

# Proračun armiranobetonskog i prednapetog nosača

---

**Kraljik, Anamarija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:157:051675>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-21**



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**

**Anamarija Kraljik**

**Proračun armiranobetonskog i prednapetog nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva**

**Smjer konstrukcije**

**Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije**

**Anamarija Kraljik**

**JMBAG: 0114027963**

**Proračun armiranobetonskog i prednapetog nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2020.**

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema diplomskog rada

**PRORAČUN ARMIRANOBETONSKOG I PREDNAPETOG NOSAČA**

**DESIGN OF REINFORCED CONCRETE AND PRESTRESSED BEAM**

Kandidatkinja: **ANAMARIJA KRALJIK**

Kolegij: **PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad broj: **K-2020-2**

**Rad treba sadržavati:**

- tehnički opis
- statički proračun prednapetog T-nosača
- statički proračun armiranobetonskog T-nosača
- nacrt i iskaz amature
- usporedba rezultata

**Tema rada je uručena: 25. veljače 2020.**

**Mentor:**

doc. dr. sc. Željko Smolčić,  
dipl. ing. građ.

## **IZJAVA**

Diplomski rad sam izradila 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.

---

Anamarija Kraljik

U Rijeci, 24. srpnja 2020.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se, prije svega, svom mentoru doc. dr.sc. Željku Smolčiću koji mi je omogućio sve potrebne materijale koji su bili potrebni za izradu ovog diplomskog rada. Uz to, želim zahvaliti za savjete, strpljenje te kvalitetnu komunikaciju koja je znatno olakšala pisanje rada.

Također, želim se zahvaliti i svim profesorima te asistentima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na nesebičnoj pomoći te prenesenom znanju iz raznih područja građevinarstva.

Te na kraju, posebnu zahvalnost pridodajem svojoj obitelji i prijateljima koji su kroz cijeli period školovanja bili uz mene i bili najveći oslonac za vrijeme cjelokupnog studija.

## SAŽETAK

Prednapete betonske konstrukcije sastoje se od betona, čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje. U odnosu na armiranobetonske konstrukcije, prednapeti beton koristi se kada želimo u potpunosti eliminirati ili barem smanjiti vlačna normalna naprezanja djelovanjem umjetno izazvanih sila (sila prednapinjanja). Kako se smanjenjem vlačnih naprezanja, smanjuju pukotine, uz to se povećava nosivost elemenata što znatno utječe na trajnost konstrukcija. Moguće je svladavanje većih raspona uz racionalnu vitkost presjeka te smanjene progibe. Ovim diplomskim radom provesti će se postupak dimenzioniranja i proračuna prednapetog i armiranobetnoskog krovnog nosača hale. Rad se sastoji od provjere graničnog stanja nosivosti (GSN) odnosno provjere prednapetog te provjere graničnog stanja uporabljivosti (GSU). Sve provjere su zadovoljene, a proračun se provodio u skladu s normom za proračun prednapetih i armiranobetonskih elemenata HRN EN 1992.

**Ključne riječi:** prednapeti beton, armirani beton, GSN, GSU, nosači, proračun, dimenzioniranje

## ABSTRACT

Prestressed concrete structures consist of concrete, reinforcing steel and prestressing steel. In relation to reinforced concrete structures, prestressed concrete is used when we want to completely eliminate or at least reduce tensile normal stresses by the action of artificially induced forces (prestressing force). As the reduction of tensile stresses reduces cracks, in addition to increasing the load-bearing capacity of the elements, it is possible to overcome larger spans with a rational slenderness of the cross section and reduced deflections. This thesis will carry out the procedure of dimensioning and calculation of prestressed and reinforced concrete roof girder of the hall. The work consists of checking the limit state of load-bearing capacity and checking the usability limit state. All checks were met, and the calculation was carried out in accordance with the standard for the calculation of prestressed and reinforced concrete elements HRN EN 1992.

**Keywords:** prestressed concrete, reinforced concrete, ULC, ULS, girders, calculation, dimensioning

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEHNIČKI OPIS .....	3
2.1. Svojstva materijala .....	5
3. PREDNAPETI NOSAČ .....	6
3.1. Stalna i promjenjiva djelovanja.....	6
3.1.1. <i>Stalno djelovanje</i> .....	6
3.1.2. <i>Opterećenje snijegom</i> .....	7
3.2. Procjena veličina prednapetog nosača.....	11
3.2.1. <i>Procjena površine prednapetog čelika (<math>A_p</math>)</i> .....	11
3.2.2. <i>Procjena površine običnog čelika (<math>A_{s1}</math> i <math>A_{s2}</math>)</i> .....	14
3.2.3. <i>Geometrijske karakteristike</i> .....	15
3.3. Najveća naprezanja u natezi prednapetog nosača .....	16
3.4. Gubici sile prednaprezanja .....	17
3.4.1. <i>Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije</i> .....	17
3.4.2. <i>Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja</i> .....	17
3.4.3. <i>Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina</i> .....	18
3.4.4. <i>Vremenski gubici</i> .....	20
3.5. Granično stanje nosivosti .....	23
3.6. Savijanje s uzdužnom silom.....	24
3.6.1. <i>Dimenzioniranje presjeka u sredini polja (<math>t = \infty, P_{m\infty}, g_{k,1}, g_{k,2}, q_{k,1}</math>)</i> .....	24
3.6.2. <i>Provjera najmanjeg i najvećeg postotka armiranja</i> .....	25
3.6.3. <i>Dimenzioniranje presjeka u sredini polja (<math>t=0, P_{m0}, g_{k,1}</math>)</i> .....	27
3.7. Provjera na poprečne sile .....	29
3.7.1. <i>Proračunska nosivost na poprečnu silu</i> .....	29
3.7.2. <i>Proračunski potrebna poprečna armatura</i> .....	31
3.7.3. <i>Dokaz čvrstoće tlačnih štapova</i> .....	33
3.7.4. <i>Najmanja potrebna poprečna armatura</i> .....	34
3.8. Granično stanje uporabljivosti .....	35



3.8.1.	<i>Granično stanje naprezanja</i> .....	35
3.8.1.1.	<i>Provjere naprezanja za neraspucali ili raspucali presjek</i> .....	35
3.8.2.	<i>Stanje izgradnje (<math>t = 0</math>, karakteristična kombinacija, sredina raspona)</i> .....	36
3.8.3.	<i>Stanje eksploatacije (<math>t = \infty</math>, karakteristična k.o., sredina raspona)</i> .....	38
3.8.4.	<i>Provjere naprezanja za nazovistalnu k.o., (<math>t = \infty</math>, sredina raspona)</i> .....	40
3.9.	<i>Granično stanje pukotina</i> .....	41
3.10.	<i>Granično stanje deformacija</i> .....	46
4.	<b>ARMIRANOBETONSKI NOSAČ</b> .....	48
4.1.	<b>Stalna i promjenjiva djelovanja</b> .....	48
4.1.1.	<i>Stalno opterećenje</i> .....	48
4.1.2.	<i>Opterećenje snijegom</i> .....	49
4.2.	<b>Granično stanje nosivosti</b> .....	52
4.2.1.	<i>Dimenzioniranje na sredini raspona</i> .....	53
4.2.2.	<i>Karakteristike presjeka</i> .....	54
4.3.	<b>Provjera na poprečne sile</b> .....	55
4.3.1.	<i>Proračunski potrebna poprečna armatura</i> .....	55
4.3.2.	<i>Proračun poprečne armature</i> .....	57
4.3.3.	<i>Kontrola nosivosti tlačne dijagonale</i> .....	58
4.3.4.	<i>Najmanja potrebna poprečna armatura</i> .....	59
4.3.5.	<i>Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature</i> .....	61
4.4.	<b>Granično stanje uporabljivosti</b> .....	64
4.4.1.	<i>Granično stanje pukotina / raspucavanja</i> .....	64
4.4.2.	<i>Provjera širine pukotina</i> .....	66
4.4.3.	<i>Granično stanje deformacija</i> .....	71
5.	<b>USPOREDBA PREDNAPETOG I ARMIRANOBETONSKOG NOSAČA</b> .....	81
6.	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	83
7.	<b>LITERATURA</b> .....	84
8.	<b>GRAFIČKI PRILOZI – NACRTI</b> .....	85

## POPIS SLIKA

Slika 1: Tlocrtne dimenzije proizvodne hale

Slika 2: Geometrijske karakteristike nosača

Slika 3: Statički sustav prednapetog nosača

Slika 4: Položaj natege u nosaču

Slika 5: Poprečni presjek "T" nosača

Slika 6: Skica i dimenzije natege

Slika 7: Geometrijske karakteristike presjeka nosača

Slika 8: Dijagram gubitaka prednapinjanja

Slika 9: Skica deformacije i unosa sile u fazi gradnja za prednapeti krovni nosač

Slika 10: Skica položaja reznih sila

Slika 11: Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Slika 12: Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki [1]

Slika 13: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki s obzirom na ograničenje širine pukotina i naprezanje [1]

Slika 14: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

Slika 15: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje

Slika 16: Izraz za proračun progiba slobodno oslonjene grede kontinuiranim opterećenjem

Slika 17: Geometrijske karakteristike AB nosača

Slika 18: Statički sustav armiranobetonskog nosača

Slika 19: Poprečni T presjek AB nosača

Slika 20: Armatura armiranobetonskog nosača

Slika 21: Dimenzije AB nosača

Slika 22: Određivanje najvećeg naprezanja s obzirom na ograničenje pukotina i promjer šipki [1]

Slika 23: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki AB nosača [1]

Slika 24: Tablica omjera raspona i proračunske visine

Slika 25: Omočeni obod nosača

Slika 26: Nazivne vrijednosti slobodnog skupljanja pri sušenju [3]

Slika 27: Koeficijent ovisan o srednjem polumjeru elementa [3]

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1: Opterećenje snijegom prednapetog nosača

Tablica 2: Geometrijske karakteristike presjeka

Tablica 3: Gubici sile zbog trenja

Tablica 4: Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka

Tablica 5: Vrijednosti sile nakon svih gubitaka

Tablica 6: Opterećenje snijegom (AB NOSAČ)

Tablica 7: Geometrijske karakteristike AB nosača

Tablica 8: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete

Tablica 9: Potrebne duljine sidrenja armature za loše uvjete

Tablica 10: Potrebne duljine nastavljanja armature

Tablica 11: Usporedba količine armature AB i PB nosača

Tablica 12: Usporedba graničnog stanja deformacija AB i PB nosača

## 1. UVOD

Prilikom proučavanja armiranobetonskog i prednapetih konstrukcija, bitno je znati osnovu prednapinjanja tj. ulogu prednapetog betona u građevinarstvu. Odnosno, potrebno je jasno shvatiti ulogu običnog čelika, te znati karakteristike prednapetog čelika uz karakteristike betona. Beton kao građevni materijal ima vrlo malu vlačnu čvrstoću (otprilike 1/10 tlačne), dok ima vrlo veliku tlačnu čvrstoću. Zbog takve raspodjele čvrstoće prilikom temperaturnih promjena, skupljanja i opterećenja koje djeluje na gredu moguće je doseći vlačnu čvrstoću betona koja će uzrokovati prve pukotine u vlačnom dijelu nosača. [1]

Korištenjem armiranog betona tj. betona i običnog čelika za armiranje, postizemo veću vlačnu čvrstoću armiranobetonskog elementa u usporedbi s običnim betonom. Koncept armiranog betona je takav da beton i armatura djeluju homogeno na donjem rubu dok ne dosegnu vlačnu čvrstoću. Kako pukotine odnosno deformacije rastu prema gornjem rubu nosača, beton ne doprinosi vlačnoj nosivosti. Povećanje opterećenja u vremenu uzrokuje istezanje armature dok se ona plastično ne deformira. Beton na gornjem rubu doživljava velika tlačna naprezanja, i tada deformacija počinje nelinearno rasti. Nelinearnim porastom deformacije dolazimo do povećanja deformacija bez prirasta opterećenja kada je ono doseglo graničnu vrijednost i tada nastaje slom materijala. [3]

Nakon mnogih istraživanja, došlo je do uvođenja prednapetog čelika u građevinarstvo. Ideja o eliminiranju pukotina u nosačima, dovela je do ideje o istezanju armature u betonu. Što je dovelo do početnog tlačnog naprezanja, tj. prednapinjanja. Ideja o prednapinjanju krenula je, da se prije vanjskog opterećenja beton dovede u takvo stanje naprezanja gdje će uporabno opterećenje moći preuzeti cijeli betonski presjek. Ova ideja dovela je do punog prednapinjanja (potpuna eliminacija vlačnih naprezanja) i ograničenog prednapinjanja (dopuštena vlačna naprezanja u ograničenim količinama). [1] [2]

Uspoređujući beton s prednapetim čelikom s onim koji u sebi sadrži običan čelik za armiranje. Može se iznijeti nekoliko bitnih prednosti prednapetih konstrukcija u odnosu na armiranobetonske. Neke od prednosti jesu, povećana nosivost, manja deformabilnost, manja vlastita težina kod iste nosivosti (smanjenje poprečnih presjeka), kod povijenih kabela djelovanje poprečnih sila je znatno manje, koristi se manja količina čelika što nužno ne mora biti prednost jer se koristi čelik za prednapinjanje koji je skuplji, ubrzanje montažne gradnje. Najveća prednost, jest smanjenje širine pukotina ili potpuna eliminacija pukotina kod punog

prednapinjanja. Uz prednosti, kao i kod svakog sustava postoje i mane kao što su vrlo velika cijena čelika za prednapinjanje, povećanje progiba tijekom vremena (dolazi do popuštanja sustava za prednapinjanje), kompliciranost u izvođenju i projektiranju, prilikom izrade potrebna je vrlo velika preciznost. [1]

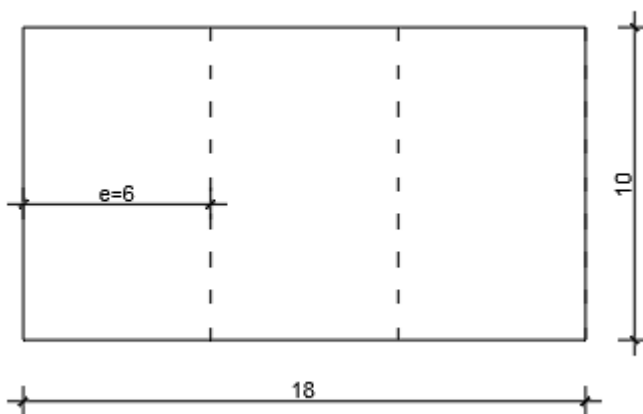
Prednapeti beton ima široku primjenu, neka od područja gdje se primjenjuje jesu izgradnja mostova, zgrada, hidrotehničkih objekata, tornjeva, nuklearnih elektrana, potpornih zidova, bunkera, silosa i dr. Prednapete konstrukcije najčešće ćemo susretati u projektiranju i izvođenju velikoraspinskih konstrukcija. Kao što su sportske dvorane, koncertne dvorane, mostovi i sl. [1]

Ovim diplomskim radom provesti će se proračun prednapetog nosača proizvodne hale, koji će se usporediti s armiranobetonskim nosačem istih dimenzija. Radom će biti obuhvaćene osnovne formule tj. koraci provedeni za uspješno projektiranje prednapetih i armiranobetonskih konstrukcija. Rad je napisan u 5 poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja, slijedi tehnički opis u kojemu su definirane dimenzije proizvodne hale, geometrijske karakteristike nosača, svojstva materijala koja se primjenjuju u projektiranju oba nosača. Kroz treće glavno poglavlje provodi se proračun prednapetog nosača s pomoću računalnog programa Mathcad kroz 10 potpoglavlja. Prvim potpoglavljem definirana su opterećenja na temelju kojih je proveden proračun. Nakon toga, proveda se procjena veličina prenapetog nosača, te su se sljedećim potpoglavljem odredila najveća naprezanja natezi, odnosno definiranje sile neposredno nakon prednapinjanja. 4. potpoglavljem proračunati su svi gubici sile prednapinjanja, a to su gubici zbog elastične deformacije, trenja te prokliznuća klina i vremenski gubici. Oduzimanjem svih gubitaka od početne sile dobiva se stvarna sila prednapinjanja na temelju koje proračunavamo granično stanje nosivosti nosača. Granično stanje nosivosti provedeno je kroz provjeru na savijanje s uzdužnom silom te provjerom na poprečne sile. Kako bi proračun bio pravilno proveden potrebno je bilo i provesti provjeru graničnog stanja uporabljivosti koje se sastoji od provjere graničnog stanja naprezanja, pukotina i deformacija. Četvrtim poglavljem proveden je proračun armiranobetonskog nosača. Proračun je proveden provjerom graničnog stanja nosivosti i uporabljivosti kroz poglavlja. GSN provedeno je dimenzioniranje poprečnog presjeka te provjera presjeka na poprečne sile. Nakon dimenzioniranja, bilo je potrebno provesti proračun GSU koji obuhvaća provjeru graničnog stanja raspucavanja, provjeru širine pukotina te granično stanje deformacija. Usporedbom rezultata nakon provedenog proračuna donesen je zaključak kojim je analizirano kada je opravdano koristiti armirani a kada prednapeti beton.

## 2. TEHNIČKI OPIS

Diplomskim radom proračunavati će se nosači poslovno – proizvodne hale sastavljene od prednapetih betonskih predgotovljenih elemenata i stupova koji će se uspoređivati s nosačima hale koji su izvedeni kao armiranobetonski. Statički sustav u poprečnom smjeru sastoji se od poprečnih okvira koji tvore prednapeti (armiranobetonski) krovni nosači i stupovi, dok su okviri u uzdužnom smjeru sastavljeni od sekundarnih nosača i montažnih stupova hale. Prednapinjanje se izvodi uz sprezanje ostvareno naknadnim injektiranjem cementnog morta.

Osne dimenzije montažne hale su 18,0 m x 10 m. Ploština prizemlja iznosi oko 180 m<sup>2</sup>.



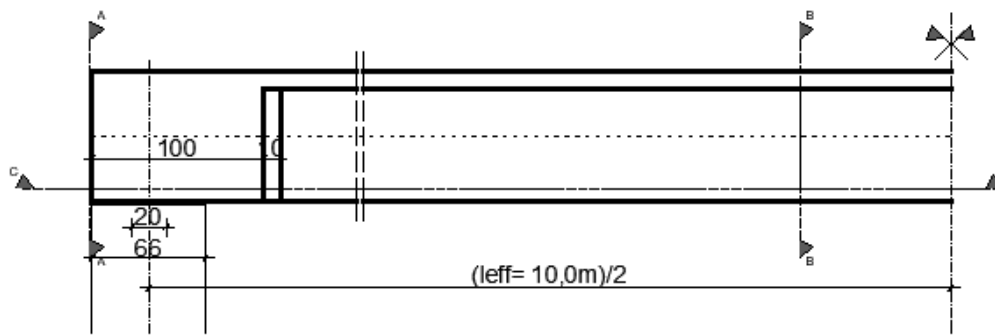
Slika 1: Tlocrtne dimenzije proizvodne hale

Proračunava se jednostavni krovni prednapeti nosač. Osni razmak između dva susjedna nosača je  $e = 6,00$  m.

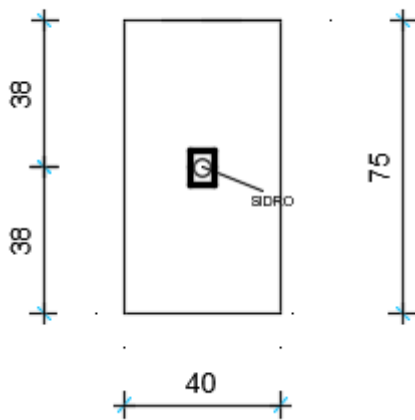
Krovni nosač je unutarnji nosivi element. Ukrućenje hale u horizontalnom smjeru ostvareno je upetošću stupova i krovnom pločom.

Djelovanje je pretežno mirno.

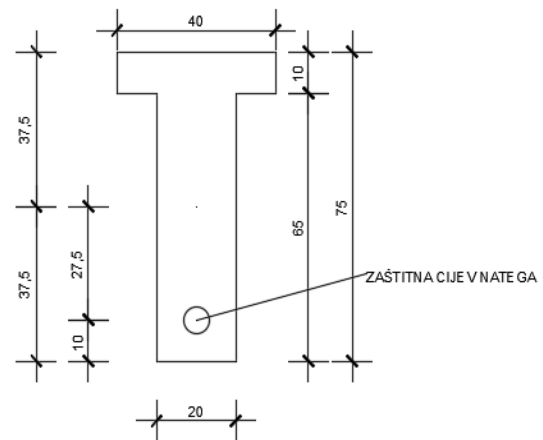
UZDUŽNI PRESJEK



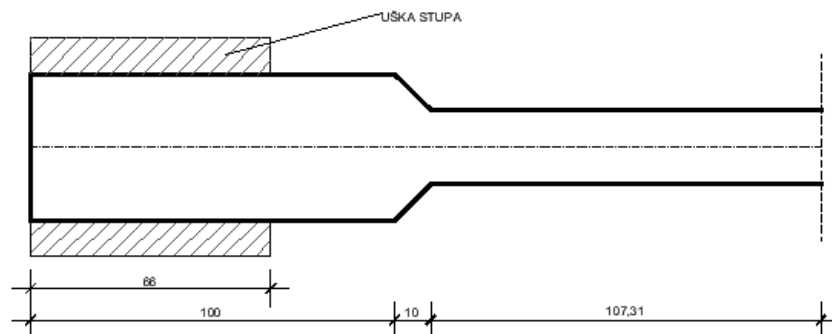
PRESJEK A-A



PRESJEK B-B



PRESJEK C-C



Slika 2: Geometrijske karakteristike nosača



## 2.1. Svojstva materijala

Materijali:

- Beton C35/45
- Čelik za armiranje B500A
- Čelik za prednapinjanje 1500/1770

### **Beton C35/45:**

- Karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana:  $f_{ck} = 35$  MPa
- Srednja osna vlačna čvrstoća betona:  $f_{ctm} = 3,2$  MPa
- Sekantni modul elastičnosti:  $E_{cm} = 34\ 000$  MPa

### **Čelik za armiranje B500A:**

- Karakteristična granica popuštanja:  $f_{yk} = 500$  MPa
- Modul elastičnosti:  $E_s = 200\ 000$  MPa
- Razred duktilnosti A, obična duktilnost

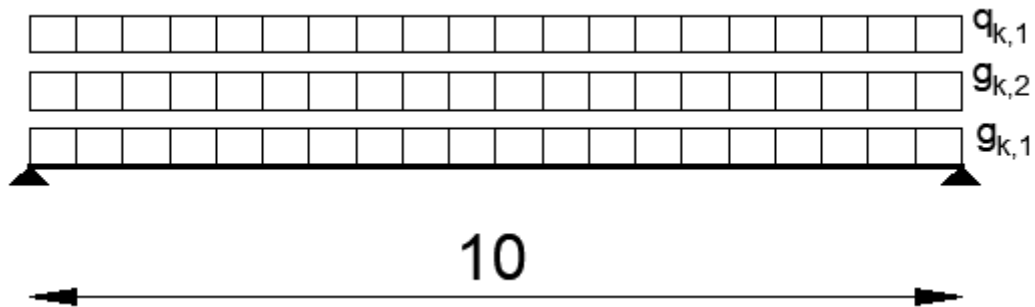
### **Čelik za prednapinjanje 1500/1770:**

- Karakteristično naprezanje čelika pri 0,1%-tnoj zaostaloj deformaciji:  $f_{p0.1k} = 1500$  MPa
- Karakteristična vlačna čvrstoća čelika za prednapinjanje:  $f_{pk} = 1770$  MPa
- Modul elastičnosti:  $E_p = 195\ 000$  MPa
- Razred 2: žica ili uža – malo opuštanje (relaksacija)

### 3. PREDNAPETI NOSAČ

#### 3.1. Stalna i promjenjiva djelovanja

##### 3.1.1. Stalno djelovanje



Slika 3: Statički sustav prednapetog nosača

- Površina betonskog presjeka (idealizirani T – presjek):

$$A_c = (b_{eff} - b_w) h_f + b_w * h = (40 - 20) 10 + 20 * 75$$

$$A_c = 1700 \text{ cm}^2 = 0,17 \text{ m}^2$$

#### Stalno djelovanje

- **Krovni nosač:**  $g_{k,1} = \gamma * A_c = 25 * 0,17 = 4,25 \text{ kN/m}$

- **Krovna konstrukcija:** (porasti beton + izravnavajući sloj + HI)

- porasti beton 20 cm ( $\gamma = 7,2 \text{ kN/m}^3$ )

- hidroizolacija ( $\gamma = 0,23 \text{ kN/m}^2$ )

$$g_{k,2} = (7,2 * 0,2 + 0,23) * 6,0 = 10,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,1} + g_{k,2} = 4,25 + 10,0 = 14,25 \text{ kN/m}$$

### 3.1.2. Opterećenje snijegom

#### Opterećenja snijegom na krovovima prema HRN EN 1991-1-3; NA/HRN EN 1991-1-3

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

$\mu_i$  faktor oblika opterećenja snijegom na krovu

$s_k$  karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu

$C_e$  faktor izloženosti ( $C_e = 1,0$ )

$C_t$  toplinski koeficijent ( $C_t = 1,0$ )

Za nadmorsku visinu 100 m i 3. područje – kontinentalna Hrvatska (Ilok), karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu iznosi  $s_k = 1 \text{ kN/m}^2$ .

Za kut nagiba krova  $\alpha = 0^\circ$ , ( $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ), faktor oblika opterećenja snijegom iznose  $\mu_1 = 0,8$

Proračunske vrijednosti opterećenja snijegom na krovu za moguće slučajeve rasporeda djelovanja, s  $C_e = 1,0$  i  $C_t = 1,0$ , te  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$ :

**–simetrično djelovanje snijega**

I. slučaj:

$$s_1 = \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

**– nesimetrična raspodjela snijega na nesimetričnom krovu**

II. slučaj:

$$s_1 = 0,5 * \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,5 * 0,8 * 1 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

III. slučaj:

$$s_1 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = 0,5 * \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,5 * 0,8 * 1 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

Tablični prikaz rezultata prikazan tablicom 1:

*Tablica 1: Opterećenje snijegom prednapetog nosača*

Djelovanje snijega na krovu/m <sup>2</sup> tlocrta			
NMV	100,00	m	
Područje	III.		
NMV	100,00	m	
$S_k$	1	kN/m <sup>2</sup>	
$\alpha_1$	0	°	
$\alpha_2$	0	°	
$\mu_{1(\alpha_1)}$	0,80	m	
$\mu_{1(\alpha_2)}$	0,80	m	
$C_e$	1,00	/	
$C_t$	1,00	/	
$s(I.)$	0,80	kN/m <sup>2</sup>	I. Slučaj: simetrična raspodjela III. Slučaj: nesimetrična raspodjela
$s_1(III.)$	0,80	kN/m <sup>2</sup>	
$s_2(III.)$	0,40	kN/m <sup>2</sup>	

$$s = 0,80 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{k,1} = s * 6,0 = 0,80 * 6,0 = 4,8 \text{ kN/m}$$

Preporučene vrijednosti koeficijenta kombinacije za snijeg, za lokacije ispod 1000 m nadmorske visine prema EN 1991-1-3:2003:

$$\psi_0=0,5 \quad \psi_1=0,2 \quad \psi_2=0,0$$

### Prednapinjanje:

- Natege se vode po paraboli u jednoj razini. Jednadžba parabole definirana je:

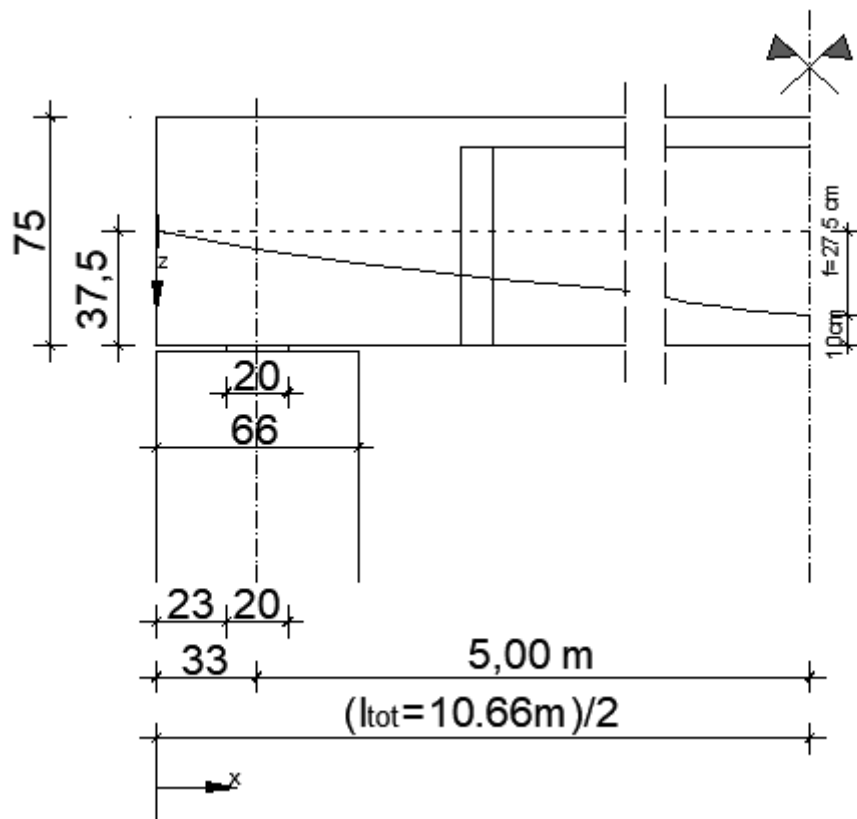
$$z(x) = 4 * f * \left( \frac{x}{l_{tot}} - \frac{x^2}{l_{tot}^2} \right)$$

- kut skretanja natege:

$$\theta(x) = \frac{8 * x * f}{l_{tot}^2}$$

Strelica parabole natege iznosi:

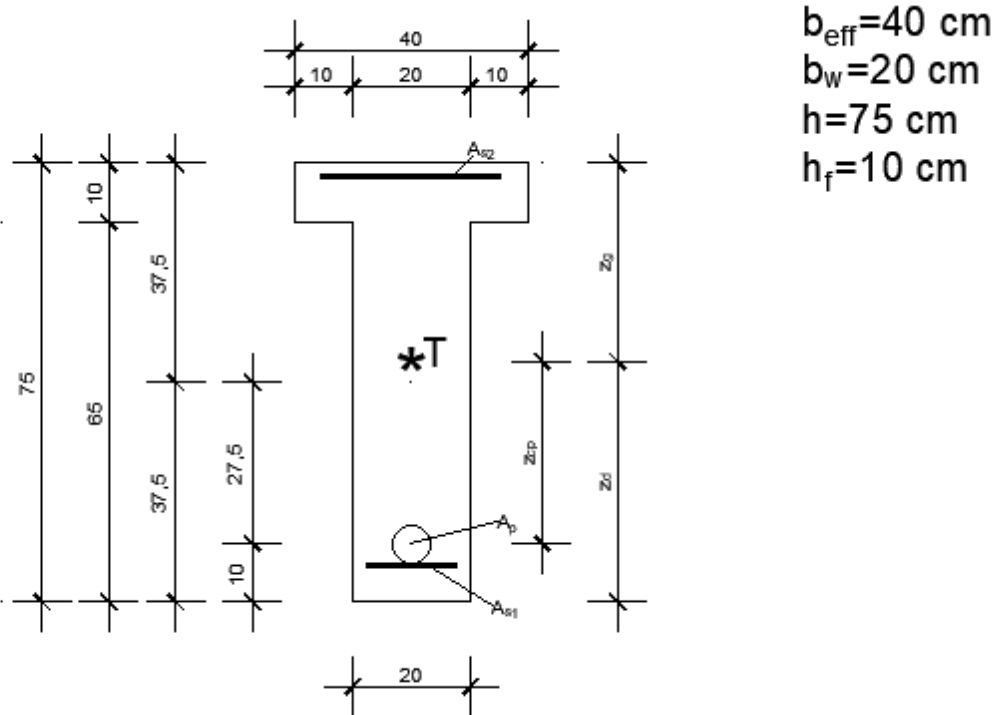
$$f = 37,5 - 10 = 27,5 \text{ cm}$$



Slika 4: Položaj natege u nosaču

## 3.2. Procjena veličina prednapetog nosača

### 3.2.1. Procjena površine prednapetog čelika ( $A_p$ )



Slika 5: Poprečni presjek "T" nosača

$$A_c = 1700 \text{ cm}^2$$

Udaljenost između težišta betona i donjeg ruba:

$$z_d = \frac{(b_{eff} - b_w) * h_f \left(h - \frac{h_f}{2}\right) + b_w * h * \frac{h}{2}}{A_c}$$

$$z_d = \frac{(40 - 20) * 10 \left(75 - \frac{10}{2}\right) + 20 * 75 * \frac{75}{2}}{1700}$$

$$z_d = 41,324 \text{ cm}$$

Udaljenost između težišta betona i gornjeg ruba:

$$z_g = h - z_d = 75 - 41,324 = 33,676 \text{ cm}$$

Momenti tromosti betonskog presjeka:

$$I_c = \frac{(b_{eff} - b_w) * h_f^3}{12} + [(b_{eff} - b_w) * h_f] * \left(z_g - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \frac{b_w * h^3}{12} + (b_w * h) * \left(z_d - \frac{h}{2}\right)^2$$

$$I_c = \frac{(40 - 20) * 10^3}{12} + [(40 - 20) * 10] * \left(33,676 - \frac{10}{2}\right)^2 + \frac{20 * 75^3}{12} + (20 * 75) * \left(41,324 - \frac{75}{2}\right)^2$$

$$I_c = 891200 \text{ cm}^4$$

Momenti otpora gornjeg ruba:

$$W_g = \frac{I_c}{z_g} = \frac{0,0089}{0,337} = 0,026409 \text{ m}^3$$

Moment otpora donjeg ruba:

$$W_d = \frac{I_c}{z_d} = \frac{0,0089}{0,413} = 0,02155 \text{ m}^3$$

Udaljenost gornjeg ruba jezgre:

$$k_g = \frac{W_d}{A_c} = \frac{0,02155}{0,17} = 0,127 \text{ m}$$

Udaljenost donjeg ruba jezgre:

$$k_d = \frac{W_g}{A_c} = \frac{0,026409}{0,17} = 0,155 \text{ m}$$

Udaljenost težišta prednapete armature do težišta betonskog presjeka:

$$z_{cp} = z_d - 10 = 41,324 - 10 = 31,324 \text{ m}$$

Nazovistalna kombinacija:

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

Za snijeg  $\psi_2 = 0$



Momenti savijanja u sredini polja za nazovistalnu kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) + \left( \frac{4,8 * 10^2}{8} \right) * 0 = 178,13 \text{ kNm}$$

Sila prednapinjanja nakon svih gubitaka

$$P_{m\infty} = \frac{M_{Ed,perm} - f_{ctm} * W_d}{z_{cp} + k_g} = \frac{17813 - 0,32 * 0,02155 * 10^6}{31,324 + 12,7}$$

$$P_{m\infty} = 247,978 \text{ kN}$$

Koeficijentom "m" uzimaju se u obzir vremenski gubici napona u čeliku zbog skupljanja, puzanja i relaksacije.

Koeficijentom "δ" pokrivaju se početni gubici (trenje, prokliznuće klina, elastične deformacije).

Pretpostavka je da su ukupni gubici 25 % :

$$\delta * m = 0,75$$

Potrebna površina prednapete armature dobije se po izrazu:

$$A_p = \frac{P_{m\infty}}{\delta * m * \sigma_{p,max}}$$

Najveće naprezanje u natezi (sila na preši):

$$\sigma_{p,max,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_1 * f_{pk} = 0,8 * 1770 = 1416 \text{ MPa} \\ k_2 * f_{p,0.1,k} = 0,9 * 1500 = 1350 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

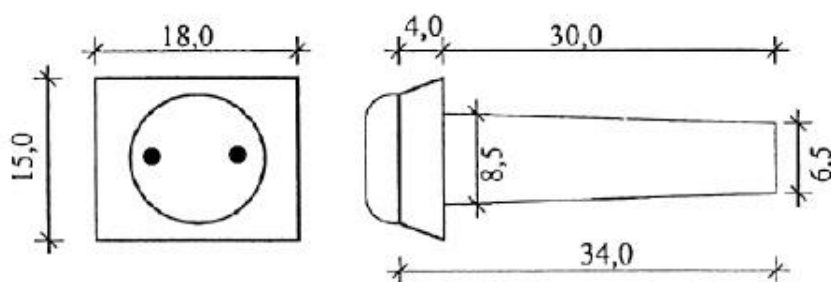
$$\sigma_{p,max,max} = 1350 \text{ MPa}$$

$$A_p = \frac{P_{m\infty}}{\delta * m * \sigma_{p,max}} = \frac{247,978}{0,75 * 135,0} = 2,45 \text{ cm}^2$$

Usvajamo jednu nategu ukupne površine:

$$A_p = 3 \text{ cm}^2$$

Natega se sastoji od 2 užeta, površina užeta je 1,5 cm<sup>2</sup>.



Slika 6: Skica i dimenzije natega

Površina presjeka jedne natega (od 2 užeta) je  $2 \cdot 1,5 = 3 \text{ cm}^2$

### 3.2.2. Procjena površine običnog čelika ( $A_{s1}$ i $A_{s2}$ )

Proračunska granica popuštanja armature  $f_{yd}$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa} - \text{uzdužne šipke armature}$$

Proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje  $f_{pd}$

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1,k}}{\gamma_s} = \frac{1500}{1,15} = 1304,35 \text{ MPa}$$

Statička visina čelika za prednapinjanje

$$d_p = h - 10 = 75 - 10 = 65 \text{ cm}$$

$$d_s = d_p = 65 \text{ cm}$$

$$z_p = z_s = z \approx 0,9 \cdot d_p = 0,9 \cdot 65 = 58,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona:

$$M_{Ed} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2})}{8} \cdot l^2 \right) \cdot \gamma_G + \left( \frac{q_{k,1}}{8} \cdot l^2 \right) \cdot \gamma_Q$$

$$M_{Ed} = \left( \frac{(4,25 + 10,0)}{8} \cdot 10^2 \right) \cdot 1,35 + \left( \frac{4,8}{8} \cdot 10^2 \right) \cdot 1,5$$

$$M_{Ed} = 300,47 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da u prednapetoj armaturi dolazi do popuštanja:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

$$A_{S1} = \frac{M_{Ed} - A_p * \sigma_p * z_p}{f_{yd} * z_s} = \frac{M_{Ed} - A_p * f_{pd} * 0,9 * d_p}{f_{yd} * 0,9 * d_p}$$

$$A_{S1} = \frac{30047 - 3 * 130,44 * 0,9 * 65}{43,5 * 0,9 * 65} = 2.812 \text{ cm}^2$$

Odabire se  $A_{S1} = 5\emptyset 12$  ( $5,66 \text{ cm}^2$ )

Osim toga, usvajamo tlačnu armaturu  $A_{S2} = 4\emptyset 12$  ( $4,52 \text{ cm}^2$ )

### 3.2.3. Geometrijske karakteristike

Idealizirani poprečni presjek:

$\emptyset_{duct} = 65 \text{ mm}$  → vanjski promjer zaštitne cijevi natege

$A_p = 3 \text{ cm}^2$  → ploština čelika za prednapinjanje jedne natege

$$\alpha_{E,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{34000} = 5,74$$

$$\alpha_{E,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{34000} = 5,88$$

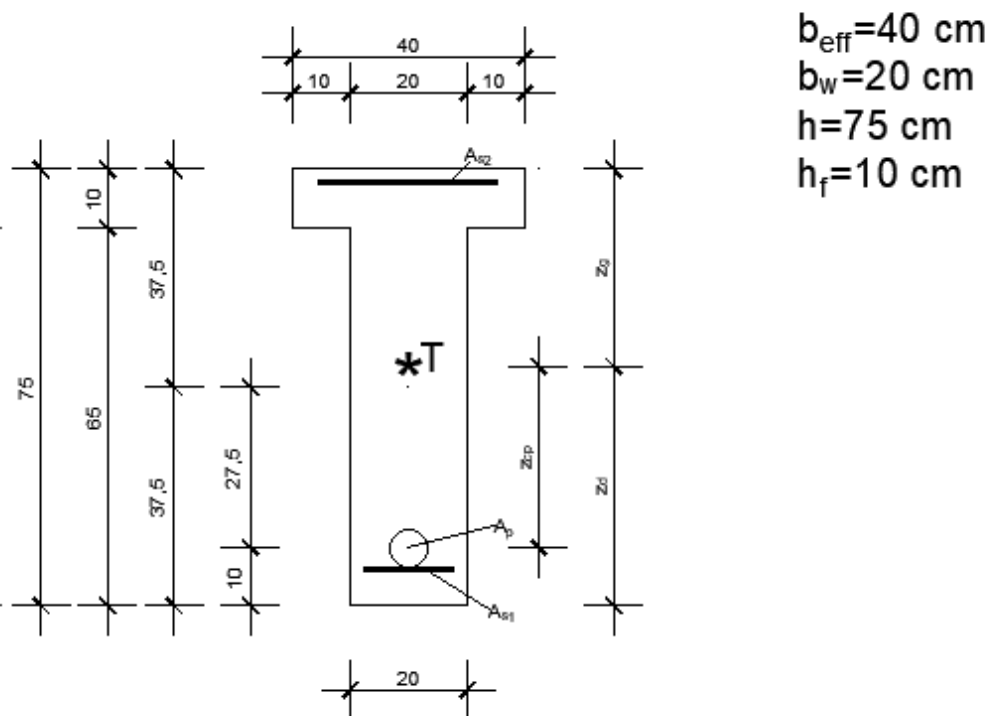
$A_{S1} = 5,66 \text{ cm}^2$  ( $5\emptyset 12$ ) → donja armatura

$A_{S2} = 4,52 \text{ cm}^2$  ( $4\emptyset 12$ ) → gornja armatura

Vrijednosti dobivene u Mathcad-u (koristimo bruto geometrijske karakteristike presjeka) prikazan tablicom 2:

*Tablica 2: Geometrijske karakteristike presjeka*

Beton	Ac [m <sup>2</sup> ]	Ic [m <sup>4</sup> ]	z <sub>d</sub> [m]	z <sub>g</sub> [m]	Z <sub>cp</sub> [m]
Bruto	0,17	0,0089	0,413	0,337	0,313
Neto	0,163	0,00845	0,423	0,327	0,323
Idealno	0,176	0,00952	0,409	0,341	0,309



Slika 7: Geometrijske karakteristike presjeka nosača

### 3.3. Najveća naprezanja u natezi prednapetog nosača

Najveće naprezanje u natezi (sila na preši):

$$\sigma_{p \max, \max} = \min \begin{cases} k_1 * f_{pk} = 0,8 * 1770 = 1416 \text{ MPa} \\ k_2 * f_{p 0.1, k} = 0,9 * 1500 = 1350 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\sigma_{p \max, \max} = 1350 \text{ MPa}$$

Najveća sila u natezi (sila na preši):

$$P_{\max, \max} = \sigma_{p \max, \max} * A_p = 135,0 * 3 = 405 \text{ kN}$$

Napon u čeliku za prednapinjanje smije neposredno nakon napinjanja iznositi:

$$\sigma_{pm0, \max} = \min \begin{cases} k_7 * f_{pk} = 0,75 * 1770 = 1327,5 \text{ MPa} \\ k_8 * f_{p 0.1, k} = 0,85 * 1500 = 1275 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\sigma_{pm0, \max} = 1275 \text{ MPa}$$

Sila u čeliku za prednapinjanje smije neposredno nakon napinjanja iznasti:

$$P_{m0,max} = \sigma_{pm0,max} * A_p = 127,5 * 3 = 382,5 \text{ kN}$$

### 3.4. Gubici sile prednaprezanja

#### 3.4.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

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

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

#### 3.4.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

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

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

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

$$\theta(x) = \frac{8 * x * f}{l_{tot}^2}$$

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

NATEGA ( $f = 0,275 \text{ m}$ ):

$$\theta(x) = \frac{8 * x * f}{l_{tot}^2} = \frac{8 * 0,275 * x}{10,66^2} = 0,00194 * x$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k*x)}) = 1 - e^{-\mu(0,00194*x+0,0055*x)},$$

gubici sile zbog trenja prikazani tablicom 3:

Tablica 3: Gubici sile zbog trenja

Natega	$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k*x)})$		
	x=0	x=5,33	x=10,66
(f = 0,275 m)	0	0,992	0,983

### 3.4.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

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

Kako bi pravilno mogli opisati prednapinjanje duž natega moramo proračunati gubitak sile prednapinjanja  $\Delta P_{sl}$  i duljinu utjecaja prokliznuća klina  $l_{sl}$ .

Prema podacima proizvođača prokliznuće klina uzima se  $\Delta l_{sl} = 2$  mm.

NATEGA (f = 0,275 m) :

$P_{max} = P_{m0,max} = 382,5$  kN → vrijednost sile na preši uzeta je kako bi se u trenutku to izbjeglo prekoračenje sile na preši.

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} * E_p * A_p}{P_{max} * \mu \left( \frac{8 * f}{l_{tot}^2} + k \right)}} = \sqrt{\frac{0,002 * 195000 * 10^6 * 3 * 10^{-4}}{382,5 * 10^3 * 0,21 \left( \frac{8 * 0,275}{10,66^2} + 0,0055 \right)}}$$

$$l_{sl} = 7,654 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 * 382,5 * 10^3 * 0,21 * 7,654 * \left( \frac{8 * 0,275}{10,66^2} + 0,0055 \right)$$

$$\Delta P_{sl} = 30,57 \text{ kN}$$

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

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

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

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 382,5 * (1 - e^{-\mu(0,00194*x+0,0055*x)}) \quad x \geq 7,654 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 7,654) = 4,547 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(l_{sl} = 10,66) = 6,32 \text{ kN}$$

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

$$P_{m0}(7,654) = 382,5 - 4,547 = 377,95 \text{ kN}$$

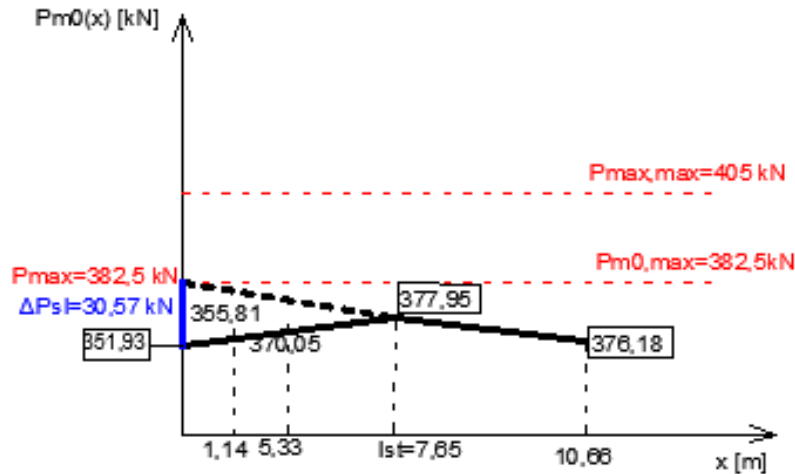
$$P_{m0}(10,66) = 382,5 - 6,32 = 376,18 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 382,5 - 30,57 = 351,93 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(5,33) = 351,93 + \frac{377,95 - 351,93}{7,654} * 5,33 = 370,05 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(1,14) = 351,93 + \frac{377,95 - 351,93}{7,654} * 1,14 = 355,81 \text{ kN}$$

Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka prikazani tablicom 4:



Slika 8: Dijagram gubitaka prednapinjanja

Tablica 4: Vrijednosti sile prednapinjanja nakon gubitaka

x [m]	0	5,33	10,66
$P_{m0}(x)$ [kN]	351,93	370,05	376,18

### 3.4.4. Vremenski gubici

Gubici koji nastaju zbog skupljanja, puzanja i relaksacije:

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

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

$\varepsilon_{cs} = -0,564\% = -0,000564$  – procijenjena deformacija skupljanja → vrijednost dobivena Mathcad-om

$\frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{34000} = 5,74$  – odnos modula elastičnosti čelika za prednapinjanje i modula elastičnosti betona



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

$\rho(t, t_0) = 3,1$  – koeficijent puzanja → vrijednosti dobivene Mathcad-om

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

$$A_p = 3 \text{ cm}^2$$

$$A_c = 0,17 \text{ m}^2$$

$$I_c = 0,0089 \text{ m}^4$$

$$z_{cp} = 0,313 \text{ m}$$

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

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

$\sigma_{pi}$  – 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)

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}$$

$f_{pk}$  – karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće prednapetog čelika

$\rho_{1000} = 2,5$  vrijednost relaksacijskog gubitka 1000 sati nakon prednapinjanja i pri srednjoj temperaturi 20°C za razred 2

Naprezanje nakon početnih gubitaka u nategama na polovici raspona:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{m0,1}}{A_{p1}} = \frac{370.05 * 10^3}{3 * 10^{-4}} = 1234 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1234}{1770} = 0,697$$

Gubitak naprezanja zbog opuštanja nakon 500 000 sati:

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

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,697} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75*(1-0,697)} * 10^{-5} = 0,038$$

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

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

$$\Delta\sigma_{pr} = 1234 * \left[ 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,697} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75*(1-0,697)} * 10^{-5} \right] = 47,51 \text{ MPa}$$

Moment savijanja u sredini raspona od nazovistalnih djelovanja (G+P<sub>m0</sub>+Ψ<sub>2</sub>\*Q):

$$M_{QP} = \frac{g_{k,1} + g_{k,2}}{8} * l^2 = \frac{4,25 + 10}{8} * 10^2 = 178,13 \text{ kNm}$$

Naprezanje betona u visini natega od vlastite težine i početnog prednapinjanja i drugih nazovistalnih djelovanja:

$$\sigma_{c,QP} = \frac{M_{QP} * z_{cp}}{I_c} + \left( -\frac{P_{m0,1}}{A_c} - \frac{P_{m0,1} * z_{cp}}{I_c} * z_{cp} \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = \frac{178,13 * 10^3 * 0,313}{0,0089} + \left( -\frac{370,05 * 10^3}{0,17} - \frac{370,05 * 10^3 * 0,313}{0,0089} * 0,313 \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = 6,27 - 6,25 = 0,014 \text{ MPa (vlak)}$$

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

-deformacija od skupljanja i relaksacije uzima se kao apsolutna vrijednost te tlačno naprezanje se uzima s pozitivnim predznakom

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

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{0,000564 * 195000 + 0,8 * 47,51 + 5,74 * 3,1 * 0,014}{1 + 5,74 * \frac{3 * 10^{-4}}{0,17} * \left( 1 + \frac{0,17}{0,0089} * 0,313 * 0,313 \right) * [1 + 0,8 * 3,1]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 134,61 \text{ MPa}$$

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

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p * \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 134,61 * 10^3 * 3 * 10^{-4} = 40,38 \text{ kN}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja natega u sredini raspona u trenutku  $t = \infty$  iznosi:

NATEGA ( $f = 0,275 \text{ m}$ ):

$$P_{m\infty} = P_{m0} - \Delta\sigma_{p,c+s+r} * A_p = 370,05 - 40,38 = 329,67 \text{ kN},$$

Vrijednosti sile prednapinjanja nakon svih gubitaka prikazani tablicom 5:

*Tablica 5: Vrijednosti sile nakon svih gubitaka*

X [m]	0	5,33	10,66
$P_{m0}(x)$ [kN]	351,93	370,05	376,18
$P_{m\infty}(x) = P_{m0}(x) - 40,38$ [kN]	311,55	329,67	338,8

### 3.5. Granično stanje nosivosti

Dugotrajne učinke na tlačnu čvrstoću i neželjene učinke uzrokovane načinom na koji je beton opterećen uzimamo pomoću koeficijenta  $\alpha_{cc}$ :

$\alpha_{cc} = 1$  – preporučena vrijednost prema EN 1992-1-1 koja je prihvaćena nacionalnim dodatkom

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 * \frac{35}{1,5} = 23,3 \text{ MPa} - \text{proračunska čvrstoća betona}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 1 * \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} - \text{proračunska granica popuštanja uzdužne armature}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 1 * \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} - \text{proračunska granica popuštanja vilica}$$

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1500}{1,15} = 1304,35 \text{ MPa} - \text{proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje}$$

$\varepsilon_{pd} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1304,35}{195000} = 6,70 * 10^{-3} = 6,70 \text{ ‰}$  – deformacija pri proračunskoj granici popuštanja čelika za prednapinjanje

### 3.6. Savijanje s uzdužnom silom

#### 3.6.1. Dimenzioniranje presjeka u sredini polja ( $t = \infty, P_{m\infty}, g_{k,1}, g_{k,2}, q_{k,1}$ )

$$d_p = h - 10 = 75 - 10 = 65 \text{ cm}$$

$$d_s = d_p = 65 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona:

$$M_{Ed} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2})}{8} * l^2 \right) * \gamma_G + \left( \frac{q_{k,1}}{8} * l^2 \right) * \gamma_Q$$

$$M_{Ed} \left( \frac{(4,25 + 10)}{8} * 10,00^2 \right) * 1,35 + \left( \frac{4,8}{8} * 10,00^2 \right) * 1,5$$

$$M_{Ed} = 330,47 \text{ kNm}$$

Ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje kod dimenzioniranja uzima se na strani otpornosti ( $\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p$ ).

Pretpostavka je da neutralna os pada u ploču!

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{33047}{40 * 65^2 * 2,33} = 0,084 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Iz tablica:  $\varepsilon_{c,ed2} = -3,1 \text{ ‰}$

$$\varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = 0,119$$

$$\zeta = 0,953; \mu_{Ed} = 0,085$$

$$\xi = \frac{x}{d} \rightarrow x = \xi * d = 0,119 * 153,5 = 7,74 \text{ cm} < h_f = 10 \text{ cm}$$

Neutralna os nalazi se u ploči, gornja pretpostavka vrijedi!

Pretpostavka da u prednapetoj armaturi dolazi do popuštanja:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed} - A_p * \sigma_p * z_p}{f_{yd} * z_s} = \frac{M_{Ed} - A_p * f_{pd} * \zeta * d_p}{f_{yd} * \zeta * d_p}$$

$$A_{s1} = \frac{33047 - 3 * 130,44 * 0,953 * 65}{43,5 * 0,953 * 65} = 3,27 \text{ cm}^2$$

Odabire se  $3\phi 12$  ( $3,39 \text{ cm}^2$ )

$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰}$  - deformacije koju čelik za prednapinjanje dobiva nakon raspucavanja

Naprezanje u natezi u sredini raspona nakon svih gubitaka:

$$\sigma_{pm\infty} = \frac{P_{m\infty}}{A_{p,1}} = \frac{329,67 * 10^3}{3 * 10^{-4}} = 1098,9 \text{ MPa}$$

**Predizduženje (predeformacija):**

$$\varepsilon_{pm\infty} = \frac{\sigma_{pm\infty}}{E_p} = \frac{1098,9}{195000} = 5,64 * 10^{-3} = 5,64 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p = 5,64 + 20 = 25,64 \text{ ‰}$$

$\varepsilon_p = 25,64 \text{ ‰} > \varepsilon_{pd} = 6,70 \text{ ‰} \rightarrow$  u čeliku za prednapinjanje došlo je do popuštanja

### **3.6.2. Provjera najmanjeg i najvećeg postotka armiranja**

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0,0013 * b_t * d - \text{minimalna ploština presjeka armature}$$

prema nacionalnom dodatku

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{3,2}{500} * 20 * 65 \geq 0,0013 * 20 * 65$$

$$A_{s,min} = 2,16 > 1,69$$

$$A_{s,min} = 2,16 \text{ cm}^2$$

Najveća armatura prema nacionalnom dodatku za grede T-presjeka s tlačno naprezanom pojasnicom:

$$A_{s1,max} = 0,022 * A_C$$

Slučaj b (beton razred čvrstoće manji ili jednak C50/60 i kada je  $0,45d > h_f$ )

$$0,45d = 0,45 * 65 = 0,293 > h_f = 0,100$$

$$A_C = 2,5 * h_f * b_{eff} = 2,5 * 10 * 40 = 1000 \text{ cm}^2$$

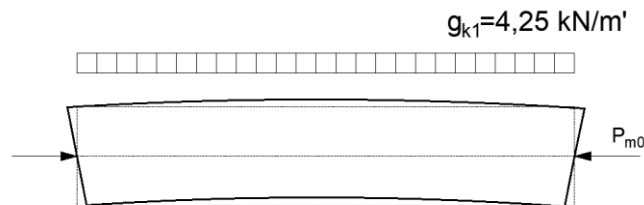
$$A_{s1,max} = 0,022 * A_C = 0,022 * 1000 = 22 \text{ cm}^2$$

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

$$2,16 \leq 3,39 \leq 22 \rightarrow \text{Zadovoljava!}$$

### 3.6.3. Dimenzioniranje presjeka u sredini polja ( $t=0$ , $P_{m0}$ , $g_{k,1}$ )

Za fazu građenja potrebno je dokazati nosivost predstlačenog vlačnog područja za kombinaciju djelovanja vlastite težine  $g_{k,1}$  i prednapinjanja  $P_{m0}$ .



Slika 9: Skica deformacije i unosa sile u fazi gradnja za prednapeti krovni nosač

Parcijalni koeficijenti sigurnosti

-povoljno djelovanje vlastite težine:  $\gamma_G = 1.0$

-nepovoljno djelovanje prednapinjanja:  $\gamma_p = 1.0$

Dokaz se provodi dimenzioniranjem poprečnog presjeka u polju za savijanje s uzdužnom silom u trenutku  $t=0$ . Gubitak sile prednapinjanja zbog skraćanja betona se zanemaruje.

Prednapinjanje kao predizduženje (preddeformacija) uzima se na strani djelovanja.

Proračunski moment u polju od djelovanja  $g_{k,1}$ :

$$M_{ed,g} = \left( \frac{g_{k,1}}{8} * l^2 \right) * \gamma_G$$

$$M_{ed,g} = \left( \frac{4,25}{8} * 10^2 \right) * 1 = 53,13 \text{ kNm}$$

Vrijednost proračunske normalne sile kao posljedica djelovanja sile prednapinjanja u trenutku  $t=0$  na sredini raspona:

$$N_{Ed} = - P_{m0} * \gamma_p = -370,05 * 1 = -370,05 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost momenta savijanja od sile prednapinjanja u sredini raspona u trenutku  $t=0$ :

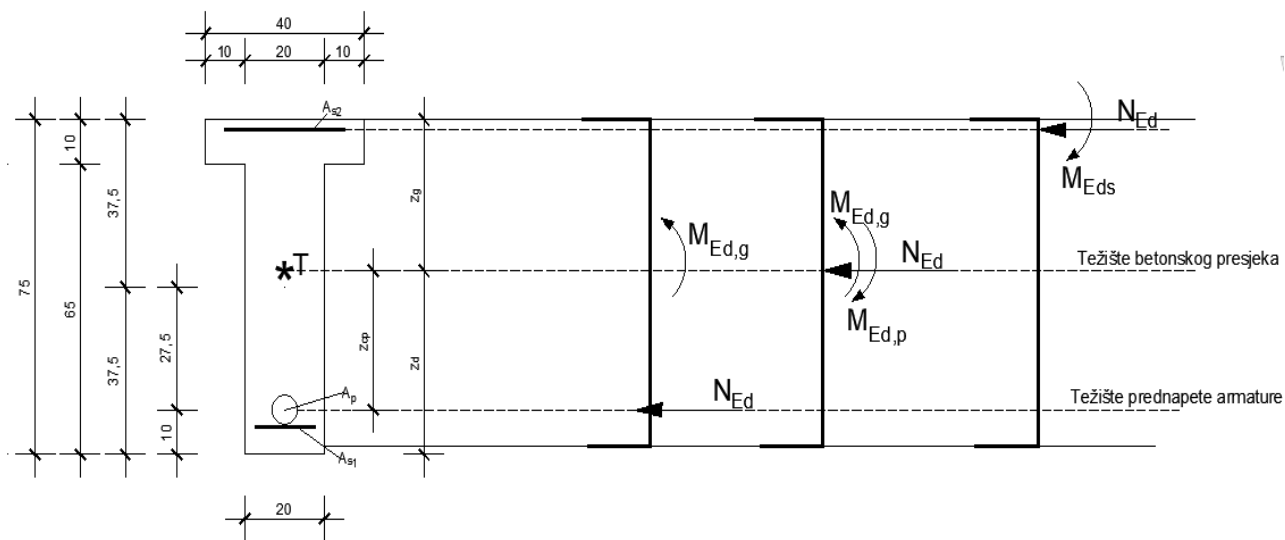
$$M_{Ed,P} = - (P_{m0} * z_{cp}) * \gamma_p =$$

$$M_{Ed,P} = - (370,05 * 0,313) * 1 = -115,46 \text{ kNm}$$

Rezne sile s obzirom na težište betona:

$$M_{Ed,g} + M_{Ed,P} = 53,13 - 115,46 = -62,33 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -370,05 \text{ kN}$$



Slika 10: Skica položaja reznih sila

Udaljenost između težišta gornje armature i težišta betonskog presjeka:

$$z_{cs2} = z_g - h_f / 2 = 33,676 - 10 / 2 = 28,676 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja s obzirom na os gornje zone armature:

$$M_{Eds} = M_{Ed,g} + M_{Ed,P} - N_{Ed} * z_{cs2} = 53,13 - 115,46 - 370,05 * 0,287 = -168,53 \text{ kNm}$$

Statička visina čelika za armiranje

$$d = h - h_f / 2 = 75 - 10 / 2 = 70 \text{ cm}$$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_i * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{16853}{20 * 70^2 * 2,33} = 0,074 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$



Iz tablica:  $\varepsilon_{c,ed2} = -2,4 \text{ ‰}$      $\varepsilon_{s1} = 20,0 \text{ ‰}$      $\xi = 0,107$      $\zeta = 0,958$      $\mu_{Ed} = 0,074$

$$A_{S2} = \frac{M_{Eds}}{f_{yd} \cdot \zeta \cdot d} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{16853}{0,958 \cdot 70 \cdot 43,48} - \frac{370,05}{43,48} = -2,73 \text{ cm}^2$$

Dobivenom vrijednošću se potvrđuje da na gornjem rubu presjeka nije potrebna armatura.

Usvaja se tlačna armatura  $A_{S2} 4\phi 10$  ( $3,14 \text{ cm}^2$ )

### 3.7. Provjera na poprečne sile

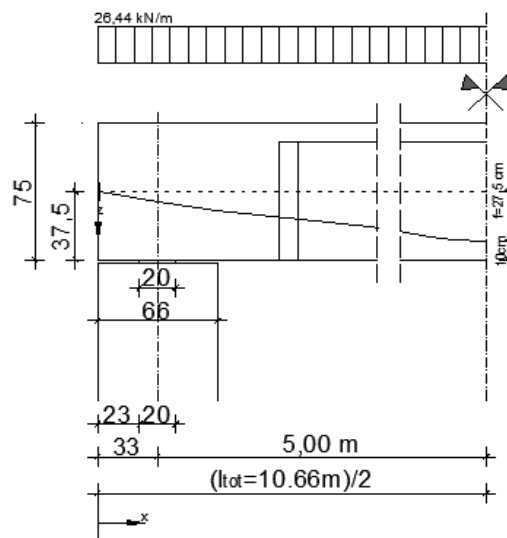
#### 3.7.1. Proračunska nosivost na poprečnu silu

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

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

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

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



Slika 11: Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

$$g_d + q_d = (g_{k,1} + g_{k,2}) \cdot \gamma_G + q_{k,1} \cdot \gamma_G = (4,25 + 10) \cdot 1,35 + 4,8 \cdot 1,5$$

$$g_d + q_d = 26,44 \text{ kN/m}$$

Reducirana proračunska poprečna sila (za određivanje poprečne armature):

$$V_{0d,red} = (g_d + q_d) * \frac{l}{2} - (g_d + q_d) * (d + 0,1)$$

$$V_{0d,red} = (g_d + q_d) * \left( \frac{l}{2} - d - 0,1 \right)$$

$$V_{0d,red} = 26,44 * \left( \frac{10}{2} - 0,71 - 0,1 \right)$$

$$V_{0d,red} = 110,78 \text{ kN}$$

Proračunska poprečna sila (za dokaz tlačnih štapova betona):

$$V_{0d} = (g_d + q_d) * \frac{l}{2}$$

$$V_{0d} = 26,44 * \frac{10}{2}$$

$$V_{0d} = 132,2 \text{ kN}$$

Funkcija položaja natege:

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

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

Nagib natega na udaljenosti  $x = 0,23 + 0,20 + 0,71 = 1,14$  m od ruba oslonca:

Natega razine 1:

$$\tan \alpha_1 = 4 * f * \left( \frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 * x}{l_{tot}^2} \right) = 4 * 0,275 * \left( \frac{1}{10,66} - \frac{2 * 1,14}{10,66^2} \right) = 0,081$$

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

$$P_{m0,1}(1,14) = 355,81 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty,1}(1,14) = P_{m0,1}(1,14) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} * A_p = 355,81 - 40,38 = 315,43 \text{ kN}$$

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

$$V_{pd} = P_{m\infty} * \sin \alpha_1$$

$$V_{pd} = 315,43 * 0,081 = 25,55 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile (za određivanje poprečne armature):

$$V_{Ed,red} = V_{0d,red} - V_{pd} = 110,78 - 25,55 = 85,23 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile (za dokaz tlačnih štapova):

$$V_{Ed} = V_{0d} - V_{pd} = 132,2 - 25,55 = 106,65 \text{ kN}$$

### 3.7.2. Proračunski potrebna poprečna armatura

Postupak sa slobodnim odabirom nagiba tlačnih štapova.

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

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

Nosivost elemenata na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

S minimalnom vrijednosti od  $V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{710}} = 1,53 \leq 2$$

$A_{sl}$  – površina vlačnog područja presjeka koja se sidri za najmanje  $d + l_{bd}$

$l_{bd}$  – proračunska duljina sidrenja

$b_w$  – najmanja širina presjeka u vlačnom području u mm

$$A_{sl} = A_{s1} = 3,39 \text{ cm}^2$$

$l_{bd}$  – proračunska duljina sidrenja

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w * d} \leq 0,02 \text{ – koeficijent armiranja uzdužne armature}$$

$$\rho_1 = \frac{3,39}{20 * 71} = 0,0024 \leq 0,02$$

$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 * f_{cd}$  – naprezanje uslijed proračunske tlačne sile u betonu u promatranom presjeku ( $x=1,14$  m)

$$N_{Ed} = P_{m\infty,1}(1,14) = 315,43 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{315,43 * 10^3}{1,7 * 10^5} < 0,2 * 23,33$$

$$\sigma_{cp} = 1,86 \text{ MPa} < 4,67 \text{ MPa}$$

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

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

$$v_{min} = 0,035 * k^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 * 1,53^{\frac{3}{2}} * 35^{\frac{1}{2}} = 0,392$$

$$k_1 = 0,15$$

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

$$V_{Rd,c} = \left[ 0,12 * 1,53 * (100 * 0,0024 * 35)^{\frac{1}{3}} + 0,15 * 1,86 \right] * 200 * 710$$

$$V_{Rd,c} = 92615,35 \text{ N} = 92,62 \text{ kN}$$

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

$$V_{Rd,c} \geq (0,392 + 0,15 * 1,86) * 200 * 710$$

$$V_{Rd,c} \geq 95282 \text{ N} = 95,28 \text{ kN}$$

$92,62 \text{ kN} \leq 95,28 \text{ kN}$  Prekoračena je minimalna vrijednost!

$$V_{Ed,red} = 85,23 \text{ kN} < V_{Rd,c} = 95,28 \text{ kN}$$

Potrebno je proračunati minimalnu poprečnu armaturu te provjeriti nosivost tlačne dijagonale.

### 3.7.3. Dokaz čvrstoće tlačnih štapova

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

Preporučene vrijednosti koeficijenta  $\alpha_{cw}$  i  $v_1$  dane su nacionalnim dodatkom.

Preporučene vrijednosti za  $\alpha_{cw}$ :

1 – za neprednapete konstrukcije

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

$$1,25 - za 0,25f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd}$$

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

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

$$0 \leq 1,86 \leq 0,25 * 23,33 = 5,83 \quad \rightarrow \quad \alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) = \left(1 + \frac{1,86}{23,33}\right) = 1,079$$

Preporučena vrijednost za  $v_1$  je  $v$

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

$$v_1 = 0.6 * \left[1 - \frac{35}{250}\right] = 0,516$$

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

$$\emptyset_{duct} = 6,5 \text{ cm} > \frac{b_w}{8} = \frac{20}{8} = 2,5 \text{ cm}$$

$$b_{w,nom} = b_w - 0,5 * \emptyset_{duct} = 20 - 0,5 * 6,5 = 16,75 \text{ cm}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w * z * v_1 * f_{cd}}{ctg\theta + \tan\theta} = \frac{1,079 * 16,75 * 0,9 * 71 * 0,516 * 2,33}{1,192 + 0,839} = 683,65 \text{ kN}$$

$V_{Rd,max} = 683,65 \text{ kN} > V_{Ed} = 106,65 \text{ kN}$  zadovoljen je i uvjet nosivosti tlačnih štapova!

### 3.7.4. Najmanja potrebna poprečna armatura

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s * b_w * \sin\alpha} \quad - \text{koeficijent armiranja poprečnom armaturom}$$

Pretpostavljeni promjer vilica  $\emptyset 8$

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

$\alpha = 90^\circ$  – za vertikalne spone  $\rightarrow \sin\alpha = 1$

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

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

Vrijednost za minimalni koeficijent armiranja dana je nacionalnim dodatkom:

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

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w * b_w * \sin\alpha} = \frac{1,0}{0,00096 * 20 * 1} = 52,08 \text{ cm}$$

Najveći uzdužni razmak spona  $s_{1,max}$  za beton  $\leq C50/60$  (nacionalni dodatak):

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

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

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

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

$$106,65 \leq 0,3 * 683,65 = 205,095 \text{ kN}$$

$$s_{1,max} = 0,75 * d \leq 300 \text{ mm}$$

$$s_{1,max} = 0,75 * 710 \leq 300 \text{ mm}$$

$$s_{1,max} = 532,5 \text{ mm} > 300 \text{ mm} \rightarrow \text{prekoračena je maksimalna vrijednost}$$

$$s_{1,max} = 30 \text{ cm}$$

Usvajamo minimalni razmak vilica  $s=30 \text{ cm}$ .  $\rightarrow$  Minimalne vilice su dvorezne ( $m=2$ )  $\emptyset 8/30 \text{ cm}$ .

### **3.8. Granično stanje uporabljivosti**

#### **3.8.1. Granično stanje naprezanja**

##### *3.8.1.1. Provjere naprezanja za neraspucali ili raspucali presjek*

Kako bi se izbjegla pojava uzdužnih pukotina, mikropukotina te jača pojava puzanja potrebno je ograničiti tlačno naprezanje u betonu jer bi takvi efekti mogli uzrokovati negativne utjecaje na konstrukciju. Uzdužna pukotina na elementu nastati će kada naprezanje za karakterističnu kombinaciju opterećenja bude veće od kritične vrijednosti. Za pretpostavku linearnog puzanja u proračunu potrebno je ograničiti naprezanja uslijed nazovistalne kombinacije opterećenja. Kada se želi izbjeći neelastično ponašanje, neželjeno raspucavanje i deformacije koje se smatraju izbjegnutim ukoliko za karakterističnu kombinaciju djelovanja ne prelaze granične vrijednosti zbog toga je potrebno ograničiti vlačno naprezanje u armaturi.

Potrebno je provesti provjeru stanja naprezanja za dvije kombinacije djelovanja (GSU):

Karakterističnu i nazovistalnu kombinaciju.

Faktori kombinacija prema EN 1991-1-3:2003:

$$\Psi_0 = 0,5$$

$$\Psi_1 = 0,2$$

$$\Psi_2 = 0,0$$

Koeficijentom  $r$  odnosno koeficijentom kojim se modificiraju učinci prednapinjanja u graničnom stanju uporabljivosti (ali kada su primjenjene prikladne mjere kao što su izravno mjerenje sile prednapinjanja)

$$r = r_{inf} = r_{sup} = 1$$

Nacionalnim dodatkom propisane su preporučene su vrijednosti koeficijenata  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , i  $k_5$  predstavljaju ograničenja naprezanja.

$$\sigma_c \leq k_1 * f_{ck} \quad \text{gdje je } k_1 = 0,6 \text{ za karakterističnu kombinaciju}$$

$$\sigma_c \leq k_2 * f_{ck} \quad \text{gdje je } k_2 = 0,45 \text{ za nazovistalnu kombinaciju}$$

$$\sigma_s \leq k_3 * f_{yk} \quad \text{gdje je } k_3 = 0,8 \text{ za nenapetu armaturu, karakteristična kombinacija}$$

$$\sigma_p \leq k_5 * f_{pk} \quad \text{gdje je } k_5 = 0,75 \text{ za prednapetu armaturu}$$

Provjere koje je potrebno provesti, provode se za bruto karakteristike presjeka. Raspucalost presjeka provjerava se na način da se provjerava je li vlačna čvrstoća betona  $f_{ctm}$  prekoračena. Odnosno, presjek se smatra raspucalim u onom trenutku kada je dosegnuta vlačna čvrstoća presjeka.

Proračun naprezanja i kritičnog momenta raspucalosti proveden je u računalnim paketom Mathcad.

### 3.8.2. Stanje izgradnje ( $t=0$ , karakteristična kombinacija, sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

$$g_{k,1} = 4,25 \text{ kN/m}$$

$$M_{gk1} = \frac{g_{k,1} * l^2}{8}$$

$$M_{gk1} = \frac{4,25 * 10^2}{8} = 53,13 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk1} = 53,13 \text{ kNm}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = 0$

$$P_{m0} = P_{m0,1} = 370,05 \text{ kN}$$



Karakteristična vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = 0$

$$P_{k0} = P_{m0,1} * r = 1 * 370,05 = 370,05 \text{ kN}$$

Momenti savijanja u trenutku pojave prve pukotine (vlak na donjem rubu)

$$M_{cr} = W_d \left( f_{ctm} + \frac{P_k}{A_c} + \frac{P_k * z_{cp}}{W_g} \right)$$

$$M_{cr} = 2,157 * 10^7 \left( 3,2 + \frac{370,05 * 10^3}{0,17 * 10^5} + \frac{370,05 * 10^3 * 313}{2,64 * 10^7} \right) = 231,87 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 53,13 \text{ kNm} < M_{cr} = 231,87 \text{ kNm}$$

- Presjek je raspucan, proračun se provodi za stanje naprezanja II (raspucalo stanje).

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0,k}) = 0,087 * 10^6 \text{ Pa} = 0,087 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0,k}) = -1,379 * 10^6 \text{ Pa} = -1,379 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0,k}) = 1210,006 * 10^6 \text{ Pa} = 1210,006 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0,k}) = -26,368 * 10^6 \text{ Pa} = -26,368 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0,k}) = -4,74 * 10^6 \text{ Pa} = -4,74 \text{ MPa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka – karakteristična k.o. (tlak)

$$\sigma_{c,ed2} \leq 0,6 * f_{ck}$$

$$0,087 \text{ MPa} \leq 0,6 * 35 \text{ MPa}$$

$$0,087 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi  $A_{s1}$  – karakteristična k.o. (vlak)

$$\sigma_{s1} \leq 0,8 * f_{yk}$$

$$26,368 \text{ MPa} \leq 0,8 * 500 \text{ MPa}$$

$$26,368 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi – karakteristična k.o. (tlak)

$$\sigma_p \leq 0,75 * f_{pk}$$

$$1210,006 \text{ MPa} \leq 0,75 * 1770 \text{ MPa}$$

$$1210,006 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Naprezanje na donjem rubu betonskog presjeka – karakteristična k.o. (vlak)

$$\sigma_{c,ed} \leq 0,6 * f_{ck}$$

$$4,74 \text{ MPa} \leq 0,6 * 35 \text{ MPa}$$

$$4,74 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Provedena kontrola naprezanja, zadovoljava!

### 3.8.3. Stanje eksploatacije ( $t = \infty$ , karakteristična k.o., sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

$$M_{Ed,rare} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,rare} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) + \left( \frac{4,8 * 10^2}{8} \right) = 238,13 \text{ kNm}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{m\infty} = 329,67 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 329,67 = 329,67 \text{ kN}$$

Moment savijanja u trenutku pojave prve pukotine (vlak na donjem rubu)

$$M_{cr} = W_d \left( f_{ctm} + \frac{P_k}{A_c} + \frac{P_k * z_{cp}}{W_d} \right)$$

$$M_{cr} = 2,157 * 10^7 \left( 3,2 + \frac{329,67 * 10^3}{0,17 * 10^5} + \frac{329,67 * 10^3 * 313}{2,157 * 10^7} \right) = 214,098 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 238,13 \text{ kNm} > M_{cr} = 214,098 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, naprezanje na donjem vlačnom rubu je nula proračun se provodi za stanje naprezanja II (raspucalo stanje)

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0},k) = -9,984 \cdot 10^6 \text{ Pa} = -9,984 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0},k) = -46,037 \cdot 10^6 \text{ Pa} = -46,037 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0},k) = 1202,533 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 1202,533 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0},k) = 121,523 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 121,523 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0},k) = 0 \cdot 10^6 \text{ MPa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka – karakteristična k.o. (tlak)

$$\sigma_{c,ed2} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$9,984 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$9,984 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi  $A_{s1}$  – karakteristična k.o. (vlak)

$$\sigma_{s1} \leq 0,8 \cdot f_{yk}$$

$$121,523 \text{ MPa} \leq 0,8 \cdot 500 \text{ MPa}$$

$$121,523 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi – karakteristična k.o. (tlak)

$$\sigma_p \leq 0,75 \cdot f_{pk}$$

$$1202,533 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 \text{ MPa}$$

$$1202,533 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Provedena kontrola naprezanja, zadovoljava!

### 3.8.4. Provjere naprezanja za nazovistalnu k.o., ( $t = \infty$ , sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

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

Moment savijanja u sredini polja za nazovistalnu kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) = 178,13 \text{ kNm}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{m\infty} = 329,67 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 329,67 = 329,67 \text{ kN}$$

Moment savijanja u trenutku pojave prve pukotine (vlak na donjem rubu)

$$M_{cr} = W_d \left( f_{ctm} + \frac{P_k}{A_c} + \frac{P_k * z_{cp}}{W_d} \right)$$

$$M_{cr} = 2,157 * 10^7 \left( 3,2 + \frac{329,67 * 10^3}{0,17 * 10^5} + \frac{329,67 * 10^3 * 313}{2,157 * 10^7} \right) = 214,098 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm} = 178,13 \text{ kNm} < M_{cr} = 214,098 \text{ kNm}$$

Presjek je neraspucan stoga se proračun provodi za stanje naprezanja I odnosno, neraspucalo stanje.

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0},k) = -4,614 \cdot 10^6 \text{ Pa} = -4,614 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0},k) = -24,783 \cdot 10^6 \text{ Pa} = -24,783 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0},k) = 1102,347 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 1102,347 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0},k) = 6,367 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 6,367 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0},k) = 1,403 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 1,403 \text{ MPa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka – karakteristična k.o. (tlak)

$$\sigma_{c,ed 2} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$$

$$4,614 \text{ MPa} \leq 0,45 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$4,614 \text{ MPa} < 15,75 \text{ MPa}$$

Provedena kontrola naprezanja, zadovoljava!

### 3.9. Granično stanje pukotina

Promatra se vlačna zona T presjeka, točnije rebro presjeka, neposredno prije raspucavanja za čestu kombinaciju opterećenja.

#### **Minimalna armatura za ograničenje širine pukotina:**

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

$k_c$  – koeficijent koji uzima u obzir raspodjelu naprezanja unutar presjeka netom prije raspucavanja

Za naprezanje izazvano savijanjem, za rebro T presjeka:

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * \left(\frac{h}{h^*}\right) f_{ct,eff}} \right) \leq 1$$

$\sigma_c$  – srednje naprezanje u betonu na promatranom dijelu presjeka

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh}$$

$N_{Ed}$  – uzdužna sila kod graničnog stanja uporabljivosti (pozitivna ako je tlačna) uslijed opterećenja i prednapinjanja  $N_{Ed} = P_{m\infty} = 329,67 \text{ kN}$

$$\sigma_c = \frac{329,67 * 10^3}{200(750 - 100)} = 2,54 \text{ MPa}$$

$k_1$  – koeficijent koji uzima u obzir efekte, izazvane uzdužnom silom, na raspodijelu naprezanja

$$k_1 = 1,5 - \text{ako je } N_{Ed} \text{ tlačna sila}$$

$$h^* = h \text{ za } h < 1,0 \text{ m}$$

$$h^* = 1 \text{ m za } h \geq 1,0 \text{ m}$$

$$h = 750 - 100 = 650 \text{ mm} < 1000 \text{ mm} \rightarrow h^* = 0,65 \text{ m}$$

$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$  – vlačna čvrstoća u trenutku nastanka prve pukotine

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * \left(\frac{h}{h^*}\right) f_{ct,eff}} \right) \leq 1$$

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{2,54}{1,5 * \left(\frac{750}{650}\right) 3,2} \right) \leq 1$$

$$k_c = 0,22 < 1$$

$k$  – koeficijent koji omogućava efekt neujednačenih samouravnotežujućih naprezanja,

Koja vode do smanjenja zadržavajućih sila

$$k = 0,65 - \text{za rebra visine } h \geq 800 \text{ mm}$$

$k = 1$  – za rebra visine  $h \leq 300$  mm

### Inerpolacija

$H = 650$  mm,  $k = 0,76$

$A_{ct} = b_w * z_d = 20 * 41,3 = 826$  cm<sup>2</sup> – vlačna površina presjeka neposredno prije pojave prvih pukotina

U vlačnoj zoni je postavljena armatura:

$A_{sI} = 3\emptyset 12$  (3,39 cm<sup>2</sup>)

Naprezanje u čeliku [MPa]	Najveći promjer šipke [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Slika 12: Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki [1]

Kako bi se ograničila širina pukotina  $w_k = 0,2$  mm i najveći promjer šipki  $\emptyset 12 \rightarrow$  naprezanje u nenapetoj armaturi je:  $\sigma_s = 240$  MPa

$$A_{s,min} = \frac{k_c k_{fct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{0,22 * 0,76 * 3,2 * 0,826 * 10^5}{240} = 1,84 \text{ cm}^2$$

Minimalna armatura za ograničenje pukotina  $A_{s,min} = 1,84$  cm<sup>2</sup> stoga zadovoljava armatura postavljena u vlačnoj zoni  $A_{sI} 3\emptyset 12$  (3,39 cm<sup>2</sup>)

Provjera naprezanja za ( $t = \infty$ , sredina raspona, često k.o.)

Karakteristična kombinacija:

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

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_1$$

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) + \left( \frac{4,8 * 10^2}{8} \right) * 0,2 = 190,13 \text{ kNm}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{m\infty} = 329,67 \text{ kN}$$

Karakteristična vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 329,67 = 329,67 \text{ kN}$$

Moment savijanja u trenutku pojave prve pukotine (vlak na donjem rubu)

$$M_{cr} = W_d \left( f_{ctm} + \frac{P_k}{A_c} + \frac{P_k * z_{cp}}{W_d} \right)$$

$$M_{cr} = 2,157 * 10^7 \left( 3,2 + \frac{329,67 * 10^3}{0,17 * 10^5} + \frac{329,67 * 10^3 * 313}{2,157 * 10^7} \right) = 214,098 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm} = 190,13 \text{ kNm} < M_{cr} = 214,098 \text{ kNm}$$

Presjek je neraspucan, proračun se provodi za stanje naprezanja I (neraspucalo stanje)

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\epsilon_{c0}, k) = -5,045 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\epsilon_{c0}, k) = -26,944 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\epsilon_{c0}, k) = 1104,583 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\epsilon_{c0}, k) = 9,106 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{ced1}(\epsilon_{c0}, k) = 1,920 * 10^6 \text{ Pa}$$

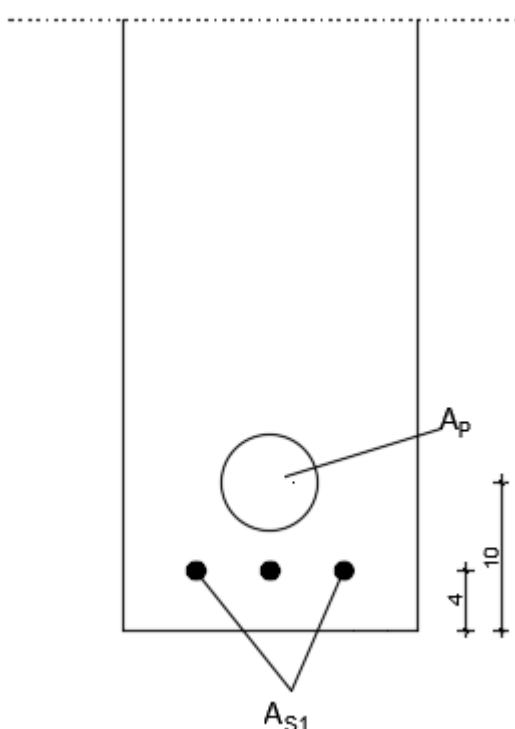


$$\sigma_{s1} = 9,106 \text{ MPa}$$

Za naprezanje u armaturi:  $\sigma_s = 240 \text{ MPa}$  dobije se razmak između šipki 100 mm. Kriterij je zadovoljen

Naprezanje u čeliku [MPa]	Najveći razmak šipki [mm]		
	$w_k=0,4 \text{ mm}$	$w_k=0,3 \text{ mm}$	$w_k=0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Slika 13: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki s obzirom na ograničenje širine pukotina i naprezanje [1]



Slika 14: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

Provedena kontrola naprezanja, zadovoljava!

### 3.10. Granično stanje deformacija

Provodi se provjera:

-  $t = \infty$ , sredina raspona, nazovistalna k.o., idealno stanje naprezanja I (neraspucalo stanje)

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

Moment savijanja u sredini polja za nazovistalnu kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) = 178,13 \text{ kNm}$$

Srednja vrijednost sile prednapinjanja u trenutku  $t = \infty$

$$P_{m\infty} = 329,67 \text{ kN}$$

Proračunski modul elastičnosti betona:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{(1 + \varphi)} = \frac{34000}{(1 + 3,1)} = 8292 \text{ MPa}$$

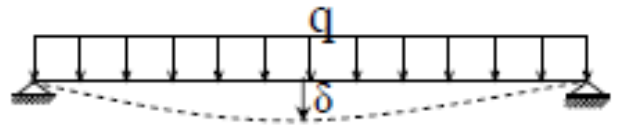
Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje u:

$$u = -P_{m\infty} * \frac{8 * f}{l_{tot}^2} = -329,67 * \frac{8 * 0,275}{10,66^2} = -6,38 \text{ kN/m}$$



Slika 15: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



Slika 16: Izraz za proračun progiba slobodno oslonjene grede kontinuiranim opterećenjem

Progib sredine grede:

$$\delta = \frac{5 \cdot (g_{k,1} + g_{k,2} + \psi_2 q_{k,1} + u) \cdot l^4}{384 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c}$$

$$\delta = \frac{5 \cdot (4,25 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3 + 0,0 \cdot 4,8 \cdot 10^3 - 6,38 \cdot 10^3) \cdot 10^4}{384 \cdot 8292 \cdot 0,089}$$

$$\delta = 0,0014 \text{ m} = 1,4 \text{ mm} = 0,14 \text{ cm}$$

Granični progib grede:

$$\frac{l}{250} = \frac{10000}{250} = 40 \text{ mm} = 4 \text{ cm}$$

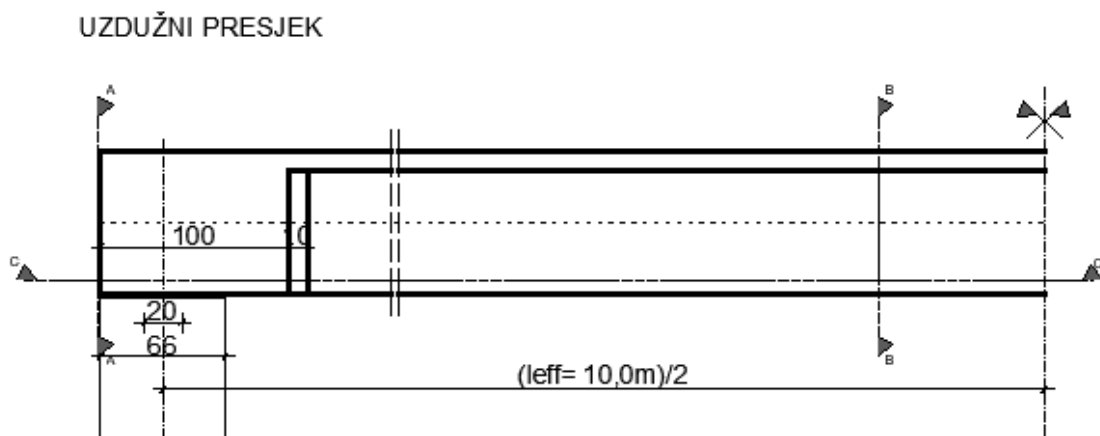
$$\delta = 0,14 \text{ cm} < 4 \text{ cm}$$

Progib zadovoljava!

## 4. ARMIRANOBETONSKI NOSAČ

Materijali:

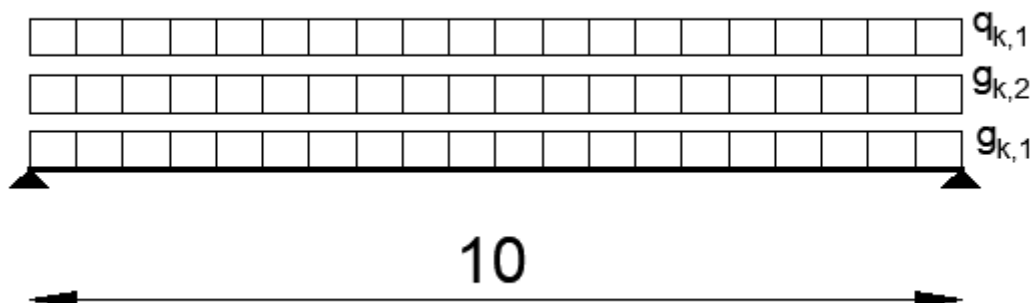
- Beton C35/45
- Čelik za armiranje B500A



Slika 17: Geometrijske karakteristike AB nosača

### 4.1 Stalna i promjenjiva djelovanja

#### 4.1.1. Stalno opterećenje



Slika 18: Statički sustav armiranobetonskog nosača

- Površina betonskog presjeka (idealizirani T – presjek):

$$A_c = (b_{eff} - b_w) h_f + b_w * h = (40 - 20) 10 + 20 * 75$$

$$A_c = 1700 \text{ cm}^2 = 0,17 \text{ m}^2$$

### **Stalno djelovanje**

- **Krovni nosač:**  $g_{k,1} = \gamma * A_c = 25 * 0,17 = 4,25 \text{ kN/m}$

- **Krovnna konstrukcija:** (porasti beton + izravnavajući sloj + HI)

- porasti beton 20 cm ( $\gamma = 7,2 \text{ kN/m}^3$ )

- hidroizolacija ( $\gamma = 0,23 \text{ kN/m}^2$ )

$$g_{k,2} = (7,2 * 0,2 + 0,23) * 6,0 = 10,0 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,1} + g_{k,2} = 4,25 + 10,0 = 14,25 \text{ kN/m}$$

#### ***4.1.2. Opterećenje snijegom***

**Opterećenja snijegom na krovovima prema HRN EN 1991-1-3; NA/HRN EN 1991-1-3**

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

$\mu_i$  faktor oblika opterećenja snijegom na krovu

$s_k$  karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu

$C_e$  faktor izloženosti ( $C_e = 1,0$ )

$C_t$  toplinski koeficijent ( $C_t = 1,0$ )

Za nadmorsku visinu 100 m i 3. područje – kontinentalna Hrvatska (Ilok), karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu iznosi  $s_k = 1 \text{ kN/m}^2$ .

Za kut nagiba krova  $\alpha = 0^\circ$ , ( $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ), faktor oblika opterećenja snijegom iznose  $\mu_1 = 0,8$

Proračunske vrijednosti opterećenja snijegom na krovu za moguće slučajeve rasporeda djelovanja, s  $C_e = 1,0$  i  $C_t = 1,0$ , te  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$ :

#### **–simetrično djelovanje snijega**

I. slučaj:

$$s_1 = \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

#### **– nesimetrična raspodjela snijega na nesimetričnom krovu**

II. slučaj:

$$s_1 = 0,5 * \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,5 * 0,8 * 1 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

III. slučaj:

$$s_1 = \mu_1(\alpha_2) * s_k = 0,8 * 1 = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = 0,5 * \mu_1(\alpha_1) * s_k = 0,5 * 0,8 * 1 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

Tablični prikaz rezultata prikazan tablicom 6:

*Tablica 6: Opterećenje snijegom (AB nosač)*

Djelovanje snijega na krovu/m <sup>2</sup> tlocrta			
NMV	100,00	m	
Područje	III.		
NMV	100,00	m	
$S_k$	1	kN/m <sup>2</sup>	
$\alpha_1$	0	°	
$\alpha_2$	0	°	
$\mu_{1(\alpha_1)}$	0,80	m	
$\mu_{1(\alpha_2)}$	0,80	m	
$C_e$	1,00	/	
$C_t$	1,00	/	
$s(I.)$	0,80	kN/m <sup>2</sup>	I. Slučaj: simetrična raspodjela III. Slučaj: nesimetrična raspodjela
$s_1(III.)$	0,80	kN/m <sup>2</sup>	
$s_2(III.)$	0,40	kN/m <sup>2</sup>	

$$s = 0,80 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{k,1} = s * 6,0 = 0,80 * 6,0 = 4,8 \text{ kN/m}$$

Preporučene vrijednosti koeficijenta kombinacije za snijeg, za lokacije ispod 1000 m nadmorske visine prema EN 1991-1-3:2003:

$$\psi_0=0,5 \quad \psi_1=0,2 \quad \psi_2=0,0$$

## 4.2 Granično stanje nosivosti

Proračunska granica popuštanja armature  $f_{yd}$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa} - \text{uzdužne šipke armature}$$

Proračunska tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{35}{1,5} = 2,33 \text{ MPa}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona:

$$M_{Ed} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2})}{8} * l^2 \right) * \gamma_G + \left( \frac{q_{k,1}}{8} * l^2 \right) * \gamma_Q$$

$$M_{Ed} = \left( \frac{(4,25 + 10,0)}{8} * 10^2 \right) * 1,35 + \left( \frac{4,8}{8} * 10^2 \right) * 1,5$$

$$M_{Ed} = 330,47 \text{ kNm}$$

Proračunska poprečna sila:

$$V_{Ed} = \left( \frac{(4,25 + 10,0)}{2} * 10 \right) * 1,35 + \left( \frac{4,8}{2} * 10 \right) * 1,5 = 132,19 \text{ kN}$$

### Zaštitni sloj:

XC1 →

S4 → S3

$$c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min} = \max \begin{cases} c_{min,b} \\ c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{cases} = 15 \text{ mm}$$

$$c_{min} = 15 + \Delta c_{dev} = 25 \text{ mm}$$

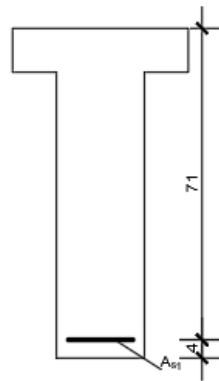
$$d_I = 2,5 + 0,8 + 1,5/2 = 4,05 = 4 \text{ cm} \rightarrow d = 75 - 4 = 71 \text{ cm}$$



#### 4.2.1. Dimenzioniranje na sredini raspona

**Pretpostavka:** N.O. prolazi kroz ploču

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{33047}{40 * 71^2 * 2,33} = 0,070 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$



Slika 19: Poprečni T presjek AB nosača

Iz tablica:

$$\xi = 0,091$$

$$\zeta = 0,962$$

$$\mu_{Ed} = 0,071$$

$$\xi = \frac{x}{d} \rightarrow x = \xi * d = 0,091 * 71 = 6,46 \text{ cm} < h_f = 10 \text{ cm}$$

Neutralna os nalazi se u ploči, gornja pretpostavka vrijedi!

$$A_{S1} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} * \zeta * d}$$

$$A_{S1} = \frac{33047}{43,5 * 0,962 * 71} = 11,12 \text{ cm}^2$$

$$A_{S,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d \leq 0,0013 * b * d$$

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{3,2}{500} * 20 * 71 = 2,4 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{mjerodavno!}$$

$$A_{s,min} = 0,0013 * 20 * 71 = 1,85 \text{ cm}^2$$

Odabire se  $6\phi 16$  ( $12,06 \text{ cm}^2$ )

#### 4.2.2. Karakteristike presjeka

Idealizirani poprečni presjek:

$$\alpha_{E,s} = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{34000} = 5,88$$

$$A_{s1} = 12,06 \text{ cm}^2 (6\phi 16) \rightarrow \text{donja armatura}$$

Vrijednosti dobivene u Mathcad-u (koristimo bruto geometrijske karakteristike presjeka):

*Tablica 7: Geometrijske karakteristike AB nosača*

Beton	Ac [m <sup>2</sup> ]	Ic [m <sup>4</sup> ]	za [m]	zg [m]	Zcp [m]
Bruto	0,17	0,0089	0,413	0,337	0,373
Neto	0,17	0,0089	0,413	0,337	0,373
Idealno	0,176	0,0096	0,401	0,349	0,361

### 4.3. Provjera na poprečne sile

$$g_d + q_d = (g_{k,1} + g_{k,2}) * \gamma_G + q_{k,1} * \gamma_G = (4,25 + 10) * 1,35 + 4,8 * 1,5$$

$$g_d + q_d = 26,44 \text{ kN/m}$$

Reducirana proračunska poprečna sila (za određivanje poprečne armature):

$$V_{0d,red} = V_{Ed} - (26,44 * 1,14)$$

$$V_{Ed} = V_{0d,red} = 104,7 \text{ kN}$$

#### 4.3.1. Proračunski potrebna poprečna armatura

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$$

Nosivost elemenata na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

S minimalnom vrijednosti od  $V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$

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

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12 - \text{računska čvrstoća na djelovanje glavnih kosih naprezanja}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 - \text{korekcijski faktor kojim se povećava nosivost na poprečnu silu}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{710}} = 1,53 \leq 2$$

$$k_1 = 0,15$$

$A_{sl}$  – površina vlačnog područja presjeka koja se sidri za najmanje  $d + l_{bd}$

$l_{bd}$  – proračunska duljina sidrenja

$b_w$  – najmanja širina presjeka u vlačnom području u mm

$$A_{sl} = A_{S1} = 12,06 \text{ cm}^2$$

$l_{bd}$  – proračunska duljina sidrenja

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w * d} \leq 0,02 \text{ – koeficijent armiranja uzdužne armature}$$

$$\rho_1 = \frac{12,06}{20 * 71} = 0,0085 \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0 \text{ – neprednapeti presjek}$$

$$v_{min} = 0,035 * k^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 * 1,53^{\frac{3}{2}} * 35^{\frac{1}{2}} = 0,392$$

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

$$V_{Rd,c} = \left[ 0,12 * 1,53 * (100 * 0,0085 * 35)^{\frac{1}{3}} + 0,15 * 0 \right] * 200 * 710$$

$$V_{Rd,c} = 80783,63 \text{ N} = 80,78 \text{ kN}$$

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

$$V_{Rd,c} \geq (0,392 + 0,15 * 0) * 200 * 710$$

$$V_{Rd,c} \geq 55664 \text{ N} = 55,668 \text{ kN}$$

80,78 kN  $\geq$  55,66 kN    Prekoračena je minimalna vrijednost!

$$V_{Ed} = 104,7 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 80,78 \text{ kN}$$

Potrebno je proračunati poprečnu armaturu.

### 4.3.2. Proračun poprečne armature

Odabiremo dvorezne vilice ( $m=2$ )  $\emptyset 8$

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

Gdje je:

$\alpha$  – kut između poprečne armature i odi grede okomito na poprečnu silu

$\theta$  – kut između betonskog tlačnog štapa i osi grede okomito na poprečnu silu

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2,5$$

$$21,8^\circ \leq \text{ctg } \theta \leq 45^\circ$$

Usvajamo:  $\text{ctg } \theta = 1,2$  ( $\theta = 40^\circ$ )

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

$A_{sw}$  – ploština presjeka poprečne armature

$s$  – razmak spona

$z$  – krak unutarnjih sila

$f_{ywd}$  – proračunska granica popuštanja poprečne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

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

$$s = \frac{100 * 0,9 * 710 * 434,783 * \text{ctg } 40}{104700} = 318,43 \text{ mm}$$

$s = 300 \text{ mm} \rightarrow$  usvajamo vilice  $\emptyset 8 / 30 \text{ cm}$

Najveća proračunska ploština presjeka poprečne armature  $A_{sw,max}$

$$\frac{A_{sw,max} * f_{ywd}}{b_w * s} \leq \frac{1}{2} * \alpha_{cw} * f_{cd}$$

$b_w$  – najmanja širina presjeka između vlačnog i tlačnog pojasa

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

neprednapeti elementi  $\alpha_{cw} = 1$

$v_1$  – koeficijent smanjenja čvrstoće za beton raspucan zbog posmika

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

$$v_1 = 0.6 * \left[ 1 - \frac{35}{250} \right] = 0,516$$

$$\frac{100 * 434,783}{200 * 300} \leq \frac{1}{2} * 1 * 0,516 * 23,33$$

$$0,72 \text{ MPa} < 6,02 \text{ MPa}$$

#### 4.3.3. Kontrola nosivosti tlačne dijagonale

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

Preporučene vrijednosti koeficijenata  $\alpha_{cw}$  i  $v_1$  dane su nacionalnim dodatkom.

Preporučene vrijednosti za  $\alpha_{cw}$ :

$\alpha_{cw} = 1$  – za neprednapete konstrukcije

Preporučena vrijednost za  $v_1$  je  $v$

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

$$v_1 = 0.6 * \left[ 1 - \frac{35}{250} \right] = 0,516$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w * z * v_1 * f_{cd}}{ctg\theta + \tan\theta} = \frac{1 * 20,0 * 0,9 * 71 * 0,516 * 2,33}{1,192 + 0,839} = 756,53 \text{ kN}$$

$V_{Rd,max} = 756,53 \text{ kN} > V_{Ed} = 104,7 \text{ kN}$  zadovoljen je i uvjet nosivosti tlačnih štapova!

#### 4.3.4. Najmanja potrebna poprečna armatura

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s * b_w * \sin\alpha} \quad - \text{koeficijent armiranja poprečnom armaturom}$$

Pretpostavljeni promjer vilica  $\emptyset 8$

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

$\alpha = 90^\circ$  – za vertikalne spone  $\rightarrow \sin\alpha = 1$

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

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

Vrijednost za minimalni koeficijent armiranja dana je nacionalnim dodatkom:

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

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w * b_w * \sin\alpha} = \frac{1,0}{0,00096 * 20 * 1} = 52,08 \text{ cm}$$

Najveći uzdužni razmak spona  $s_{1,max}$  za beton  $\leq C50/60$  (nacionalni dodatak):

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

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

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

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

$$104,7 \leq 0,3 * 756,53 = 226,96 \text{ kN}$$

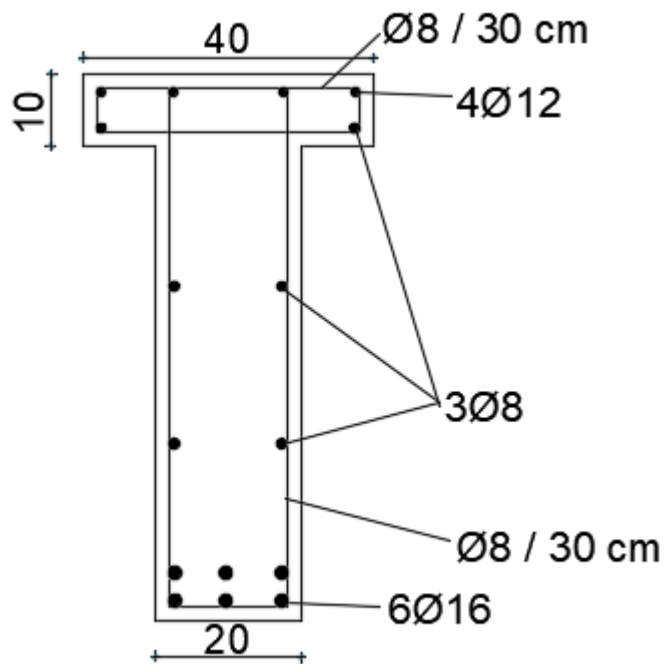
$$s_{1,max} = 0,75 * d \leq 300 \text{ mm}$$

$$s_{1,max} = 0,75 * 710 \leq 300 \text{ mm}$$

$s_{1,max} = 532,5 \text{ mm} > 300 \text{ mm} \rightarrow$  prekoračena je maksimalna vrijednost

$$s_{1,max} = 30 \text{ cm}$$

Usvajamo minimalni razmak vilica  $s=30 \text{ cm}$ .  $\rightarrow$  Minimalne vilice su dvorezne ( $m=2$ )  $\varnothing 8/30$  cm.



Slika 20: Armatura armiranobetonskog nosača



### 4.3.5. Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature

Osnovna duljina sidrenja,  $l_{b,req}$ :

$$l_{b,req} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

gdje je  $f_{bd}$  proračunska čvrstoća prijanjanja

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{cdt}$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ (za lošije uvjete } \eta_1 = 0,7)$$

$$\eta_1 = 1,0 \text{ za promjere šipke } \emptyset < 32 \text{ mm}$$

$$f_{cdt} = 1,50 \text{ MPa za beton C34/45}$$

Beton C35/45

DOBRI UVJETI:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,50 = 3,38 \text{ MPa}$$

$$l_{b,req} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{434,8}{3,38} = 32,16\emptyset$$

LOŠIJI UVJETI:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,50 = 2,36 \text{ MPa}$$

$$l_{b,req} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{434,8}{2,36} = 46,06\emptyset$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,50 = 2,36 \text{ MPa}$$

**PRORAČUNSKA DULJINA SIDRENJA**

$$l_{brd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,req} \geq l_{b,min} \quad : \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \geq 0,7$$

Pojednostavljeno može se koristiti ekvivalentna duljina sidrenja:  $l_{b,eq} = \alpha_1 \cdot l_{b,req}$  gdje  $\alpha_1$  ovisi o obliku armature (za ravne šipke  $\alpha_1 = 1,0$ ).

*Tablica 8: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete*

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
DOBRI	$\emptyset 8$	25,73 $\approx$ 26 cm
	$\emptyset 10$	32,16 $\approx$ 33 cm
	$\emptyset 12$	38,59 $\approx$ 39 cm
	$\emptyset 16$	51,46 $\approx$ 52 cm

*Tablica 9: Potrebne duljine sidrenja armature za loše uvjete*

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
LOŠIJI	$\emptyset 8$	36,85 $\approx$ 37 cm
	$\emptyset 10$	46,06 $\approx$ 47 cm
	$\emptyset 12$	55,27 $\approx$ 56 cm
	$\emptyset 16$	73,69 $\approx$ 74 cm

## NASTAVLJANJE ARMATURE

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,req}$$

gdje je  $\alpha_1 = 1$  za ravne šipke, a  $\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 = 1$

$\alpha_6$  – ovisi o postotku preklopljene armature u promatranome presjeku

Ukoliko preklapamo sve šipke u istom presjeku onda je  $\alpha_6 = 1,5$

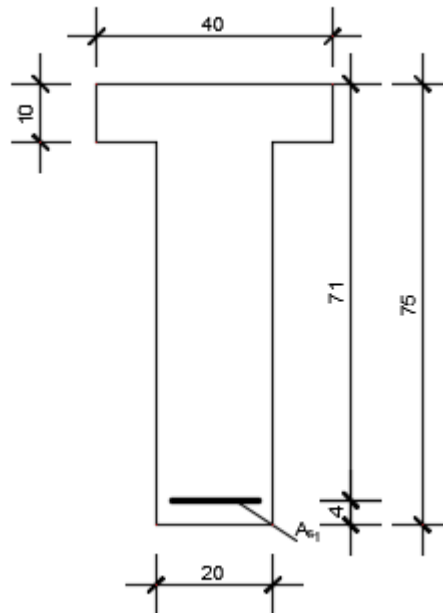
$$l_0 = 1,5 \cdot 32,16 \varnothing \text{ (za dobre uvjete)}$$

*Tablica 10: Potrebne duljine nastavljanja armature*

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA NASTAVLJANJA, $l_0$
DOBRI	$\varnothing 8$	38,59 $\approx$ 39 cm
	$\varnothing 10$	48,24 $\approx$ 49 cm
	$\varnothing 12$	57,89 $\approx$ 58 cm
	$\varnothing 16$	77,18 $\approx$ 78 cm
LOŠIJI	$\varnothing 8$	55,27 $\approx$ 56 cm
	$\varnothing 10$	69,09 $\approx$ 70 cm
	$\varnothing 12$	82,91 $\approx$ 83 cm
	$\varnothing 16$	110,54 $\approx$ 111 cm

## 4.4. Granično stanje uporabljivosti

### 4.4.1. Granično stanje pukotina / raspucavanja



Slika 21: Dimenzije AB nosača

Nazovistalna (kvazistalna) kombinacija:

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

Moment savijanja u sredini polja za nazovistalnu kombinaciju djelovanja:

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + \left( \frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left( \frac{(4,25 + 10,0) * 10,0^2}{8} \right) = 178,13 \text{ kNm}$$

Težište betonskog presjeka:

$$Z_{g.b.} = x_1 = \frac{20 \cdot 75 \cdot \frac{75}{2} + (40 - 20) \cdot 10 \cdot \frac{10}{2}}{20 \cdot 75 + (40 - 20) \cdot 10} = 33,7 \text{ cm}$$

$E_{cm} = 34\,000 \text{ MPa}$  - sekantni modul elastičnosti

$E_s = 200\,000 \text{ MPa}$  - modul elastičnosti

$f_{cm} = 43 \text{ MPa}$  – srednja tlačna čvrstoća betona

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{34000} = 5,88 \rightarrow \text{odnosa modula elastičnosti čelika i betona}$$

Položaj neutralne osi za naponsko stanje II dobije se iz uvjeta da je statički moment idealne površine s obzirom na neutralnu os jednak nuli (dio betona u vlaklu isključujemo iz proračuna).

PRETPOSTAVKA: N.O. prolazi kroz ploču

$$b_{eff} \cdot \frac{x^2}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2) - \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot (d - x) = 0$$

$$40 \cdot \frac{x^2}{2} + (5,88 - 1) \cdot 0 \cdot (x - 4) - 5,88 \cdot 12,06 \cdot (71 - x) = 0$$

$$20 \cdot x^2 + 70,91x - 5034,81 = 0$$

$$x = 14,19 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$$

N.O. ne prolazi kroz ploču.

$$z = d - \frac{x}{3} = 71 - \frac{14,19}{3} = 66,27 \text{ cm}$$

Naprezanje u vlačnoj armaturi za naponsko naprezanje II

$$\sigma_{s1} = \frac{M_{Ed}}{A_{s1} \cdot z} = \frac{17813}{12,06 \cdot 66,27} = 22,29 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 222,9 \text{ MPa}$$

#### 4.4.2. Provjera širine pukotina

##### Najmanja ploština armature za ograničenje širine pukotina

$$A_{s,min}\sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

$A_{s,min}$  – najmanja ploština presjeka armature u vlačnoj zoni

$k_c$  – koeficijent koji uzima u obzir raspodjelu naprezanja unutar presjeka netom prije raspucavanja

Za naprezanje izazvano savijanjem, za rebro T presjeka:

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * \left(\frac{h}{h^*}\right) f_{ct,eff}} \right) \leq 1 - \text{savijanje i savijanje uzdužnom silom}$$

$\sigma_c$  – srednje naprezanje u betonu na promatranom dijelu presjeka

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh}$$

$N_{Ed}$  – uzdužna sila kod graničnog stanja uporabljivosti (pozitivna ako je tlačna) uslijed opterećenja i prednapinjanja  $N_{Ed} = 0$  kN

$$\sigma_c = \frac{0}{200(750 - 100)} = 0 \text{ MPa}$$

$k_1$  – koeficijent koji uzima u obzir efekte, izazvane uzdužnom silom, na raspodjelu naprezanja

$$k_1 = 1,5 - \text{ako je } N_{Ed} \text{ tlačna sila}$$

$$h^* = h \text{ za } h < 1,0 \text{ m}$$

$$h^* = 1 \text{ m za } h \geq 1,0 \text{ m}$$

$$h = 750 - 100 = 650 \text{ mm} < 1000 \text{ mm} \rightarrow h^* = 0,65 \text{ m}$$

$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2$  MPa – vlačna čvrstoća u trenutku nastanka prve pukotine

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * \left(\frac{h}{h^*}\right) f_{ct,eff}} \right) \leq 1$$

$$k_c = 0,4 * \left( 1 - \frac{0}{1,5 * \left( \frac{750}{650} \right)^{3,2}} \right) \leq 1$$

$$k_c = 0,4 < 1 \rightarrow \text{mjerodavno } 0,4$$

$k$  – koeficijent koji omogućava efekt neujednačenih samouravnotežujućih naprezanja koja vode do smanjenja zadržavajućih sila

$$k = 0,65 - \text{za rebra visine } h \geq 800 \text{ mm}$$

$$k = 1 - \text{za rebra visine } h \leq 300 \text{ mm}$$

### **Inerpolacija**

$$h = 750 \text{ mm}, k = 0,685$$

$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 3,2 \text{ MPa}$  – srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona u trenutku kad se očekuje pojava prve pukotine

$A_{ct} = b_w * z_d = 20 * 41,3 = 826 \text{ cm}^2$  – vlačna površina presjeka neposredno prije pojave prvih pukotina

$$A_{s,min} = k_c k f_{ct,eff} A_{ct} / \sigma_{s1} = 3,25 \text{ cm}^2$$

U vlačnoj zoni je postavljena armatura:

$A_{s1} = 6\emptyset 16 (12,06 \text{ cm}^2) \rightarrow$  odabrana armatura za GSN zadovoljava minimalnu armaturu za ograničenje širine pukotina.

Tablični postupak ograničen promjer i razmak šipki

### NAJVEĆI PROMJER ŠIPKI ZA OGRANIČENJE PUKOTINA

$$\sigma_s = 222,9 \text{ MPa} \rightarrow \emptyset 26$$

$$\emptyset 16 < \emptyset 26$$

Naprezanje u čeliku [MPa]	Najveći promjer šipke [mm]		
	$w_k=0,4 \text{ mm}$	$w_k=0,3 \text{ mm}$	$w_k=0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Slika 22: Određivanje najvećeg naprezanja s obzirom na ograničenje pukotina i promjer šipki [1]

Granična vrijednost širine pukotina

Razred izloženosti: XC1

Nazovistalna kombinacija

$$w_{max} = 0,4 \text{ mm}$$

Najveći razmak šipki:

$$\sigma_s = 222,9 \text{ MPa} \rightarrow 270 \text{ mm}$$

Naprezanje u čeliku [MPa]	Najveći razmak šipki [mm]		
	$w_k=0,4 \text{ mm}$	$w_k=0,3 \text{ mm}$	$w_k=0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	▶ 150
240	250	200	˘ 100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Slika 23: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki AB nosača [1]



6 šipki u dva reda se postavlja u rebro debljine 20 cm, zadovoljava razmak šipki.

Zadovoljava širina pukotine.

### **Proračun širine pukotina**

-Proračun širine pukotina može se izbjeći, pojednostavljeni postupak:

- ograničiti promjer šipki (prema tablici)
- ograničiti razmake šipki (prema tablici)

Ukoliko oba uvjeta budu zadovoljena nije potrebno provoditi proračun pukotina.

No, u ovom slučaju iako su oba uvjeta zadovoljena proračun će se provesti.

$$w_k < w_{max}$$

$$w_k < 0,4 \text{ mm}$$

Prijanjajuća armatura nalazi se na razmaku manjem od  $5(c + \phi/2) = 5(3,3 + 1,6/2) = 20,5$  cm vrijedi izraz:

$$s_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{p,eff}} = 3,4 * 3,3 + \frac{0,8 * 0,5 * 0,425 * 1,6}{0,061} = 15,68 \text{ cm}$$

$s_{r,max}$  – najveći razmak pukotina

$k_1$  – koeficijent ovisan o vrsti armature ( rebrasta armatura = 0,8)

$k_2$  – koeficijent raspodjele deformacija (0,5 – savijanje, 1 – vlak)

$$k_3 = 3,4$$

$$k_4 = 0,425$$

$c = 2,5 + 0,8 = 3,3$  cm -zaštitni sloj uzdužne armature

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{233,49 - 0,4 \frac{3,2}{0,061} (1 + 5,88 * 0,061)}{200000} \geq 0,6 \frac{233,49}{200000}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 1,024 * 10^{-3} \geq 7,005 * 10^{-4}$$

$\varepsilon_{sm}$  – srednja deformacija armature za mjerodavnu kombinaciju opterećenja

$\varepsilon_{cm}$  – srednja deformacija betona između pukotina

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{12,06}{200} = 0,061$$

$\rho_{p,eff}$

– djelotvorna površina betona u vlaknu koja okružuje armature na visini  $h_{c,eff}$

$$A_{c,eff} = b_w * h_{c,eff} = 20 * 10 = 200 \text{ cm}^2$$

$$h_{c,eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5 * (h - d) \\ \frac{h-x}{3} \\ \frac{h}{2} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 10 \\ 20,27 \\ 37,5 \end{array} \right.$$

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 15,68 * 1,024 * 10^{-3} = 0,16 \text{ mm}$$

$$w_k < w_{max}$$

0,16 mm < 0,4 mm → širina pukotina zadovoljava!

#### 4.4.3. Granično stanje deformacija

Deformaciju konstrukcije, tj. elementa potrebno je ograničiti kako ne bi ugrozila njihovu funkciju ili vanjski izgled.

Prema EC2 upotrebljivost konstrukcije, neće biti ugrožena ukoliko proračunski progib grede, ploče ili konzole za nazovistalnu kombinaciju opterećenja ne prelazi vrijednost  $RASPON/250$ .

Granično stanje deformiranja može se kontrolirati:

- ograničenjem vitkosti elementa  $l/d$
- proračunom progiba elementa te usporedbom s graničnom vrijednošću

#### Ograničenje vitkosti elementa

$$\frac{l}{d} = \frac{1000}{71} = 14,08 \text{ cm}$$

$$\frac{l}{d} < \text{granične vitkosti}$$

$$\rho = \frac{A_{s1,req}}{b*d} = \frac{11,12}{20*71} = 7,83 * 10^{-3} = 0,78\%$$

$\rho$  – koeficijent armiranja potrebnom vlačnom armaturom u polovici raspona

$$\frac{l}{d} = 20$$

→ vrijednost dobivena prema tabličnom primjeru omjera raspona i proračunske

visine, vrijednosti u tablici prikazane su za naprezanje od 310 MPa stoga je potrebno

korigirati tablične vrijednosti korekcijskim faktorom

$$\frac{310}{\sigma_s} = \frac{310}{222,9} = 1,39$$

$$\frac{500}{f_{yk}} * \frac{A_{s,prov}}{A_{s1,req}} = \frac{500}{500} * \frac{12,06}{11,12} = 1,08 \rightarrow \text{mjerodavno}$$

Vrijednosti tablice potrebno je korigirati jer greda ima raspon veći od 7m.

Progib prema korigiranim vrijednostima:

$$20 \cdot 1,08 \cdot 0,7 = 15,12 \text{ cm}$$

$7/l_{\text{eff}} = 7/10 = 0,7 \rightarrow$  vrijednosti  $l/d$  potrebno je pomnožiti s faktorom korekcije jer duljina grede prelazi 7 m.

$$\frac{l}{d} < \text{granične vitkosti}$$

$$14,08 \text{ cm} < 15,12 \text{ cm}$$

Progib zadovoljava prema tabličnoj provjeri. Stoga nije potrebno provoditi proračun progiba, ali u ovom slučaju će se provesti.

Konstruktivni sustav	K	Jako napregnut beton $\rho = 1,5 \%$	Slabo napregnut beton $\rho = 0,5 \%$
Slobodno oslonjena greda, slobodno oslonjene ploče nosive u jednom ili dva smjera	1,0	14	20
Krajnji raspon kontinuirane grede ili kontinuirane ploče nosive u jednom smjeru ili ploče nosive u dvama smjerovima ako je kontinuitet preko jedne duljine stranice	1,3	18	26
Unutarnji raspon grede ili ploče nosive u jednom smjeru ili u dvama smjerovima	1,5	20	30
Ploče oslonjene na stupove bez greda (ploče bez greda) (na temelju duljeg raspona)	1,2	17	24
Konzole	0,4	6	8
Napomena 1: Dane vrijednosti odabrane su konzervativno a proračun često može pokazati da su mogući i tanji elementi. Napomena 2: Za ploče nosive u dva smjera kontrolu treba provesti za kraći raspon. Kod ploča bez greda treba uzeti dulji raspon. Napomena 3: Granične vrijednosti dane za ploče bez greda odnose se na manje strogo ograničenje nego što je progib u sredini raspona veličine raspon/250 vezan za razmak stupova. Iskustvo je pokazalo da je to zadovoljavajuće.			

Slika 24: Tablica omjera raspona i proračunske visine

### Koeficijent puzanja $\rho(t, t_0)$

$h_0$  – srednji polumjer elementa

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

$A_c$  – površina poprečnog presjeka

$u$  – omočeni obod, opseg onog dijela presjeka koji je izložen sušenju (koji je u kontaktu s atmosferom)



Slika 25: Omočeni obod nosača

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 1700}{230} = 14,78 \text{ cm} = 147,8 \text{ mm}$$

$$u = b_{eff} \cdot 2 + 2 \cdot 75 = 230 \text{ cm}$$

relativna vlažnost okoliša: 50%

klasa cementa: N

starost betona u danima u trenutku 1 opterećenja elementa  $t_0 = 28 \text{ dana}$

$\rho(\infty, 28) = 2,185 \rightarrow$  vrijednost dobivena Mathcadom i tabličnim postupkom.

## Koeficijent skupljanja

Ukupna deformacija skupljanja  $\epsilon_{cs}$

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

$\epsilon_{cd}$  – deformacija uslijed sušenja

$\epsilon_{ca}$  – autogena deformacija

$$\epsilon_{cd,\infty} = k_h * \epsilon_{cd,0}$$

$\epsilon_{cd,0} = \frac{0,46+0,38}{2} = 0,42 \text{ ‰}$  – prema tablici *Nazivne vrijednosti slobodnog skupljanja pri sušenju*

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relative Humidity (in ‰)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

Slika 26: Nazivne vrijednosti slobodnog skupljanja pri sušenju [3]

$k_h$  - koeficijent koji zavisi o srednjem polumjeru elementa  $h_0$

$$k_h = 0,93$$

Values for  $k_h$

$h_0$	$k_h$
100	1.0
200	0.85
300	0.75
$\geq 500$	0.70

Slika 27: Koeficijent ovisan o srednjem polumjeru elementa [3]

$$\epsilon_{cd,\infty} = k_h * \epsilon_{cd,0} = 0,93 * 0,42 = 0,39 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{ca} = \beta_{as}(t) * \epsilon_{ca}(\infty) =$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10)10^{-6} = 2,5*(35-10) 10^{-6} = 6,25 * 10^{-5}$$

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

$$\varepsilon_{cs} = 0,39 + 0,0625 = 0,4525 \text{ ‰}$$

Puzanje se uzima u obzir preko efektivnog modula elastičnosti betona

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1+\rho(\infty,28)} = \frac{34000}{1+2,185} = 10675,04 \text{ MPa}$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{200000}{10675,04} = 18,74$$

Položaj neutralne osi za stanje naprezanja II dobiva se iz uvjeta da je statički moment idealne površine s obzirom na N.O. jednak nuli.

PRETPOSTAVKA: N.O. prolazi kroz ploču

$$b_{eff} * \frac{x^2}{2} + (\alpha_e - 1) * A_{s2} * (x-d_2) - \alpha_e * A_{s1} * (d-x) = 0$$

$$40 * \frac{x^2}{2} + (18,74 - 1) * 0 * (x-4) - 18,74 * 12,06 (71-x) = 0$$

$$20 * x^2 + 226x - 16046,31 = 0$$

$$x = 23,23 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$$

N.O. ne prolazi kroz ploču.

$$z = d - \frac{x}{3} = 71 - \frac{23,23}{3} = 63,26 \text{ cm}$$

Naprezanje u vlačnoj armaturi za naponsko naprezanje II (raspucali presjek) – uključujući i puzanje

$$\sigma_s = \frac{M_{Ed}}{A_{s1} * z} = \frac{17813}{12,06 * 63,26} = 23,348 \frac{kN}{cm^2} = 233,49 \text{ MPa}$$

Potrebno je promotriti dvije krajnje mogućnosti:

1. neraspucalo stanje, gdje armatura i beton zajedno sudjeluju u nošenju (elastično ponašanje)
2. potpuno raspucalo stanje (doprinos betona nosivosti na vlak se zanemaruje)

Elementi koji nisu napregnuti iznad dopuštene vlačne čvrstoće betona bilo gdje u elementu smatraju se neraspucalim.

Elementi kod kojih se očekuju pukotine ponašaju se kao da se nalaze između neraspucalog i potpuno raspucalog stanja.

Općenita vrijednost deformiranja (što može biti deformacija, progib, zakrivljenost, pomak ili uvijanje) može se dobiti primjenom izraza:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I$$

$\alpha$  – jedna od vrijednosti deformiranja

$\alpha_I, \alpha_{II}$  – odgovarajuće vrijednosti deformiranja za neraspucali i

potpuno raspucali element

$\zeta$  – faktor raspodjele

$$\zeta = 1 - \beta \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

$\zeta = 0$  – neraspucali element

$\beta$  – koeficijent kojim se uzima u obzir trajanje opterećenja

$\beta = 0,5$  – dugotrajno opterećenje ili promijenljivo s čestim djelovanjem

$\beta = 1,0$  – kratkotrajno opterećenje

$\sigma_s$  – naprezanje u vlačnoj armaturi proračunatoj na temelju raspucalog presjeka

$\sigma_{sr}$  – naprezanje u vlačnoj armaturi na mjestu pojave prve pukotine

$\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}$  može se zamijeniti s  $\frac{M_{cr}}{M}$  za savijanje ili  $\frac{N_{cr}}{N}$  za čisti vlak



Udaljenost težišta idealnog presjeka (u obzir uzimamo armaturu) s obzirom na gornji rub

$$x_0 = \frac{20 * 75 * \frac{75}{2} + (40 - 20) * 10 * \frac{10}{2} + (18,74 - 1)12,06 * 71}{20 * 75 + (40 - 20) * 10 + (18,74 - 1)12,06} = 37,85 \text{ cm}$$

N.O. ne prolazi kroz ploču.

Idealni moment tromosti  $I_{id}$

$$I_{id} = \frac{20 * (75 - 37,85)^3}{3} + \frac{20 * 37,85^3}{3} + \frac{(40 - 20) * 10^3}{12} + 10 * (40 - 20) \left(37,85 - \frac{10}{2}\right)^2 + (18,74 - 1) * [12,06 * (71 - 37,85)^2] =$$

$$I_{id} = 1155908,24 \text{ cm}^4$$

### Proračun srednje zakrivljenosti izazvane opterećenjem

$$\frac{1}{r_m} = \zeta \frac{1}{r_{II}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_I}$$

$\frac{1}{r_I}$  – zakrivljenost za naponsko stanje I

$$\frac{1}{r_I} = \frac{M_{Ed}}{E_{c,eff} I_{id}}$$

$$\frac{1}{r_I} = \frac{17813}{1067,504 * 1155908,24} = 1,44 * 10^{-5} \frac{1}{\text{cm}}$$

$\frac{1}{r_{II}}$  – zakrivljenost za naponsko stanje II

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\sigma_s}{E_s(d - x)}$$

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{23,35}{20000 (71 - 23,23)} = 2,44 * 10^{-5} \frac{1}{\text{cm}}$$

$M_{cr}$  – moment savijanja pri pojavi prve pukotine

$$M_{cr} = f_{ct,m} * \frac{I}{z_D}$$

$$I = \frac{20 * 65^3}{3} + \frac{40 * 10^3}{3} = 1844166,67 \text{ cm}^4$$

$$z_D = h - x_T = 75 - 33,7 = 41,3 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = 0,32 * \frac{1844166,67}{41,3} = 14288,94 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_{sr} = \frac{M_{cr}}{A_s * z} = \frac{14288,94}{12,06 * 63,26} = 18,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$\zeta = \zeta = 1 - 0,5 \left( \frac{18,73}{23,35} \right)^2 = 0,68$$

$$\frac{1}{r_m} = 0,68 * 2,44 * 10^{-5} + (1 - 0,68) * 5,04 * 10^{-6} = 2,12 * 10^{-5} \frac{1}{\text{cm}}$$

### **Proračun srednje zakrivljenosti od skupljanja (1/ r<sub>cs,m</sub>)**

$$\frac{1}{r_{cs,m}} = \zeta \frac{1}{r_{cs,II}} + (1 - \zeta) \frac{1}{r_{cs,I}}$$

$$\frac{1}{r_{cs,I}} - \text{zakrivljenost zbog skupljanja za naponsko stanje I}$$

$$\frac{1}{r_{cs,I}} = \varepsilon_{cs,\infty} * \alpha_e * \frac{S_I}{I_I}$$

$$\frac{1}{r_{cs,II}} - \text{zakrivljenost zbog skupljanja za naponsko stanje II}$$

$$\frac{1}{r_{cs,II}} = \varepsilon_{cs,\infty} * \alpha_e * \frac{S_{II}}{I_{II}}$$

$I_I$  i  $I_{II}$  – idealni moment tromosti za naponsko stanje I odnosno naponsko stanje II

$$I_I = I_{id} = 1155908,24 \text{ cm}^4$$

$$I_{II} = \frac{40 * 23,23^3}{3} + 18,74 * 12,06 * (71 - 23,23)^2 = 682878,21 \text{ cm}^4$$

$$S_I = 12,06 * (71 - 37,85) = 399,79 \text{ cm}^2$$

$$S_{II} = 12,06 * (71 - 23,23) = 576,11 \text{ cm}^2$$

$$\frac{1}{r_{cs,I}} = 0,4525 * 10^{-3} * 18,74 * \frac{399,79}{1155908,24} = 2,93 * 10^{-6} \frac{1}{\text{cm}}$$

$$\frac{1}{r_{cs,II}} = 0,4525 * 10^{-3} * 18,74 * \frac{576,11}{682878,21} = 7,15 * 10^{-6} \frac{1}{\text{cm}}$$

$$\frac{1}{r_{cs,m}} = 0,68 * 7,15 * 10^{-6} + (1 - 0,68) * 2,93 * 10^{-6} = 5,79 * 10^{-6} \frac{1}{\text{cm}}$$

Ukupna zakrivljenost od opterećenja i skupljanja betona ( $1/r_{tot}$ )

$$\frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{r_{cs,m}} = 2,12 * 10^{-5} + 5,79 * 10^{-6} = 2,69 * 10^{-5} \frac{1}{\text{cm}}$$

Progib se izračuna iz poznate funkcije zakrivljenosti i uz zadovoljenje rubnih uvjeta za pronalaženje integracijskih konstanti iz izraza:

$$f_{tot} = \iint \frac{1}{r_{tot,x}} dx + c_1 x + c_2$$

Za elemente konstantne visine koristi se pojednostavljena metoda određivanja progiba:

Odredi se zakrivljenost na mjestu maks. momenta te progib po izrazu:

$$f_{tot} = k * l^2 * \frac{1}{r_{tot}}$$

k-koeficijent ovisan o statičkom sustavu i opterećenju

$$f_{tot} = \frac{5}{48} * 1000^2 * 2,69 * 10^{-5} = 2,81 \text{ cm}$$

$$f_{tot} < \frac{l}{250}$$

$$2,81 < \frac{1000}{250} = 4 \text{ cm}$$

Proračun progiba zadovoljava!

**Provjera:**

$$\sigma_{sr} = \alpha_e * \frac{M_{Ed}(d-x)}{I_{IIId}} = 18,74 * \frac{17813(71-23,23)}{682878,21} = 23,35 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{M_{Ed}}{E_{c,eff}I_{IIId}} = \frac{17813}{1067,504*682878,21} = 2,44 * 10^{-5} \frac{1}{\text{cm}}$$

## 5. USPOREDBA PREDNAPETOG I ARMIRANOBETONSKOG NOSAČA

Na temelju dobivenih rezultata iz proračuna, moguće je usporediti opravdanost korištenja prednapetog i običnog čelika prilikom projektiranja i izvođenja konstrukcija.

### Granično stanje nosivosti

Prilikom proračuna prednapetog T nosača visine 75 cm, širine pojasnice 40 cm te širine hrpta 20 cm. Statički sustav nosača je prosta greda duljine 10 metara. Beton koji je predviđen proračunom je C35/45, čelik za armiranje B500A te čelik za prednapinjanje 1500/1770. Za zadano opterećenje proračunom je dobiveno kako je potrebno postaviti jedan kabel promjera 6,5 cm koji sadrži 2 užeta od 1,5 cm<sup>2</sup>. Uz prednapeti čelik potrebno je ugraditi i običan čelik. Stoga, u donju zonu grede postaviti će se  $A_{s1}$  3 $\phi$ 12 (3,39 cm<sup>2</sup>) i tlačnu armaturu  $A_{s2}$  4 $\phi$ 10 (3,14 cm<sup>2</sup>). Uz potrebnu prednapetu, vlačnu i tlačnu armaturu postaviti će se i vilice  $\phi$ 8/30 cm.

Dok, za isto opterećenje proračun nosača bez prednapete armature. Odnosno, armiranobetonski nosač potrebno je armirati u donjoj (vlačnoj) zoni s 6 $\phi$ 16 (12,06 cm<sup>2</sup>). Uz armaturu u donjoj zoni, osigurati će se montažna armatura  $\phi$ 8, koju je potrebno raspodijeliti po visini kako bi se izbjeglo izvijanje nosača. Uz montažnu armaturu koja se postavlja po visini, osigurati će se šipke u gornjoj zoni nosača 4 $\phi$ 12 (4,52cm<sup>2</sup>) za lakše postavljanje spona (poprečne armature) koja će se postavljati na svakih 30 cm, po cijeloj duljini nosača.

*Tablica 11: Usporedba količine armature AB i PB nosača*

PARAMETAR	VRIJEDNOSTI	
	PB NOSAČ	AB NOSAČ
$A_p$	3 cm <sup>2</sup>	-
$A_{s1}$	3 $\phi$ 12	6 $\phi$ 16
$A_{s2}$	4 $\phi$ 10	4 $\phi$ 12
Poprečna armatura	dvorezne vilice $\phi$ 8/30	dvorezne vilice $\phi$ 8/30

### Granično stanje uporabljivosti

Provedene provjere graničnog stanja uporabljivosti zadovoljene su u oba slučaja. U tablici 12. vidljivo je kako je progib za isto opterećenje kod prednapetog nosača znatno manji u odnosu na armiranobetonski nosač. Nakon provedenog proračuna graničnog stanja uporabljivosti progib PB nosača za zadano opterećenje iznosi 0,14 cm što iznosi 3,5% graničnog progiba. Dok će AB nosač isto opterećenje svladati s progibom od 2,81 cm što je 70% graničnog progiba.

*Tablica 12: Usporedba graničnog stanja deformacija AB i PB nosača*

PARAMETAR	VRIJEDNOSTI	
	PB NOSAČ	AB NOSAČ
$\delta$	0,14 cm	2,81 cm

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenog proračuna i usporedbe prednapetog i armiranobetonskog nosača. Korištenje prednapetog čelika, potrebno je posebno opravdati jer je tehnologija izvođenja vrlo skupa. Prije svega, prednapinjanjem želimo eliminirati ili barem smanjiti vlačna naprezanja u svim presjecima nosača pomoću umjetno izazvanih sila. Vlačna naprezanja koja se pojavljuju u nosačima uzrokuju pojavu prvih pukotina. Iz tog razloga potrebno je postaviti armaturu kako bi nadoknadili vlačnu čvrstoću betona koja je vrlo mala (1/10 tlačne čvrstoće). Prednapinjanjem moguće je uštediti na količini betona i čelika za armiranje. Osim uštede u materijalu umjetno izazvanim silama u nosaču postiže se superiornija nosivost nosača. Iz tog razloga prednapinjenje je opravdano koristiti prilikom svladavanja velikih raspona. Kako je ranije navedeno, prednapinjanje mora biti ekonomski i tehnološki prihvatljivo. Korištenjem prednapetih kabela u nosačima moguće je smanjiti poprečan presjek nosača, kako smo u ovom primjeru uspoređivali nosače istih poprečnih presjeka od AB i PB, jedan od glavnih pokazatelja opravdanosti korištenja određene vrste nosača je veličina progiba za zadano opterećenje te količina armature nosača određena proračunom.

Prilikom usporedbe ova dva nosača, progib oba nosača je manji od graničnog. Iako je progib armiranobetonskog nosača 20 puta veći od progiba prednapete grede. U ovom slučaju opravdano je usporediti i količinu armature oba nosača. Količina armature koju je potrebno osigurati kod PB nosača iznosi nekih 40% ukupne armature nosača od armiranog betona. Iako je razlika u postotku armiranja znatna, kako bi se zadovoljila nosivost PB nosača potrebno je osigurati i neznatnu količinu prednapete armature koja znatno utječe na ponašanje nosača.

Na ovako kratkim nosačima nije ekonomski prihvatljivo izvoditi prednapinjanje, jer ne dolazi do znatne eliminacije progiba. Tj. armiranobetonska greda će moći preuzeti isto opterećenje kao i prednapeta uz znatnu uštedu u izvođenju. Tek kada bi smo smanjili poprečan presjek prednapetog nosača, dobili bi smo uštedu u materijalu. Te bi tada korištenje prednapetog betona bilo opravdano. Stoga je vrlo bitno prilikom projektiranja opravdati korištenje prednapetog betona.

## 7. LITERATURA

- [ 1 ] Smolčić, Ž., Prednapete betonske konstrukcije, interna predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2020.
- [ 2 ] Meštrović, D., Prednapeti beton teorija, interna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2017.
- [ 3 ] Grandić, D., Betonske i zidane konstrukcije 1, interna predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2020.
- [ 4 ] EN 1992 – 1 – 1 Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 1 : General rules and rules for buildingis, European Committee for Standardization, Brussels 2004.
- [ 5 ] EN 1991 – 1 – 3 Eurocode 1, Actions on sctructures – Part 1 : General actions – Snow loads, European Committee for Standardization, Brussels 2004.

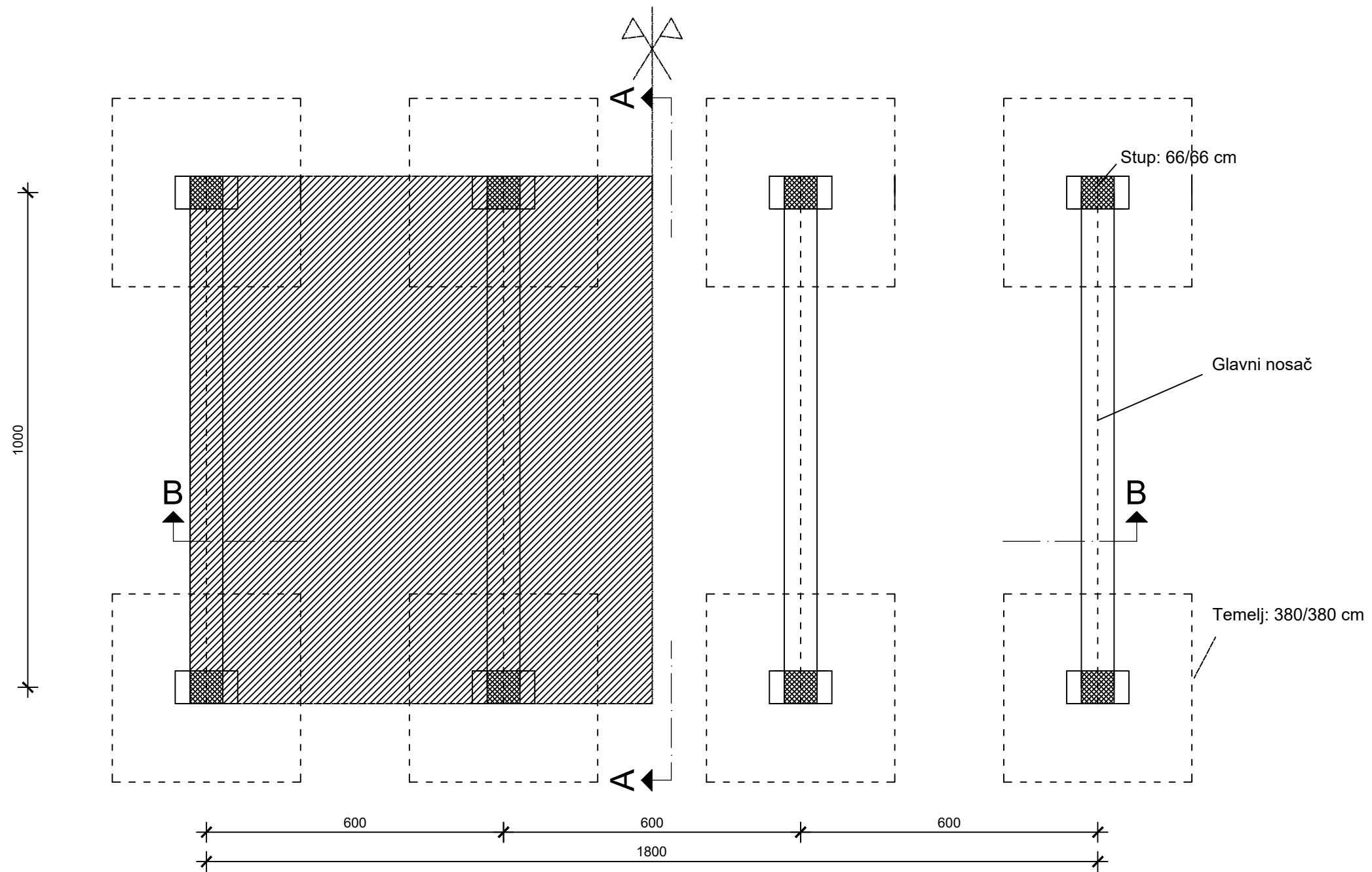


## 8. GRAFIČKI PRILOZI – NACRTI

Popis nacrtā:

- |    |   |                   |
|----|---|-------------------|
| 1. | Tlocrtna dispozicija hale                                   | MJ 1:100          |
| 2. | Presjek B-B   | MJ 1:100          |
| 3. | Presjek A-A   | MJ 1:100          |
| 4. | Plan i iskaz armature prednapetog nosača                    | MJ 1:50 / MJ 1:10 |
| 5. | Plan i iskaz armature prednapetog nosača, presjek A-A       | MJ 1:10           |
| 6. | Plan i iskaz armature armiranobetonskog nosača              | MJ 1:50 / MJ 1:10 |
| 7. | Plan i iskaz armature armiranobetonskog nosača, presjek A-A | MJ 1:10           |

# TLOCRTNA DISPOZICIJA HALE MJ 1:100



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad  
**PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG  
 NOSAČA**

Sadržaj nacrt  
**TLOCRTNA DISPOZICIJAHALE**

Student  
**Anamarija Kraljik**

Kolegij:  
**PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE**

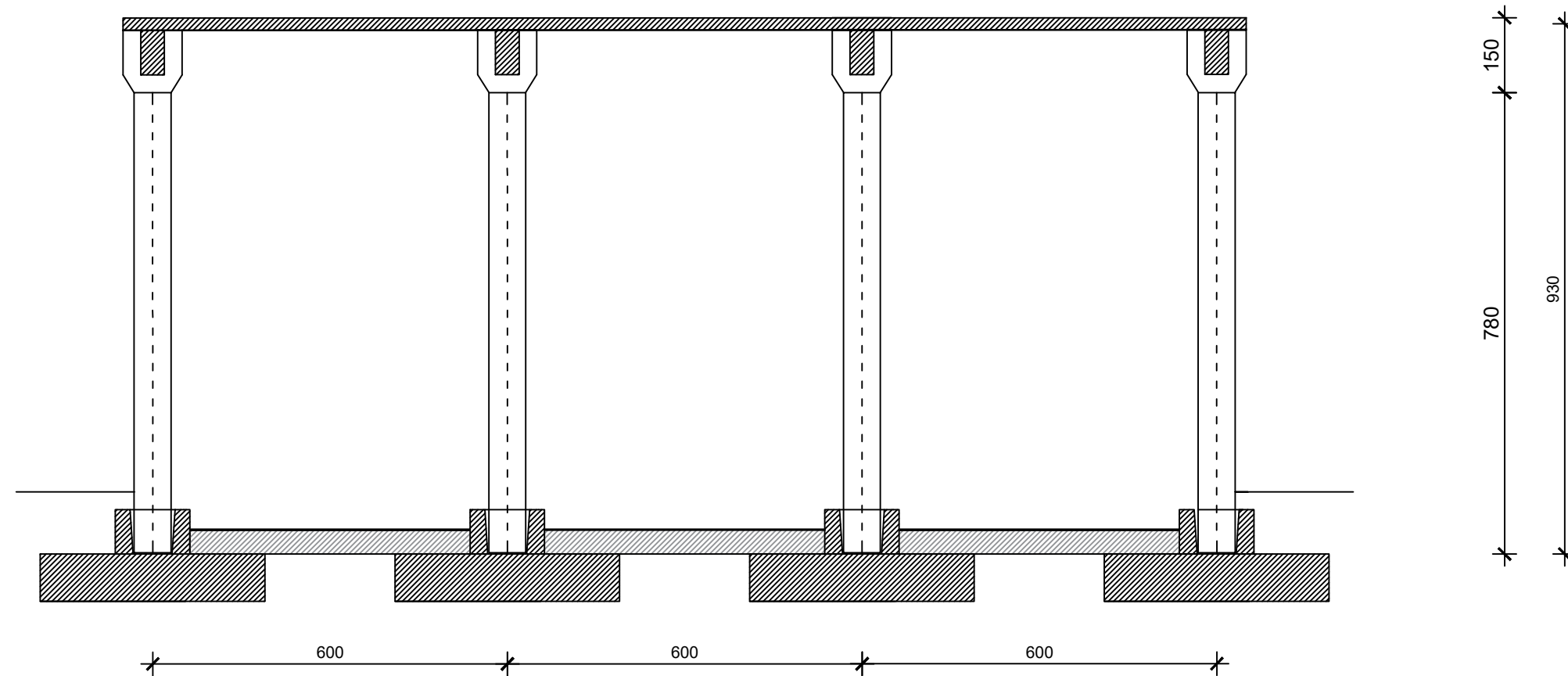
Mentor:  
 dr. sc. **Željko Smolčić**

Datum:  
 10.08.2020.

Mjerilo:  
 1:100

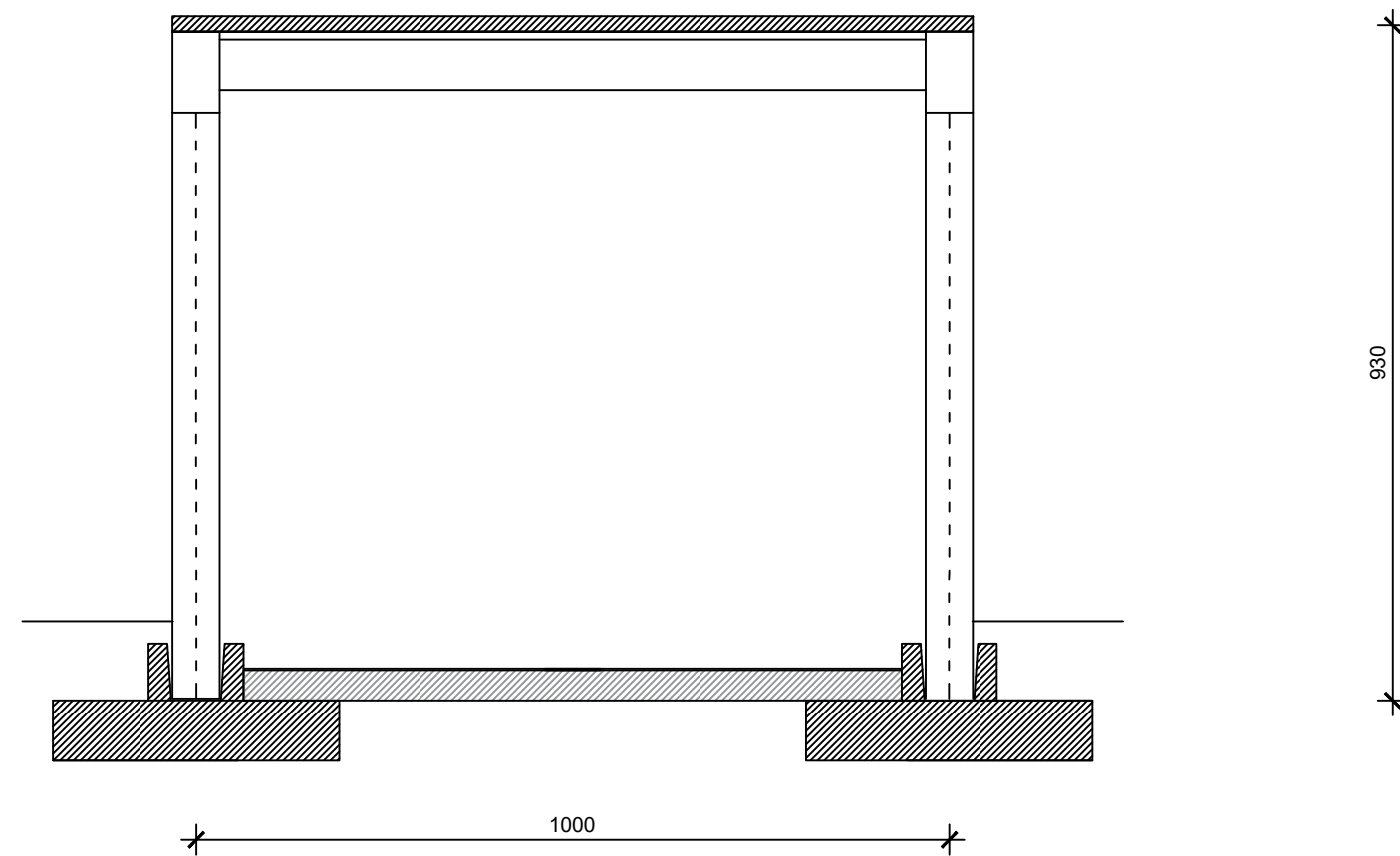
List:  
 1

# PRESJEK HALE B-B MJ 1:100



<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad <b>PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG NOSAČA</b>		Sadržaj nacrt <b>PRESJEK HALE B-B</b>	
Student <b>Anamarija Kraljik</b>		Kolegij: <b>PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE</b>	
Mentor: dr. sc. <b>Željko Smolčić</b>	Datum: 10.08.2020.	Mjerilo: 1:100	List: 2

# PRESJEK HALE A-A MJ 1:100



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad  
**PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG  
NOSAČA**

Sadržaj nacrt  
**PRESJEK HALE A-A**

Student  
**Anamarija Kraljik**

Kolegij:  
**PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE**

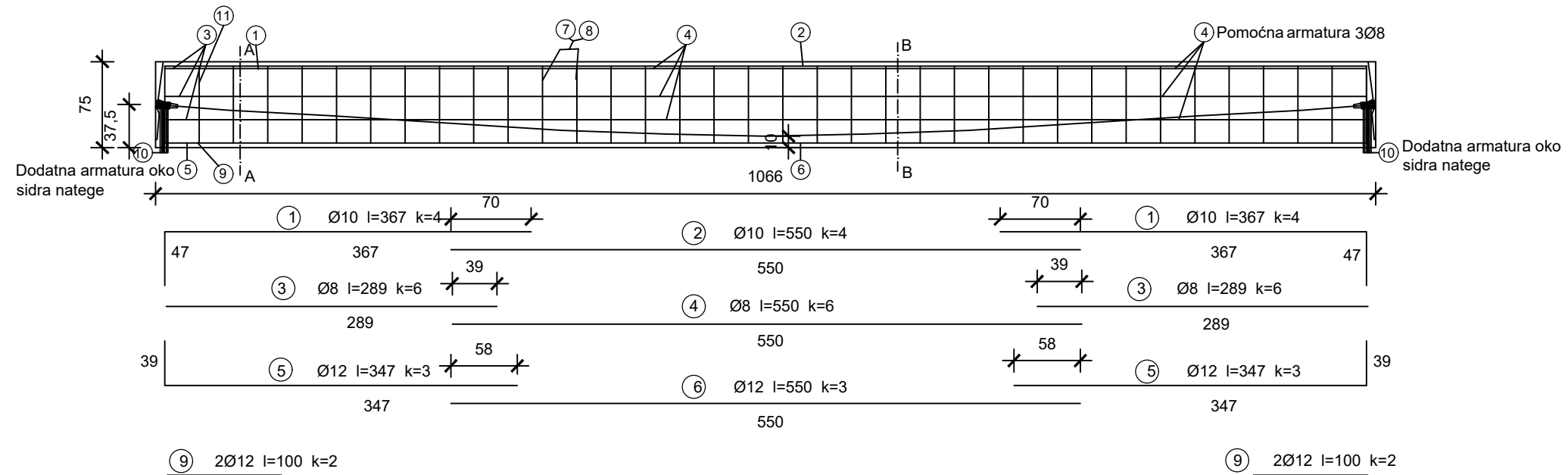
Mentor:  
dr. sc. **Željko Smolčić**

Datum:  
10.08.2020.

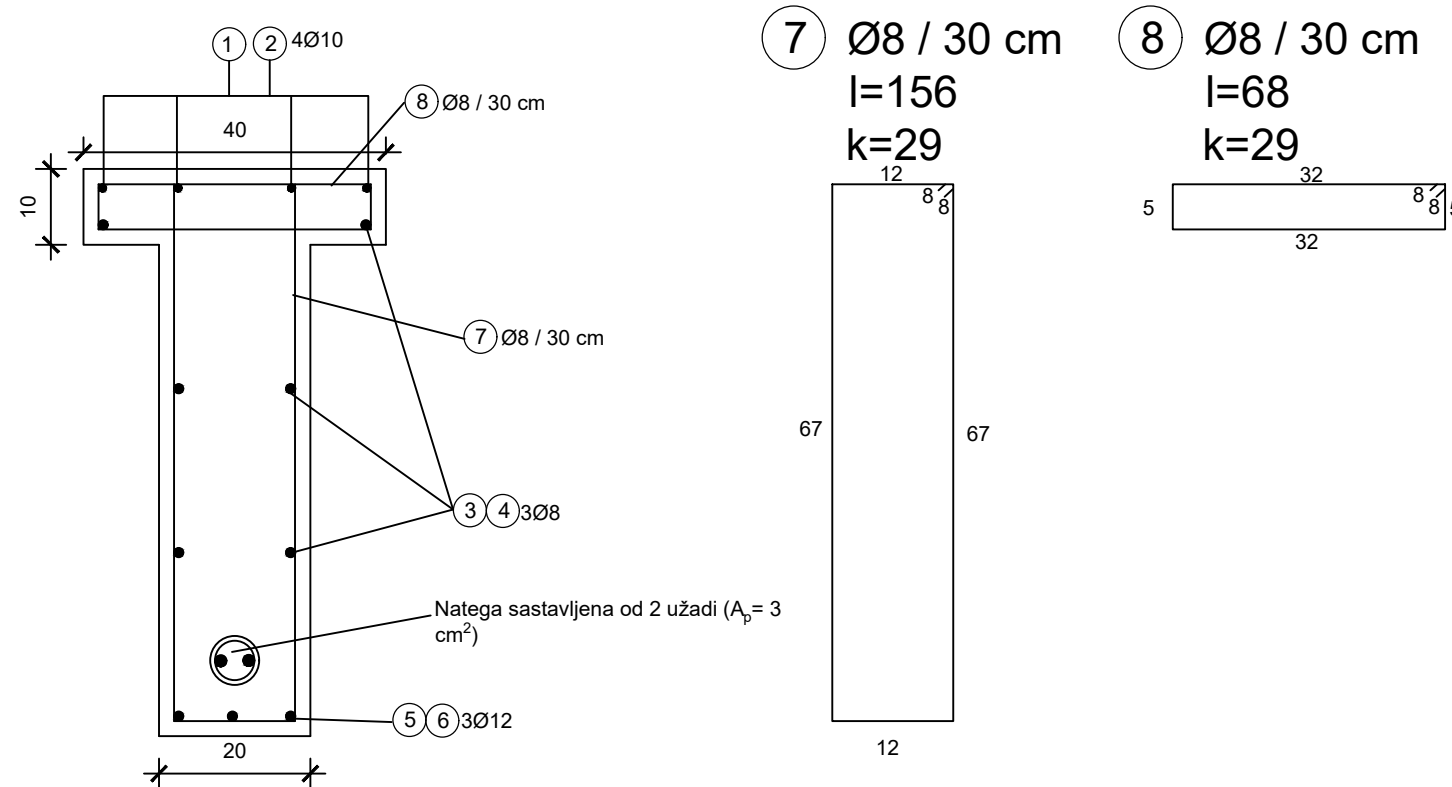
Mjerilo:  
1:100

List:  
3

# PLAN I ISKAZ ARMATURE PREDNAPETOG NOSAČA MJ 1:50

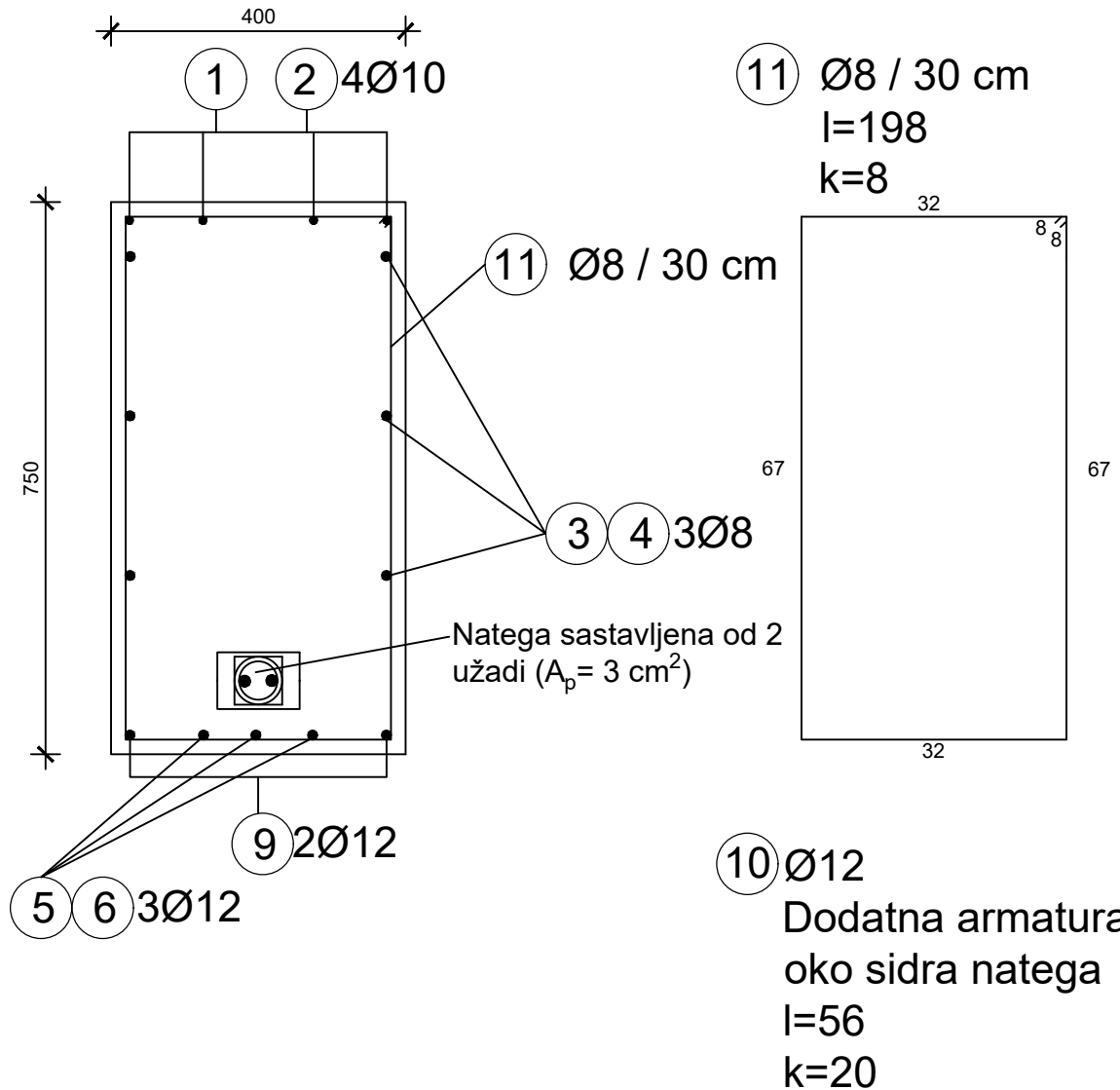


## PRESJEK B-B MJ 1:10

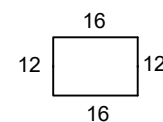


<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad <b>PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG NOSAČA</b>		Sadržaj nacrt <b>PLAN I ISKAZ OBIČNE I PREDNAPETE ARMATURE PB NOSAČA</b>	
Student <b>Anamarija Kraljik</b>		Kolegij: <b>PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE</b>	
Mentor: dr. sc. <b>Željko Smolčić</b>	Datum: 12.07.2020.	Mjerilo: 1:50	List: 4

PRESJEK A-A



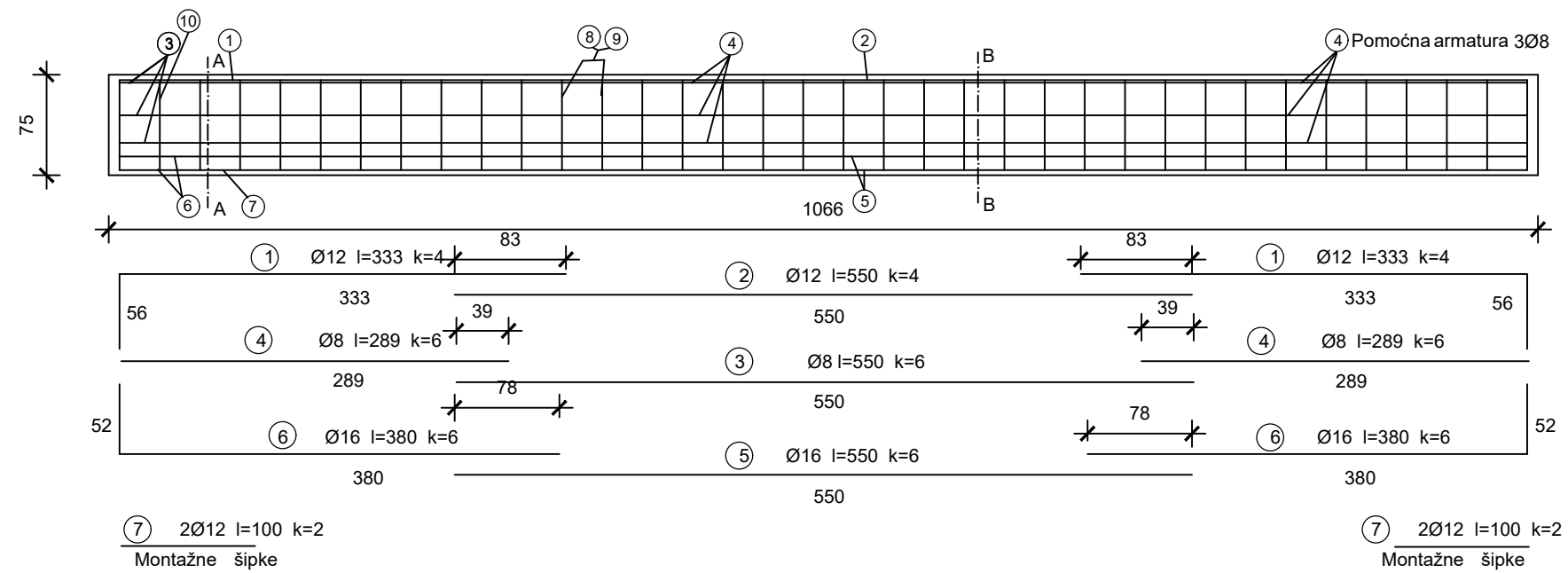
ISKAZ NENAPETE ARMATURE ZA PREDNAPETI NOSAČ						
POZ	DULJINA (m)	(mm)	KOM	UKUPNA DULJINA		
				8	10	12
1	3.87	10	8		30.96	
2	5.5	10	4		22	
3	2.89	8	12	34.68		
4	5.5	8	6	33		
5	3.47	12	6			20.82
6	5.5	12	3			16.5
7	1.56	8	29	45.24		
8	0.68	8	29	19.72		
9	1	12	4			4
10	0.56	12	20			11.2
11	1.98	8	8	15.84		
Ukupno (m)				148.48	52.96	52.52
Masa (kg/m)				0.405	0.633	0.911
Ukupno po promjerima (kg)				60.1344	33.52368	47.84572



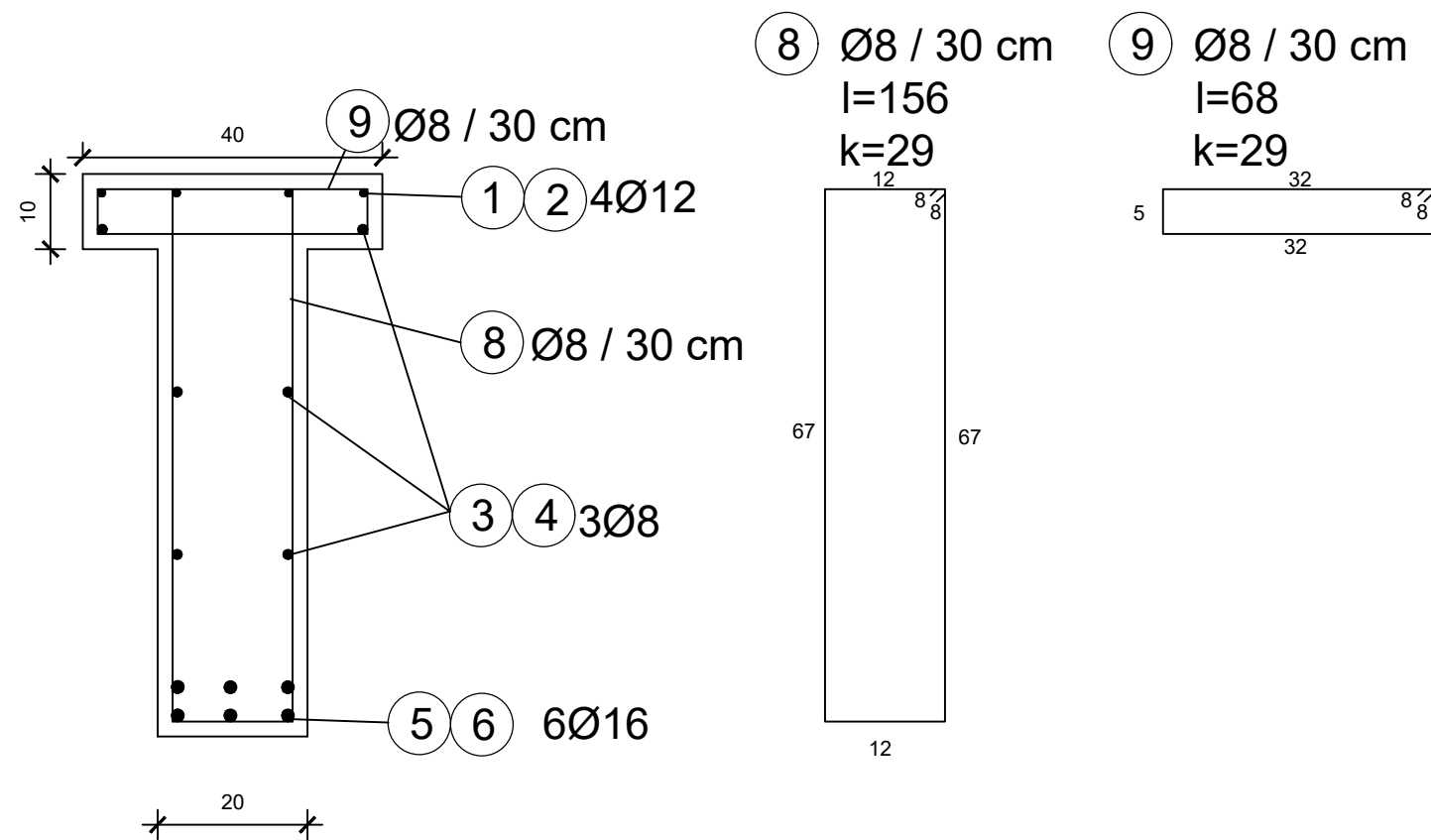
ISKAZ PREDNAPETE ARMATURE		
POZ	DULJINA (m)	KOM
1	10.53	1
Ukupno (m)		10.53
Masa (kg/m)		5.9
Sveukupno (kg)		62.127

<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG NOSAČA		Sadržaj nacrt PLAN ARMATURE PB NOSAČA PRESJEK A-A	
Student Anamarija Kraljik		Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE	
Mentor: dr. sc. Željko Smolčić	Datum: 10.08.2020.	Mjerilo: 1:10	List: 5

# PLAN I ISKAZ ARMATURE ARMIRANOBETONSKOG NOSAČA MJ 1:50

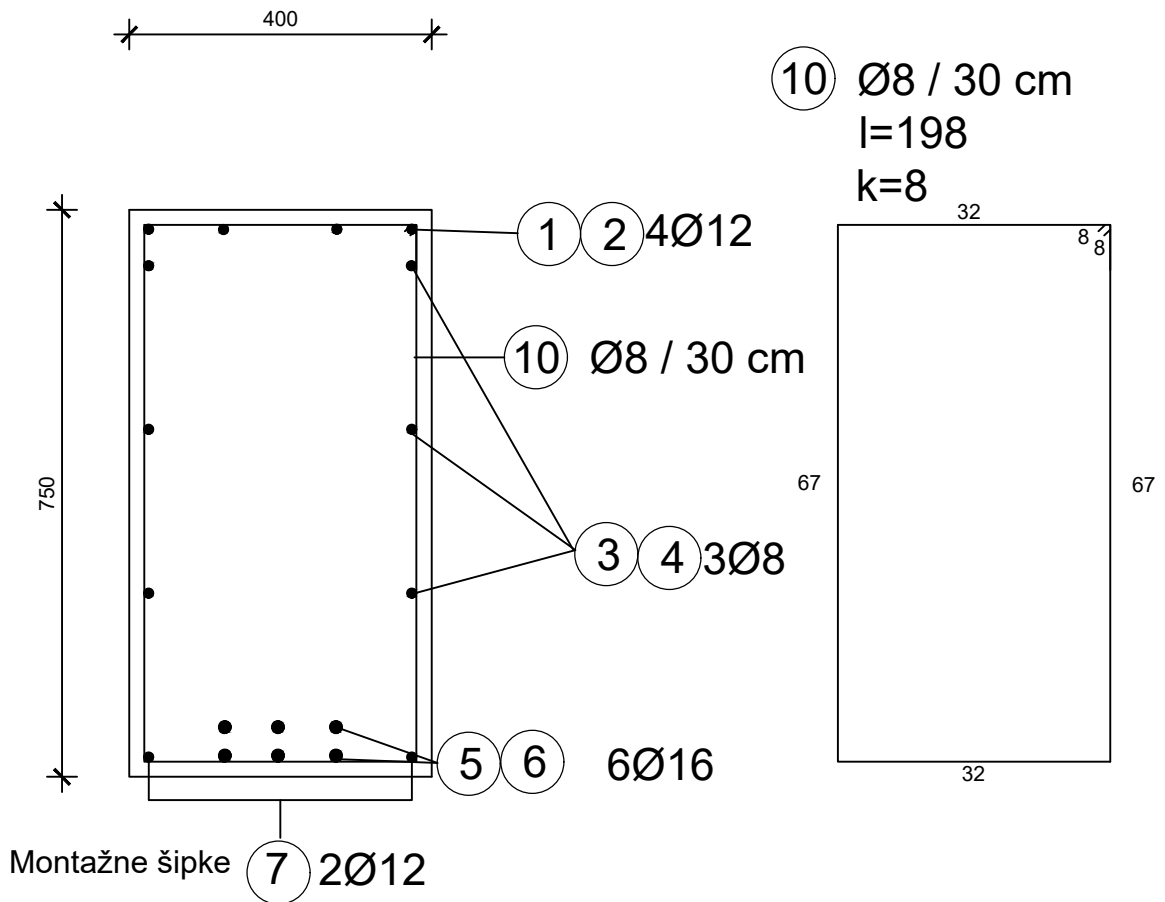


## PRESJEK B-B



<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad <b>PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG NOSAČA</b>		Sadržaj nacrt <b>PLAN I ISKAZ ARMATURE AB NOSAČA</b>	
Student: <b>Anamarija Kraljik</b>		Kolegij: <b>PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE</b>	
Mentor: dr. sc. <b>Željko Smolčić</b>	Datum: 10.08.2020.	Mjerilo: 1:50	List: 6

PRESJEK A-A



ISKAZ ARMATURE ZA ARMIRANOBETONSKI NOSAČ						
POZ	DULJINA (m)	(mm)	KOM	UKUPNA DULJINA		
				8	12	16
1	3.33	12	8	26.64		
2	5.5	12	4	22		
3	5.5	8	6		33	
4	2.69	8	12		32.28	
5	5.5	16	6			33
6	3.8	16	12			45.6
7	1	12	4		4	
8	1.56	8	29	45.24		
9	0.68	8	29	19.72		
10	1.98	8	8	15.84		
Ukupno (m)				129.44	69.28	78.6
Masa (kg/m)				0.405	0.911	1.62
Ukupno po promjerima (kg)				52.4232	63.11408	127.332

<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad PRORAČUN ARMIRANOG I PREDNAPETOG NOSAČA		Sadržaj nacrt PLAN ARMATURE AB NOSAČA PRESJEK A-A	
Student Anamarija Kraljik		Kolegij: PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE	
Mentor: dr. sc. Željko Smolčić	Datum: 10.08.2020.	Mjerilo: 1:10	List: 7