_C = h \cdot b_{eff}$$

d) kada se rabi beton razreda čvrstoće veći ili jednak C55/67 i kada je:

$$0,35d > h_f, \text{ tada je: } A_C = 3 \cdot h_f \cdot b_{eff}$$

Najveći postotak armiranja prema slučaju b) iznosi:

$$0,45 \cdot d_s = 0,45 \cdot 1,20 = 0,54 \text{ m} > h_f = 0,27 \text{ m}$$

$$A_C = 2,5 \cdot h_f \cdot b_{eff} = 2,5 \cdot 27 \cdot 420 = 28350 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1,max} = 0,022 \cdot A_C = 0,022 \cdot 28350 = 623,7 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_{s1} \leq A_{s1,max}$$

$$4,524 \text{ cm}^2 \leq 8,30 \text{ cm}^2 \leq 623,7 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Gdje je:

$d_s$  – statička visina armature

$h_f$  – debljina pojasnice i ploče

Usvaja se armatura  $A_{s1} = 5\emptyset 16$  cm (10,5 cm<sup>2</sup>)

Također, pretpostavlja se postavljanje 1/3 armature iz polja u gornju zonu:

$$A_{s1}^g = \frac{1}{3} \cdot A_{s1} = \frac{1}{3} \cdot 10,5 = 3,5 \text{ cm}^2 \rightarrow A_{s1}^g = 4\emptyset 12 \text{ cm (4,52 cm}^2)$$

### **3.6.2 Proračunska nosivost na poprečnu silu**

Proračunska vrijednost poprečne sile uz uzimanje u obzir nagnutog vođenja natega za prednapinjanje glasi:

$$V_{Ed} = V_{0d} - V_{pd}$$

Gdje su:

$V_{0d}$  – proračunska poprečna sila u presjeku

$V_{pd}$  – komponenta poprečne sile nagnute natege

Kontinuirano opterećenje iznosi:

$$q = \gamma_G \cdot (G_I + G_{II} + \Delta G) + \gamma_Q \cdot Q$$

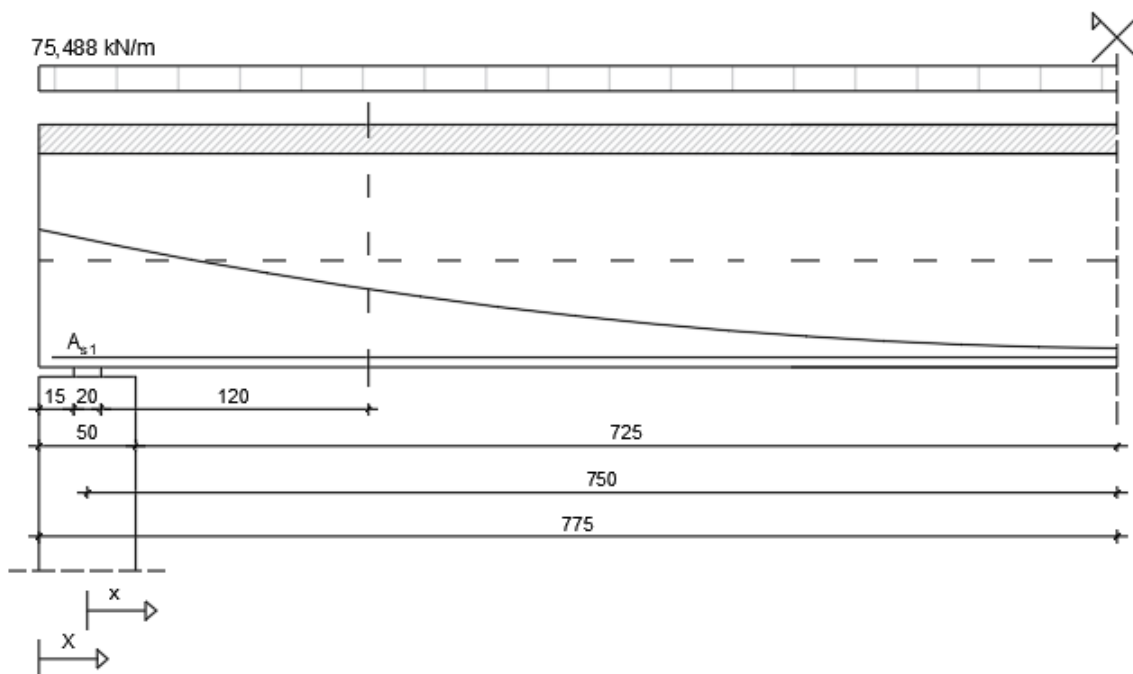
$$q = 1,35 \cdot (9,725 + 0 + 39,903) + 1,5 \cdot 5,66$$

$$q = 75,488 \text{ kN/m}$$

Gdje je:

$\gamma_G$  – parcijalni koeficijent za stalna djelovanja

$\gamma_Q$  – parcijalni koeficijent za promjenjiva djelovanja



Slika 24. Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Proračunska poprečna sila iznosi:

$$V_{0d} = q_{Ed} \cdot \frac{l}{2}$$

$$V_{0d} = 75,488 \cdot \frac{15}{2}$$

$$V_{0d} = 566,16 \text{ kN}$$

Funkcija položaja natege:

$$z(x) = 4 \cdot f \cdot \left( \frac{X}{l_{tot}} - \frac{X^2}{l_{tot}^2} \right)$$

$$z'(x) = 4 \cdot f \cdot \left( \frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 \cdot X}{l_{tot}^2} \right) = \tan \alpha$$

Nagib natege na udaljenosti  $X = 0,15 + 0,20 + 1,20 = 1,55$  m iznosi:

$$\tan \alpha = 4 \cdot f \cdot \left( \frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 \cdot X}{l_{tot}^2} \right) = 4 \cdot 0,59944 \cdot \left( \frac{1}{15,50} - \frac{2 \cdot 1,55}{15,50^2} \right) = 0,1238$$

Sila prednapinjanja na udaljenosti  $X=1,55$  od ruba oslonca nosača ( $t = 0$ ), lijevi oslonac:

$$P_{m0}(1,55) = 1391,1 + \frac{1463,64 - 1391,1}{8,66} \cdot 1,55 = 1404,08 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty}(1,55) = P_{m0}(1,55) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 1404,08 - 150,81 = 1253,27 \text{ kN}$$

Poprečna komponenta sile prednapinjanja ( $\sin \alpha$  i  $\gamma_p = 1$ ) (za male kutove  $\sin \alpha = \tan \alpha$ ) iznosi:

$$V_{pd} = P_{m\infty} \cdot \sin \alpha$$

$$V_{pd} = 1253,27 \cdot 0,1238 = 155,15 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile

$$V_{Ed} = V_{0d} - V_{pd} = 566,16 - 155,15 = 411,01 \text{ kN}$$

### **3.6.3 Proračunski potrebna poprečna armatura**

Postupak sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova.

Odabir kuta  $\theta$  između tlačnih štapova i uzdužne osi ograničen je na:

$$1 < ctg\theta < 2,5 \quad (21,8^\circ < \theta < 45^\circ)$$

Nosivost elemenata na poprečnu silu bez poprečne armature:

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$$

uz najmanju vrijednost

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{1200}} = 1,408 \leq 2$$

$$A_{sl} = A_{s1} = 8,30 \text{ cm}^2$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$$\rho_1 = \frac{8,30}{25 \cdot 120} = 0,00276 \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty}(1,55) = 1253,27 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{1253,27 \cdot 10^3}{10,19 \cdot 10^5} < 0,2 \cdot 20$$

$$\sigma_{cp} = 1,23 \text{ MPa} < 4,00 \text{ MPa}$$



Gdje je:

$A_{sl}$  – ploština vlačne armature koja se proteže  $\geq (l_{bd} + d)$  izvan promatranog presjeka

$l_{bd}$  – proračunska duljina sidrenja

$b_w$  – najmanja širina presjeka u vlačnom području

$\rho_1$  – koeficijent armiranja uzdužne armature

$\sigma_{cp}$  – naprezanje uslijed proračunske tlačne sile u betonu

$N_{Ed}$  – osna sila u presjeku zbog opterećenja ili prednapinjanja

Vrijednosti za  $C_{Rd,c}$ ,  $v_{min}$  i  $k_1$  dobivamo iz nacionalnog dodatka [6]:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1,408^{3/2} \cdot 30^{1/2} = 0,32$$

$$k_1 = 0,15$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} = [0,12 \cdot 1,408 \cdot (100 \cdot 0,00276 \cdot 30)^{1/3} + 0,15 \cdot 1,23] \cdot 250 \cdot 1200$$

$$V_{Rd,c} = 157895,18 \text{ N} = 157,895 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} \geq (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} \geq (0,32 + 0,15 \cdot 1,23) \cdot 250 \cdot 1200$$

$$V_{Rd,c} \geq 151350 \text{ N} = 151,35 \text{ kN}$$

$$157,895 \text{ kN} \geq 151,35 \text{ kN} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

$$V_{Ed} = 411,01 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 157,895 \text{ kN} \rightarrow \text{potrebno je proračunati poprečnu armaturu}$$

Kod elemenata s okomitom poprečnom armaturom (spone), nosivost na poprečne sile je manja vrijednost od:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{ctg\theta + tan\theta}$$

$\theta = 40^\circ$  - odabrani kuta nagiba tlačnih štapova

$$ctg\theta = 1,192$$

$$V_{Ed} = V_{Rd,s}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta$$

$$V_{Ed} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta \rightarrow s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta$$

Odabiremo dvorezne spone (m=2)  $\emptyset 8$  :

$$A_{sw} = m \cdot \frac{\emptyset^2 \cdot \pi}{4} = 2 \cdot \frac{0,8^2 \cdot \pi}{4} = 1,00 \text{ cm}^2$$

$$z = 0,9 \cdot d$$

$$z = 0,9 \cdot 120$$

$$z = 108 \text{ cm}$$

$$s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta = \frac{1,0}{411,01} \cdot 0,9 \cdot 120 \cdot 43,48 \cdot 1,192$$

$$s = 13,62 \text{ cm}$$

Gdje je:

$A_{sw}$  – ploština presjeka poprečne armature

$\emptyset$  – promjer poprečne armature

$m$  – reznost poprečne armature

$z$  – krak unutarnjih sila

$s$  – razmak spona

$\nu_1$  – koeficijent smanjenja čvrstoće za beton raspucan zbog posmika

$\alpha_{cw}$  – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu

Usvojene su dvorezne spona ( $m=2$ )  $\emptyset 8/13$  cm.

### 3.6.4 Dokaz čvrstoće tlačnih štapova

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{ctg\theta + tan\theta}$$

Preporučene vrijednosti koeficijenata  $\alpha_{cw}$  i  $\nu_1$  dane su nacionalnim dodatkom [6].

Preporučene vrijednosti za  $\alpha_{cw}$ :

1 – za neprednapete konstrukcije

$\left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right)$  kada je  $0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$

1,25 kada je  $0,25 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$

$2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right)$  kada je  $0,5 f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 1,5 f_{cd}$

$0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$

$0 \leq 1,23 \leq 0,25 \cdot 20 = 5,00 \rightarrow \alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) = \left(1 + \frac{1,23}{20,00}\right) = 1,06$

Faktor smanjenja čvrstoće betona koji je raspucao zbog posmika iznosi:

$$v_1 = v = 0.6 \cdot \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

$$v_1 = 0.6 \cdot \left[ 1 - \frac{30}{250} \right] = 0,528$$

Zbog veličine vanjskog promjera zaštitne cijevi natege  $\phi_{duct} = 6,5 \text{ cm}$  koja je veća od 1/8 širine hrpta mora se za određivanje  $V_{Rd,max}$  računati s neto širinom hrpta:

$$\phi_{duct} = 6,5 \text{ cm} > \frac{b_w}{8} = \frac{25}{8} = 3,125 \text{ cm}$$

$$b_{w,nom} = b_w - 0,5 \cdot \phi_{duct} = 25 - 0,5 \cdot 6,5 = 21,75 \text{ cm}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{ctg\theta + tan\theta} = \frac{1,06 \cdot 21,75 \cdot 0,9 \cdot 120 \cdot 0,528 \cdot 2,0}{0,839 + 1,192} = 1294,62 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 1294,62 \text{ kN} > V_{Ed} = 411,01 \text{ kN} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

### 3.6.5 Najmanja potrebna poprečna armatura

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w \cdot \sin\alpha}$$

Pretpostavljeni promjer spona  $\phi 8$ .

Odabiremo dvorezne spona ( $m=2$ )  $\phi 8$ :

$$\alpha = 90^\circ - \text{za vertikalne spona} \rightarrow \sin\alpha = 1$$

$$A_{sw} = m \cdot \frac{\phi^2 \cdot \pi}{4} = 2 \cdot \frac{0,8^2 \cdot \pi}{4} = 1,00 \text{ cm}^2$$

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w \cdot b_w \cdot \sin\alpha}$$

Vrijednost za minimalni koeficijent armiranja dana je nacionalnim dodatkom:

$$\rho_{w,min} = 0,15 \cdot \left( \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) = 0,15 \cdot \left( \frac{3,2}{500} \right) = 0,00096$$

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w \cdot b_w \cdot \sin\alpha} = \frac{1,0}{0,00096 \cdot 25 \cdot 1} = 41,67 \text{ cm}$$

Najveći uzdužni razmak spona  $s_{1,max}$  za beton  $\leq$  C50/60 [6]:

Ako je  $V_{Ed} \leq 0,3 V_{Rd,max}$  onda je  $s_{1,max} = 0,75 \cdot d \leq 300 \text{ mm}$

Ako je  $0,3 V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 0,6 V_{Rd,max}$  onda je  $s_{1,max} = 0,55 \cdot d \leq 300 \text{ mm}$

Ako je  $0,6 V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 1,0 V_{Rd,max}$  onda je  $s_{1,max} = 0,3 \cdot d \leq 200 \text{ mm}$

$$0,3 V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 0,6 V_{Rd,max}$$

$$0,3 \cdot 1294,62 \leq 411,01 \leq 0,6 \cdot 1294,62$$

$$0,3 \cdot 1294,62 \leq 411,01 \leq 0,6 \cdot 1294,62$$

$$388,39 \leq 411,01 \leq 776,77$$

$$s_{1,max} = 0,55 \cdot d \leq 300 \text{ mm}$$

$$s_{1,max} = 0,55 \cdot 1200 \leq 300 \text{ mm}$$

$$s_{1,max} = 660 > 300 \text{ mm} \rightarrow s_{1,max} = 30 \text{ cm}$$

Prekoračena je maksimalna vrijednost te se usvaja maksimalni dopušteni razmak spona  $s=30 \text{ cm}$ .

Maksimalne spone su dvorezne ( $m=2$ )  $\emptyset 8/30 \text{ cm}$

Usvojene spone su dvorezne ( $m=2$ )  $\emptyset 8/13 \text{ cm}$ .

Poprečna sila koju nose minimalne spone (m=2) Ø8/13 cm:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta$$

$$V_{Rd,s} = \frac{1,00}{13} \cdot 0,9 \cdot 120 \cdot 43,48 \cdot 1,192$$

$$V_{Rd,s} = 430,57 \text{ kN}$$

Poprečna sila koju nose minimalne spone (m=2) Ø8/30 cm:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta$$

$$V_{Rd,s} = \frac{1,00}{30} \cdot 0,9 \cdot 120 \cdot 43,48 \cdot 1,192$$

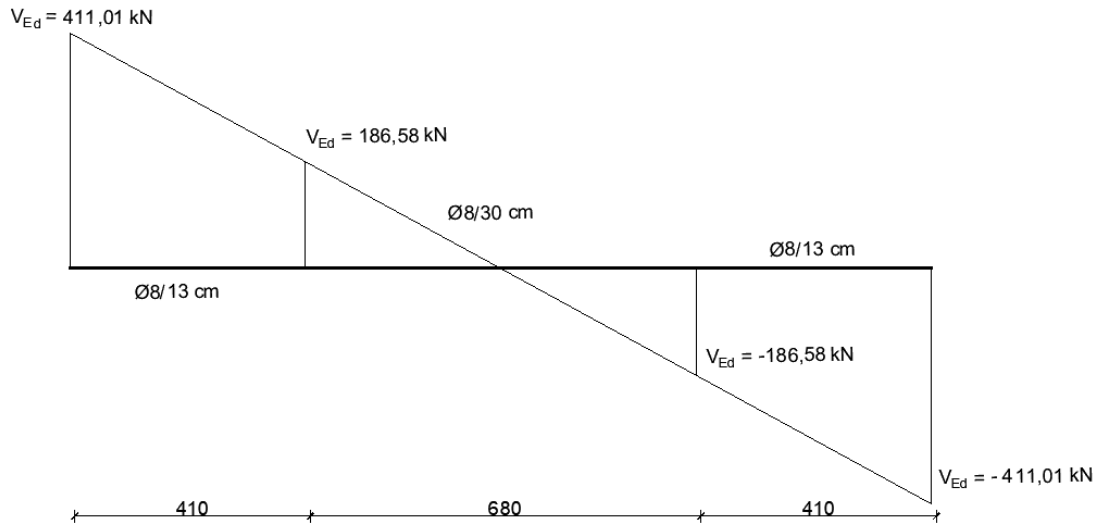
$$V_{Rd,s} = 186,58 \text{ kN}$$

Poprečna sila mijenja predznak na sredini raspona ( $x = 7,5 \text{ m}$ ). Mjesto gdje poprečna sila poprima vrijednost  $V_{Rd,s} = 186,58 \text{ kN}$  te gdje maksimalne spone (m=2) Ø8/30 cm zadovoljavaju iznosi:

$$x_0 = 7,5 - \frac{V_{Rd,s}}{V_{Ed}} \cdot 7,5$$

$$x_0 = 7,5 - \frac{186,58}{411,01} \cdot 7,5$$

$$x_0 = 4,1 \text{ m}$$



Slika 25. Raspodjela spona

### 3.6.6 Posmik na spojnoj površini betona koji su izvedeni u različito vrijeme

Armatura za sprezanje starog i novog betona proračunava se pomoću izraza:

$$v_{Edi} \leq v_{Rdi}$$

Gdje je:

$v_{Edi}$  – proračunska vrijednost posmičnog naprezanja na spojnoj površini

$v_{Rdi}$  – proračunska posmična otpornost spojne površine

Potrebni razmak spona se dobije izjednačavanjem proračunske vrijednosti posmičnog naprezanja na spojnoj površini i proračunske posmične otpornosti spojne površine:

$$v_{Edi} = v_{Rdi}$$

$$v_{Edi} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_i}$$

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

$$\beta \cdot \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_i} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)$$

$$\beta \cdot \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_i} - (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n) = \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_i} = \frac{m \cdot A_{sw}^1}{b_i \cdot s} = \frac{A_{sw}}{b_i \cdot s}$$

$$\beta \cdot \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_i} - (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n) = \frac{m \cdot A_{sw}^1}{b_i \cdot s} \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)$$

$$s \cdot \beta \cdot V_{Ed} - (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n) \cdot b_i \cdot s \cdot z = A_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)$$

$$s \cdot [\beta \cdot V_{Ed} - (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n) \cdot b_i \cdot z] = A_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)$$

$$s = \frac{A_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin\alpha + \cos\alpha)}{\beta \cdot V_{Ed} - (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n) \cdot b_i \cdot z}$$

$$s = \frac{1,00 \cdot (0,9 \cdot 120) \cdot 43,48 \cdot (0,7 \cdot 1 + 0)}{1 \cdot 411,01 - (0,4 \cdot 0,133 + 0,7 \cdot 0) \cdot 145 \cdot (0,9 \cdot 120)}$$

$$s = -7,79 \text{ cm}$$

Iz dobivenog negativnog razmaka spona zaključujemo da je dovoljno samo „trenje“ između starog i novog betona. Radi sigurnosti, spona za sprezanje će ipak biti postavljene.

Gdje je:

$\beta$  – omjer uzdužne sile u novoj ploštini betona i ukupne uzdužne sile u tlačnom ili vlačnom području, oboje proračunano za promatrani presjek,  $\beta = 1$  (na strani sigurnosti)

$V_{Ed}$  – poprečna posmična sila

$z$  – krak unutarnjih sila spregnutog presjeka

$b_i$  – širina spojne površine

$c$  i  $\mu$  – koeficijenti koji ovise o hrapavosti spojne ploštine. Hrapava površina s najmanje 3 mm hrapavosti na oko 40 mm razmaka, postignuta ohrapavljanjem, izlaganjem agregata ili drugim metodama koje daju istovrijedno ponašanje,  $c = 0,4$  i  $\mu = 0,7$

$f_{ctd}$  – proračunska vlačna čvrstoća betona,  $f_{ctd} = 1,33 \text{ MPa}$  (za C30/37)



$\sigma_n$  – naprezanje po jedinici ploštine uzrokovano najmanjom vanjskom silom okomitom na spojnu površinu koja može djelovati istodobno s poprečnom silom,  $\sigma_n = 0$  (na strani sigurnosti)

$A_s$  – ploština armature koja presijeca spojnu površinu, uključujući običnu poprečnu armaturu (ako je ima), s primjerenim sidrenjem na obje strane spojne površine

$A_t$  – ploština spoja

$\alpha = 90^\circ$

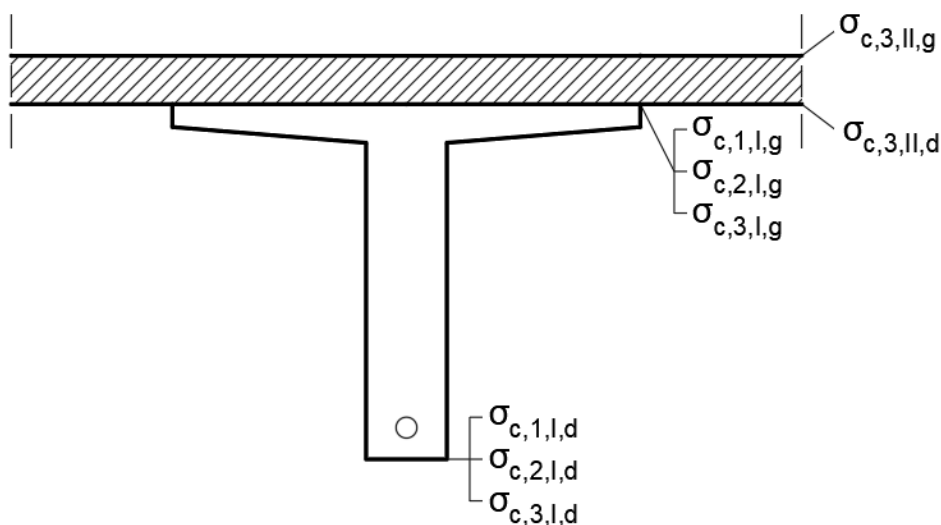
Usvajamo da mjerodavne spone iznad ležaja su spone dimenzionirane na poprečnu silu, (m=2)  $\emptyset 8/13$  cm.

### **3.7 Granično stanje uporabljivosti**

Prilikom provjere graničnog stanja uporabljivosti potrebno je provjeriti ograničenje naprezanja, kontrolu pukotina te kontrolu progiba. Provjere ograničenja naprezanja provode se za karakterističnu i nazovistalnu kombinaciju djelovanja. Kontrola pukotina nije provedena jer je presjek neraspucan dok kontrola progiba nije obuhvaćena radom.

#### ***3.7.1 Provjera ograničenja naprezanja za karakterističnu kombinaciju***

Slika 26. prikazuje dijelove presjeka u kojima se proračunava naprezanje. Za dobivanje potrebnih naprezanja u presjeku duž raspona korišten je računalni program Mathcad. Naprezanja u presjeku proračunata su za svaki 1 cm. U nastavku je prikazan postupak proračuna naprezanja u presjeku na sredini raspona.



Slika 26. Prikaz dijelova presjeka u kojima se proračunava naprezanje u betonu za određeni trenutak

Ulazni podaci za proračun naprezanja u presjeku na sredini raspona:

$$x = 7,5 \text{ m}$$

$$M_{G_I} = 273,52 \text{ kNm}$$

$$M_{G_{II}} = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{\Delta G} = 1122,27 \text{ kNm}$$

$$M_Q = 159,19 \text{ kNm}$$

$$P_{m0} = 1456,02 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty} = 1305,21 \text{ kN}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m0} + G_I$ " iznose:

$$\sigma_{c,1,I,g} = \left[ -\frac{P_{m0}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m0}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{M_{G_I}(x)}{W_{g,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,g} = \left[ -\frac{1456,02}{0,389} + \frac{1456,02 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{273,52}{0,119307} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,g} = 1,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = \left[ -\frac{P_{m0}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m0}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{M_{G_I}(x)}{W_{d,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = \left[ -\frac{1456,02}{0,389} - \frac{1456,02 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{273,52}{0,068998} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = -12,43 \text{ MPa}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ " iznose:

$$\sigma_{c,2,I,g} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{g,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,g} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} + \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{(273,52 + 0)}{0,119307} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,g} = 0,91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} - \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{(273,52 + 0)}{0,068998} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = -10,73 \text{ MPa}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ " iznose:

$$\sigma_{c,3,II,g} = m_c \cdot \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{g,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,g} = 1 \cdot \left( -\frac{1122,27 + 159,19}{0,404793} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,g} = -3,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = m_c \cdot \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{spoj,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = 1 \cdot \left( -\frac{1122,27 + 159,19}{0,969632} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = -1,32 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,g} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{g,I}} \right] + \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{spoj,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,g} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} + \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{(273,52 + 0)}{0,119307} \right] + \left( -\frac{(1122,27 + 159,19)}{0,969632} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,g} = -0,41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} \right] + \left( \frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{d,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} - \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{(273,52 + 0)}{0,068998} \right] + \left( \frac{(1122,27 + 159,19)}{0,10502} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = 1,47 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$c$  – naprezanje u betonu

1 – naprezanje u trenutku " $P_{m0} + G_I$ "

$I$  – naprezanje u „T“ presjeku (I.faza)

$g$  – naprezanje u gornjem rubu elementa

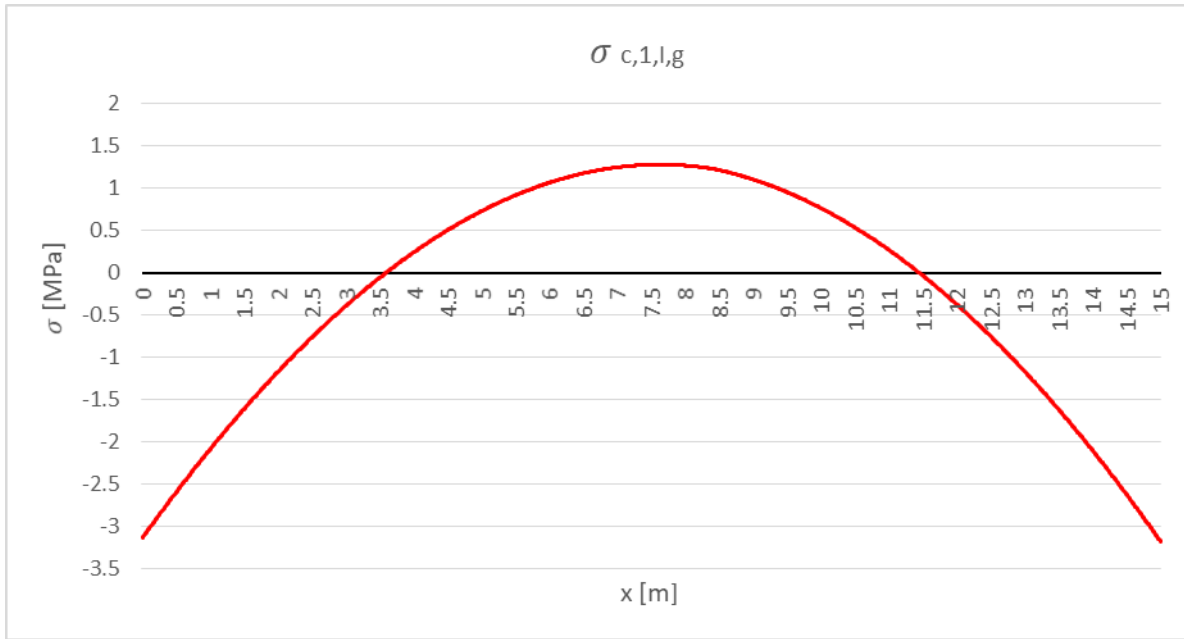
$d$  – naprezanje u donjem rubu elementa

2 – naprezanje u trenutku " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ "

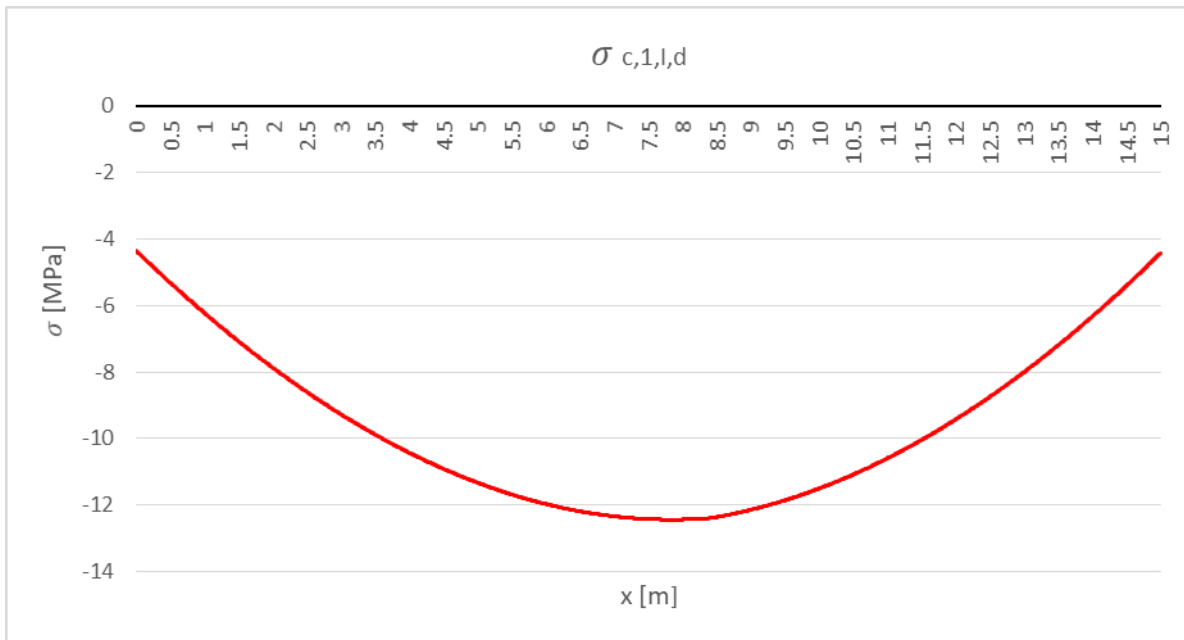
3 – naprezanje u trenutku " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ "

$II$  – naprezanje u dobetoniranoj ploči (II.faza)

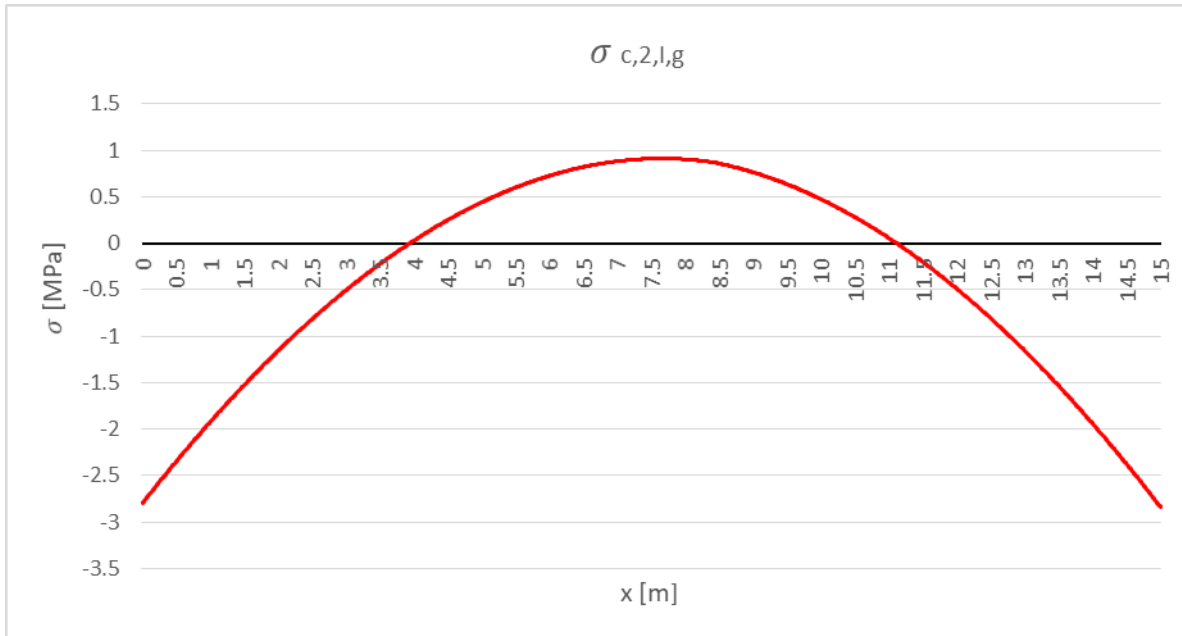
Slike u nastavku prikazuju naprezanje duž cijelog raspona za određeni dio presjeka te trenutak.



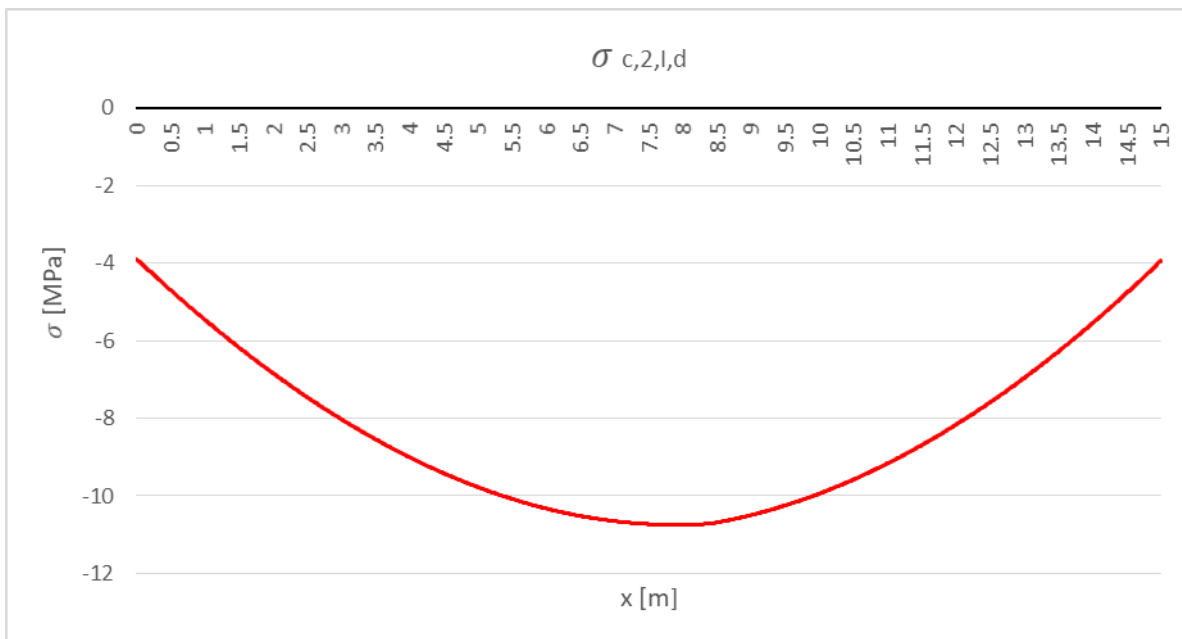
Slika 27. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m0} + G_I$ ")



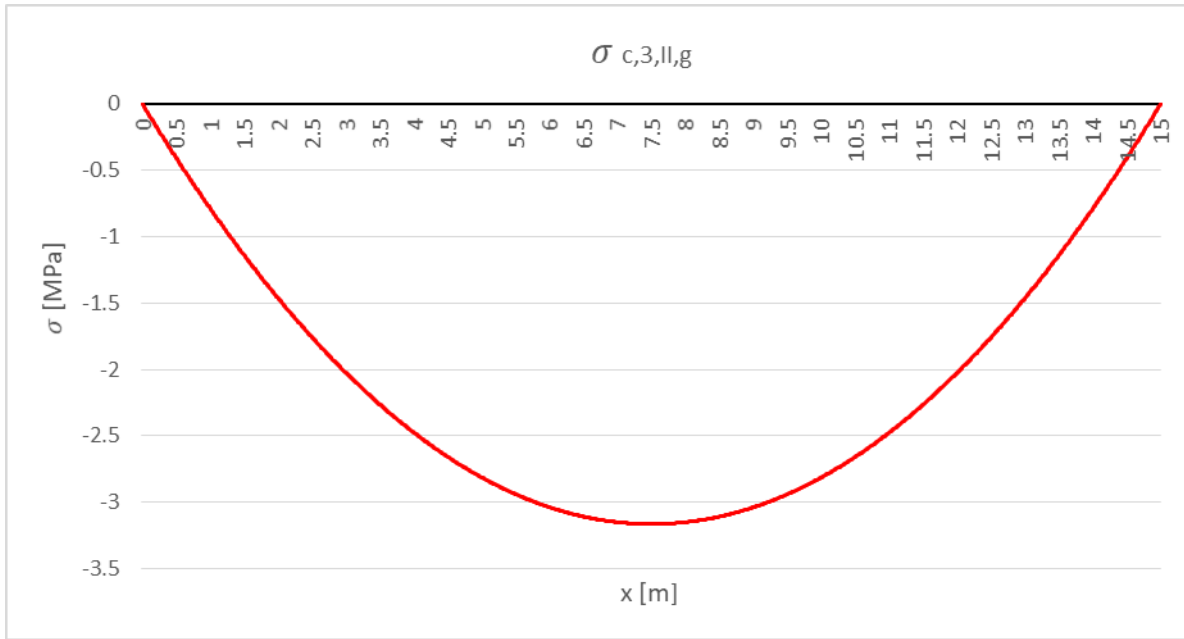
Slika 28. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m0} + G_I$ ")



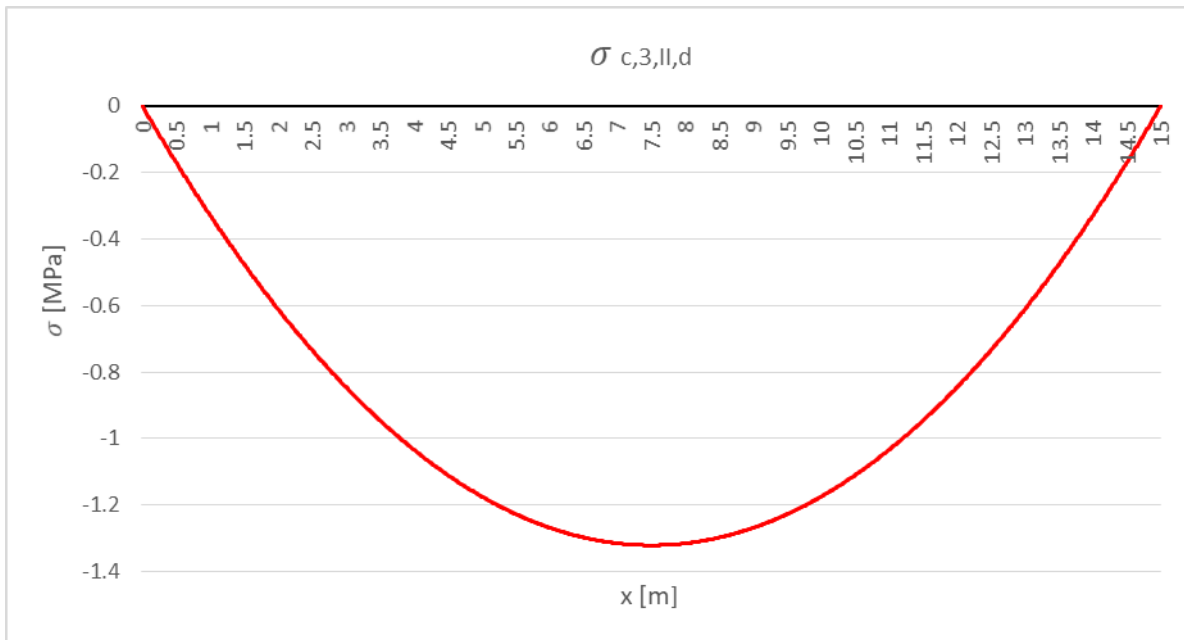
Slika 29. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ ")



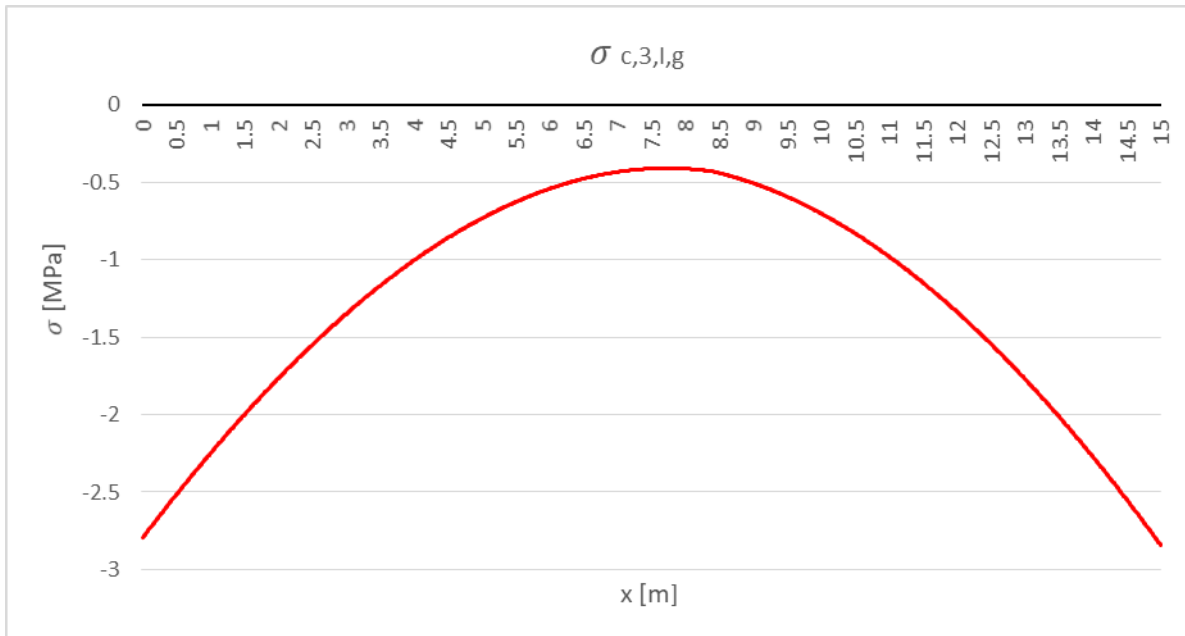
Slika 30. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ ")



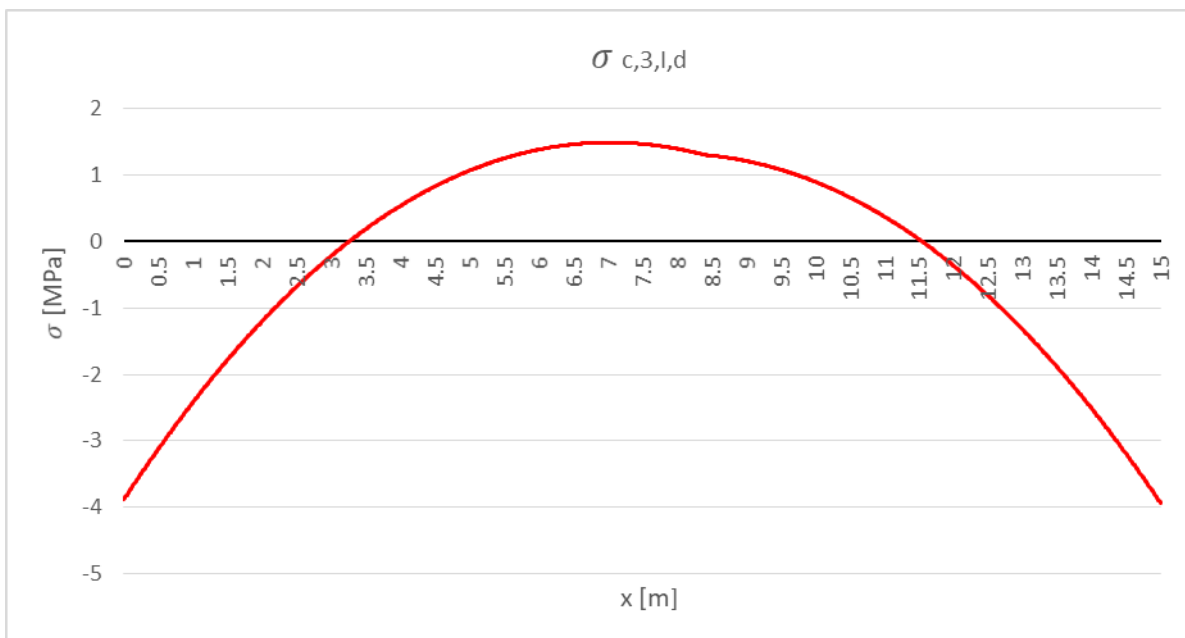
Slika 31. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub dobetonirane ploče te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 32. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub dobetonirane ploče te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 33. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 34. Grafički prikaz naprezanja u betonu za karakterističnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Ograničenja naprezanja za karakterističnu kombinaciju djelovanja su:

$$\sigma_c \leq k_1 \cdot f_{ck}$$

$$\sigma_c \leq 0,6 \cdot 30$$

$$\sigma_c \geq -18 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s \leq k_3 \cdot f_{yk}$$

$$\sigma_s \leq 0,8 \cdot 500$$

$$\sigma_s \leq 400 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p \leq k_5 \cdot f_{pk}$$

$$\sigma_p \leq 0,75 \cdot 1860$$

$$\sigma_p \leq 1395 \text{ MPa}$$

Također, naprezanje ne smije biti veće od srednje osne vlačne čvrstoće betona:

$$\sigma_c \leq f_{ctm}$$

$$\sigma_c \leq 2,9 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$\sigma_c$  – naprezanje u betonu

$\sigma_s$  – naprezanje u armaturi

$\sigma_p$  – naprezanje u prednapetoj natezi

$k_1 = 0,6$  (preporučena vrijednost prema nacionalnom dodatku)

$k_3 = 0,8$  (preporučena vrijednost prema nacionalnom dodatku)

$k_5 = 0,75$  (preporučena vrijednost prema nacionalnom dodatku)

Kontrole ograničenja naprezanja u armaturi te u prednapetoj natezi nije potrebno provjeravati jer je presjek neraspucan. Stoga, provjerava se samo naprezanje u betonu i to za najmanju te najveću vrijednost naprezanja za sve trenutke i faze. Najmanja vrijednost

naprezanja je u donjem rubu „T“ presjeka na duljini  $x = 7,84$  m, za trenutak " $P_{m0} + G_I$ " i fazu I, dok je najveća vrijednost naprezanja u donjem rubu presjeka na duljini  $x = 7,03$  m, za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ " i fazu I:

$$\sigma_{c,1,I,d} = -12,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = 1,49 \text{ MPa}$$

Kontrola ograničenja naprezanja iznosi:

$$-18 \text{ MPa} \leq -12,44 \text{ MPa} \leq 2,9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

$$-18 \text{ MPa} \leq 1,49 \leq 2,9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

### ***3.7.2 Provjera ograničenja naprezanja za nazovistalnu kombinaciju***

Slika 26. prikazuje dijelove presjeka u kojima se proračunava naprezanje. Za dobivanje potrebnih naprezanja u presjeku duž raspona korišten je računalni program Mathcad. Naprezanja u presjeku proračunata su za svaki 1 cm. U nastavku je prikazan postupak proračuna naprezanja u presjeku na sredini raspona.

Ulazni podaci za proračun naprezanja u presjeku na sredini raspona:

$$x = 7,5 \text{ m}$$

$$M_{G_I} = 273,52 \text{ kNm}$$

$$M_{G_{II}} = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{\Delta G} = 1122,27 \text{ kNm}$$

$$M_Q = 0 \text{ kNm}$$

$$P_{m0} = 1456,02 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty} = 1305,21 \text{ kN}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m0} + G_I$ " iznose:

$$\sigma_{c,1,I,g} = \left[ -\frac{P_{m0}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m0}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{M_{G_I}(x)}{W_{g,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,g} = \left[ -\frac{1456,02}{0,389} + \frac{1456,02 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{273,52}{0,119307} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,g} = 1,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = \left[ -\frac{P_{m0}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m0}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{M_{G_I}(x)}{W_{d,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = \left[ -\frac{1456,02}{0,389} - \frac{1456,02 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{273,52}{0,068998} \right]$$

$$\sigma_{c,1,I,d} = -12,43 \text{ MPa}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ " iznose:

$$\sigma_{c,2,I,g} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{g,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,g} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} + \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{(273,52 + 0)}{0,119307} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,g} = 0,91 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} - \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{(273,52 + 0)}{0,068998} \right]$$

$$\sigma_{c,2,I,d} = -10,73 \text{ MPa}$$

Naprezanja za trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ " iznose:

$$\sigma_{c,3,II,g} = m_c \cdot \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{g,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,g} = 1 \cdot \left( -\frac{1122,27 + 0}{0,404793} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,g} = -2,77 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = m_c \cdot \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{spoj,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = 1 \cdot \left( -\frac{1122,27 + 0}{0,969632} \right)$$

$$\sigma_{c,3,II,d} = -1,16 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,g} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} + \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{g,I}} - \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{g,I}} \right] + \left( -\frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{spoj,kom}} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,g} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} + \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,119307} - \frac{(273,52 + 0)}{0,119307} \right] + \left( -\frac{(1122,27 + 0)}{0,969632} \right)$$

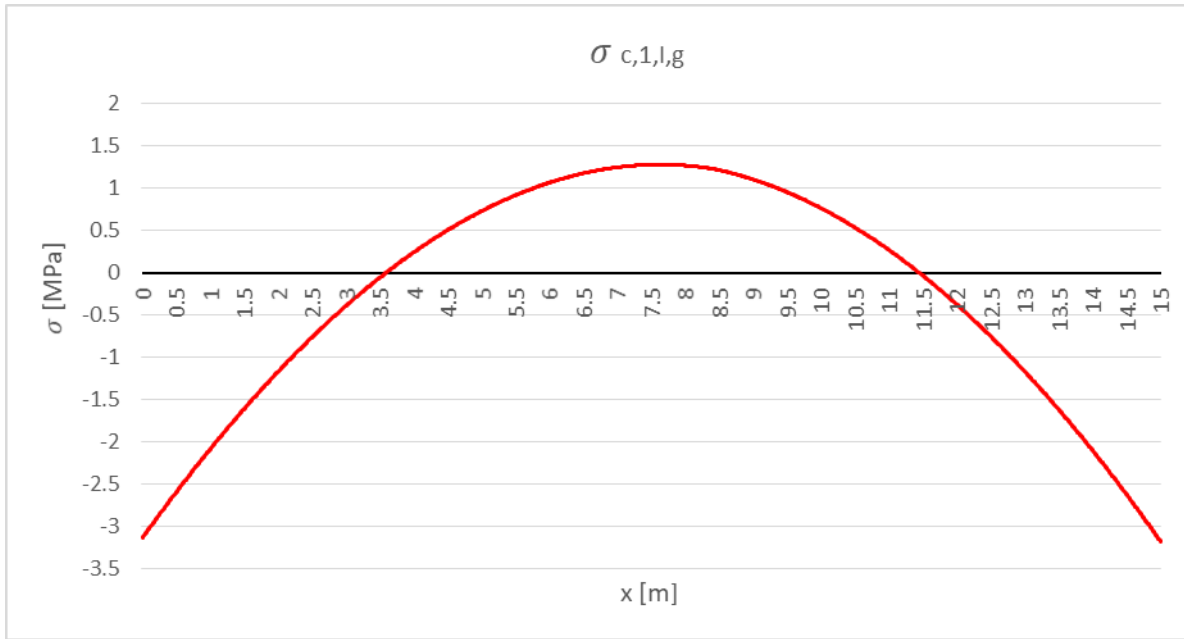
$$\sigma_{c,3,I,g} = -0,25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = \left[ -\frac{P_{m\infty}}{A_{c,I}} - \frac{P_{m\infty}(x) \cdot z_{cp,I}(x)}{W_{d,I}} + \frac{(M_{G_I}(x) + M_{G_{II}}(x))}{W_{d,I}} \right] + \left( \frac{M_{\Delta G}(x) + M_Q(x)}{W_{d,kom}} \right)$$

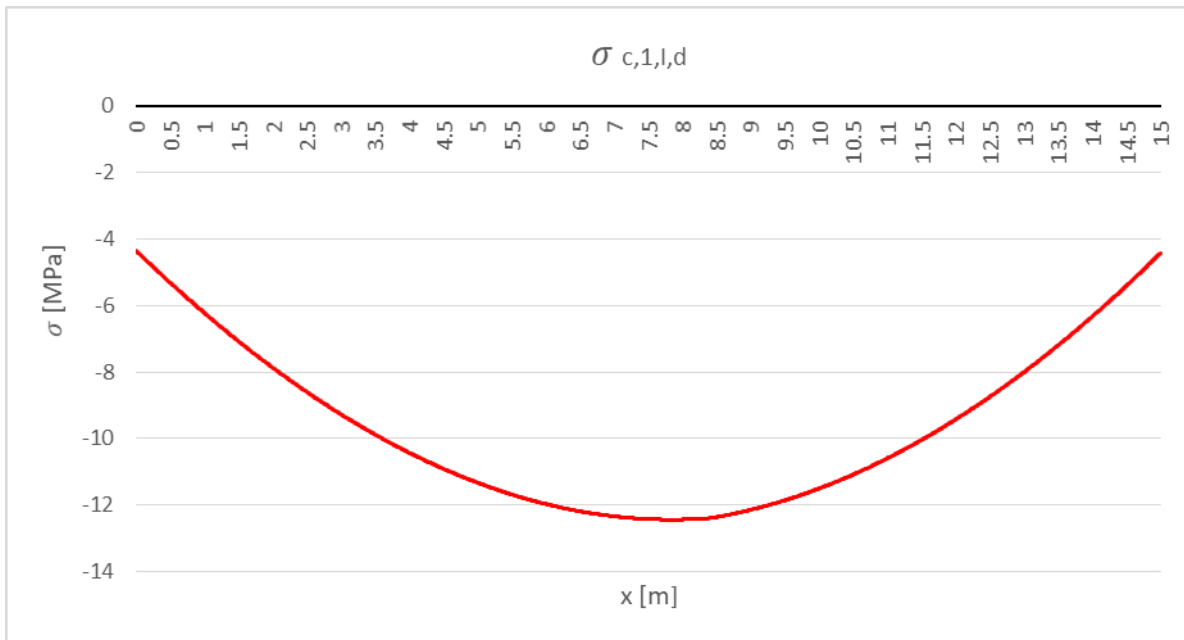
$$\sigma_{c,3,I,d} = \left[ -\frac{1305,21}{0,389} - \frac{1305,21 \cdot 0,59944}{0,068998} + \frac{(273,52 + 0)}{0,068998} \right] + \left( \frac{(1122,27 + 0)}{0,10502} \right)$$

$$\sigma_{c,3,I,d} = -0,04 \text{ MPa}$$

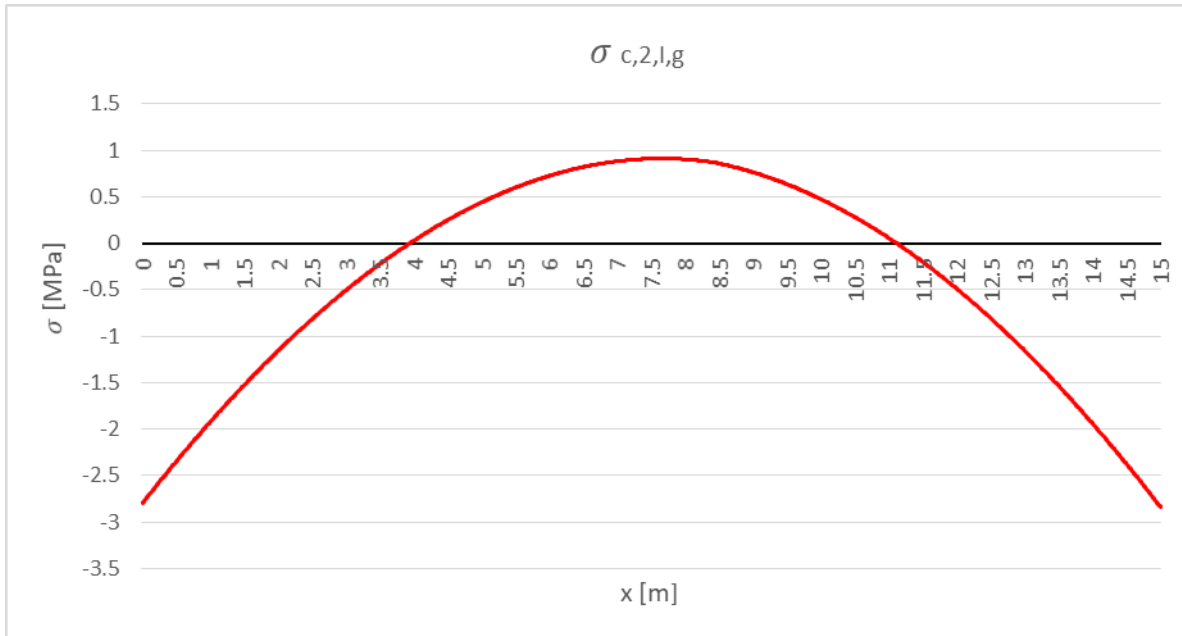
Slike u nastavku prikazuju naprezanje duž cijelog raspona za određeni dio presjeka te trenutak.



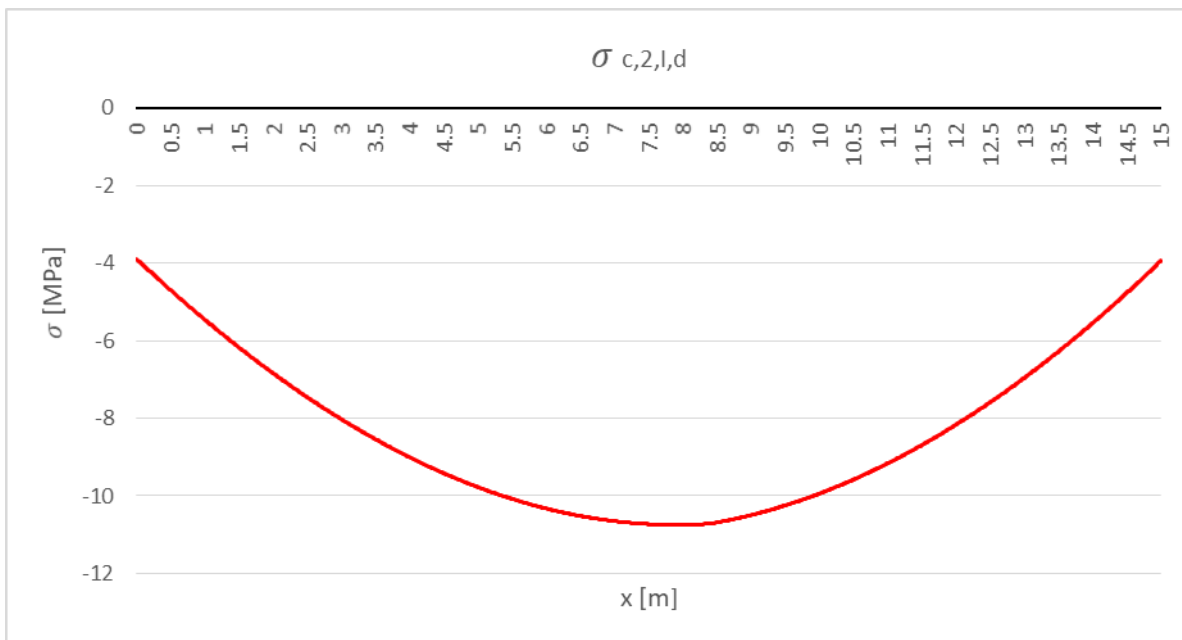
Slika 35. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m0} + G_I$ ")



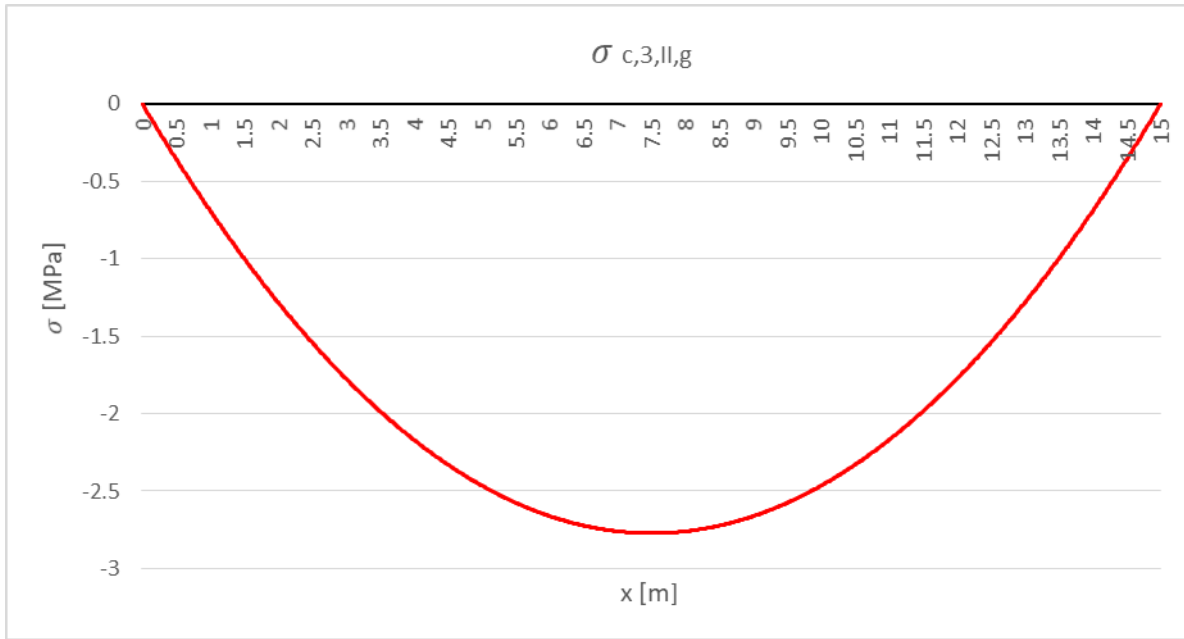
Slika 36. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m0} + G_I$ ")



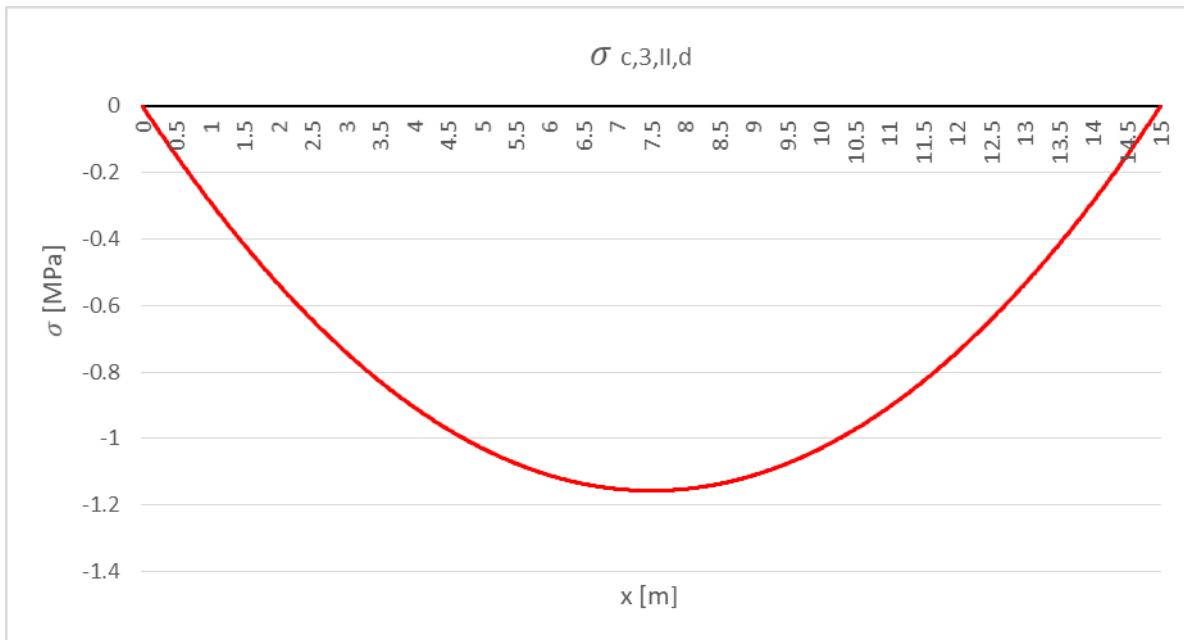
Slika 37. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ ")



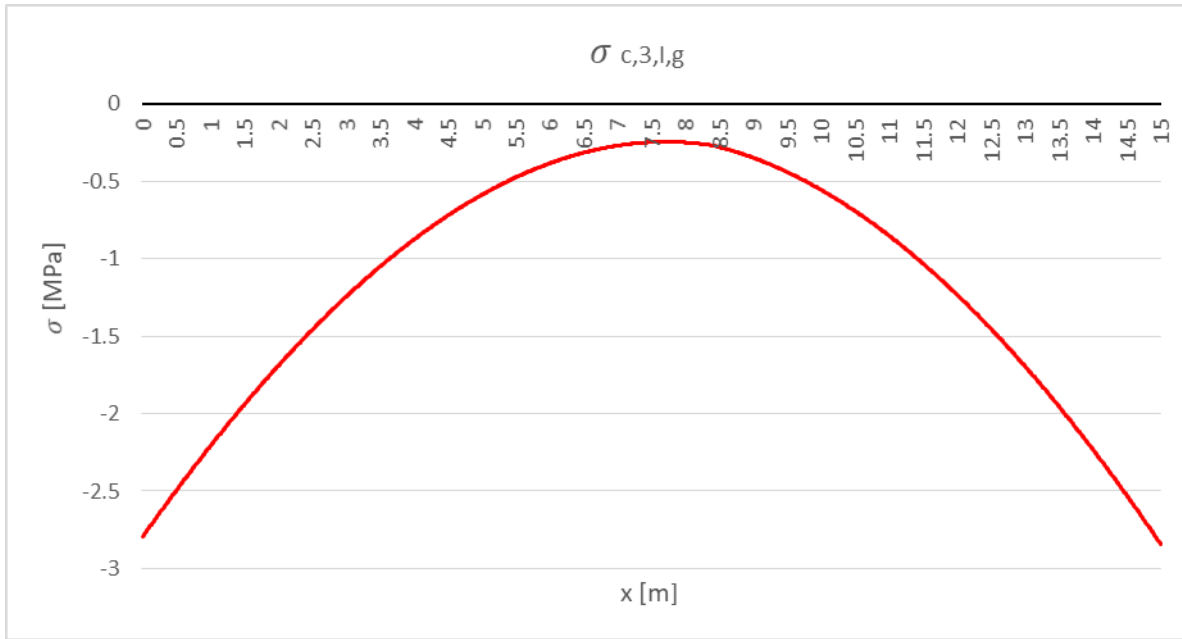
Slika 38. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II}$ ")



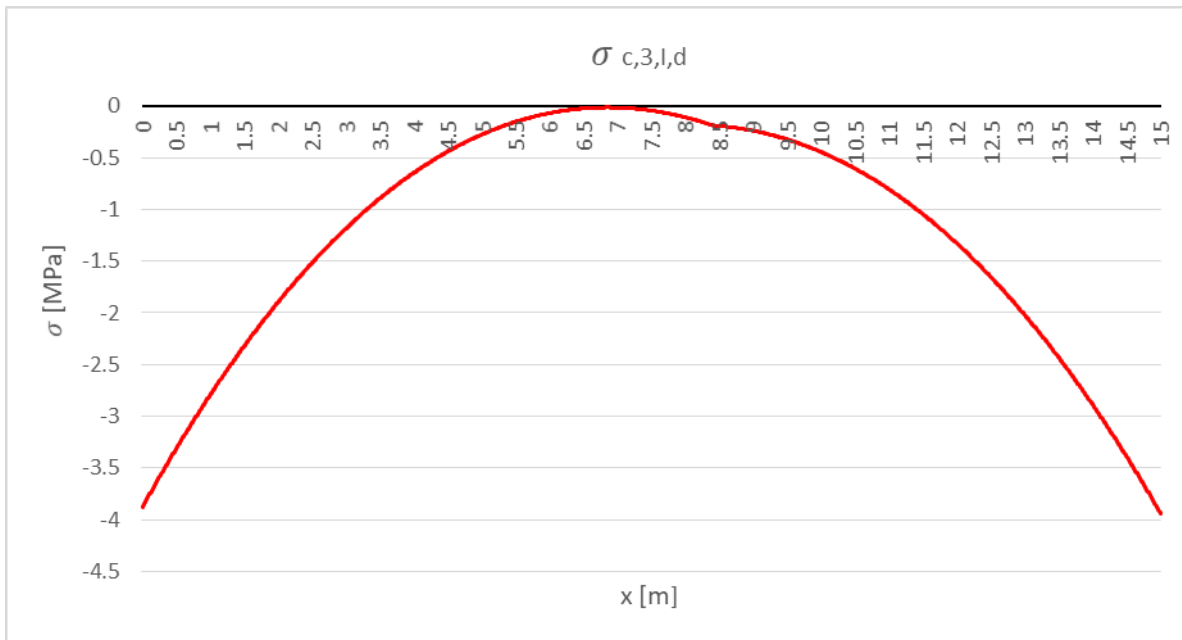
Slika 39. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub dobetonirane ploče te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 40. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub dobetonirane ploče te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 41. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (gornji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Slika 42. Grafički prikaz naprezanja u betonu za nazovistalnu kombinaciju djelovanja (donji rub „T“ presjeka te trenutak " $P_{m\infty} + G_I + G_{II} + \Delta G + Q$ ")



Ograničenje naprezanja za nazovistalnu kombinaciju djelovanja su:

$$\sigma_c \leq k_2 \cdot f_{ck}$$

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot 30$$

$$\sigma_c \geq -13,5 \text{ MPa}$$

Također, naprezanje ne smije biti veće od srednje osne vlačne čvrstoće betona:

$$\sigma_c \leq f_{ctm}$$

$$\sigma_c \leq 2,9 \text{ MPa}$$

Gdje su:

$\sigma_c$  – naprezanje u betonu

$k_2 = 0,45$  (preporučena vrijednost prema nacionalnom dodatku)

Kontrola ograničenja naprezanja se isto provjerava za najmanju te najveću vrijednost naprezanja za sve trenutke i faze. Najmanja vrijednost naprezanja je u donjem rubu „T“ presjeka na duljini  $x = 7,84$  m, za trenutak " $P_{m0} + G_I$ " i fazu I, dok je najveća vrijednost naprezanja u gornjem rubu „T“ presjeka na duljini  $x = 7,63$  m, za trenutak " $P_{m0} + G_I$ " i fazu I.:

$$\sigma_{c,1,I,d} = -12,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,3,I,G} = 1,28 \text{ MPa}$$

Kontrola ograničenja naprezanja iznosi:

$$-13,5 \text{ MPa} \leq -12,44 \text{ MPa} \leq 2,9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

$$-13,5 \text{ MPa} \leq 1,28 \text{ MPa} \leq 2,9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

## 4. ARMIRANOBETONSKA PLOČA

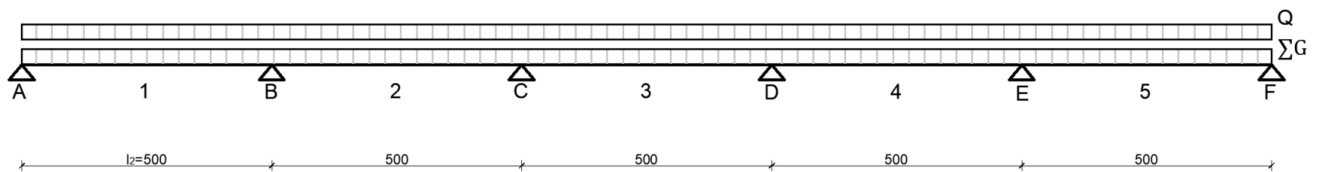
### 4.1 Analiza opterećenja

Analiza opterećenja je provedena u potpoglavlju 3.3 (Analiza opterećenja i kombinacije djelovanja). Stoga, stalno opterećenje za ploču  $\Sigma G$  iznosi  $7,05 \text{ kN/m}^2$  dok promjenjivo opterećenje  $Q$  za ploču iznosi  $1,00 \text{ kN/m}^2$ . Proračunsko opterećenje iznosi:

$$q_{Ed} = \gamma_G \cdot \Sigma G + \gamma_Q \cdot Q$$

$$q_{Ed} = 1,35 \cdot 7,05 + 1,5 \cdot 1,00$$

$$q_{Ed} = 11,018 \text{ kN}$$



Slika 43. Statički sustav armiranobetonske ploče i prikaz opterećenja na ploču

Proračun reakcija u osloncima:

$$A_G = 0,395 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$A_G = 0,395 \cdot 7,05 \cdot 5$$

$$A_G = 13,924 \text{ kN}$$

$$A_Q = 0,395 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$A_Q = 0,395 \cdot 1,00 \cdot 5$$

$$A_Q = 1,975 \text{ kN}$$

$$A_{Ed} = \gamma_G \cdot A_G + \gamma_Q \cdot A_Q$$

$$A_{Ed} = 1,35 \cdot 13,924 + 1,5 \cdot 1,975$$

$$A_{Ed} = 21,760 \text{ kN}$$

$$B_G = 1,132 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$B_G = 1,132 \cdot 7,05 \cdot 5$$

$$B_G = 39,903 \text{ kN}$$

$$B_Q = 1,132 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$B_Q = 1,132 \cdot 1,00 \cdot 5$$

$$B_Q = 5,66 \text{ kN}$$

$$B_{Ed} = \gamma_G \cdot B_G + \gamma_Q \cdot B_Q$$

$$B_{Ed} = 1,35 \cdot 39,903 + 1,5 \cdot 5,66$$

$$B_{Ed} = 62,359 \text{ kN}$$

$$C_G = 0,974 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$C_G = 0,974 \cdot 7,05 \cdot 5$$

$$C_G = 34,334 \text{ kN}$$

$$C_Q = 0,974 \cdot \Sigma G \cdot l_2$$

$$C_Q = 0,974 \cdot 1,00 \cdot 5$$

$$C_Q = 4,87 \text{ kN}$$

$$C_{Ed} = \gamma_G \cdot C_G + \gamma_Q \cdot C_Q$$

$$C_{Ed} = 1,35 \cdot 34,334 + 1,5 \cdot 4,87$$

$$C_{Ed} = 53,656 \text{ kN}$$

Gdje je:

G – reakcija u osloncu od djelovanja stalnog opterećenja

Q – reakcija u osloncu od djelovanja promjenjivog opterećenja

Ed – proračunska vrijednost reakcije u osloncu

Proračun momenata savijanja:

$$M_{1G} = 0,078 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{1G} = 0,078 \cdot 7,05 \cdot 5^2$$

$$M_{1G} = 13,748 \text{ kNm}$$

$$M_{1Q} = 0,078 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{1Q} = 0,078 \cdot 1,00 \cdot 5^2$$

$$M_{1Q} = 1,95 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed1} = \gamma_G \cdot M_{1G} + \gamma_Q \cdot M_{1Q}$$

$$M_{Ed1} = 1,35 \cdot 13,748 + 1,5 \cdot 1,95$$

$$M_{Ed1} = 21,485 \text{ kNm}$$

$$M_{2G} = 0,033 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{2G} = 0,033 \cdot 7,05 \cdot 5^2$$

$$M_{2G} = 5,816 \text{ kNm}$$

$$M_{2Q} = 0,033 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{2Q} = 0,033 \cdot 1,00 \cdot 5^2$$

$$M_{2Q} = 0,825 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed2} = \gamma_G \cdot M_{2G} + \gamma_Q \cdot M_{2Q}$$

$$M_{Ed2} = 1,35 \cdot 5,816 + 1,5 \cdot 0,825$$

$$M_{Ed2} = 9,089 \text{ kNm}$$

$$M_{3G} = 0,046 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{3G} = 0,046 \cdot 7,05 \cdot 5^2$$

$$M_{3G} = 8,108 \text{ kNm}$$

$$M_{3Q} = 0,046 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{3Q} = 0,046 \cdot 1,00 \cdot 5^2$$

$$M_{3Q} = 1,15 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed3} = \gamma_G \cdot M_{3G} + \gamma_Q \cdot M_{3Q}$$

$$M_{Ed3} = 1,35 \cdot 9,089 + 1,5 \cdot 1,15$$

$$M_{Ed3} = 13,995 \text{ kNm}$$

$$M_{BG} = -0,105 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{BG} = -0,105 \cdot 7,05 \cdot 5^2$$

$$M_{BG} = -18,506 \text{ kNm}$$

$$M_{BQ} = -0,105 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{BQ} = -0,105 \cdot 1,00 \cdot 5^2$$

$$M_{BQ} = -2,625 \text{ kNm}$$

$$M_{EdB} = \gamma_G \cdot M_{BG} + \gamma_Q \cdot M_{BQ}$$

$$M_{EdB} = 1,35 \cdot (-18,506) + 1,5 \cdot (-2,625)$$

$$M_{EdB} = -28,921 \text{ kNm}$$

$$M_{CG} = -0,079 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{CG} = -0,079 \cdot 7,05 \cdot 5^2$$

$$M_{CG} = -13,924 \text{ kNm}$$

$$M_{CQ} = -0,079 \cdot \Sigma G \cdot l_2^2$$

$$M_{CQ} = -0,079 \cdot 1,00 \cdot 5^2$$

$$M_{CQ} = -1,975 \text{ kNm}$$

$$M_{EdC} = \gamma_G \cdot M_{CG} + \gamma_Q \cdot M_{CQ}$$

$$M_{EdC} = 1,35 \cdot (-13,924) + 1,5 \cdot (-1,975)$$

$$M_{EdC} = -21,76 \text{ kNm}$$

Gdje je:

G – moment savijanja od djelovanja stalnog opterećenja

Q – moment savijanja od djelovanja promjenjivog opterećenja

Ed – proračunska vrijednost momenta savijanja

Proračun položaja nul-točaka [2]:

$$x_{V1} = \frac{A_{Ed}}{q_{Ed}}$$

$$x_{V1} = \frac{21,76}{11,018}$$

$$x_{V1} = 1,97 \text{ m}$$

$$x_{M1} = x_{V1} \mp x_{V1}$$

$$x_{M1} = 1,97 \mp 1,97$$

$$x_{M1,1} = 0$$

$$x_{M1,2} = 3,94 \text{ m}$$

$$x_{V2} = \frac{(A_{Ed} - (q \cdot l_2) + B_{Ed})}{q_{Ed}}$$

$$x_{V2} = \frac{(21,76 - (11,018 \cdot 5) + 62,359)}{11,018}$$

$$x_{V2} = 2,63 \text{ m}$$

$$x_{M2} = x_{V2} \mp \sqrt{x_{V2}^2 - \frac{2 \cdot M_{EdB}}{q_{Ed}}}$$

$$x_{M2} = 2,63 \mp \sqrt{2,63^2 - \frac{2 \cdot 28,921}{11,018}}$$

$$x_{M2,1} = 1,34 \text{ m}$$

$$x_{M2,2} = 3,92 \text{ m}$$

$$x_{V3} = \frac{(A_{Ed} - (q \cdot l_2) + B_{Ed} - (q \cdot l_2) + C_{Ed})}{q_{Ed}}$$

$$x_{V3} = \frac{(21,76 - (11,018 \cdot 5) + 62,359 - (11,018 \cdot 5) + 53,656)}{11,018}$$

$$x_{V3} = 2,50 \text{ m}$$

$$x_{M3} = x_{V3} \mp \sqrt{x_{V3}^2 - \frac{2 \cdot M_{EdC}}{q_{Ed}}}$$

$$x_{M2} = 2,50 \mp \sqrt{2,50^2 - \frac{2 \cdot 21,76}{11,018}}$$

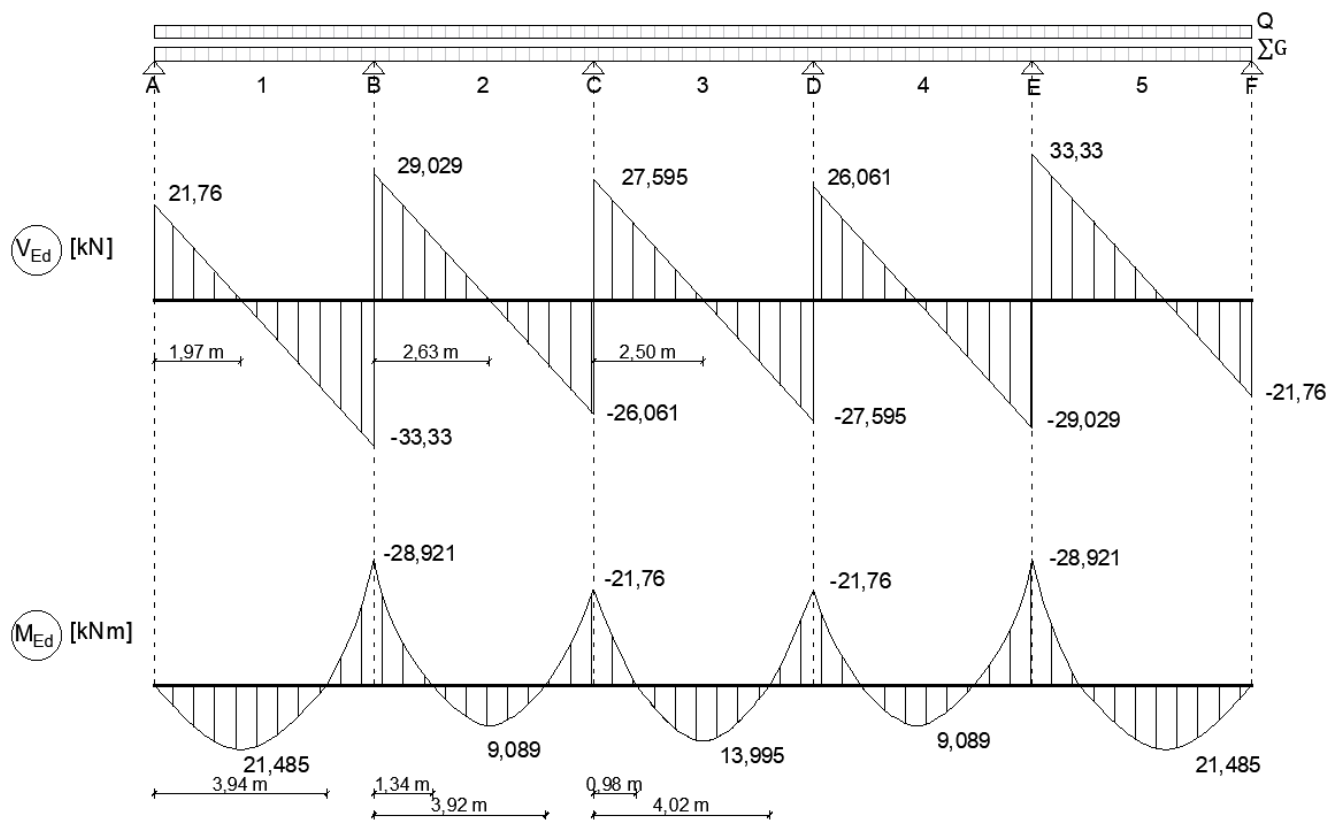
$$x_{M3,1} = 0,98 \text{ m}$$

$$x_{M3,2} = 4,02 \text{ m}$$

Gdje je:

V – položaj nul-točke dijagrama poprečnih sila u određenom polju

M – položaj nul-točke dijagrama momenta savijanja u određenom polju



Slika 44. Prikaz dijagrama poprečnih sila i momenata savijanja

## 4.2 Proračun statičke visine

Razred izloženosti: XC1 (suho ili trajno vlažno); beton unutar građevina s niskom vlagom zraka [6]

Predviđeni vijek trajanja građevine: 50 godina [6]

Vrsta elementa: Element pločaste geometrije [6]

Preporučeni razred konstrukcije: S4 [6]

Izračun: S4 – 0 (proračunski vijek 50 godina) – 1 (C30/37) – 1 (pločasti element) = S2

Najmanja debljina zaštitnog sloja zbog uvjeta okoliša za S2 i XC1:  $c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} \\ c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$



$$c_{min} = \max \begin{cases} \emptyset \leq 10 \text{ mm} \\ 10 + 0 - 0 - 0 = 10 \text{ mm} \rightarrow 10 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{cases}$$

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

$$c_{nom} = 10 + 10 = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$$

$$d_{1,pl} = c_{nom} + \frac{\emptyset}{2}$$

$$d_{1,pl} = 2 + \frac{1}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$d_{pl} = h_5 - d_1$$

$$d_{pl} = 15 - 2,5$$

$$d_{pl} = 12,5 \text{ cm}$$

Gdje je:

$c_{min}$  – najmanja debljina zaštitnog sloja

$c_{min,b}$  – najmanja debljina zaštitnog sloja za osiguranje prionjivosti za pojedinačne šipke; jednak je promjeru šipke  $\emptyset$

$c_{min,dur}$  – najmanja debljina zaštitnog sloja zbog uvjeta okoliša

$\Delta c_{dur,\gamma}$  – sigurnosni dodatak;  $\Delta c_{dur,\gamma} = 0$

$\Delta c_{dur,st}$  – smanjenje u slučaju korištenja nehrđajućeg čelika;  $\Delta c_{dur,st} = 0$

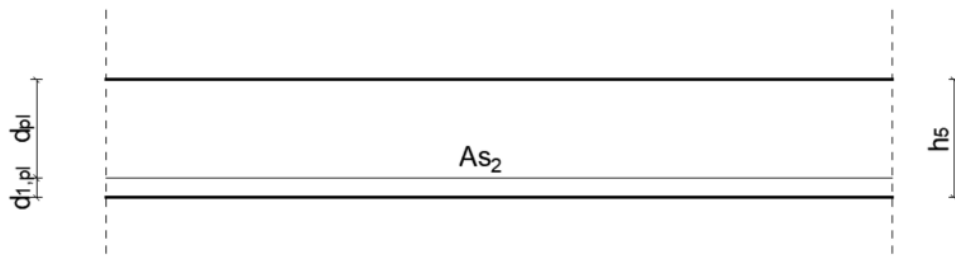
$\Delta c_{dur,add}$  – smanjenje zaštitnog sloja ako se rabi beton s dodanim aditivom;  $\Delta c_{dur,add} = 0$

$c_{nom}$  – nazivna debljina zaštitnog sloja

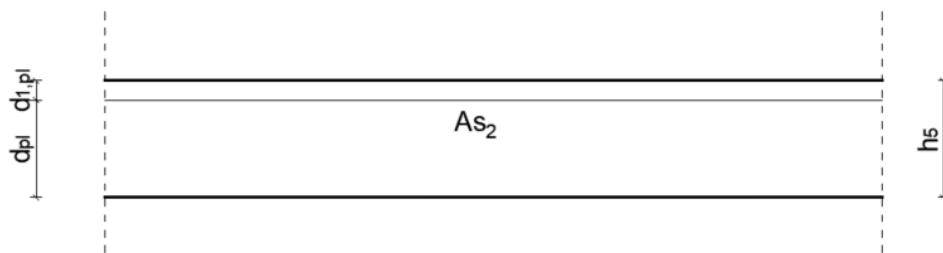
$\Delta c_{dev}$  – dodatak debljine zaštitnog sloja za osiguranje odstupanja;  $\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$

$d_{1,pl}$  – statička visina armature

$d_{pl}$  – statička visina čelika za armiranje



Slika 45. Prikaz statičke visine armature u donjoj zoni ploče



Slika 46. Prikaz statičke visine armature u gornjoj zoni ploče

### 4.3 Dimenzioniranje na moment savijanja

#### 4.3.1 Polje 1

$$\mu_{Ed1} = \frac{M_{Ed1}}{b \cdot d_{pl}^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{Ed1} = \frac{2148,5}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,0}$$

$$\mu_{Ed1} = 0,069 \cong 0,071 < \mu_{Rds,lim} = 0,296 \quad \rightarrow \quad \xi = 0,091; \zeta = 0,962$$

$$A_{s2,1} = \frac{M_{Ed1}}{\zeta \cdot d_{pl} \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s2,1} = \frac{2148,5}{0,962 \cdot 12,5 \cdot 43,48}$$

$$A_{s2,1} = 4,11 \text{ cm}^2/\text{m}' \quad \rightarrow \quad \text{Usvaja se armatura } A_{s2,1} = \emptyset 10/17 \text{ cm (4,62 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

### 4.3.2 Oslonac B

$$\mu_{EdB} = \frac{M_{EdB}}{b \cdot d_{pl}^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{EdB} = \frac{2892,1}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,0}$$

$$\mu_{EdB} = 0,093 \cong 0,096 < \mu_{Rds,lim} = 0,296 \quad \rightarrow \quad \xi = 0,125; \zeta = 0,948$$

$$A_{s2,B} = \frac{M_{EdB}}{\zeta \cdot d_{pl} \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s2,B} = \frac{2892,1}{0,948 \cdot 12,5 \cdot 43,48}$$

$$A_{s2,B} = 5,61 \text{ cm}^2/\text{m}' \quad \rightarrow \quad \text{Usvaja se armatura } A_{s2,B} = \emptyset 10/13 \text{ cm (6,04 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

### 4.3.3 Polje 2

$$\mu_{Ed2} = \frac{M_{Ed2}}{b \cdot d_{pl}^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{Ed2} = \frac{908,9}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,0}$$

$$\mu_{Ed2} = 0,029 \cong 0,030 < \mu_{Rds,lim} = 0,296 \quad \rightarrow \quad \xi = 0,037; \zeta = 0,985$$

$$A_{s2,2} = \frac{M_{Ed2}}{\zeta \cdot d_{pl} \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s2,2} = \frac{908,9}{0,985 \cdot 12,5 \cdot 43,48}$$

$$A_{s2,2} = 1,70 \text{ cm}^2/\text{m}' \quad \rightarrow \quad \text{Usvaja se armatura } A_{s2,2} = \emptyset 10/20 \text{ cm (3,93 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

#### 4.3.4 Oslonac C

$$\mu_{EdC} = \frac{M_{EdC}}{b \cdot d_{pl}^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{EdC} = \frac{2176}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,0}$$

$$\mu_{EdC} = 0,069 \cong 0,071 < \mu_{Rds,lim} = 0,296 \quad \rightarrow \quad \xi = 0,091; \zeta = 0,962$$

$$A_{s2,C} = \frac{M_{EdC}}{\zeta \cdot d_{pl} \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s2,C} = \frac{2176}{0,962 \cdot 12,5 \cdot 43,48}$$

$$A_{s2,C} = 4,16 \text{ cm}^2/\text{m}' \quad \rightarrow \quad \text{Usvaja se armatura } A_{s2,C} = \emptyset 10/17 \text{ cm (4,62 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

#### 4.3.5 Polje 3

$$\mu_{Ed3} = \frac{M_{Ed3}}{b \cdot d_{pl}^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{Ed3} = \frac{1399,5}{100 \cdot 12,5^2 \cdot 2,0}$$

$$\mu_{Ed3} = 0,045 < \mu_{Rds,lim} = 0,296 \quad \rightarrow \quad \xi = 0,057; \zeta = 0,976$$

$$A_{s2,3} = \frac{M_{Ed3}}{\zeta \cdot d_{pl} \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s2,3} = \frac{1399,5}{0,976 \cdot 12,5 \cdot 43,48}$$

$$A_{s2,3} = 2,64 \text{ cm}^2/\text{m}' \quad \rightarrow \quad \text{Usvaja se armatura } A_{s2,3} = \emptyset 10/20 \text{ cm (3,93 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

Gdje je:

$b$  – širina presjeka

$\xi$  – koeficijent visine neutralne osi

$\zeta$  – koeficijent kraka unutarnjih sila

#### 4.3.6 Razdjelna armatura

Sekundarnu poprečnu (razdjelnu) armaturu ne manju od 20 % glavne armature treba osigurati u pločama nosivim u jednom smjeru. Radi jednostavnosti razdjelna armatura se postavlja duž cijele ploče i to od 20 % glavne armature u osloncu B.

$$A_{st} = 0,20 \cdot A_{s2,B}$$

$$A_{st} = 0,20 \cdot 6,04$$

$$A_{st} = 1,21 \text{ cm}^2/\text{m}' \rightarrow \text{Usvaja se razdjelna armatura } A_{st} = \emptyset 6/20 \text{ cm (1,41 cm}^2/\text{m}'\text{)}$$

Najmanji postotak armiranja iznosi:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d_{pl} \geq 0,0013 \cdot b \cdot d_{pl}$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{2,9}{500} \cdot 100 \cdot 12,5 \geq 0,0013 \cdot 100 \cdot 12,5$$

$$A_{s,min} = 1,89 \text{ cm}^2 > 1,63 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = 1,89 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Najveća armatura za jednostruko armirani presjek iznosi:

$$A_{s2,max} = 0,022 \cdot A_C$$

$$A_{s2,max} = 0,022 \cdot b \cdot h_5 = 0,022 \cdot 100 \cdot 15 = 33 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

$$A_{s,min} \leq A_{s2,B} \leq A_{s2,max}$$

$$1,89 \text{ cm}^2/\text{m}' \leq 6,04 \text{ cm}^2/\text{m}' \leq 33 \text{ cm}^2/\text{m}' \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

Najveći dopušteni razmaci armature ploče:

$$\text{Glavna armatura: } \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot h_5 = 2 \cdot 150 = 300 \text{ mm} \\ 250 \text{ mm} \end{array} \right. = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Razdjelna armatura: } \min \left\{ \begin{array}{l} 3 \cdot h_5 = 3 \cdot 150 = 450 \text{ mm} \\ 400 \text{ mm} \end{array} \right. = 400 \text{ mm}$$

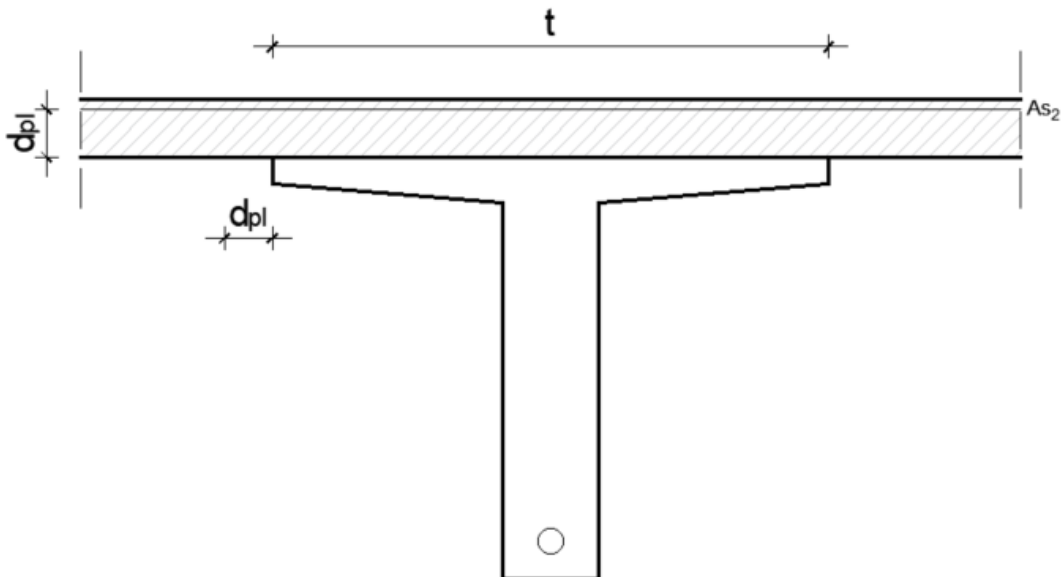
#### 4.4 Dimenzioniranje na poprečnu silu

Dimenzioniranje na poprečnu silu se proračunava za ležaj „B“. Za potrebne provjere potrebno je izračunati umanjenu poprečnu silu na ležaju „B“:

$$V'_{Ed,B} = -V_{Ed,B} + q_{Ed} \cdot \left(\frac{t}{2} + d_{pl}\right)$$

$$V'_{Ed,B} = -33,33 + 11,018 \cdot \left(\frac{1,45}{2} + 0,125\right)$$

$$V'_{Ed,B} = -23,96 \text{ kN}$$



Slika 47. Prikaz veličina potrebnih za proračun umanjene poprečne sile

##### 4.4.1 Proračunski potrebna poprečna armatura

Nosivost elemenata na poprečnu silu bez poprečne armature:

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$$

uz najmanju vrijednost

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_{pl}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{pl}}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{1250}} = 1,4 \leq 2$$

$$A_{s2,B} = 6,04 \text{ cm}^2$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$$\rho_1 = \frac{6,04}{100 \cdot 12,5} = 0,004832 \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd}$$

$$N_{Ed} = 0 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

Vrijednosti za  $C_{Rd,c}$ ,  $v_{min}$  i  $k_1$  dobivamo iz nacionalnog dodatka [6]:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1,4^{3/2} \cdot 30^{1/2} = 0,32$$

$$k_1 = 0,15$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} = [0,12 \cdot 1,4 \cdot (100 \cdot 0,004832 \cdot 30)^{1/3} + 0,15 \cdot 0] \cdot 1000 \cdot 125$$

$$V_{Rd,c} = 51203,79 \text{ N} = 51,20 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} \geq (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_{Rd,c} \geq (0,32 + 0,15 \cdot 0) \cdot 1000 \cdot 125$$

$$V_{Rd,c} \geq 40000 \text{ N} = 40,0 \text{ kN}$$

$$51,20 \text{ kN} \geq 40,0 \text{ kN} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

$$V'_{Ed,B} = 23,96 \text{ kN} < V_{Rd,c} = 51,20 \text{ kN} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$

#### **4.4.2 Dokaz čvrstoće tlačnih štapova**

Zadovoljavanjem nosivosti na poprečne sile nije potreban proračun poprečne armature, stoga nosivost tlačnih štapova se može provjeriti pomoću sljedećeg izraza:

$$V'_{Ed,B} \leq 0,5 \cdot b_w \cdot d_{pl} \cdot v_1 \cdot f_{cd}$$

$$V'_{Ed,B} \leq 0,5 \cdot 100 \cdot 12,5 \cdot 0,528 \cdot 2,0$$

$$23,96 \text{ kN} \leq 660 \text{ kN} \rightarrow \text{Zadovoljava}$$



## 5. DULJINE SIDRENJA I PRIJEKLOPA ŠIPKI ARMIRANOBETONSKE PLOČE

### 5.1 Granično stanje prijanjanja

Proračunska vrijednost graničnog naprezanja prijanjanja za rebraste šipke:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,33$$

$$f_{bd} = 3,0 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$\eta_1$  – koeficijent koji se odnosi na kvalitetu uvjeta prijanjanja i položaj šipke za vrijeme betoniranja;  $\eta_1 = 1$  kad su „dobri“ uvjeti

$\eta_2$  – odnosi se na promjer šipke;  $\eta_2 = 1$  ( $\emptyset \leq 32\text{mm}$ )

### 5.2 Duljina sidrenja

Osnovna duljina sidrenja:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

Gdje je:

$\sigma_{sd}$  – proračunsko naprezanje šipke na položaju od kojeg se mjeri sidrenje,  $\sigma_{sd} = 434,8 \text{ MPa}$  (na strani sigurnosti) za čelik B500A

Ako je  $\sigma_{sd} = 0 \text{ MPa}$ , tada je  $l_{b,rqd} = 0 \text{ cm}$

Ø10:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{10}{4} \cdot \frac{434,8}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 362,33 \text{ mm} \cong 37 \text{ cm}$$

Proračunska duljina sidrenja ravnih šipki:

$$l_{bd,1} = l_{b,rqd}$$

Proračunska duljina sidrenja šipki sa kutnom kukom:

$$l_{bd,2} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

Gdje je:

$\alpha_1$  – učinak oblika šipki uz odgovarajući zaštitni sloj;  $\alpha_1 = 1$  (na strani sigurnosti)

$\alpha_2$  – učinak najmanjeg zaštitnog sloja;  $\alpha_2 = 1$  (na strani sigurnosti)

$\alpha_3$  – učinak ovijanja poprečnom armaturom;  $\alpha_3 = 1$  (na strani sigurnosti)

$\alpha_4$  – utjecaj jedne ili više zavarenih poprečnih šipki uzduž proračunske duljine sidrenja;

$\alpha_4 = 0,7$  (na strani sigurnosti)

$\alpha_5$  – učinak tlačnog naprezanja okomito na ravninu cijepanja uzduž proračunske duljine

sidrenja;  $\alpha_5 = 1$  (na strani sigurnosti)

Za sidrenje u vlaku:

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

Za sidrenje u tlaku:

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,6 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$\phi 10$ :

$$l_{bd,1} = 37 \text{ cm}$$

$$l_{bd,2} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 37 = 25,9 \cong 26 \text{ cm}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 370 \\ 10 \cdot 10 \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 111 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = 11,1 \text{ cm}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,6 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,6 \cdot 370 \\ 10 \cdot 10 \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 222 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = 22,2 \text{ cm}$$

### 5.2.1 Sidrenje donje armature na krajnjem ležaju

$$F_{Ed} = |A_{Ed}| \cdot \frac{a_l}{z} + N_{Ed}$$

$$F_{Ed} = |21,76| \cdot \frac{12,5}{0,9 \cdot 12,5} + 0$$

$$F_{Ed} = 24,18 \text{ kN}$$

Gdje je:

$F_{Ed}$  – vlačna sila koju je potrebno usidriti

$a_l$  – pomak momentnog dijagrama,  $a_l = d_{pl}$  (za ploče)

$z$  – krak unutarnjih sila,  $z = 0,9 \cdot d_{pl}$

$N_{Ed}$  – osna sila

Potrebna površina armature preko ležaja A:

$$A_{s,req} = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A_{s,req} = \frac{24,18}{43,48}$$

$A_{s,req} = 0,56 \text{ cm}^2 \rightarrow$  vodimo armaturne šipke iz polja preko ležaja

Proračunsko naprezanje šipke ( $A_{s2,1} = \emptyset 10/17 \text{ cm [4,62 cm}^2/\text{m}'\text{]})$ :

$$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_{s2,1}}$$

$$\sigma_{sd} = \frac{24180}{462}$$

$$\sigma_{sd} = 52,34 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{10}{4} \cdot \frac{52,34}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 43,62 \text{ mm} \cong 4,4 \text{ cm}$$

Za sidrenje u vlaku:

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 44 \\ 10 \cdot 10 \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 13,2 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = 10 \text{ cm}$$

$$l_{bd,1} = 4,4 \text{ cm}$$

$$l_{bd,2} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 4,4 = 3,08 \cong 4 \text{ cm}$$

$$l_{bd,2} \geq l_{b,min}$$

$$4,4 \text{ cm} \geq 10 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_{bd} = 10 \text{ cm}$

### 5.2.2 Sidrenje gornje armature na krajnjem ležaju

Gornja armatura mora preuzeti najmanje 25% najvećeg momenta od susjednog polja, što je jednako 25% armature polja:

$$A_{a1} = 25\% \cdot A_{s2,1} = 25\% \cdot 4,62 = 1,16 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

Usvajamo  $\emptyset 10/20 \text{ cm}$  ( $3,93 \text{ cm}^2/\text{m}'$ )

Potrebno produžiti armaturu za najmanje 0,2 duljine susjednog raspona, mjereno od lica oslonca:

$$0,2 \cdot l_{eff} = 0,2 \cdot 500 = 1,0 \text{ m}$$

### 5.2.3 Sidrenje gornje armature na srednjim ležajima

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{10}{4} \cdot \frac{0}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 0 \text{ cm}$$

Za sidrenje u vlaku:

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 0 \\ 10 \cdot 10 \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 0 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{cases} = 10 \text{ cm}$$

$$l_{bd,1} = 0 \text{ cm}$$

$$l_{bd,2} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0 = 0 \text{ cm}$$

$$l_{bd,2} \geq l_{b,min}$$

$$0 \text{ cm} \geq 10 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_{bd} = 10 \text{ cm}$

Sidrenje donje armature na srednjim ležajima se rješava pomoću prijeklopa koji je proračunat u nastavku.

### 5.3 Duljina prijeklopa

Proračunska duljina prijeklopa nastavljanjem:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{0,min}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Gdje je:

$\alpha_6 = 1,5$  (na strani sigurnosti, ukoliko je postotak preklopljene armature veći od 50%)

### 5.3.1 Prijeklop donje armature na srednjim ležajima

$\emptyset 10$ :

$$l_{b,rqd} = 37 \text{ cm}$$

$$l_0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 37 = 55,5 \text{ cm}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 1,5 \cdot 370 \\ 15 \cdot 10 \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 166,5 \text{ mm} \\ 150 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = 20 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_0 = 60 \text{ cm}$

### 5.3.2 Prijeklop razdjelne armature

$\emptyset 6$ :

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{6}{4} \cdot \frac{434,8}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 217,4 \text{ mm} \cong 22 \text{ cm}$$

$$l_0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 22 = 33 \text{ cm}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\phi \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 1,5 \cdot 330 \\ 15 \cdot 6 \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 148,5 \text{ mm} \\ 90 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = 20 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_0 = 35 \text{ cm}$

## 5.4 Skraćivanje uzdužne vlačne armature

### 5.4.1 Polje 1

Ovojnica ( $\frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$ ):

$$\frac{M_{Ed1}}{\zeta \cdot d_{pl}} + 0 = \frac{2148,5}{0,962 \cdot 12,5} + 0 = 178,67 \text{ kN}$$

Vlačna sila otpora  $F_{RS}$ :

$$F_{RS} = A_{s2,1} \cdot f_{yd} = 4,62 \cdot 43,48 = 200,88 \text{ kN}$$

### 5.4.2 Oslonac B

Ovojnica ( $\frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$ ):

$$\frac{M_{EdB}}{\zeta \cdot d_{pl}} + 0 = \frac{2892,1}{0,948 \cdot 12,5} + 0 = 244,06 \text{ kN}$$



Vlačna sila otpora  $F_{RS}$ :

$$F_{RS} = A_{S2,B} \cdot f_{yd} = 6,04 \cdot 43,48 = 262,62 \text{ kN}$$

### 5.4.3 Polje 2

Ovojnica ( $\frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$ ):

$$\frac{M_{Ed2}}{\zeta \cdot d_{pl}} + 0 = \frac{908,9}{0,985 \cdot 12,5} + 0 = 73,82 \text{ kN}$$

Vlačna sila otpora  $F_{RS}$ :

$$F_{RS} = A_{S2,2} \cdot f_{yd} = 3,93 \cdot 43,48 = 170,88 \text{ kN}$$

### 5.4.4 Oslonac C

Ovojnica ( $\frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$ ):

$$\frac{M_{EdC}}{\zeta \cdot d_{pl}} + 0 = \frac{2176}{0,962 \cdot 12,5} + 0 = 180,95 \text{ kN}$$

Vlačna sila otpora  $F_{RS}$ :

$$F_{RS} = A_{S2,C} \cdot f_{yd} = 4,62 \cdot 43,48 = 200,88 \text{ kN}$$

### 5.4.5 Polje 3

Ovojnica ( $\frac{M_{Ed}}{z} + N_{Ed}$ ):

$$\frac{M_{Ed3}}{\zeta \cdot d_{pl}} + 0 = \frac{1399,5}{0,976 \cdot 12,5} + 0 = 114,71 \text{ kN}$$

Vlačna sila otpora  $F_{RS}$ :

$$F_{RS} = A_{s2,3} \cdot f_{yd} = 3,93 \cdot 43,48 = 170,88 \text{ kN}$$

## 6. DULJINE SIDRENJA, PRIJEKLOPA I RAZMACI ŠIPKI SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA

### 6.1 Granično stanje prianjanja

Proračunska vrijednost graničnog naprezanja prianjanja za rebraste šipke:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,33$$

$$f_{bd} = 3,0 \text{ MPa}$$

Gdje je:

$\eta_1$  – koeficijent koji se odnosi na kvalitetu uvjeta prianjanja i položaj šipke za vrijeme betoniranja;  $\eta_1 = 1$  kad su „dobri“ uvjeti

$\eta_2$  – odnosi se na promjer šipke;  $\eta_2 = 1$  ( $\emptyset \leq 32\text{mm}$ )

### 6.2 Duljina sidrenja

Osnovna duljina sidrenja:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

Gdje je:

$\sigma_{sd}$  – proračunsko naprezanje šipke na položaju od kojeg se mjeri sidrenje,  $\sigma_{sd} = 434,8 \text{ MPa}$  (na strani sigurnosti) za čelik B500A

Ako je  $\sigma_{sd} = 0 \text{ MPa}$ , tada je  $l_{b,rqd} = 0 \text{ cm}$

Ø8:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{8}{4} \cdot \frac{434,8}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 289,87 \text{ mm} \cong 29 \text{ cm}$$

Ø12:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{12}{4} \cdot \frac{434,8}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 434,8 \text{ mm} \cong 45 \text{ cm}$$

Ø16:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{16}{4} \cdot \frac{434,8}{3}$$

$$l_{b,rqd} = 579,73 \text{ mm} \cong 58 \text{ cm}$$

### 6.3 Duljina prijeklopa

Proračunska duljina prijeklopa nastavljanjem:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{0,min}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Gdje je:

$\alpha_6 = 1,5$  (na strani sigurnosti, ukoliko je postotak preklopljene armature veći od 50%)

$\emptyset 8$ :

$$l_{b,rqd} = 29 \text{ cm}$$

$$l_0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 29 = 43,5$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 1,5 \cdot 290 \\ 15 \cdot 8 \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 130,5 \text{ mm} \\ 120 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = 20 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_0 = 30 \text{ cm}$

$\emptyset 12$ :

$$l_{b,rqd} = 45 \text{ cm}$$

$$l_0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 45 = 67,5 \text{ cm}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 1,5 \cdot 450 \\ 15 \cdot 14 \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 202,5 \text{ mm} \\ 180 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = 20,3 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_0 = 70 \text{ cm}$

Ø16:

$$l_{b,rqd} = 58 \text{ cm}$$

$$l_0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 58 = 87 \text{ cm}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{0,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot 1,5 \cdot 580 \\ 15 \cdot 16 \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 261 \text{ mm} \\ 249 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \end{cases} = 26,1 \text{ cm}$$

Usvajamo  $l_0 = 90 \text{ cm}$

#### 6.4 Razmak šipki

Horizontalni i vertikalni razmak između pojedinih paralelnih šipki ili horizontalnih redova paralelnih šipki ne treba biti manji od:

$$s \geq \max \begin{cases} k_1 \cdot \emptyset \\ d_g + k_2 \\ 20 \text{ mm} \end{cases} = \max \begin{cases} 1 \cdot 16 \\ 8 + 5 \\ 20 \end{cases} = \max \begin{cases} 16 \text{ mm} \\ 13 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \end{cases} = 2 \text{ cm}$$

Gdje je:

$$k_1 = 1$$

Ø – promjer armature

$d_g$  – najveća veličina agregata

$$k_2 = 5$$

## 7. ISKAZ ARMATURE

Tablica 11. prikazuje iskaz armature armiranobetonske ploče, dok Tablica 12. prikazuje iskaz armature jednog spregnutog prednapetog nosača.

Tablica 11. Iskaz armature armiranobetonske ploče

ISKAZ ARMATURE ARMIRANOBETONSKE PLOČE					
Armaturne šipke					
POZ	φ [mm]	Duljina [m]	Komada	Ukupna duljina [m]	
				φ6	φ10
1	10	1,23	152		186,96
2	10	2,7	232		626,4
3	10	2,84	178		505,52
4	10	5,4	178		961,2
5	10	5,6	152		851,2
6	10	5,6	76		425,6
7	10	2,51	178		446,78
8	6	5,17	268	1385,56	1385,56
9	6	5,34	134	715,56	715,56
10	6	5,17	160	827,2	827,2
11	6	5,34	80	427,2	427,2
Ukupno [m']				2101,12	6104,78
Masa [kg/m']				0,222	0,617
Ukupno po promjerima [kg]				466,449	3766,649
Sveukupno [kg]				4233,098	

Tablica 12. Iskaz armature jednog spregnutog prednapetog nosača

ISKAZ ARMATURE JEDNOG SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA						
Armaturne šipke						
POZ	φ [mm]	Duljina [m]	Komada	Ukupna duljina [m]		
				φ8	φ12	φ16
1	12	5,88	8		47,04	
2	12	6	4		24	
3	8	5,03	24	120,72		
4	8	6	12	72		
5	16	6,2	4			24,8
6	16	6	2			12
7	16	6,2	6			37,2
8	16	6	3			18
9	8	2,96	69	204,24	204,24	
10	8	0,92	138	126,96	126,96	
11	8	2,96	21	62,16	62,16	
12	8	0,92	42	38,64	38,64	
Ukupno [m']				624,72	503,04	92
Masa [kg/m']				0,395	0,888	1,578
Ukupno po promjerima [kg]				246,764	446,700	145,176
Sveukupno [kg]				838,640		



## 8. ZAKLJUČAK

Zaključno, ovaj diplomski rad detaljno obrađuje projektiranje i proračun spregnutog prednapetog nosača za poslovno–proizvodnu halu. Prednapeti betonski elementi obrađeni u radu pokazuju veliku učinkovitost u smanjenju deformacija i boljem iskorištavanju materijala u usporedbi s klasičnim armiranobetonskim konstrukcijama. Glavni nosač, izveden kao predgotovljeni prednapeti element „T“ presjeka spregnut armiranobetonskom pločom, pruža zadovoljavajuću nosivost i dugotrajnu stabilnost.

Korišteni računalni programi poput Mathcada i Gala Reinforcementa omogućili su precizne proračune i analize. Uz to, proračuni su provedeni prema Eurokod standardima i nacionalnim dodacima, čime su osigurana tehnička ispravnost i usklađenost građevinskim normama i pravilima. Posebna pažnja je posvećena je korištenju predgotovljenih prednapetih elemenata i betona izlivenog na gradilištu (in-situ), što omogućuje smanjenju troškova i povećanju brzine gradnje.

Analiza je također pokazala da je primjena prednapetih elemenata u zoni vlaka, dok je beton u zoni tlaka, učinkovito rješenje za postizanje dugotrajnosti i otpornosti konstrukcije. Ovakva raspodjela osigurava stabilnost konstrukcije tijekom njezina vijeka trajanja. Detaljni nacrti armature i iskaz armature doprinose cjelovitosti rada.

Zaključci donose potvrdu o prednostima korištenja prednapetog betona u suvremenom građevinarstvu, s naglaskom na tehničku isplativost ovakvih konstrukcija. Prednapeti betonski elementi, uz pravilnu primjenu, omogućuju uštedu materijala, smanjenje troškova održavanja i gradnje te povećanje sigurnosti i nosivosti konstrukcije. Analiza i proračuni provedeni u ovom diplomskom radu dokazali su da sustav zadovoljava sve zahtjeve vezane uz nosivost i stabilnost.

## 9. LITERATURA

- [1] HRN EN 1991-1-3:2012 / NA:2016 - Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-3: Opća djelovanja - Opterećenja snijegom.
- [2] Ž. Smolčić, Prednapete betonske konstrukcije, interna predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2024..
- [3] P. Nagarajan, Prestressed Concrete Design, Department of Civil Engineering NIT Calicut, Kerala, 2013..
- [4] N. K. Raju, Prestressed Concrete, M S Ramaiah Institute of Technology, Bangalore.
- [5] GP Krk, Katalog montažnih elemenata.
- [6] HRN EN 1992-1-1:2013 - Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010).

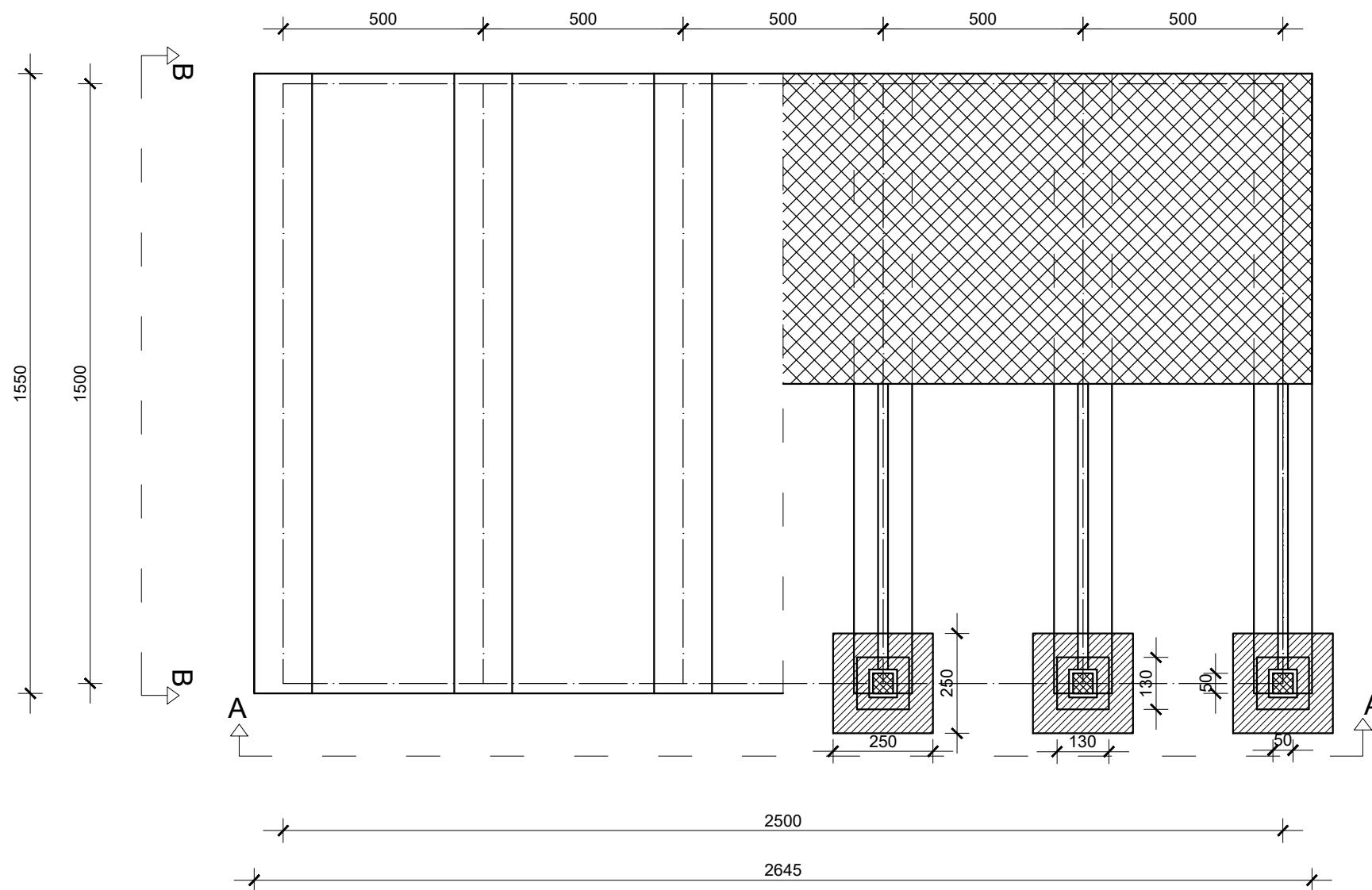
## 10. GRAFIČKI PRILOZI

Popis nacрта:

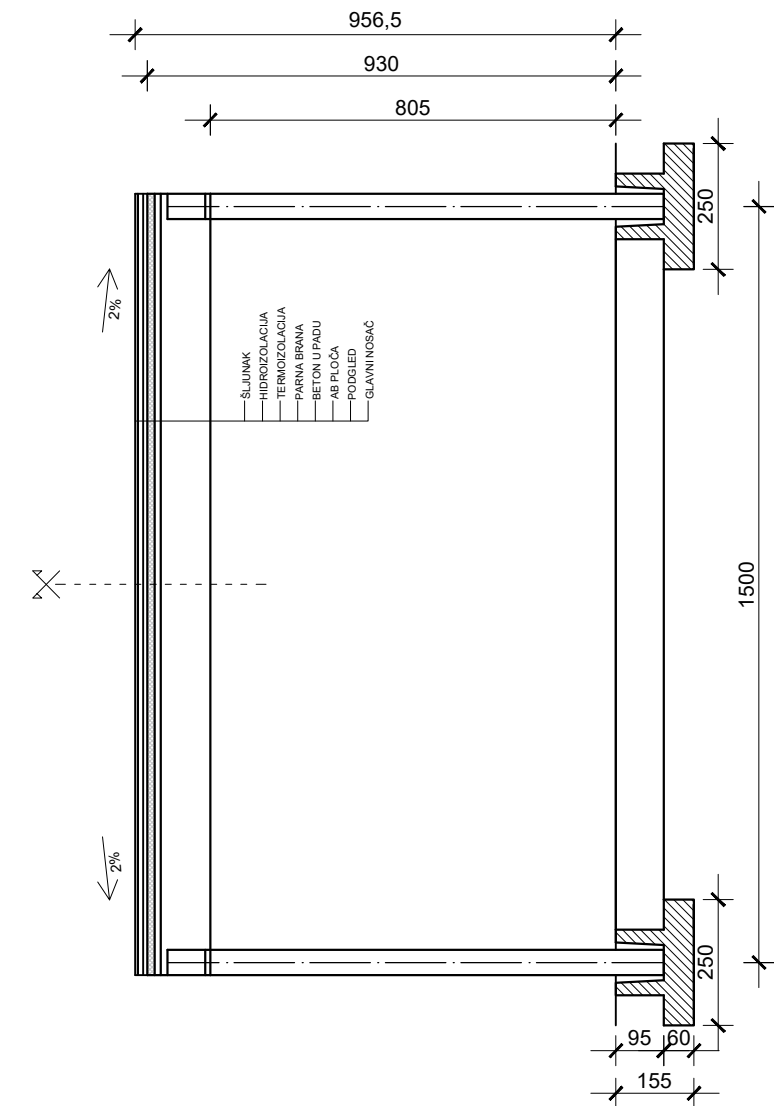
1. Dispozicija	M 1:150
2. Plan armature armiranobetonske ploče	M 1:75
3. Shema armiranja donje zone armiranobetonske ploče	M 1:100
4. Shema armiranja gornje zone armiranobetonske ploče	M 1:100
5. Plan armature spregnutog prednapetog nosača	M 1:50

# DISPOZICIJA

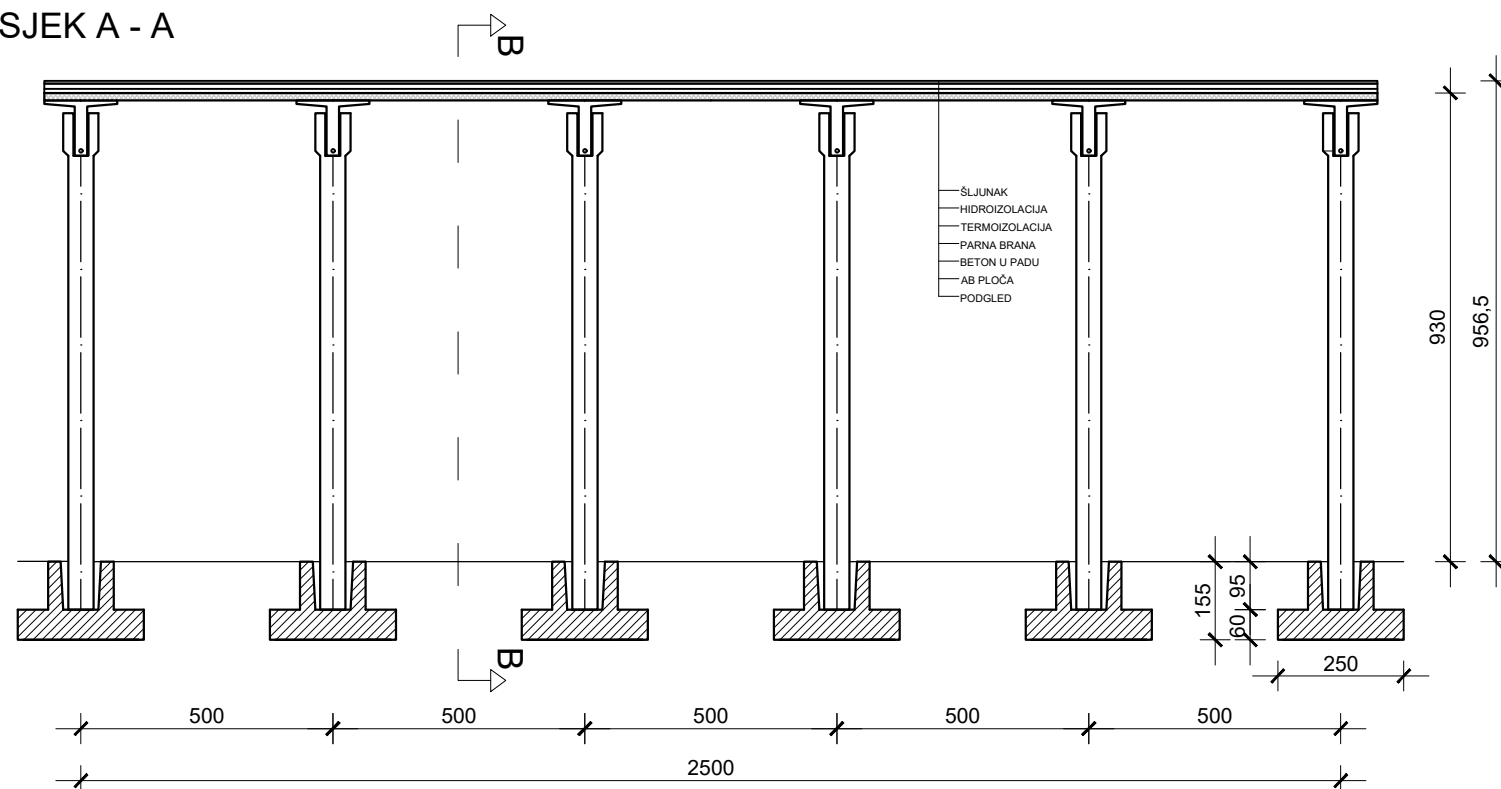
TLOCRT



PRESJEK B - B

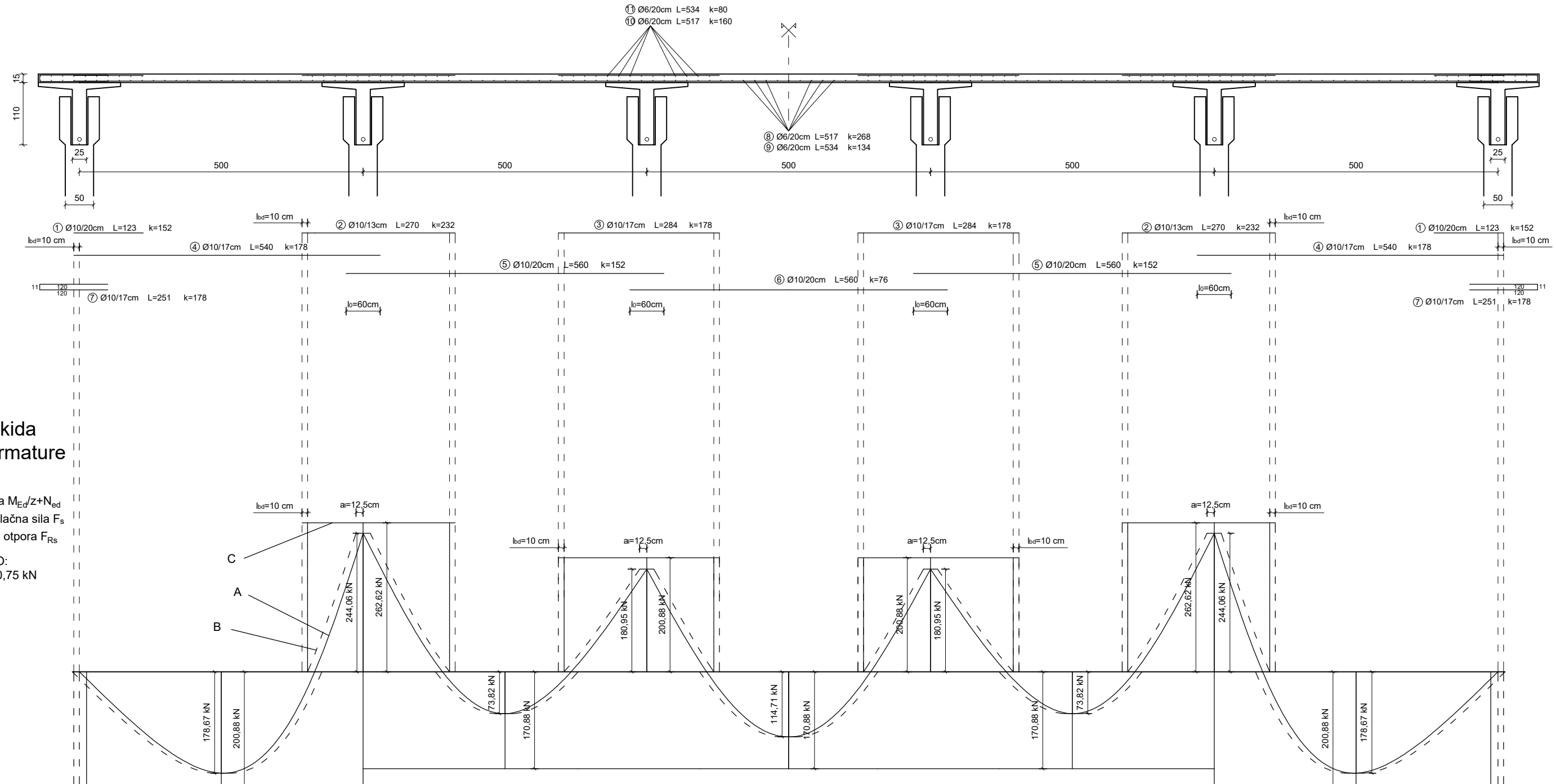


PRESJEK A - A



<p><b>G</b> <b>F</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</p>			
<p>Diplomski rad: DIMENZIONIRANJE SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA</p>		<p>Sadržaj nacrt: DISPOZICIJA</p>	
<p>Student: Matija Pranjić</p>		<p>Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE</p>	
<p>Mentor: dr.sc Željko Smolčić</p>		<p>Datum: 05.09.2024.</p>	<p>Mjerilo: 1:150</p>
		<p>List: 1.</p>	

# PLAN ARMATURE ARMIRANOBETONSKE PLOČE



Skica prekida  
uzužne armature

A - ovojnica za  $M_{Ed}/z+N_{ed}$   
B - djelujuća vlačna sila  $F_s$   
C - vlačna sila otpora  $F_{Rs}$

MJERILO:  
1 mm = 0,75 kN

Zaštitni sloj betona:  
 $c_{nom} = 2 \text{ cm}$

Beton:  
C30/37

Čelik:  
B500A

Pomak momentnog dijagrama:  
 $a_1 = 12,5 \text{ cm}$

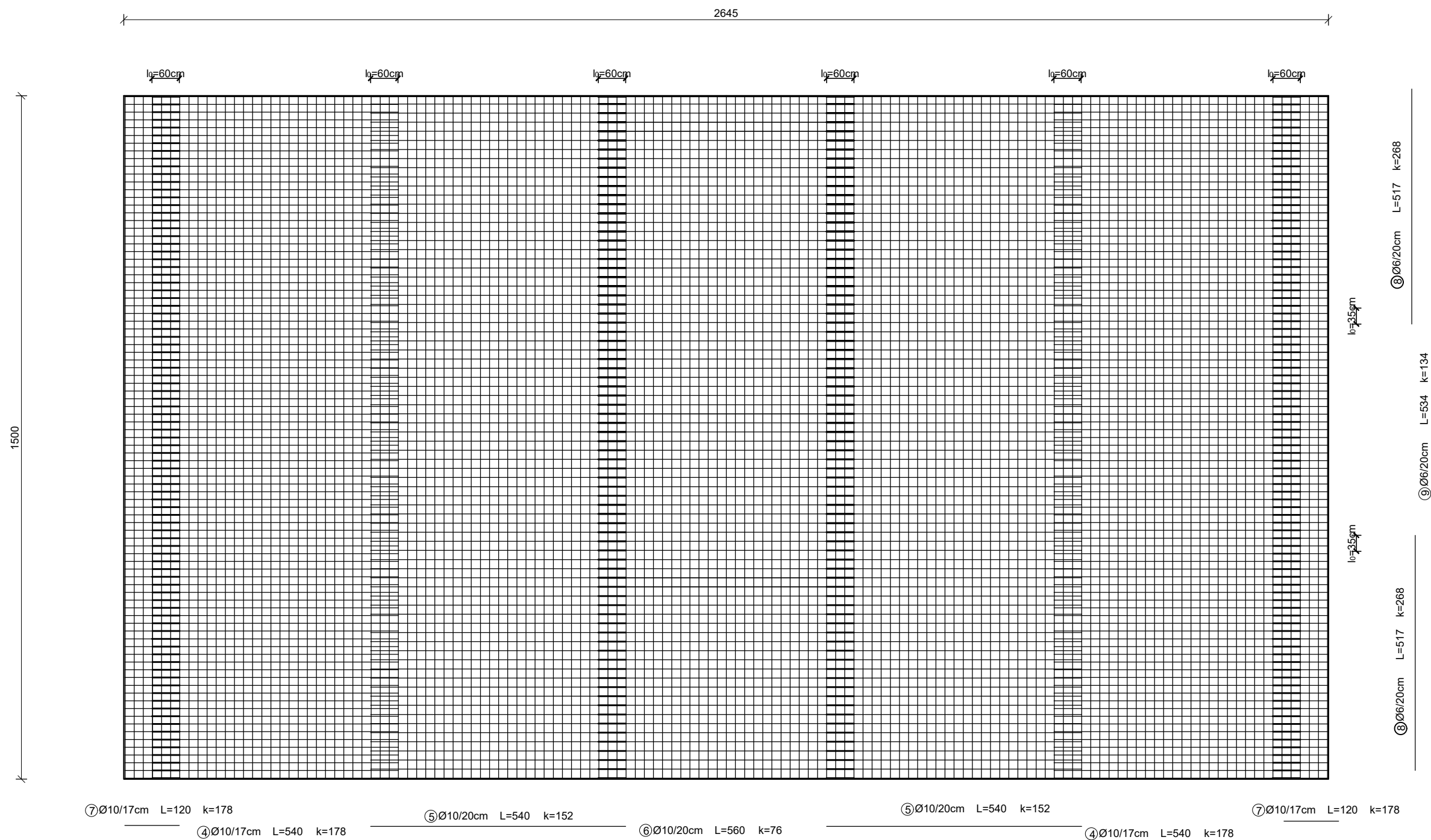
Duljina sidrenja:  
 $l_{bd} = 10 \text{ cm}$

Duljina prijeklopa:  
 $l_0 = 60 \text{ cm}$

ISKAZ ARMATURE ARMIRANOBETONSKE PLOČE					
Armaturne šipke					
POZ	$\phi$ [mm]	Duljina [m]	Komada	Ukupna duljina [m]	
				$\phi 6$	$\phi 10$
1	10	1,23	152		186,96
2	10	2,7	232		626,4
3	10	2,84	178		505,52
4	10	5,4	178		961,2
5	10	5,6	152		851,2
6	10	5,6	76		425,6
7	10	2,51	178		446,78
8	6	5,17	268	1385,56	1385,56
9	6	5,34	134	715,56	715,56
10	6	5,17	160	827,2	827,2
11	6	5,34	80	427,2	427,2
Ukupno [m]				2101,12	6104,78
Masa [kg/m <sup>3</sup> ]				0,222	0,617
Ukupno po promjerima [kg]				466,449	3766,649
Sveukupno [kg]				4233,098	

G F GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad: DIMENSIONIRANJE SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA		Sadržaj nacrta: PLAN ARMATURE ARMIRANOBETONSKE PLOČE	
Student: Matija Pranjic		Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE	
Mentor: dr.sc Željko Smolčić	Datum: 05.09.2024.	Mjerilo: 1:75	List: 2.

# SHEMA ARMIRANJA DONJE ZONE ARMIRANOBETONSKE PLOČE



Zaštitni sloj betona:  
 $c_{nom} = 2 \text{ cm}$

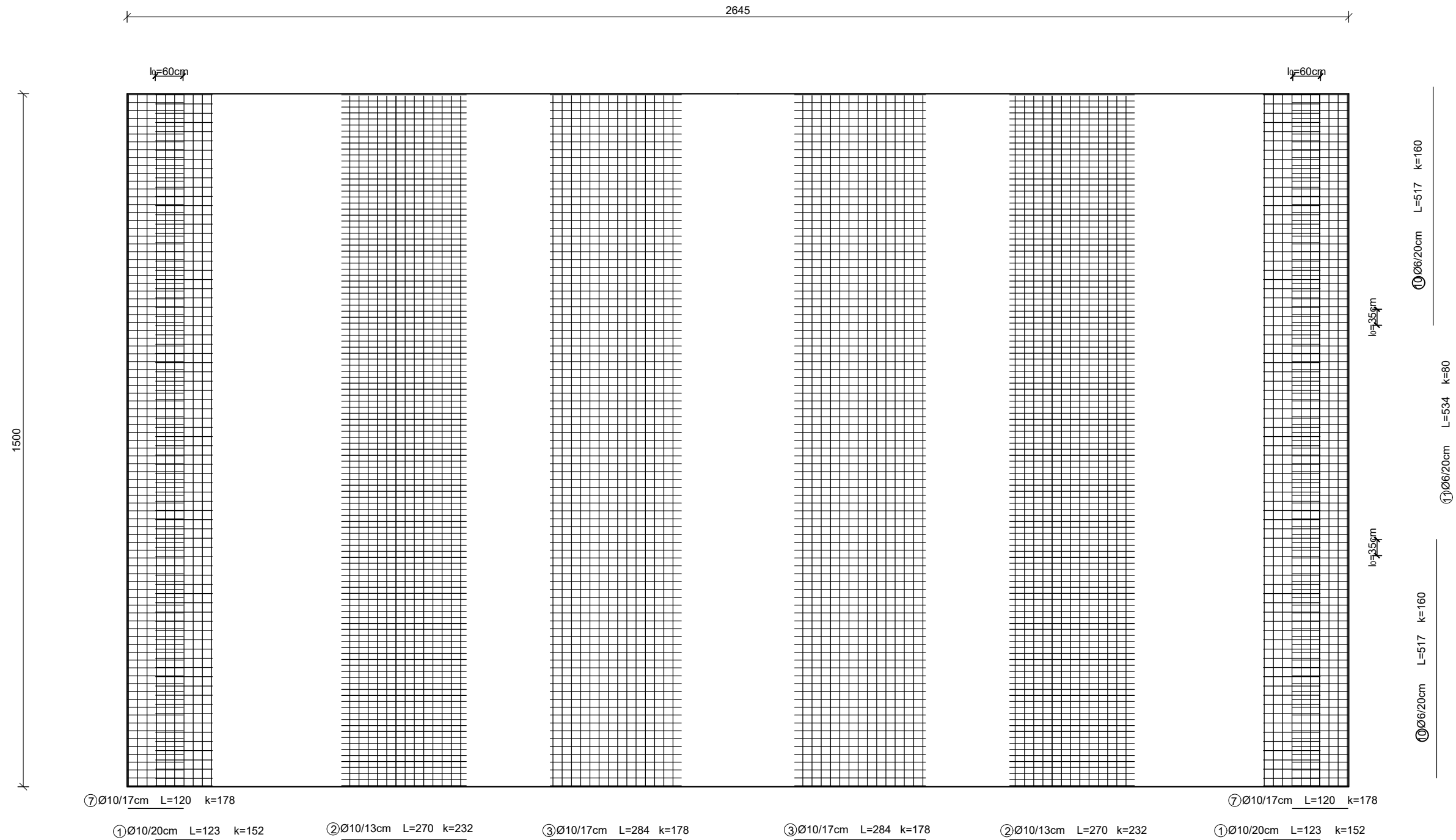
Beton:  
C30/37

Čelik:  
B500A

Duljina prijeklopa:  
 $\text{Ø}6 \rightarrow l_0 = 35 \text{ cm}$   
 $\text{Ø}10 \rightarrow l_0 = 60 \text{ cm}$

Diplomski rad: DIMENSIONIRANJE SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA		Sadržaj nacrt: SHEMA ARMIRANJE DONJE ZONE ARMIRANOBETONSKE PLOČE	
Student: Matija Pranjic		Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE	
Mentor: dr.sc Željko Smolčić	Datum: 05.09.2024.	Mjerilo: 1:100	List: 3.

# SHEMA ARMIRANJA GORNJE ZONE ARMIRANOBETONSKE PLOČE



Zaštitni sloj betona:  
 $c_{nom} = 2 \text{ cm}$

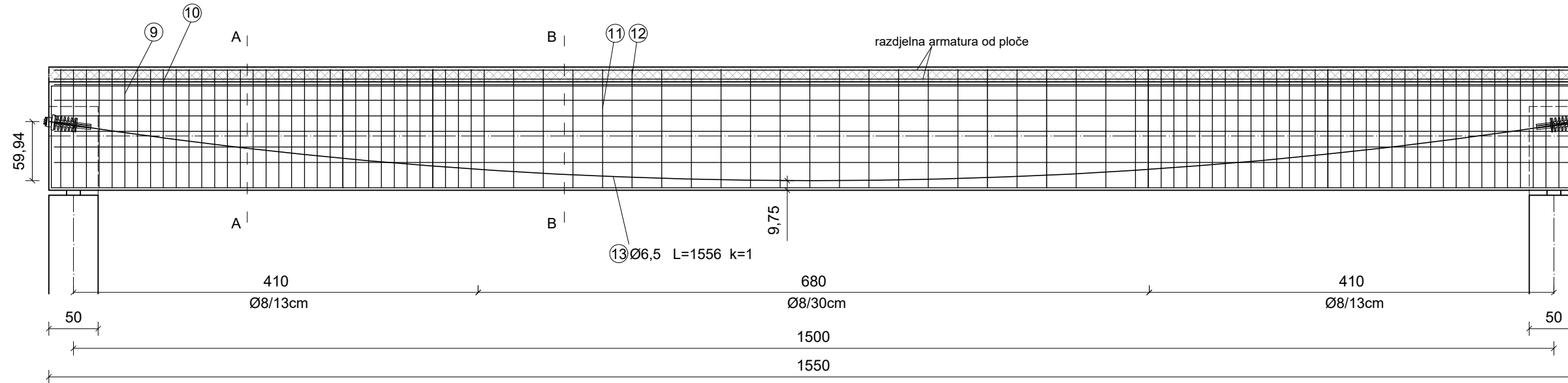
Beton:  
C30/37

Čelik:  
B500A

Duljina prijeklopa:  
Ø6 →  $l_0 = 35 \text{ cm}$   
Ø10 →  $l_0 = 60 \text{ cm}$

<b>G</b> <b>F</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad: DIMENZIONIRANJE SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA		Sadržaj nacрта: SHEMA ARMIRANJE GORNJE ZONE ARMIRANOBETONSKE PLOČE	
Student: Matija Pranjić		Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE	
Mentor: dr.sc Željko Smolčić		Datum: 05.09.2024.	Mjerilo: 1:100
		List: 4.	

# PLAN ARMATURE SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA

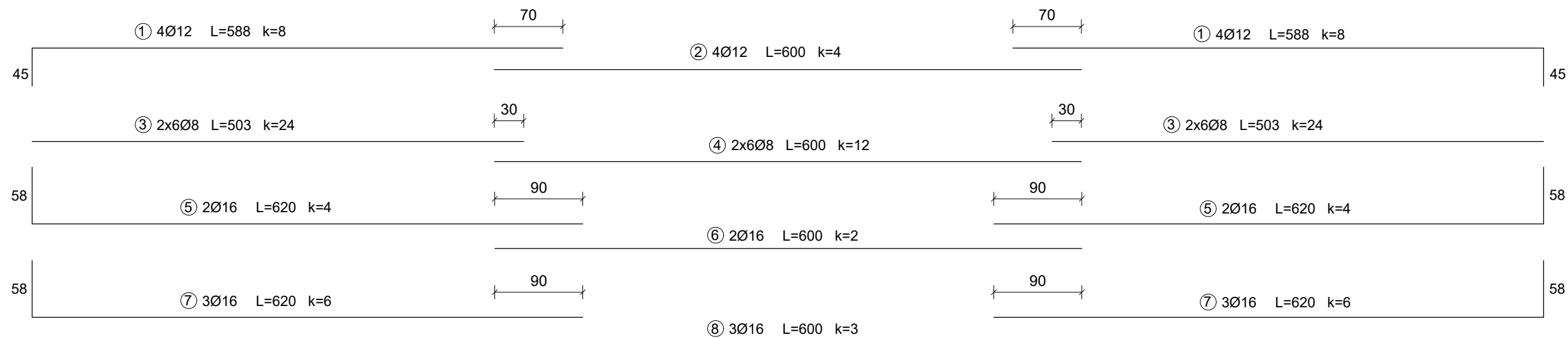


Zaštitni sloj betona:  
C<sub>nom</sub> = 2,5 cm

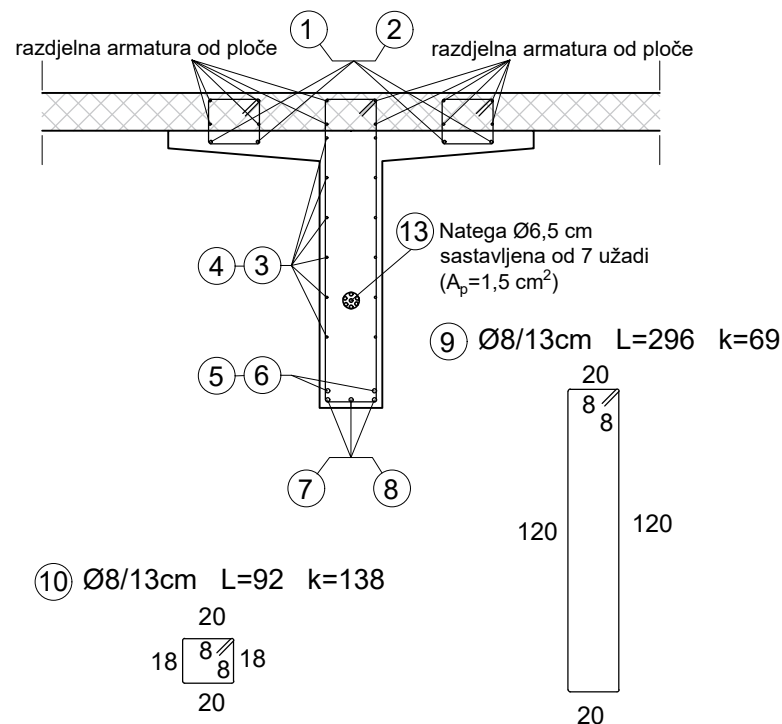
Beton:  
C30/37

Čelik:  
B500A  
1640/1860

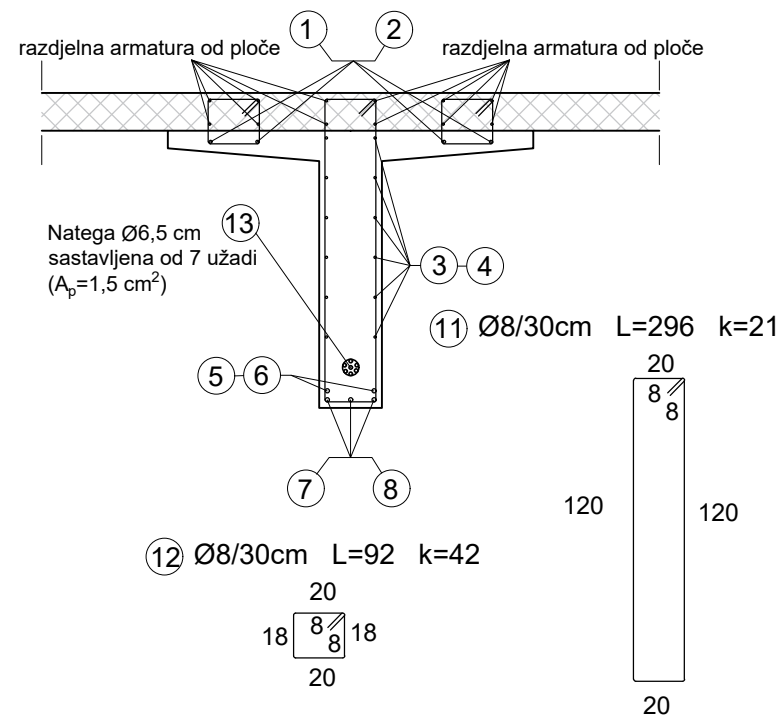
Duljina prijeklopa:  
Ø8 → l<sub>0</sub> = 30 cm  
Ø12 → l<sub>0</sub> = 70 cm  
Ø16 → l<sub>0</sub> = 90 cm



PRESJEK A-A  
M 1:30



PRESJEK B-B  
M 1:30



ISKAZ ARMATURE JEDNOG SPREGNUTOG PREDNAPETOG NOSAČA

Armaturene šipke						
POZ	φ [mm]	Duljina [m]	Komada	Ukupna duljina [m]		
				φ8	φ12	φ16
1	12	5,88	8		47,04	
2	12	6	4		24	
3	8	5,03	24	120,72		
4	8	6	12	72		
5	16	6,2	4			24,8
6	16	6	2			12
7	16	6,2	6			37,2
8	16	6	3			18
9	8	2,96	69	204,24	204,24	
10	8	0,92	138	126,96	126,96	
11	8	2,96	21	62,16	62,16	
12	8	0,92	42	38,64	38,64	
Ukupno [m]				624,72	503,04	92
Masa [kg/m]				0,395	0,888	1,578
Ukupno po promjerima [kg]				246,764	446,700	145,176
Sveukupno [kg]				838,640		

GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad:  
DIMENZIONIRANJE  
SPREGNUTOG  
PREDNAPETOG NOSAČA

Sadržaj nacrt:  
HEMA ARMIRANJA  
SPREGNUTOG  
PREDNAPETOG NOSAČA

Student:  
Matija Pranjić

Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE  
KONSTRUKCIJE

Mentor:  
dr.sc Željko Smolčić

Datum: 05.09.2024. Mjerilo: 1:50 List: 5.