

Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka

Gambaletta, Diego

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:157:278242>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



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 U RIJECI**

Gambaletta Diego

**USPOREDBA PRORAČUNA PREDNAPETOG PRAVOKUTNOG I
T-PRESJEKA**

Diplomski rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

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

**Gambaletta Diego
JMBAG: 0114027984**

**USPOREDBA PRORAČUNA PREDNAPETOG PRAVOKUTNOG I
T-PRESJEKA**

Diplomski rad

Rijeka, srpanj 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema diplomskog rada

**USPOREDBA PRORAČUNA PREDNAPETOG PRAVOKUTNOG I T-PRESJEKA
COMPARISON OF DESIGN PRESTRESSED RECTANGULAR AND T-SECTION**

Kandidat: **DIEGO GAMBALETTA**

Kolegij: **PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad broj: **K-2020-34**

Rad treba sadržavati:

- tehnički opis
- statički proračun prednapetog T-nosača
- statički proračun prednapetog pravokutnog presjeka 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 izradio 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.

Diego Gambaletta

U Rijeci, 10. lipnja 2020.

Zahvala

Prvenstveno se zahvaljujem svojem mentoru dr.sc. Željku Smolčiću koji mi je omogućio sve potrebne materijale za izradu ovog diplomskog rada i što je svojim savjetima, strpljenjem, te učinkovitom komunikacijom uvelike olakšao proces izrade rada.

Također, zahvaljujem se svim ostalim profesorima i asistentima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na stečenom znanju iz raznih područja građevinarstva, te strpljenju i vremenu koje su imali da odgovore na moje brojne upite.

Posebnu zahvalu dugujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili uz mene i pružali mi potporu za vrijeme studija.

SAŽETAK

Prednapete betonske konstrukcije su spreg betona, čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje. Primjenjuju se kod građevina gdje se želi izbjeći pojava pukotina, povećati nosivost, smanjiti deformabilnost itd., a posebnu ulogu imaju kod građevina velikog raspona. Osnovna ideja prednapinjanja proizlazi iz toga da se, prije vanjskog opterećenja, umjetnim načinom beton dovede u takvo stanje naprezanja gdje će u preuzimanju napona od uporabnog opterećenja sudjelovati cijeli betonski presjek. U ovom radu je proveden postupak dimenzioniranja i proračuna prednapetog krovnog nosača „T“ presjeka i pravokutnog presjeka i, na poslijetku, usporedba dobivenih rezultata. Dokazuje se opravdanost upotrebe nosača „T“ presjeka, te iznose preporuke za daljnja istraživanja. Cijeli proračun je proveden prema normi za proračun prednapetih elemenata EN 1992.

Ključne riječi: prednapeti beton, „T“ presjek, pravokutni presjek, usporedba

ABSTRACT

Prestressed concrete is compound of concrete, reinforcing steel and prestressing steel. It applies to buildings where it is necessary to avoid cracking, increase the bearing capacity, reduce deformability etc., and it's mostly applied to large-scale building. The basic idea of prestressing is using artificial way to bring concrete to such a state of stress where the whole concrete section will take part in the take-over of the load, after an external load has been applied. This paper compares the use of „T“ and rectangular prestressed roof beam of a production hall. In the end, it is proven that the use of „T“ beam is justifiable and recommendations for further research are given. Entire analysis was performed in accordance with the standard for calculating prestressed elements EN 1992.

Key words: prestressed concrete, „T“ beam, rectangular beam, comparison

Sadržaj

1	UVOD.....	1
2	TEHNIČKI OPIS.....	3
2.1	Svojstva materijala.....	5
3	PRORAČUN PREDNAPETOG NOSAČA – T-PRESJEK.....	6
3.1	STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA	6
3.2	PROCJENA VELIČINA	8
3.2.1	Procjena površine čelika za prednapinjanje.....	8
3.2.2	Procjena površine čelika za armiranje	12
3.2.3	Geometrijske karakteristike nosača	13
3.3	NAJVEĆA NAPREZANJA U NATEZI	15
3.4	GUBICI SILE PREDNAPINJANJA	16
3.4.1	Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije	16
3.4.2	Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja	16
3.4.3	Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina	17
3.4.4	Vremenski gubici.....	20
3.5	GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI.....	23
3.5.1	Savijanje s uzdužnom silom	23
3.5.2	Provjera na poprečne sile.....	30
3.5.3	Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature.....	38
3.6	GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI.....	40
3.6.1	Granično stanje naprezanja.....	40
3.6.2	Granično stanje pukotina	45
3.6.3	Granično stanje deformacija.....	49
4	PRORAČUN PREDNAPETOG NOSAČA – PRAVOKUTNI PRESJEK.....	52
4.1	STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA	52
4.2	PROCJENA VELIČINA	54
4.2.1	Procjena površine čelika za prednapinjanje.....	54
4.2.2	Procjena površine čelika za armiranje	57
4.2.3	Geometrijske karakteristike nosača	58
4.3	NAJVEĆA NAPREZANJA U NATEZI	60
4.4	GUBICI SILE PREDNAPINJANJA	61
4.4.1	Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije	61
4.4.2	Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja	61
4.4.3	Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina	62
4.4.4	Vremenski gubici.....	65
4.5	GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI.....	68

4.5.1	Savijanje s uzdužnom silom	68
4.5.2	Provjera na poprečne sile.....	73
4.5.3	Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature.....	81
4.6	GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI.....	83
4.6.1	Granično stanje naprezanja.....	83
4.6.2	Granično stanje pukotina	88
4.6.3	Granično stanje deformacija.....	92
5	ANALIZA REZULTATA ZA T-PRESJEK I PRAVOKUTNI PRESJEK	95
6	ZAKLJUČAK.....	97
7	GRAFIČKI PRILOZI	99

1 UVOD

Kako bi se pravilno razumjele osnove prednapinjanja i uloga prednapetog betona u građevinarstvu, važno je poznavati materijalne karakteristike betona. Beton je materijal koji posjeduje veoma malu vlačnu čvrstoću i iznimno veliku tlačnu čvrstoću. Kao posljedica djelovanja temperaturnih promjena i skupljanja betona, javljaju se neizbježna naprezanja u betonu koja vrlo lako dosegnu vlačnu čvrstoću betona. Osim neizbježnih naprezanja od skupljanja i temperaturne razlike, javljaju se i naprezanja uslijed djelovanja vanjskog opterećenja. Kao posljedica dostizanja vlačne čvrstoće betona, dolazi do pojave pukotina odnosno raspucavanja vlačnog područja. [1]

Da bi se izbjegle pukotine, razvila se ideja o istezanju armature u betonu kako bi se izazvalo početno tlačno naprezanje odnosno da se beton prednapne. Osnovna ideja prednapinjanja proizlazi iz toga da se, prije vanjskog opterećenja, umjetnim načinom beton dovede u takvo stanje naprezanja gdje će u preuzimanju napona od uporabnog opterećenja sudjelovati cijeli betonski presjek. Temeljem te ideje razvilo se takozvano puno prednapinjanje kod kojega se u potpunosti eliminiraju vlačna naprezanja, te ograničeno prednapinjanje gdje su u ograničenim veličinama dopuštena vlačna naprezanja. [1]

Važno je znati da prednapeti beton nije zaseban materijal, već ga se može definirati kao spreg betona, čelika za prednapinjanje i čelika za armiranje. Sve prednapete konstrukcije sastoje se od armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata koji su prednapinjanjem dodatno stlačeni. Vrlo je bitno odabrati povoljan oblik natege iz razloga što zakrivljenim vođenjem natege postižu se vertikalna opterećenja koja djeluju u smjeru obrnutom od vanjskog opterećenja. Natege za prednapinjanje se najčešće izrađuju od čelika visoke čvrstoće koje je potrebno i sidriti. [2]

Uspoređujući prednapete konstrukcije s armiranobetonskim konstrukcijama, može se iznijeti nekoliko bitnih prednosti prednapetih konstrukcija. Samo neke od prednosti su manje deformacije, povećanje nosivosti, viša čvrstoća na zamor, eliminacija pukotina, manja potrošnja čelika za armiranje, manji betonski presjeci (manja vlastita težina), umanjeno djelovanje poprečnih sila itd. Nedostaci prednapetih konstrukcija su visoka cijena čelika za prednapinjanje, povećan rad u smislu postavljanja natega, složenije projektiranje i zahtjev za velikom preciznošću. [1][2]

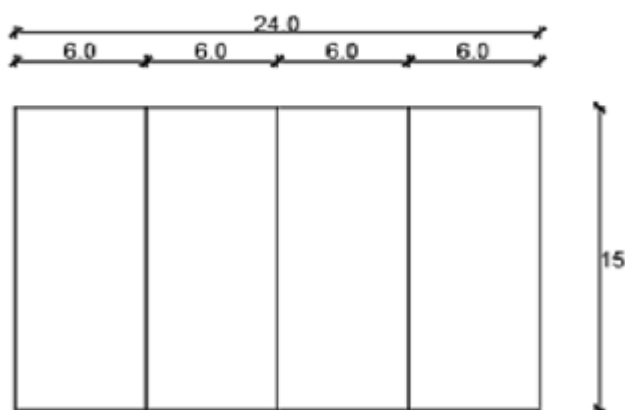
Primjena prednapetog betona u građevinarstvu je velika. Primjenjuje se u gotovo svim granama građevinarstva, a samo neki od objekata su potporni zidovi, nuklearne elektrane, zgrade, silosi, mostovi, tornjevi, bunker, hidrotehničke građevine, kesoni, poljoprivredne i

industrijske građevine itd. Prednapete konstrukcije imaju bitnu ulogu u izvođenju objekata velikih raspona poput mostova, koncertnih ili sportskih dvorana, stadiona itd. [1]

Zadatak ovog diplomskog rada je usporedba prednapetog krovnog nosača „T“ presjeka i pravokutnog presjeka. Provođenjem proračuna prednapetih krovnih nosača proizvodne hale, čitatelji se upoznaju sa osnovnim formulama i koracima potrebnim za uspješno projektiranje prednapetih elemenata. Rad je napisan u sedam poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja, drugo poglavlje se odnosi na tehnički opis gdje su iznesene dimenzije proizvodne hale, geometrijske karakteristike nosača te svojstva materijala koja se primjenjuju u proračunima. Treće poglavlje se odnosi na proračun prednapetog nosača „T“ presjeka, a četvrto poglavlje na proračun prednapetog nosača pravokutnog presjeka. U petom se poglavlju analiziraju provedeni proračuni i uspoređuju dobiveni rezultati. Na poslijetku, u šestom poglavlju iznosi se zaključak. Grafički prilozi čine sedmo poglavlje.

2 TEHNIČKI OPIS

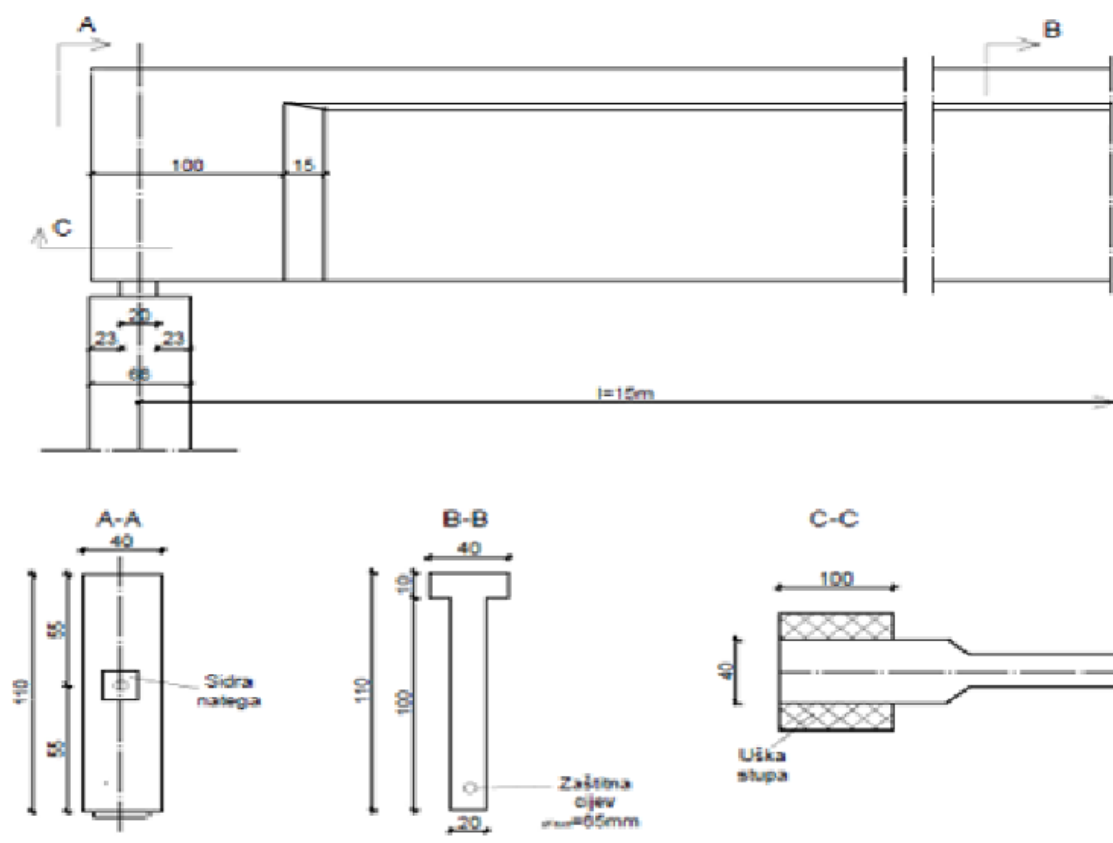
Proizvodna hala izvedena je od betonskih stupova i predgotovljenih prednapetih betonskih elemenata. Montažni stupovi hale zajedno sa sekundarnim nosačima čine statički sustav okvira u uzdužnome smjeru, dok stupovi i prednapeti krovni nosači u poprečnome smjeru čine poprečne okvire. Osne dimenzije proizvodne hale su 24 m x 15,66 m, a površina prizemlja iznosi približno 376 m². Izvedba prednapinjanja elemenata provedena je sustavom sprezanja pomoću naknadno injektiranog cementnog morta.



Slika 1: Tlocrtne dimenzije proizvodne hale

Proračun se provodi za jednostavni prednapeti nosač. U prvom slučaju prednapeti nosač je „T“ presjeka širine 20 cm, gornjeg pojasa 40 cm i ukupne visine 110 cm. U drugom slučaju prednapeti nosač je pravokutnog presjeka 110x20 cm. Susjedni nosači međusobno su razmaknuti za udaljenost od $e=6,00$ m. Krovni nosač izvodi se kao unutarnji nosivi element. Ukrućenje u horizontalnom smjeru ostvareno je upetošću krovne ploče i stupova. Razmatraju se relativno mirna djelovanja.

Prednapeti nosač izveden je od betona kvalitete C35/45, čelika za armiranje B500A i čelika za prednapinjanje 1500/1770.



Slika 2: Geometrijske karakteristike nosača

2.1 Svojstva materijala

Beton C35/45:

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

Čelik za armiranje B500A:

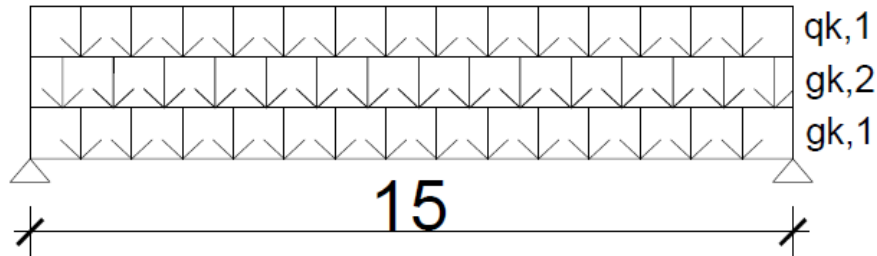
- Karakteristična granica popuštanja $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- Razred duktilnosti A, obična duktilnost
- Modul elastičnosti $E_s = 200\ 000 \text{ MPa}$

Čelik za prednapinjanje 1500/1770:

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

3 PRORAČUN PREDNAPETOG NOSAČA – T-PRESJEK

3.1 STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA



Slika 3: Statički sustav prednapetog nosača

Površina betonskog presjeka (idealizirani T – presjek – slika 5 u idućem poglavlju):

$$A_c = (b_{eff} - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h = (40 - 20) \cdot 10 + 20 \cdot 110$$

$$A_c = 2400 \text{ cm}^2 = 0,24 \text{ m}^2$$

Stalno djelovanje

- Krovni nosač: $g_{k,1} = \gamma \cdot A_c = 25 \cdot 0,24 = 6,0 \text{ kN/m}$
- Krovna konstrukcija: porasti beton ($\gamma = 7,2 \text{ kN/m}^3$) 20 cm + izravnavajući sloj + hidroizolacija ($0,23 \text{ kN/m}^2$). Širina ploče iznosi 6,0 m.

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

$$g_{k,1} + g_{k,2} = 6,0 + 10,0 = 16,0 \text{ kN/m}$$

Opterećenje snijegom

- $s = 1,0 \text{ kN/m}^2$
- Za ploču širine 6,0 m: $q_{k,1} = s \cdot 6,0 = 1,0 \cdot 6,0 = 6,0 \text{ kN/m}$
- Prema EN 1991-1-3:2003, za lokacije ispod 1000 m.n.v., preporučene su sljedeće vrijednosti koeficijenata kombinacije za snijeg:

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

Prednapinjanje

- Vođenje natega provodi se po parabolama.
- Jednadžba parabole opisana je izrazom:

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

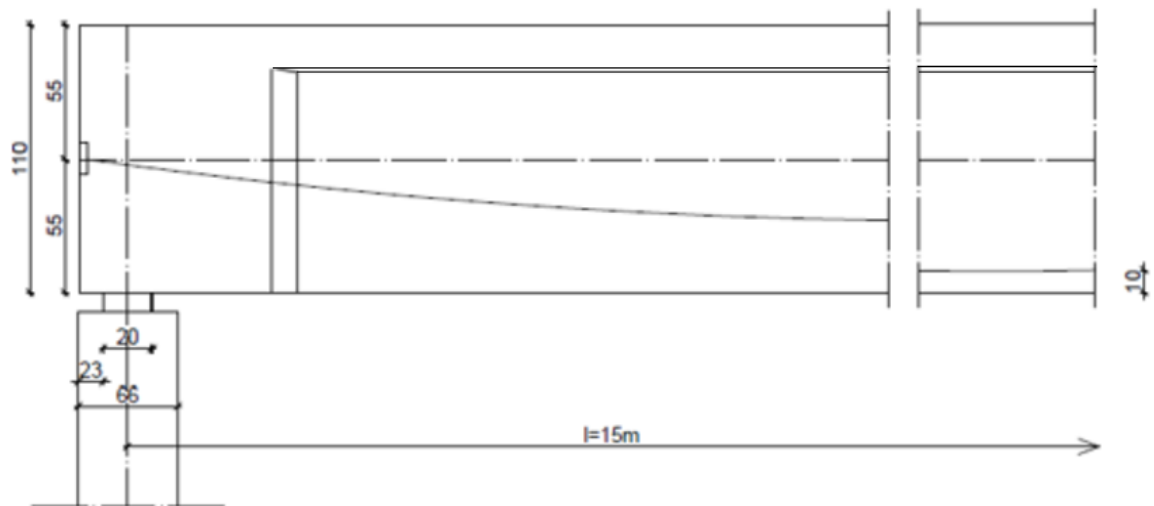
gdje je f oznaka za strelicu parabole natege.

- Kut skretanja natege opisan je izrazom:

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

- Strelice parabole natege iznose:

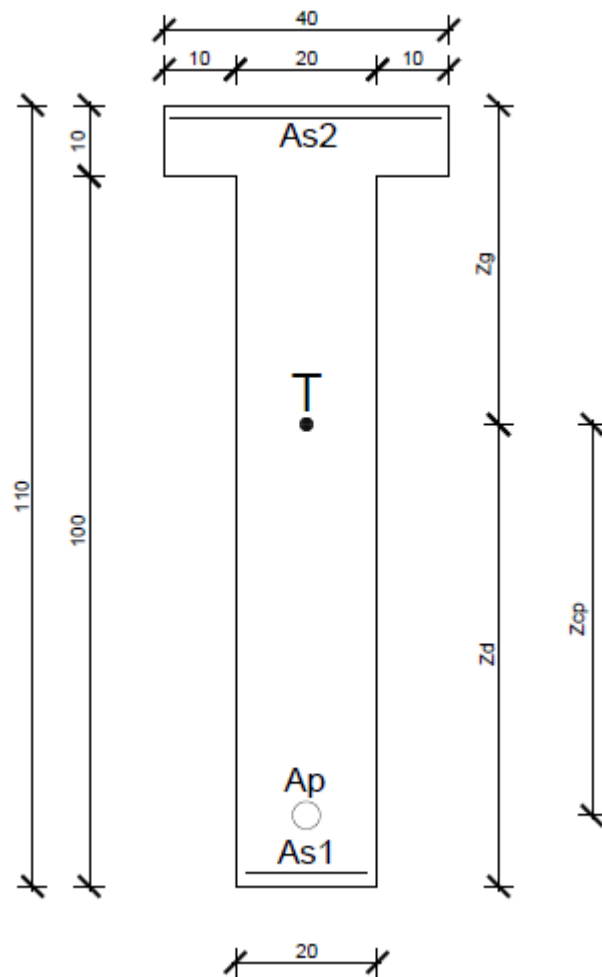
- Za razinu natege : $f_1 = 55,0 - 10 = 45 \text{ cm}$



Slika 4: Položaj natega u nosaču

3.2 PROCJENA VELIČINA

3.2.1 Procjena površine čelika za prednapinjanje



$$b_{eff} = 40 \text{ cm}$$

$$b_w = 20 \text{ cm}$$

$$h = 110 \text{ cm}$$

$$h_f = 10 \text{ cm}$$

Slika 5: Poprečni presjek nosača – „T“ presjek

Površina betonskog presjeka:

$$A_c = (b_{eff} - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h = (40 - 20) \cdot 10 + 20 \cdot 110$$

$$A_c = 2400 \text{ cm}^2 = 0,24 \text{ m}^2$$

Udaljenost između težišta betona i donjeg ruba presjeka određena je izrazom:

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

$$z_d = \frac{(40 - 20) \cdot 10 \cdot \left(110 - \frac{10}{2}\right) + 20 \cdot 110 \cdot \frac{110}{2}}{2400}$$

$$z_d = 59,2 \text{ cm}$$

Udaljenost između gornjeg ruba presjeka i težišta betona određena je izrazom:

$$z_g = h - z_d = 110 - 59,2 = 50,8 \text{ cm}$$

Vrijednost momenta tromosti betonskog presjeka dobiva se iz izraza:

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

$$I_c = \frac{(40 - 20) \cdot 10^3}{12} + [(40 - 20) \cdot 10] \cdot \left(50,8 - \frac{10}{2}\right)^2 + \frac{20 \cdot 110^3}{12} + (20 \cdot 110) \cdot \left(59,2 - \frac{110}{2}\right)^2$$

$$I_c = 0,027 \text{ m}^4$$

Moment otpora gornjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_g = \frac{I_c}{z_g} = \frac{0,027}{0,508} = 0,053 \text{ m}^3$$

Moment otpora donjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_d = \frac{I_c}{z_d} = \frac{0,027}{0,592} = 0,046 \text{ m}^3$$

Udaljenost gornjeg ruba jezgre:

$$k_g = \frac{W_d}{A_c} = \frac{0,046}{0,24} = 0,192 \text{ m}$$

Udaljenost donjeg ruba jezgre:

$$k_d = \frac{W_g}{A_c} = \frac{0,053}{0,24} = 0,221 \text{ m}$$

Udaljenost težišta betonskog presjeka od težišta prednapete armature:

$$z_{cp} = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$$

Srednja osna vlačna čvrstoća betona iznosi:

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Nazovistalnu kombinaciju opterećenja proračunavamo prema izrazu:

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

Koeficijent kombinacije za snijeg iznosi $\psi_2 = 0$.

Za nazovistalnu kombinaciju djelovanja u sredini polja moment savijanja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(6,0 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6,0 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 450,0 \text{ kNm}$$

Da bi se procijenila površina prednapete armature potrebno je postaviti uvjet da na donjem rubu presjeka nije premašena srednja vlačna čvrstoća betona za nazovistalnu kombinaciju opterećenja. Prilikom određivanja progiba potrebno je krutost na savijanje poprečnog presjeka razmatrati za stanje naprezanja I, odnosno za stanje neraspucanog betona. Pomoću jednadžbe, iz dopuštenih naprezanja, može se odrediti konačna sila prednapinjanja:

$$-\frac{P_{m\infty}}{A_c} - \frac{P_{m\infty} \cdot z_{cp}}{W_d} + \frac{M_{max}}{W_d} = \sigma_{ct\infty},$$

iz čega slijedi da je:

$$P_{m\infty} = \frac{M_{max} - \sigma_{ct\infty} \cdot W_d}{z_{cp} + k_g}$$

$P_{m\infty}$ predstavlja silu prednapinjanja nakon svih gubitaka (u trenutku $t = \infty$), a $\sigma_{ct\infty}$ predstavlja dopušteni vlačni napon u betonu prilikom eksploatacije.

$$P_{m\infty} = \frac{M_{Ed,perm} - f_{ctm} \cdot W_d}{z_{cp} + k_g} = \frac{45000 - 0,32 \cdot 0,046 \cdot 10^6}{45 + 19,2}$$

$$P_{m\infty} = 471,65 \text{ kN}$$

Pomoću koeficijenta „m“ u obzir se uzimaju vremenski gubici naprezanja u čeliku uzrokovanih puzanjem, skupljanjem i relaksacijom.

Kako bi se uzeli u obzir početni gubici, koji nastaju kao posljedica trenja, prokliznuća klina i elastične deformacije, potrebno je primijeniti koeficijent „δ“.

Pretpostavlja se da ukupni gubici iznose 25%, odnosno da je:

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

Potrebna površina prednapete armature dobiva se iz izraza:

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

Najveće naprezanje u natezi (sila na preši) određuje se kao manja vrijednost od:

$$\sigma_{p,max,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_1 \cdot f_{pk} = 0,8 \cdot 1770 = 1416 \text{ MPa} \\ k_2 \cdot f_{p0.1,k} = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

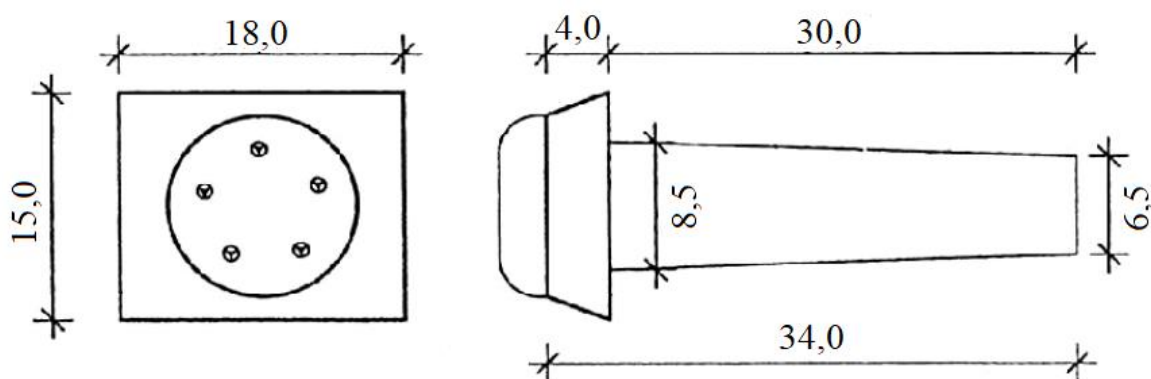
$$\sigma_{p,max,max} = 1350 \text{ MPa}$$

$$A_p = \frac{P_{m\infty}}{\delta \cdot m \cdot \sigma_{p,max}} = \frac{471,65}{0,75 \cdot 135,0} = 4,65 \text{ cm}^2$$

Usvaja se jedna natega ukupne površine:

$$A_p = 5,5 \text{ cm}^2$$

Nategu čini ukupno 5 užadi, a površina presjeka svakog užeta iznosi 1,1 cm². Iz toga slijedi da je površina presjeka natega (sastavljene od 5 užadi) jednaka 5,5 cm².



Slika 6: Skica i dimenzije natega

3.2.2 Procjena površine čelika za armiranje

Proračunska granica popuštanja čelika za armiranje f_{yd} iznosi:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

Proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje f_{pd} iznosi:

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

Statička visina čelika za prednapinjanje iznosi:

$$d_p = h - 10 = 110 - 10 = 100 \text{ cm}$$

Statička visina betonskog čelika, na strani sigurnosti, usvaja se da je:

$$d_s = d_p = 100,0 \text{ cm}$$

Vrijednost kraka unutarnjih sila uzima se kao:

$$z_p = z_s = z \approx 0,9 \cdot d_p = 0,9 \cdot 100 = 90,0 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

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

$$M_{Ed} = \left(\frac{(6,0 + 10,0)}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,35 + \left(\frac{6,0}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,5$$

$$M_{Ed} = 860,63 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da do popuštanja dolazi u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature dobiva se prema sljedećem izrazu:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed} - A_p \cdot \sigma_p \cdot z_p}{f_{yd} \cdot z_s} = \frac{M_{Ed} - A_p \cdot f_{pd} \cdot 0,9 \cdot d_p}{f_{yd} \cdot 0,9 \cdot d_p}$$

$$A_{s1} = \frac{86063 - 5,5 \cdot 130,44 \cdot 0,9 \cdot 100}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 100} = 5,49 \text{ cm}^2$$

Odabire se vlačna armatura $A_{s1} = 3\text{Ø}16$ ($6,03 \text{ cm}^2$).

Osim vlačne armature, odabire se i tlačna armatura $A_{s2} = 4\text{Ø}12$ ($4,52 \text{ cm}^2$).

3.2.3 Geometrijske karakteristike nosača

Primjenjuje se idealizirani poprečni presjek:

- Zaštitna cijev natege ima vanjski promjer veličine $\phi_{duct} = 65 \text{ mm}$

- Površina presjeka čelika za prednapinjanje za nategu iznosi $A_p = 5,5 \text{ cm}^2$

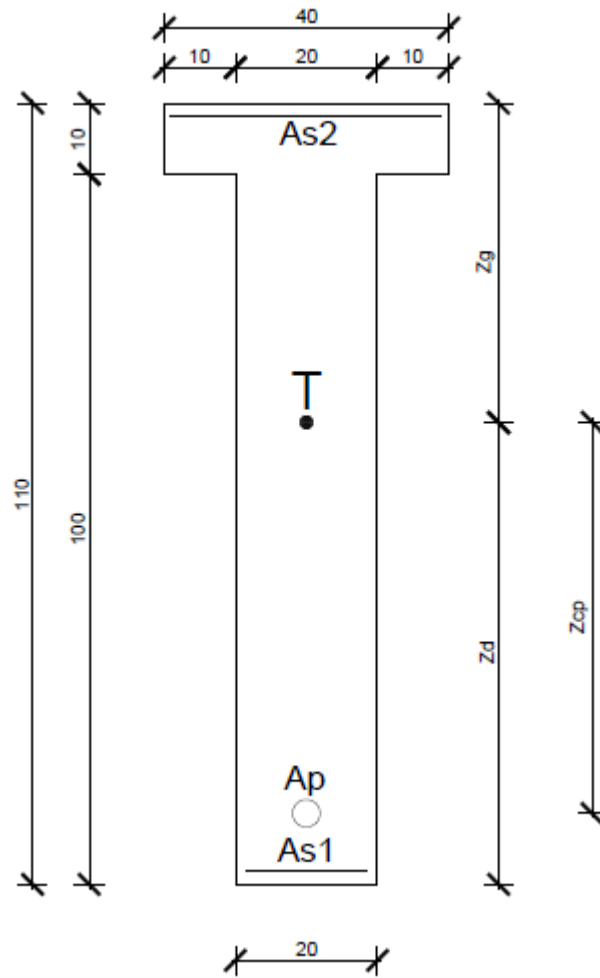
$$\alpha_{E,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{34000} = 5,74$$

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

Tablicom 1 prikazane su vrijednosti geometrijskih karakteristika nosača za bruto, neto i idealan presjek, proračunane pomoću računalnog programa Mathcad. Za proračun se koriste bruto geometrijske karakteristike presjeka.

Tablica 1: Geometrijske karakteristike nosača za bruto, neto i idealan presjek

BETON	$A_c \text{ [m}^2\text{]}$	$I_c \text{ [m}^4\text{]}$	$z_d \text{ [m]}$	$z_g \text{ [m]}$	$z_{cp,1} \text{ [m]}$	$z_{cp} \text{ [m]}$
Bruto	0,24	0,027	0,592	0,508	0,1	0,492
Neto	0,238	0,0262	0,596	0,504	0,1	0,496
Idealno	0,25	0,0292	0,571	0,592	0,1	0,471



Slika 7: Geometrijske karakteristike presjeka nosača

3.3 NAJVEĆA NAPREZANJA U NATEZI

U prethodnom poglavlju određeno je najveće naprezanje u natezi, odnosno sila na preši:

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

Najveća sila u natezi iznosi:

$$P_{\max.\max} = \sigma_{p \max.\max} \cdot A_p = 135,0 \cdot 5,5 = 742,5 \text{ kN}$$

Neposredno nakon napinjanja, naprezanje u čeliku smije iznositi:

$$\sigma_{pm0.\max} = \min \begin{cases} k_7 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1770 = 1327,5 \text{ MPa} \\ k_8 \cdot f_{p0.1,k} = 0,85 \cdot 1500 = 1275 \text{ MPa} \end{cases}$$

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

Neposredno nakon napinjanja, sila u čeliku za prednapinjanje smije iznositi:

$$P_{m0.\max} = \sigma_{pm0.\max} \cdot A_p = 127,5 \cdot 5,5 = 701,25 \text{ kN}$$

3.4 GUBICI SILE PREDNAPINJANJA

3.4.1 Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

Prednapinjanje natege vrši se u presjeku gdje je $x=0$ m. S obzirom da se prednapinjanje natege izvodi na različitim krajevima, gubici uzrokovani elastičnim skraćanjem betona su zanemarivo mali.

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

3.4.2 Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

Gubitak sile prednapinjanja kao posljedica trenja opisan je izrazom:

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

iz čega slijedi da je:

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

μ je koeficijent trenja između cijevi i natege te iznosi $\mu = 0,21$.

θ predstavlja zbroj kutova skretanja natege na duljini x i neovisan je o predznaku i smjeru.

Izražava se u radijanima, a za slučaj vođenja natege po paraboli definiran je pomoću izraza:

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

Koeficijent $k = 0,0055 \text{ m}^{-1}$ predstavlja neželjeni kut skretanja po jedinici duljine.

Natega $f=0,45$ m

$$\theta(x) = \frac{8 \cdot x \cdot f}{l_{tot}^2} = \frac{8 \cdot x \cdot 0,45}{15,66^2} = 0,01468 \cdot x$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot x)}) = 1 - e^{-\mu(0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}$$

Tablica 2: Prikaz odnosa gubitka sile prednapinjanja zbog trenja i početne sile prednapinjanja po presjecima

Natega	$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k \cdot x)})$		
	x=0	x=7,83	x=15,66
1 (f=0,45 m)	0	0,0114	0,0226

3.4.3 Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

U presjeku u kojem se vrši prednapinjanje dolazi do smanjenja početne sile prednapinjanja P_{max} kao posljedica prokliznuća klina. Sila se smanjuje za vrijednost ΔP_{sl} duž duljine djelovanja prokliznuća l_{sl} .

Potrebno je proračunati i duljinu utjecaja prokliznuća klina l_{sl} i gubitak sile prednapinjanja ΔP_{sl} da bi spoznali tok sile prednapinjanja duž natege.

Kao mjerodavan podatak za proračun, koristi se vrijednost prokliznuća klina $\Delta l_{sl} = 2,0 \text{ mm}$ koju definira proizvođač.

1. Natega $f=0,45 \text{ m}$

$$P_{max} = P_{max,max} = 742,5 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \cdot \left(\frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{742,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 8,256 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 742,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot 8,256 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 51950 \text{ N} = 51,95 \text{ kN}$$

Za sve udaljenosti, odnosno presjeke, koji prelaze duljinu djelovanja prokliznuća klina l_{sl} vrijedi:

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 742,5 \cdot (1 - e^{-0,21 \cdot (0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}) \quad \text{za } x \geq 7,83 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 7,83) = 24,23 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 15,66) = 47,67 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,83) = 742,5 - 24,23 = 718,3 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,66) = 742,5 - 47,67 = 694,83 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(l_{sl} = 7,83) = 718,3 \text{ kN} > P_{m0,max} = 701,25 \text{ kN}$$

Potrebno je smanjiti silu na preši kako bi vrijedilo:

$$P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25 \text{ kN}$$

Iz uvjeta da je $P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25$, pomoću računalnog programa Mathcad, određene su vrijednosti duljine prokliznuća klina i gubitka sile prednapinjanja za nategu 1 i nategu 2 prikazane tablicom 3.

Tablica 3: Vrijednosti gubitka sile prednapinjanja i duljine prokliznuća klina dobivene Mathcadom

Uvjet da je $P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25$			
Natega	P_{max} [kN]	ΔP_{sl} [kN]	l_{sl} [m]
1	726,5	51,39	8,3469

Provjera dobivenih vrijednosti:

1. Natega $f=0,45$ m

$$P_{max} = 726,5 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \cdot \left(\frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{726,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 8,3469 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 726,5 \cdot 0,21 \cdot 8,3469 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 51,39 \text{ kN}$$

Za sve udaljenosti, odnosno presjeke, koji prelaze duljinu djelovanja prokliznuća klina l_{sl} vrijedi:

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 726,5 \cdot (1 - e^{-0,21 \cdot (0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}) \quad \text{za } x \geq 8,3469$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 8,3469) = 25,248 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 15,66) = 46,648 \text{ kN}$$

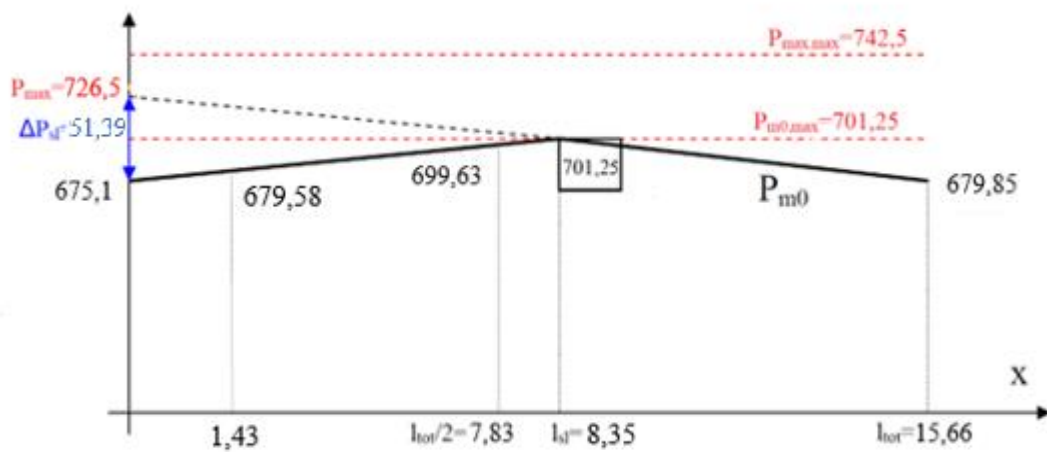
$$P_{m0}(8,3469) = 726,5 - 25,248 = 701,25 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,66) = 726,5 - 46,648 = 679,85 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 726,5 - 51,39 = 675,1 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,83) = 675,1 + \frac{701,25 - 675,1}{8,3469} \cdot 7,83 = 699,63 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(1,43) = 675,1 + \frac{701,25 - 675,1}{8,3469} \cdot 1,43 = 679,58 \text{ kN}$$



Slika 8: Dijagram gubitaka sile prednapinjanja za nategu 1 (konačne vrijednosti)

Tablica 4: Vrijednosti gubitka sile prednapinjanja za nategu 1 (konačne vrijednosti)

X [m]	0	7,83	15,66
P_{m0} [kN]	675,1	699,63	679,85

3.4.4 Vremenski gubici

Vremenski gubici nastaju se kao posljedica relaksacije, skupljanja i puzanja, a proračunavaju se pomoću izraza:

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

gdje je:

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

ε_{cs} – procijenjena deformacija skupljanja dobivena iz mathcad-a koja iznosi $\varepsilon_{cs} = -0,47578 \text{ ‰} = -0,00047578$

$E_p = 195 \text{ 000 MPa}$ – modul elastičnosti čelika za prednapinjanje

$E_{cm} = 34 \text{ 000 MPa}$ – modul elastičnosti betona

$\Delta \sigma_{pr}$ – apsolutna vrijednost promjene naprezanja u nategama uslijed opuštanja čelika za prednapinjanje, u trenutku t na mjestu x . Određuje se za naprezanje $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 Q)$, koje predstavlja početno naprezanje u kabelu uslijed nazovi-stalnih djelovanja i prednapinjanja.

$\varphi(t, t_0) = 2,159$ – koeficijent puzanja dobiven preko mathcad-a

$\sigma_{c,QP}$ – naprezanje betona u visini natege od prednapinjanja, vlastite težine te drugih nazovi-stalnih djelovanja

$A_c = 0,24 \text{ m}^2$ – ploština betonskog presjeka

$A_p = 5,5 \text{ cm}^2$ – ploština presjeka natega u promatranom području

$I_c = 0,027 \text{ m}^4$ – moment tromosti betonskog presjeka

$z_{cp} = 0,45 \text{ m}$ – resultantna udaljenost između natege i težišta betonskog presjeka

Prema sljedećem izrazu proračunava se gubitak naprezanja uzrokovan opuštanjem za razred 2 u koji spadaju žice i užadi niske relaksacije:

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

gdje je:

σ_{pi} – najveće vlačno naprezanje na kabel umanjeno za vrijednost početnih gubitaka nastalih uslijed prednapinjanja, kod naknadnog prednapinjanja

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

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

ρ_{1000} – vrijednost relaksacijskog gubitka pri srednjoj temperaturi od 20°C i 1000 sati nakon prednapinjanja. Izražava se u postocima (%), a za razred 2 iznosi $\rho_{1000} = 2,5$.

Naprezanje u nategama na sredini raspona nakon početnih gubitaka iznosi:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{m0,1}}{A_{p1}} = \frac{699,24 \cdot 10^3}{5,5 \cdot 10^{-4}} = 1272,05 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1272,05}{1770} = 0,719$$

Gubitak naprezanja nakon 500 000 sati uzrokovan opuštanjem:

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

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,719} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,719)} \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,042$$

Trenutak konačne relaksacije – promjena naprezanja uzrokovana relaksacijom čelika nakon 500 000 sati odnosno otprilike 57 godina:

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

$$\Delta\sigma_{pr} = 1272,05 \cdot \left[0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,719} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,719)} \cdot 10^{-5} \right]$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 53,99 \text{ MPa}$$

Moment savijanja na polovici raspona od nazovistalnih djelovanja bez P_{m0} :

$$M_{QP} = \frac{g_{k,1} + g_{k,2}}{8} \cdot l^2 = \frac{6 + 10,0}{8} \cdot 15^2$$

$$M_{QP} = 450 \text{ kNm}$$

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

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

$$\sigma_{c,QP} = \frac{450 \cdot 10^3 \cdot 0,492}{0,027} + \left(-\frac{699,63 \cdot 10^3}{0,24} - \frac{(699,63 \cdot 10^3) \cdot 0,492}{0,027} \cdot 0,492 \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = -0,987 \text{ MPa} \quad (\text{tlak})$$

Promjena napreznja kao posljedica puzanja, skupljanja i relaksacije (deformaciju od skupljanja i relaksacije potrebno je uzeti kao apsolutnu vrijednost, a tlačno napreznje uzeti s pozitivnim predznakom):

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

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{0,00047578 \cdot 195000 + 0,8 \cdot 53,99 + \frac{195000}{34000} \cdot 2,159 \cdot 0,492}{1 + \frac{195000}{34000} \cdot \frac{5,5 \cdot 10^{-4}}{0,24} \cdot \left(1 + \frac{0,24}{0,027} \cdot 0,492^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 2,159]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 133,15 \text{ MPa}$$

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

$$\Delta P_{c+s+r} = \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 133,15 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4} = 73,23 \text{ kN}$$

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

1. Natega

$$P_{m\infty} = P_{m0} - \Delta P_{c+s+r} = 699,63 - 73,23 = 626,4 \text{ kN}$$

Tablica 5: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu nakon vremenskih gubitaka

x [m]	0	7,83	15,66
$P_{m0}(x)$ [kN]	675,1	699,63	679,85
$P_{m\infty}(x)$ [kN]	601,87	626,4	606,62

3.5 GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Proračunska čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 \cdot \frac{35}{1,5} = 23,3 \text{ MPa}$$

α_{cc} je koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni učinci na tlačnu čvrstoću te neželjeni učinci kao posljedica načina na koji je beton opterećen. Preporučena vrijednost prema EN 1992-1-1 za α_{cc} je 1, te je prihvaćena nacionalnim dodatkom.

Proračunska granica popuštanja čelika za armiranje:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} \quad \rightarrow \text{ za uzdužnu armaturu i vilice}$$

Proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje:

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

Vrijednost deformacije pri proračunskoj granici popuštanja čelika za prednapinjanje:

$$\varepsilon_{pd} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1304,35}{195000} = 6,69 \cdot 10^{-3} = 6,69 \text{ ‰}$$

3.5.1 Savijanje s uzdužnom silom

3.5.1.1 Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=\infty$

Statička visina čelika za prednapinjanje iznosi:

$$d_p = h - h_f = 110 - 10 = 100 \text{ cm}$$

Statička visina čelika za armiranje na strani sigurnosti iznosi:

$$d_s = d_p = 100 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

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

$$M_{Ed} = \left(\frac{(6 + 10,0)}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,35 + \left(\frac{6}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,5$$

$$M_{Ed} = 860,63 \text{ kNm}$$

Pri postupku dimenzioniranja razmatra se da je ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje na strani sigurnosti ($\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p$).

Pretpostavka je da neutralna os prolazi kroz ploču.

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d_s^2 \cdot f_{cd}} = \frac{86063}{40 \cdot 100^2 \cdot 2,33} = 0,092 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Iz tablica za dimenzioniranje pravokutnog presjeka, za betone razreda čvrstoće C12/15 do C50/60, očitava se:

$$\varepsilon_{c,ed2} = -3,5 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s1} = 19,5 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,125$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,948$$

$$\mu_{Ed} = 0,096$$

$$x = \xi \cdot d = 0,125 \cdot 100 = 12,5 \text{ cm} > h_f = 10 \text{ cm}$$

Prema dobivenome slijedi da neutralna os siječe rebro, stoga gornja pretpostavka ne vrijedi.

Kod vitkih T-presjeka koji zadovoljavaju uvjet da je $\frac{b_{eff}}{b_w} > 5$, dio rebra ispod ploče može se zanemariti.

$$\frac{b_{eff}}{b_w} = \frac{40}{20} = 2,0 < 5 \quad - \text{uvjet nije zadovoljen}$$

Proračun je potrebno provesti prema postupku kada vrijedi $\frac{b_{eff}}{b_w} < 5$.

1. Iteracija

$$\frac{b_{eff}}{b_w} = \frac{40}{20} = 2,0$$

$$\frac{h_f}{d} = \frac{10,0}{100} = 0,1$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,11$$

Na osnovu navedenih parametara iz tablice se očitava $\lambda_b = 0,99$

Tablica 6: Tablica za dimenzioniranje T-presjeka za betone razreda čvrstoće od C12/15 do C50/60

h _f /d										b _{eff} /b _w							
0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	
ξ										100 · λ _b							
0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	100	100	100	100	100	100	100	
	0.50	0.44	0.39	0.33	0.28	0.22	0.17	0.11	0.06	99	99	99	99	99	98	98	
		0.50	0.44	0.38	0.31	0.25	0.19	0.13	0.06	97	96	95	95	95	94	94	
			0.50	0.43	0.36	0.29	0.21	0.14	0.07	95	92	90	89	89	88	87	
				0.50	0.42	0.33	0.25	0.17	0.08	91	87	84	82	81	80	79	
					0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	87	81	77	74	73	71	69	
						0.50	0.38	0.25	0.13	83	75	70	66	64	62	60	
C 12/15 - C 50/60 ε _{c2} =2.0 ‰ ε _{cu2} =3.5 ‰ n=2								0.50	0.33	0.17	79	69	62	58	55	53	50
									0.50	0.25	75	62	55	50	46	44	40
										0.50	71	56	47	42	37	34	30

Širina zamjenjujućeg T-presjeka iznosi:

$$b_i = \lambda_b \cdot b_{eff} = 0,99 \cdot 40 = 39,6 \text{ cm}$$

Proračun se dalje provodi kao za pravokutni presjek b_i/h .

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_i \cdot d_s^2 \cdot f_{cd}} = \frac{86063}{39,6 \cdot 100^2 \cdot 2,33} = 0,093 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Iz tablica se ponovno očitava:

$$\varepsilon_{c,ed2} = -3,5 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s1} = 16,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,122$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,948$$

$$\mu_{Ed} = 0,096$$

Dobivena vrijednost $\xi = 0,11$ u prvoj iteraciji ne razlikuje se previše od pretpostavljene vrijednosti $\xi = 0,12$, stoga nije potrebno provoditi daljnje iteracije.

Pretpostavlja se da dolazi do popuštanja u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature:

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

$$A_{s1} = \frac{86063 - 5,5 \cdot 130,44 \cdot 0,948 \cdot 100}{43,48 \cdot 0,948 \cdot 100} = 4,38 \text{ cm}^2$$

Odabire se armatura 3Ø16 (6,03 cm²)

U graničnom stanju ravnoteže, nakon raspucavanja, čelik za prednapinjanje poprima deformaciju:

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_{s1} = 16,0 \text{ ‰}$$

Naprezanje u natezi nakon svih gubitaka na sredini raspona:

$$\sigma_{pm\infty} = \frac{P_{m\infty,1}}{A_{p1}} = \frac{626,14 \cdot 10^3}{5,5 \cdot 10^{-4}} = 1138,44 \text{ MPa}$$

Predizduženje (preddeformacija) iznosi:

$$\varepsilon_{pm\infty} = \frac{\sigma_{pm\infty}}{E_p} = \frac{1138,44}{195000} = 5,84 \cdot 10^{-3} = 5,84 \text{ ‰}$$

Za granično stanje ravnoteže, ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje može se proračunati prema izrazu:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p = 5,84 + 16 = 21,84 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_p = 21,84 \text{ ‰} > \varepsilon_{pd} = 6,69 \text{ ‰} \rightarrow \text{u čeliku za prednapinjanje došlo je do popuštanja}$$

3.5.1.2 Provjera najvećeg i najmanjeg postotka armiranja

Nacionalnim dodatkom definirana je preporučena minimalna ploština presjeka armature,

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

gdje b_t predstavlja srednju širinu vlačnog područja. Kod greda T-presjeka u proračun za b_t je potrebno uvrstiti samo širinu rebra.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{3,2}{500} \cdot 20 \cdot 106 \geq 0,0013 \cdot 20 \cdot 106$$

$$A_{s,min} = 3,53 > 2,756$$

$$A_{s,min} = 3,53 \text{ cm}^2$$

Nacionalnim dodatkom definirano je da za grede T-presjeka s tlačno naprezanom pojasicom, za presjek u polju, najveća armatura iznosi $A_{s1,max} = 0,022 \cdot A_c$.

a) Kada se koristi beton razreda čvrstoće $\leq C50/60$ i kada vrijedi $0,45d \leq h_f$, tada je

$$A_c = h \cdot b_{eff}$$

b) Kada se koristi beton razreda čvrstoće $\leq C50/60$ i kada vrijedi $0,45d > h_f$, tada je

$$A_c = 2,5 \cdot h_f \cdot b_{eff}$$

c) Kada se koristi beton razreda čvrstoće $\geq C55/67$ i kada vrijedi $0,35d \leq h_f$, tada je

$$A_c = h \cdot b_{eff}$$

d) Kada se koristi beton razreda čvrstoće $\geq C55/67$ i kada vrijedi $0,35d > h_f$, tada je

$$A_c = 3,0 \cdot h_f \cdot b_{eff}$$

Beton C35/45

$$0,45 \cdot 106 = 47,7 \text{ cm} > h_f = 10,0 \text{ cm} \rightarrow \text{slučaj b)}$$

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

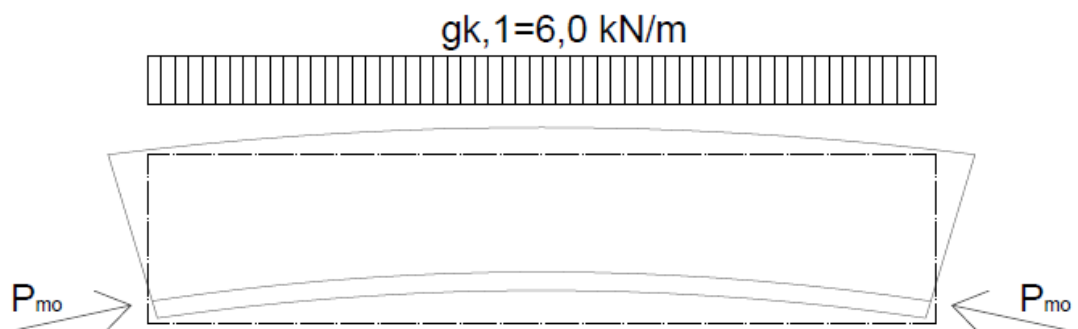
$$A_{S1,max} = 0,022 \cdot A_c = 0,022 \cdot 1000 = 22 \text{ cm}^2$$

$$A_{S,min} \leq A_{S1} \leq A_{S1,max}$$

$$3,53 \text{ cm}^2 \leq 6,03 \text{ cm}^2 \leq 22 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Zadovoljeno!}$$

3.5.1.3 Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=0$

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



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

Primjenjuju se slijedeći parcijalni koeficijenti sigurnosti:

- Za povoljno djelovanje vlastite težine $\gamma_G = 1,0$

- Za nepovoljno djelovanje prednapinjanja $\gamma_P = 1,0$

Dokaz nosivosti provodi se pomoću dimenzioniranja poprečnog presjeka u polju, u trenutku $t=0$, na savijanje s uzdužnom silom. Zanimaruje se gubitak sile prednapinjanja uzrokovan skraćanjem betona. Prednapinjanje kao predizduženje, odnosno preddeformacija, potrebno je uzeti na strani djelovanja.

Proračunski moment u polju kao posljedica djelovanja vlastite težine $g_{k,1}$:

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

$$M_{Ed,g} = \left(\frac{6}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,0 = 168,75 \text{ kNm}$$

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

$$N_{Ed} = -P_{m0} \cdot \gamma_P = -(P_{m0,1})\gamma_P = -(699,63) \cdot 1,0 = -699,63 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost momenta savijanja kao posljedica djelovanja sile prednapinjanja u trenutku $t=0$ na sredini raspona:

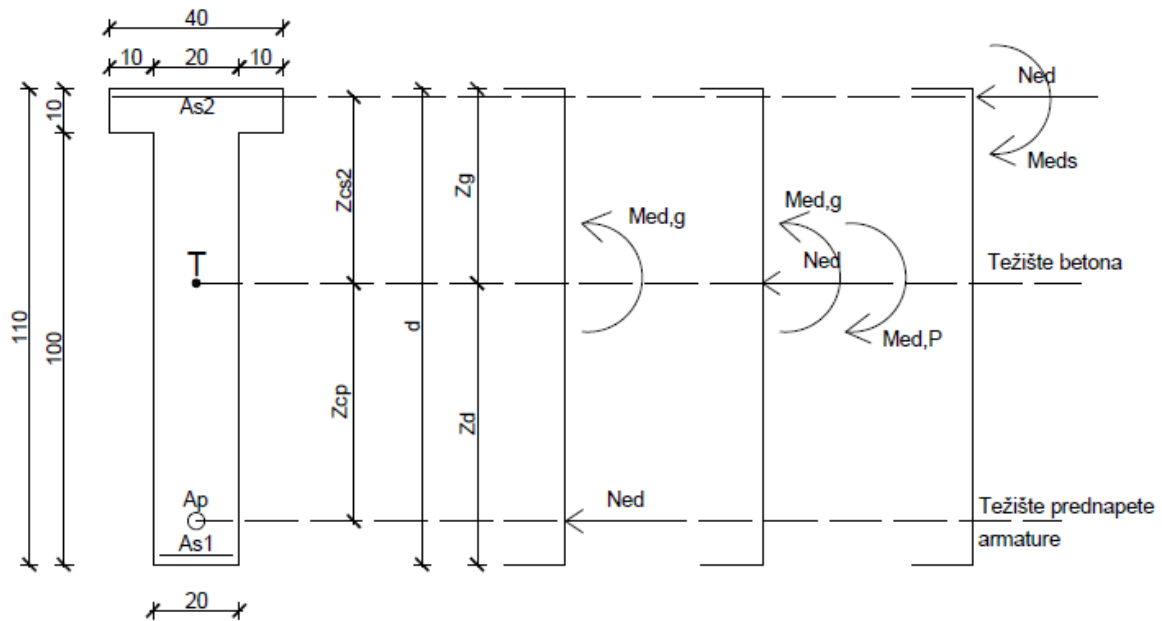
$$M_{Ed,P} = -(P_{m0} \cdot z_{cp}) \cdot \gamma_P = -\left((P_{m0,1}) \cdot z_{cp} \right) \cdot \gamma_P$$

$$M_{Ed,P} = -\left((699,63) \cdot 0,492 \right) \cdot 1,0 = -344,22 \text{ kNm}$$

Rezne sile s obzirom na težište betona:

$$M_{Ed,g} + M_{Ed,P} = 168,75 - 344,22 = -175,47 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -699,63 \text{ kN}$$



Slika 10: Skica položaja reznih sila

Udaljenost između težišta betonskog presjeka i težišta gornje armature:

$$z_{cs2} = z_g - \frac{h_f}{2} = 50,8 - \frac{10}{2} = 45,8 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja s obzirom na os gornje zone armature:

$$M_{Eds} = M_{Ed,g} + M_{Ed,P} - N_{Ed} \cdot z_{cs2}$$

$$M_{Eds} = -175,47 - 699,63 \cdot 0,458 = 495,9 \text{ kNm}$$

Statička visina čelika za armiranje:

$$d = h - \frac{h_f}{2} = 110 - \frac{10}{2} = 105 \text{ cm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{49590}{20 \cdot 106^2 \cdot 2,33} = 0,0965 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Očitano iz tablica:

$$\varepsilon_{c,ed2} = -3,4 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = 20,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,098$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,947$$

$$\mu_{Ed} = 0,096$$

$$A_{s2} = \frac{M_{Eds}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{49590}{0,947 \cdot 106 \cdot 43,48} - \frac{699,63}{43,48} = -4,62 \text{ cm}^2$$

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

Usvaja se tlačna armatura $A_{s2} 4\phi 12$ ($4,52 \text{ cm}^2$).

3.5.2 Provjera na poprečne sile

3.5.2.1 Proračunska nosivost na poprečnu silu

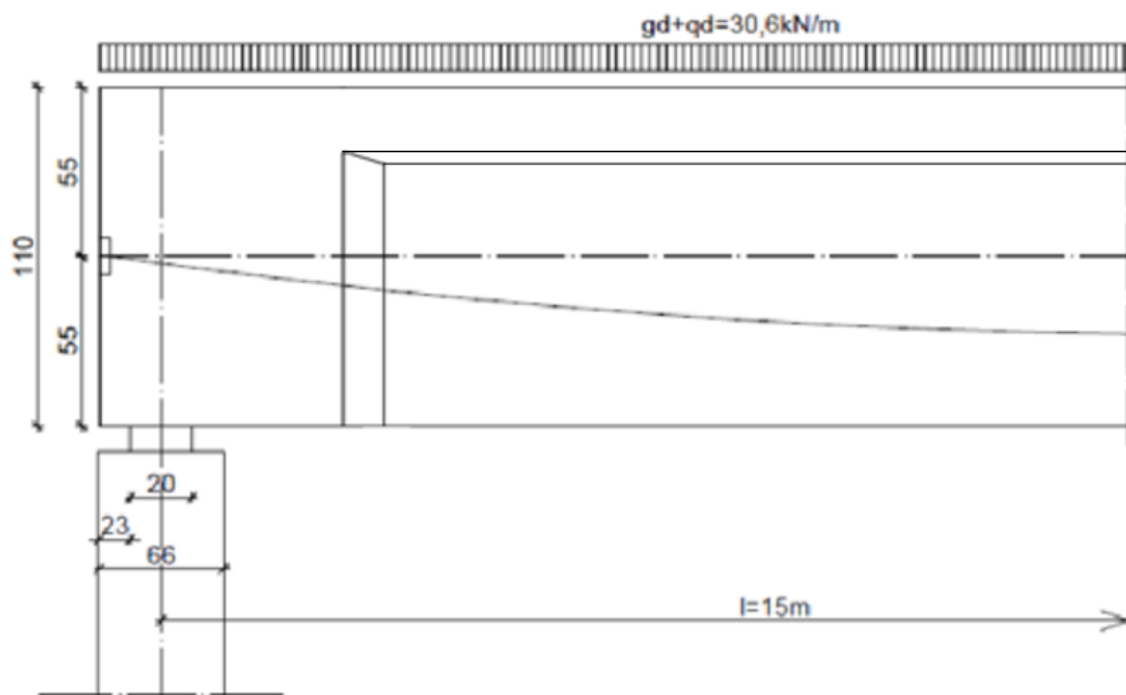
Za nagnuto vođenje natega za prednapinjanje, proračunska vrijednost poprečne sile iznosi,

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

gdje je:

V_{pd} – komponenta poprečne sile nagnute natege

V_{0d} – proračunska poprečna sila u presjeku



Slika 11: Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Proračunsko stalno i promjenjivo djelovanje iznosi:

$$g_d + q_d = (g_{k,1} + g_{k,2}) \cdot \gamma_G + q_{k,1} \cdot \gamma_Q = (6 + 10,0) \cdot 1,35 + 6 \cdot 1,5$$

$$g_d + q_d = 30,6 \text{ kN/m}$$

Proračunska reducirana poprečna sila, potrebna za određivanje poprečne armature:

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

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

$$V_{0d,red} = 30,6 \cdot \left(\frac{15}{2} - 1,0 - 0,1\right)$$

$$V_{0d,red} = 195,84 \text{ kN}$$

Proračunska poprečna sila, potrebna za dokazivanje tlačnih štapova betona:

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

$$V_{0d} = 30,6 \cdot \frac{15}{2}$$

$$V_{0d} = 229,5 \text{ kN}$$

Funkcija položaja natege:

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

Prva derivacija funkcije položaja natege:

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

Nagib natega za promatrani presjek na udaljenosti $x = 0,23 + 0,20 + 1,0 = 1,43 \text{ m}$ od ruba oslonca:

Natega 1. razine:

$$\tan \alpha_1 = 4 \cdot f \cdot \left(\frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 \cdot x}{l_{tot}^2}\right) = 4 \cdot 0,45 \cdot \left(\frac{1}{15,66} - \frac{2 \cdot 1,43}{15,66^2}\right) = 0,0939$$

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

$$P_{m0,1}(1,43) = 679,58$$

Sila prednapinjanja u trenutku $t = \infty$ na udaljenosti d od ruba oslonca (lijevi oslonac):

$$P_{m\infty,1}(1,43) = P_{m0,1}(1,43) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 679,58 - 73,23 = 606,25 \text{ kN}$$

Poprečna komponenta sile prednapinjanja:

- za male kutove vrijedi $\sin \alpha = \tan \alpha$ ($\sin \alpha$ i $\gamma_P = 1$)

$$V_{pd} = P_{m\infty,1} \cdot \sin \alpha_1$$

$$V_{pd} = 606,25 \cdot 0,0939 = 56,93 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile, potrebna za određivanje poprečne armature:

$$V_{Ed,red} = V_{0d,red} - V_{pd} = 195,84 - 56,93 = 138,91 \text{ kN}$$

3.5.2.2 Proračunski potrebna poprečna armatura

Primjenjuje se postupak samostalnog odabira nagiba tlačnih štapova. Kut θ između uzdužne osi i tlačnih štapova ograničava se na:

$$1 < \cot \theta < 2,5$$

$$21,8^\circ < \theta < 45^\circ$$

Nosivost elementa na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

Minimalna vrijednost:

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

gdje je:

f_{ck} u MPa

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d \text{ [mm]}}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{1000}} = 2,414 \leq 2$$

A_{sl} – površina vlačnog područja presjeka koju je potrebno sidriti za najmanje $d + l_{bd}$ iza promatranoga presjeka

$$A_{sl} = A_{s1} = 6,03 \text{ cm}^2$$

l_{bd} – proračunska duljina sidrenja

$b_w = 20 \text{ cm}$ – najmanja širina presjeka u vlačnome području

ρ_1 – koeficijent armiranja uzdužne armature

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

$$\rho_1 = \frac{6,03}{20 \cdot 100} = 0,00302 \leq 0,02$$

σ_{cp} – naprezanje kao posljedica djelovanja proračunske tlačne sile u betonu za promatrani presjek ($x = 1,43$ m)

N_{Ed} – uzdužna sila uslijed prednapinjanja i opterećenja u promatranome presjeku. Ukoliko je sila tlačna onda je $N_{Ed} > 0$. Zanemaruje se utjecaj prisilnih deformacija.

A_c – površina betonskoga presjeka u mm^2

$$N_{Ed} = P_{m\infty,1}(1,43) = 679,58 \text{ kN}$$

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

$$\sigma_{cp} = \frac{679,58 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 10^5} < 0,2 \cdot 23,3$$

$$\sigma_{cp} = 2,83 \text{ MPa} < 4,66 \text{ MPa}$$

Prema nacionalnom dodatku dobivene su vrijednosti za $C_{Rd,c}$, v_{min} i k_1 :

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

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2^{\frac{3}{2}} \cdot 35^{\frac{1}{2}} = 0,5857$$

$$k_1 = 0,15$$

Nosivost elementa na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,00302 \cdot 35)^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 2,83 \right] \cdot 200 \cdot 1000$$

$$\geq (0,5857 + 0,15 \cdot 2,83) \cdot 200 \cdot 1000$$

$$V_{Rd,c} = 190241,52 \text{ N} \geq 202040 \text{ N}$$

$$V_{Ed,red} = 138,91 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 202,04 \text{ kN}$$

Potrebno je proračunati poprečnu armaturu.

Nosivost na poprečne sile u slučaju elemenata s okomitom poprečnom armaturom, odnosno sponama, proračunava se kao manja vrijednost od:

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

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

gdje je:

A_{sw} – ukupna površina presjeka poprečne armature tj. spona

s – razmak spona

f_{ywd} – proračunska čvrstoća popuštanja čelika za poprečnu armaturu

v_1 – faktor redukcije čvrstoće za beton raspucan uslijed djelovanja poprečne sile

α_{cw} – koeficijent kojim se u obzir uzima stanje naprezanja u tlačnom štapu

Za savijanje s uzdužnom silom, odabran je kut nagiba tlačnih štapova:

$$\theta = 40^\circ$$

$$\cot \theta = 1,192$$

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

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

$$V_{Ed,red} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad \rightarrow \quad s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed,red}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

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

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

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

$$s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed,red}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = \frac{1,0}{138,91} \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 43,48 \cdot 1,192$$

$$s = 33,58 \text{ cm}$$

Usvojene su dvorezne vilice (m=2) $\emptyset 8/30 \text{ cm}$.

3.5.2.3 Dokaz čvrstoće tlačnih štapova

Nosivost tlačnih štapova određena je izrazom:

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

Nacionalnim dodatkom definirane su preporučene vrijednosti koeficijenta v_1 i α_{cw} .

Preporučene vrijednosti za koeficijent α_{cw} :

- 1 – u slučaju neprednapetih konstrukcija
- $(1 + \sigma_{cp}/f_{cd})$ – ukoliko je $0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd}$
- 1,25 – ukoliko je $0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd}$
- $2,5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$ – ukoliko je $0,5f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0f_{cd}$

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

$$0 \leq 2,83 \leq 0,25 \cdot 23,3$$

$$0 \leq 2,83 \leq 5,825 \rightarrow$$

$$\alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) = \left(1 + \frac{2,526}{23,3}\right) = 1,108$$

Preporučena vrijednost za v_1 je v .

$$v_1 = v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right]$$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{35}{250}\right] = 0,516$$

S obzirom da zaštitna cijev natege ima vanjski promjer veličine $\phi_{duct} = 6,5$ cm, što je veće od 1/8 širine hrpta, potrebno je koristiti neto širinu hrpta pri proračunu $V_{Rd,max}$.

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

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

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1,108 \cdot 16,75 \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,516 \cdot 2,3}{1,192 + 0,839}$$

$$V_{Rd,max} = 976,03 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 976,03 \text{ kN} > V_{Ed} = 138,91 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti tlačnih štapova je zadovoljen.

3.5.2.4 Najmanja potrebna poprečna armatura

Za preuzimanje poprečne sile potreban je koeficijent armiranja koji se dobiva iz izraza:

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

gdje je:

- ρ_w – koeficijent armiranja poprečnom armaturom
- A_{sw} – površina presjeka poprečne armature na duljini s
- s – razmak poprečne armature u uzdužnom smjeru elementa
- b_w – širina hrpta
- α – kut između glavne armature i poprečne armature (za vertikalne spone $\alpha = 90^\circ$)

Pretpostavlja se promjer vilica $\emptyset 8$. Potrebno je proračunati minimalnu poprečnu armaturu (vilice) na osnovu pretpostavljenog promjera.

Odabiru se dvorezne vilice ($m=2$) $\emptyset 8$.

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

$$s = \frac{A_{sw}}{(\rho_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha)} \text{ – potreban razmak vilica}$$

Nacionalnim dodatkom definirana je vrijednost za minimalni koeficijent armiranja:

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

Razmak vilica dobiven pomoću minimalnog koeficijenta armiranja:

$$s = \frac{A_{sw}}{(\rho_{w,min} \cdot b_w \cdot \sin \alpha)}$$

$$s = \frac{1,0}{(0,00096 \cdot 20 \cdot 1)} = 52,08 \text{ cm}$$

Nacionalnim dodatkom definirani su uvjeti za određivanje najvećeg uzdužnog razmaka spona $s_{l,max}$ ili druge poprečne armature, za beton razreda tlačne čvrstoće $\leq C50/60$:

- Ako je $V_{Ed} \leq 0,3V_{Rd,max}$ $s_{l,max} = 0,75d \leq 300 \text{ mm}$
- Ako je $0,3V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 0,6V_{Rd,max}$ $s_{l,max} = 0,55d \leq 300 \text{ mm}$
- Ako je $0,6V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 1,0V_{Rd,max}$ $s_{l,max} = 0,3d \leq 300 \text{ mm}$

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

$$138,91 \text{ kN} \leq 292,81 \text{ kN}$$

Najveći uzdužni razmak spona:

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

$$s_{l,max} = 0,75 \cdot 1000 = 750 > 300 \text{ mm}$$

Prekoračena je maksimalna vrijednost stoga se usvaja:

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

Usvojen je minimalni razmak vilica $s=30 \text{ cm}$.

Minimalne vilice su dvorezne ($m=2$) $\emptyset 8/30 \text{ cm}$.

Usvojene su dvorezne vilice ($m=2$) $\emptyset 8/30 \text{ cm}$.

3.5.3 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

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

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

$\eta_2 = 1,0$ za promjere šipki $\emptyset < 32$ mm

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

Beton C35/45

DOBRI UVJETI:

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

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

LOŠIJI UVJETI:

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

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

PRORAČUNSKA DULJINA SIDRENJA

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

Pojednostavljeno može se koristiti ekvivalentna duljina sidrenja:

$$l_{b,eq} = \alpha_1 \cdot l_{b,req}$$

gdje α_1 ovisi o obliku armature (za ravne šipke $\alpha_1 = 1,0$).

Tablica 7: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
Dobri	Ø8	25,73 ≈ 26 cm
	Ø12	38,59 ≈ 39 cm
	Ø16	51,46 ≈ 52 cm

Tablica 8: Potrebne duljine sidrenja armature za lošije uvjete

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
Lošiji	Ø8	36,85 ≈ 37 cm
	Ø12	55,27 ≈ 56 cm
	Ø16	73,70 ≈ 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 $\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 = 1$

α_6 – ovisi o postotku preklapljene armature u promatranome presjeku

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

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

$$l_0 = 1,5 \cdot 46,06 \cdot \emptyset \text{ (za lošije uvjete)}$$

Tablica 9: Potrebne duljine nastavljanja armature

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA NASTAVLJANJA, l_0
Dobri	Ø8	38,59 ≈ 39 cm
	Ø12	57,88 ≈ 58 cm
	Ø16	77,18 ≈ 78 cm
Lošiji	Ø8	55,27 ≈ 56 cm
	Ø12	82,91 ≈ 83 cm
	Ø16	110,54 ≈ 111 cm

3.6 GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI

3.6.1 Granično stanje naprezanja

3.6.1.1 Provjera naprezanja za raspucani ili neraspucani presjek

Efekti poput pojave puzanja, uzdužnih pukotina i mikropukotina mogu izazvati neželjene posljedice po konstrukciju, stoga je potrebno ograničiti tlačno naprezanje u betonu. Ukoliko naprezanje, pri karakterističnoj kombinaciji opterećenja, premaši kritičnu vrijednost, pojavit će se uzdužne pukotine. U proračunu se može pretpostaviti linearno puzanje ukoliko se ograniče naprezanja pri nazovistalnoj kombinaciji opterećenja. Kako bi se izbjeglo neelastično ponašanje, neželjene deformacije i raspucavanja, potrebno je ograničiti i vlačna naprezanja u armaturi. Vlačna naprezanja mogu se smatrati izbjegnutim ukoliko, pri karakterističnoj kombinaciji opterećenja, naprezanja u armaturi ne prelaze zadana ograničenja.

Potrebno je provesti provjeru stanja naprezanja za dvije kombinacije djelovanja, a to su karakteristična i nazovistalna kombinacija. Prema normi EN 1991-1-3:2003 zadani su faktori kombinacije:

$$\psi_0 = 0,5$$

$$\psi_1 = 0,2$$

$$\psi_2 = 0,0$$

Primjenom koeficijenta r modificiraju se učinci prednapinjanja u graničnom stanju uporabivosti (ukoliko su primjenjene prikladne mjere kao što je izravno mjerenje sile prednapinjanja):

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

Nacionalnim dodatkom dane su preporučene vrijednosti koeficijenata k_1 , k_2 , k_3 i k_5 , koji se koriste u izrazima za ograničenje naprezanja:

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

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

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

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

Potrebno je provesti provjere za bruto karakteristike presjeka. Kako bi se provjerila raspucalost presjeka potrebno je dobiti vrijednost kritičnog momenta raspucalosti. Ukoliko je premašena vrijednost vlačne čvrstoće betona f_{ctm} , presjek se smatra raspucalim. Proračun naprezanja proveden je pomoću računalnog programa Mathcad.

Stanje izgradnje t=0 (karakteristična kombinacija, sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

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

$$g_{k,1} = 6,0 \text{ kN/m}$$

$$M_{gk,1} = \frac{g_{k,1} \cdot l^2}{8}$$

$$M_{gk,1} = \frac{6 \cdot 15^2}{8} = 168,75 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} = 168,75 \text{ kNm}$$

U trenutku t=0 srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m0} = P_{m0,1} = 699,6 \text{ kN}$$

U trenutku t=0 karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k0} = r \cdot P_{m0} = 1 \cdot 699,6 = 699,6 \text{ kN}$$

Moment savijanja u trenutku pojave prve pukotine iznosi (vlak na gornjem rubu):

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

$$M_{cr} = 0,53 \cdot 10^8 \cdot \left(-3,2 - \frac{699,6 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 10^5} + \frac{699,6 \cdot 10^3 \cdot 492}{0,53 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 201,08 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 168,75 \text{ kNm} < M_{cr} = 201,08 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -0,16 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -0,451 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1235,15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = -39,13 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = -6,097 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$-0,16 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-0,16 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi A_{s1} za karakterističnu kombinaciju (vlak):

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

$$-39,13 \text{ MPa} \leq 0,8 \cdot 00 \text{ MPa}$$

$$-39,13 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1235,15 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 \text{ MPa}$$

$$1235,15 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Naprezanje na donjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced1} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$-6,097 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-6,097 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Zadovoljena je kontrola naprezanja.

Stanje eksploatacije $t=\infty$ (karakteristična kombinacija, sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

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

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

$$M_{Ed,rare} = \left(\frac{(6,0 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \frac{6 \cdot 15^2}{8} = 618,75 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty} = 626,4 = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 626,4 = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (vlak na donjem rubu):

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

$$M_{cr} = 0,46 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{626,4 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 10^5} + \frac{626,4 \cdot 10^3 \cdot 492}{0,46 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 575,49 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 618,75 \text{ kNm} > M_{cr} = 575,49 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, stoga se proračun provodi za raspucalo stanje odnosno stanje naprezanja

II (na donjem vlačnom rubu naprezanje je nula).

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -10,042 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -61,573 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1206,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 75,452 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = 0,000 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$-10,042 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-10,042 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi A_{s1} za karakterističnu kombinaciju (vlak):

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

$$75,45 \text{ MPa} \leq 0,8 \cdot 500 \text{ MPa}$$

$$75,45 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1206,3 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 \text{ MPa}$$

$$1206,3 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Zadovoljena je kontrola naprezanja.

Provjera naprezanja za nazovistalnu kombinaciju (sredina raspona, $t=\infty$)

Nazovistalna kombinacija:

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

Za nazovistalnu kombinaciju opterećenja, moment savijanja u sredini polja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(6 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 450 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 626,4 = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (na donjem rubu vlak):

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

$$M_{cr} = 0,46 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{626,4 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 10^5} + \frac{626,4 \cdot 10^3 \cdot 492}{0,46 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 575,49 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm} = 450 \text{ kNm} < M_{cr} = 575,49 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -5,135 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -32,87 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1138,81 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 1,947 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

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

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za nazovistalnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$$

$$-5,135 \text{ MPa} \leq 0,45 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-5,135 \text{ MPa} < 15,75 \text{ MPa}$$

Kontrola naprezanja je zadovoljena.

3.6.2 Granično stanje pukotina

Za čestu kombinaciju opterećenja, u trenutku neposredno prije raspucavanja, promatra se vlačna zona T presjeka koja se nalazi u rebro presjeka.

Minimalna armatura, potrebna za ograničenje širine pukotina, dobiva se prema izrazu:

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

gdje je:

k_c – koeficijent kojim se razmatra raspodjela naprezanja unutar presjeka, netom prije raspucavanja

Za naprezanje koje se javlja kao posljedica savijanja (za rebro T presjeka) vrijedi:

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

σ_c – predstavlja srednje naprezanje u betonu za promatrani dio presjeka

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h}$$

N_{Ed} – uzdužna sila koja se javlja kod graničnog stanja uporabivosti kao posljedica prednapinjanja i opterećenja (pozitivna ukoliko je tlačna)

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 626,4 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{626,4 \cdot 10^3}{200 \cdot (1100 - 100)} = 3,13 \text{ MPa}$$

k_1 – koeficijent kojim se razmatraju efekti na raspodjelu naprezanja, kao posljedica djelovanja uzdužne sile

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

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

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

$$h = 1100 - 100 = 1000 \text{ mm} > 1000 \text{ mm}$$

$$h^* = 1 \text{ m}$$

$f_{ct,eff}$ – vlačna čvrstoća u trenutku nastanka prve pukotine

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

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

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{3,13}{1,5 \cdot \left(\frac{1100}{1000}\right) \cdot 3,2} \right] \leq 1$$

$$k_c = 0,16 < 1$$

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

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

A_{ct} – vlačna površina presjeka neposredno prije pojave prve pukotine

$$A_{ct} = b_w \cdot z_d = 20 \cdot 59,2 = 1184 \text{ cm}^2$$

U vlačnoj zoni se nalazi:

$$A_{s1} = 3\phi 16 (6,03 \text{ cm}^2)$$

Steel stress ² [MPa]	Maximum bar size [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 12: Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki

Za najveći promjer šipki $\phi 16$ i ograničenje širine pukotina $w_k=0,2 \text{ mm}$, sa slike 12 se očita naprezanje u nenapetoj armaturi:

$$\sigma_s = 200 \text{ MPa}$$

$$A_{s,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{0,20 \cdot 0,65 \cdot 3,2 \cdot 1,866 \cdot 10^5}{200} = 3,88 \text{ cm}^2$$

Za ograničenje širine pukotina, minimalna armatura iznosi $A_s = 3,88 \text{ cm}^2$, a prethodno je proračunom dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi $A_{s1} = 3\phi 16 (6,03 \text{ cm}^2)$

Potrebno je provesti provjeru naprezanja za čestu kombinaciju, u sredini raspona, za $t=\infty$.

Česta kombinacija djelovanja:

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

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

$$M_{Ed,frequ} = \left(\frac{(6 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0,2$$

$$M_{Ed,frequ} = 483,75 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 626,4 = 626,4 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (na donjem rubu vlak):

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

$$M_{cr} = 0,46 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{626,4 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 10^5} + \frac{626,4 \cdot 10^3 \cdot 0,492}{0,46 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 267,57 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,frequ} = 483,75 \text{ kNm} > M_{cr} = 267,57 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, stoga se provodi proračun za raspucalo stanje odnosno za stanje naprezanja II.

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -5,89 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -37,433 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1145,205 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 9,029 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

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

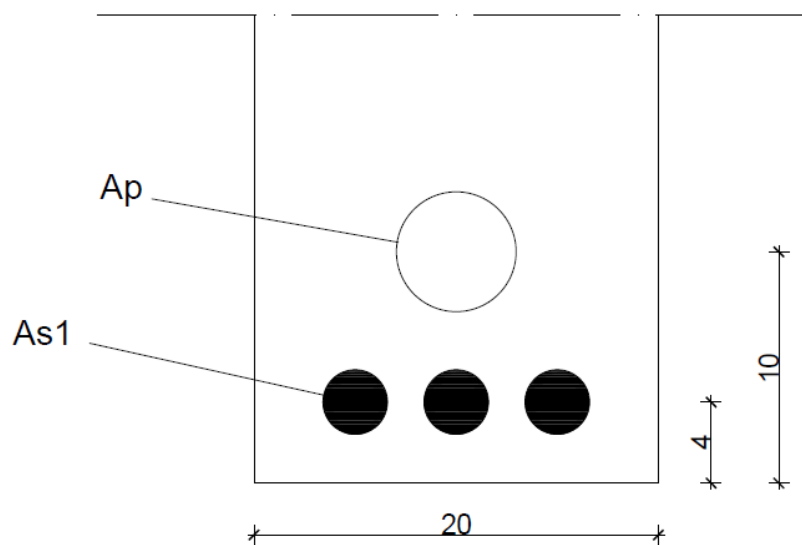
$\sigma_{s1} = 9,029 \text{ MPa}$ prema Mathcadu

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$, prema slici 12, dobiva se da je najveći mogući promjer šipki 32 mm. Proračunom je dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi promjer $\phi 16$, prema tome kriterij je zadovoljen.

Steel stress ² [MPa]	Maximum bar spacing [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

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$, prema slici 13, dobiva se da je najveći dopušteni razmak između osi šipki 150 mm. Kriterij je zadovoljen.



Slika 14: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

3.6.3 Granično stanje deformacija

Provodi se provjera za nazovistalnu kombinaciju opterećenja, u sredini raspona, za $t=\infty$.
 Provjera se provodi za idealno, stanje naprezanja I.

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

Za nazovistalnu kombinaciju djelovanja, moment savijanja u sredini polja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(6 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 450 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 626,4 \text{ kN}$$

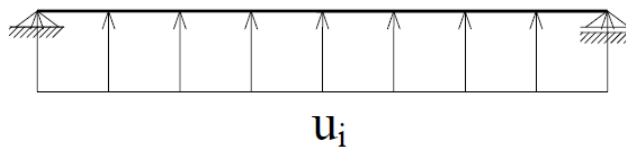
Proračunski modul elastičnosti betona iznosi:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \rho} = \frac{34000}{1 + 3,1} = 8292,68 \text{ MPa}$$

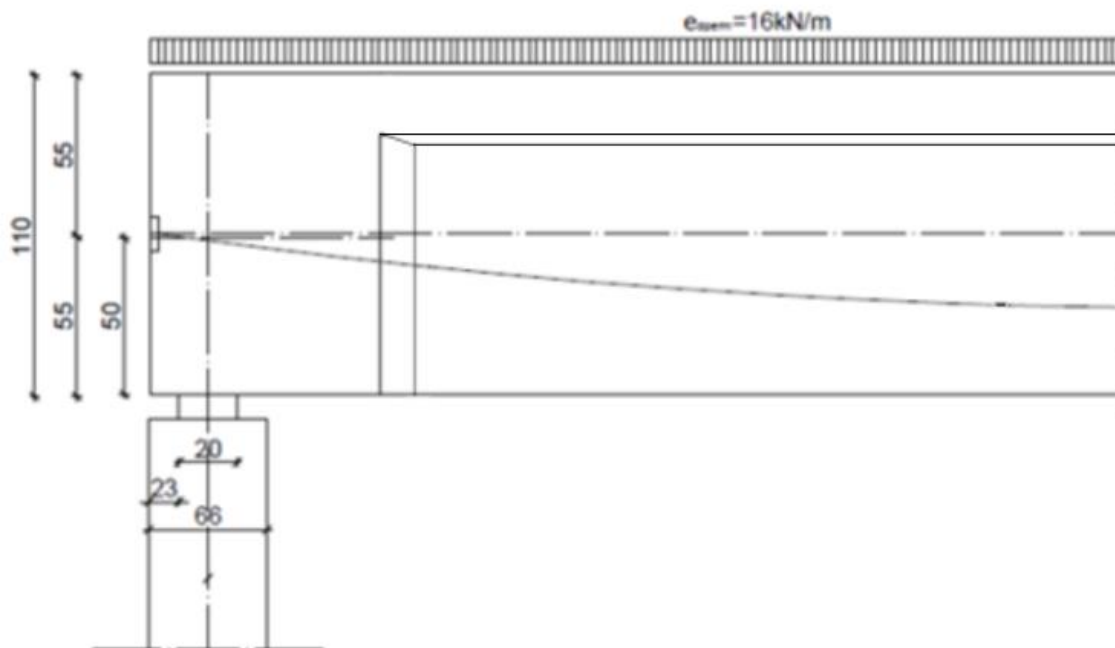
Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje u_1 i u_2 :

Natega 1:

$$u_1 = -P_{m\infty,1} \cdot \frac{8 \cdot f_1}{l_{tot}^2} = -626,4 \cdot \frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} = -9,19 \text{ kN/m}$$



Slika 15: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje

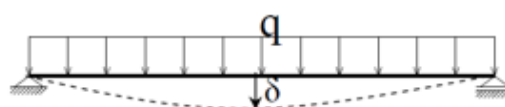


Slika 16: Položaj koncentriranog momenta

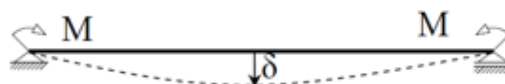
Koncentrirani moment u težištu betonskog presjeka, na oba kraja nosača:

$$M = -P_{m\infty,1} \cdot 0,5 = -626,4 \cdot 0,5 = -313,2 \text{ kNm}$$

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



$$\delta = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}$$



Slika 17: Izrazi za proračun progiba slobodno oslonjene grede

Progib sredine grede:

$$\delta = \frac{5 \cdot (g_{k,1} + g_{k,2} + \psi_2 \cdot q_{k,1} + u_1) \cdot l^4}{384 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c} + \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c}$$

$$\delta = \frac{5 \cdot (6 \cdot 10^3 + 10,0 \cdot 10^3 + 0 \cdot 6 \cdot 10^3 - 9,19 \cdot 10^3) \cdot 15^4}{384 \cdot 8292,68 \cdot 0,027} + \frac{313,2 \cdot 10^3 \cdot 15^2}{8 \cdot 8292,68 \cdot 0,027}$$

$$\delta = 0,059 \text{ m} = 5,9 \text{ cm}$$

Granični progib iznosi:

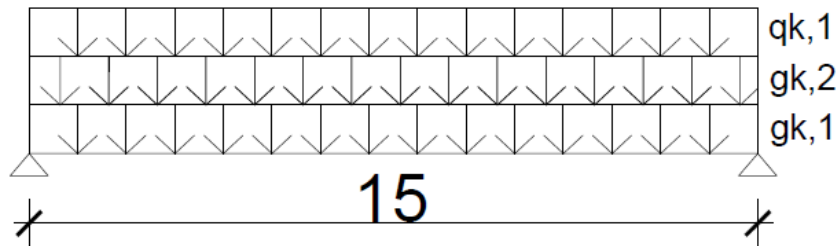
$$\frac{l}{250} = \frac{1500}{250} = 6 \text{ cm}$$

$$\delta = 5,9 \text{ cm} < 6,0 \text{ cm}$$

Progib zadovoljava.

4 PRORAČUN PREDNAPETOG NOSAČA – PRAVOKUTNI PRESJEK

4.1 STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA



Slika 18: Statički sustav prednapetog nosača

Površina betonskog presjeka (pravokutni presjek – slika 20 u idućem poglavlju):

$$A_c = b_w \cdot h = 20 \cdot 110$$

$$A_c = 2200 \text{ cm}^2 = 0,22 \text{ m}^2$$

Stalno djelovanje

- Krovni nosač: $g_{k,1} = \gamma \cdot A_c = 25 \cdot 0,22 = 5,5 \text{ kN/m}$
- Krovna konstrukcija: porasti beton ($\gamma = 7,2 \text{ kN/m}^3$) 20 cm + izravnavajući sloj + hidroizolacija ($0,23 \text{ kN/m}^2$). Širina ploče iznosi 6,0 m.

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

$$g_{k,1} + g_{k,2} = 5,5 + 10,0 = 15,5 \text{ kN/m}$$

Opterećenje snijegom

- $s = 1,0 \text{ kN/m}^2$
- Za ploču širine 6,0 m: $q_{k,1} = s \cdot 6,0 = 1,0 \cdot 6,0 = 6,0 \text{ kN/m}$
- Prema EN 1991-1-3:2003, za lokacije ispod 1000 m.n.v., preporučene su sljedeće vrijednosti koeficijenata kombinacije za snijeg:

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

Prednapinjanje

- Vođenje natega provodi se po paraboli u jednoj razini.
- Jednadžba parabole opisana je izrazom:

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

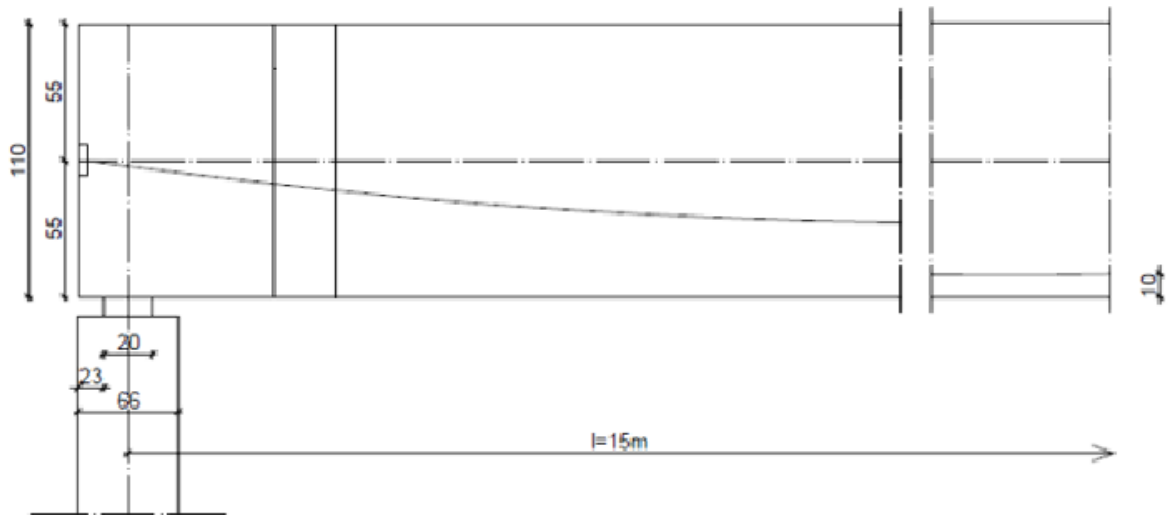
gdje je f oznaka za strelicu parabole natege.

- Kut skretanja natege opisan je izrazom:

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

- Strelice parabole natege iznose:

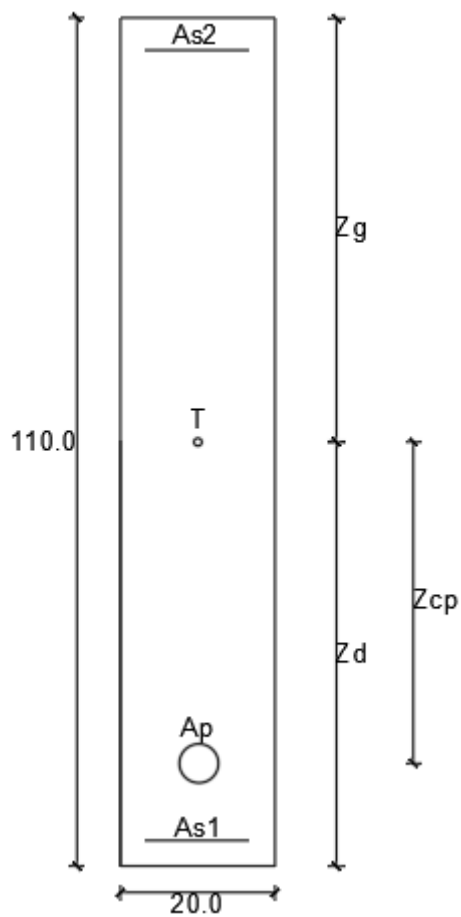
- Za razinu natege : $f_1 = 55,0 - 10 = 45 \text{ cm}$



Slika 19: Položaj natega u nosaču

4.2 PROCJENA VELIČINA

4.2.1 Procjena površine čelika za prednapinjanje



$$b_w = 20 \text{ cm}$$

$$h = 110 \text{ cm}$$

Slika 20: Poprečni presjek nosača – pravokutni presjek

Površina betonskog presjeka:

$$A_c = b_w \cdot h = 20 \cdot 110$$

$$A_c = 2200 \text{ cm}^2 = 0,22 \text{ m}^2$$

Udaljenost između težišta betona i donjeg ruba presjeka određena je izrazom:

$$z_d = \frac{b_w \cdot h \cdot \frac{h}{2}}{A_c}$$

$$z_d = \frac{20 \cdot 110 \cdot \frac{110}{2}}{2200}$$

$$z_d = 55 \text{ cm}$$

Udaljenost između gornjeg ruba presjeka i težišta betona određena je izrazom:

$$z_g = h - z_d = 110 - 55 = 55,0 \text{ cm}$$

Vrijednost momenta tromosti betonskog presjeka dobiva se iz izraza:

$$I_c = \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_w \cdot h) \cdot \left(z_d - \frac{h}{2}\right)^2$$

$$I_c = \frac{20 \cdot 110^3}{12} + (20 \cdot 110) \cdot \left(55 - \frac{110}{2}\right)^2$$

$$I_c = 0,022 \text{ m}^4$$

Moment otpora gornjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_g = \frac{I_c}{z_g} = \frac{0,022}{0,55} = 0,04 \text{ m}^3$$

Moment otpora donjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_d = \frac{I_c}{z_d} = \frac{0,022}{0,55} = 0,04 \text{ m}^3$$

Udaljenost gornjeg ruba jezgre:

$$k_g = \frac{W_d}{A_c} = \frac{0,04}{0,22} = 0,182 \text{ m}$$

Udaljenost donjeg ruba jezgre:

$$k_d = \frac{W_g}{A_c} = \frac{0,04}{0,22} = 0,182 \text{ m}$$

Udaljenost težišta betonskog presjeka od težišta prednapete armature:

$$z_{cp} = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$$

Srednja osna vlačna čvrstoća betona iznosi:

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

Nazovistalnu kombinaciju opterećenja proračunavamo prema izrazu:

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

Koeficijent kombinacije za snijeg iznosi $\psi_2 = 0$.

Za nazovistalnu kombinaciju djelovanja u sredini polja moment savijanja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(5,5 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6,0 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 436 \text{ kNm}$$

Da bi se procijenila površina prednapete armature potrebno je postaviti uvjet da na donjem rubu presjeka nije premašena srednja vlačna čvrstoća betona za nazovistalnu kombinaciju opterećenja. Prilikom određivanja progiba potrebno je krutost na savijanje poprečnog presjeka razmatrati za stanje naprezanja I, odnosno za stanje neraspucanog betona. Pomoću jednadžbe, iz dopuštenih naprezanja, može se odrediti konačna sila prednapinjanja:

$$-\frac{P_{m\infty}}{A_c} - \frac{P_{m\infty} \cdot z_{cp}}{W_d} + \frac{M_{max}}{W_d} = \sigma_{ct\infty},$$

iz čega slijedi da je:

$$P_{m\infty} = \frac{M_{max} - \sigma_{ct\infty} \cdot W_d}{z_{cp} + k_g}$$

$P_{m\infty}$ predstavlja silu prednapinjanja nakon svih gubitaka (u trenutku $t = \infty$), a $\sigma_{ct\infty}$ predstavlja dopušteni vlačni napon u betonu prilikom eksploatacije.

$$P_{m\infty} = \frac{M_{Ed,perm} - f_{ctm} \cdot W_d}{z_{cp} + k_g} = \frac{43600 - 0,32 \cdot 0,04 \cdot 10^6}{45 + 18,2}$$

$$P_{m\infty} = 487,34 \text{ kN}$$

Pomoću koeficijenta „m“ u obzir se uzimaju vremenski gubici naprezanja u čeliku uzrokovanih puzanjem, skupljanjem i relaksacijom.

Kako bi se uzeli u obzir početni gubici, koji nastaju kao posljedica trenja, prokliznuća klina i elastične deformacije, potrebno je primijeniti koeficijent „ δ “.

Pretpostavlja se da ukupni gubici iznose 25%, odnosno da je:

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

Potrebna površina prednapete armature dobiva se iz izraza:

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

Najveće naprezanje u natezi (sila na preši) određuje se kao manja vrijednost od:

$$\sigma_{p,max,max} = \min \begin{cases} k_1 \cdot f_{pk} = 0,8 \cdot 1770 = 1416 \text{ MPa} \\ k_2 \cdot f_{p0.1,k} = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ MPa} \end{cases}$$

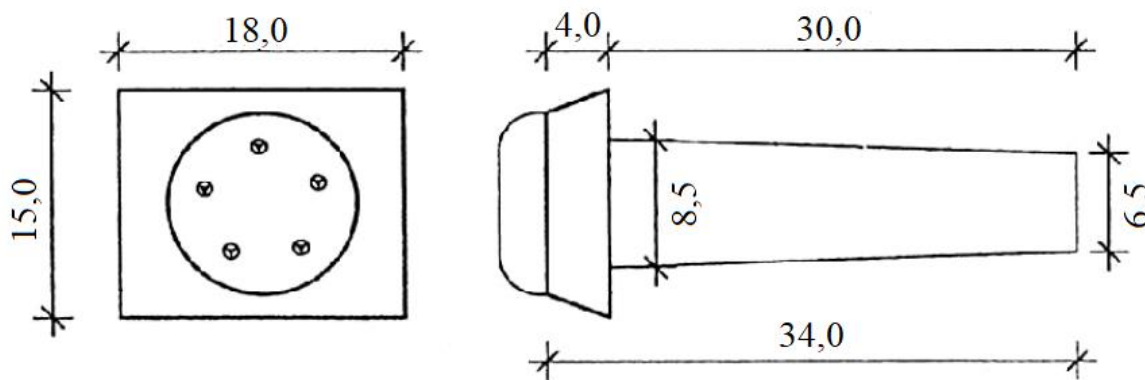
$$\sigma_{p,max,max} = 1350 \text{ MPa}$$

$$A_p = \frac{P_{m\infty}}{\delta \cdot m \cdot \sigma_{p,max}} = \frac{487,34}{0,75 \cdot 135,0} = 4,81 \text{ cm}^2$$

Usvaja se jedna natega ukupne površine:

$$A_p = 5,5 \text{ cm}^2$$

Nategu čini ukupno 5 užadi, a površina presjeka svakog užeta iznosi 1,1 cm². Iz toga slijedi da je površina presjeka natega (sastavljene od 5 užadi) jednaka 5,5 cm².



Slika 21 : Skica i dimenzije natega

4.2.2 Procjena površine čelika za armiranje

Proračunska granica popuštanja čelika za armiranje f_{yd} iznosi:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

Proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje f_{pd} iznosi:

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

Statička visina čelika za prednapinjanje iznosi:

$$d_p = h - 10 = 110 - 10 = 100 \text{ cm}$$

Statička visina betonskog čelika, na strani sigurnosti, usvaja se da je:

$$d_s = d_p = 100,0 \text{ cm}$$

Vrijednost kraka unutarnjih sila uzima se kao:

$$z_p = z_s = z \approx 0,9 \cdot d_p = 0,9 \cdot 100 = 90,0 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

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

$$M_{Ed} = \left(\frac{(5,5 + 10,0)}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,35 + \left(\frac{6,0}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,5$$

$$M_{Ed} = 841,64 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da do popuštanja dolazi u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature dobiva se prema sljedećem izrazu:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed} - A_p \cdot \sigma_p \cdot z_p}{f_{yd} \cdot z_s} = \frac{M_{Ed} - A_p \cdot f_{pd} \cdot 0,9 \cdot d_p}{f_{yd} \cdot 0,9 \cdot d_p}$$

$$A_{s1} = \frac{84164 - 5,0 \cdot 130,44 \cdot 0,9 \cdot 100}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 100} = 6,5 \text{ cm}^2$$

Odabire se vlačna armatura $A_{s1} = 3\text{Ø}20$ (9,42 cm²).

Osim vlačne armature, odabire se i tlačna armatura $A_{s2} = 4\text{Ø}12$ (4,52 cm²).

4.2.3 Geometrijske karakteristike nosača

Primjenjuje se idealizirani poprečni presjek:

- Zaštitna cijev natege ima vanjski promjer veličine $\phi_{duct} = 65 \text{ mm}$

- Površina presjeka čelika za prednapinjanje za nategu iznosi $A_p = 5,5 \text{ cm}^2$

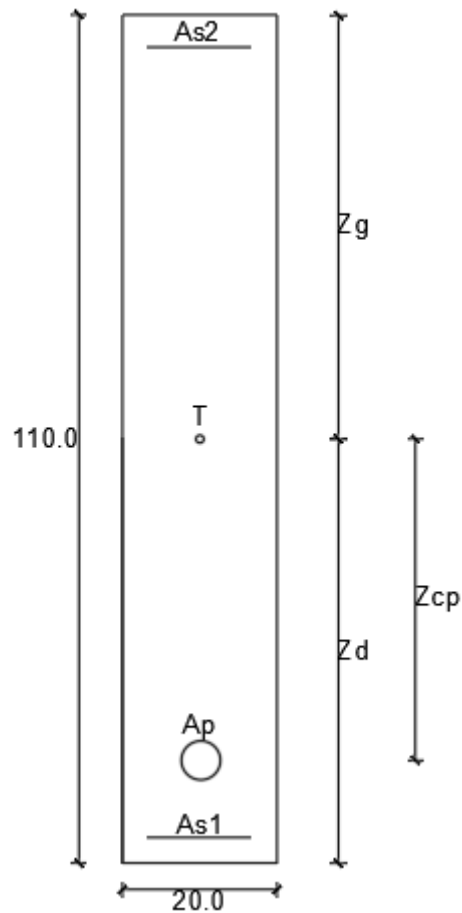
$$\alpha_{E,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{34000} = 5,74$$

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

Tablicom 1 prikazane su vrijednosti geometrijskih karakteristika nosača za bruto, neto i idealan presjek, proračunane pomoću računalnog programa Mathcad. Za proračun se koriste bruto geometrijske karakteristike presjeka.

Tablica 10: Geometrijske karakteristike nosača za bruto, neto i idealan presjek

BETON	$A_c \text{ [m}^2\text{]}$	$I_c \text{ [m}^4\text{]}$	$z_d \text{ [m]}$	$z_g \text{ [m]}$	$z_{cp,1} \text{ [m]}$	$z_{cp} \text{ [m]}$
Bruto	0,22	0,022	0,55	0,55	0,1	0,45
Neto	0,213	0,021	0,562	0,538	0,1	0,462
Idealno	0,248	0,029	0,548	0,552	0,1	0,448



Slika 22 : Geometrijske karakteristike presjeka nosača

4.3 NAJVEĆA NAPREZANJA U NATEZI

U prethodnom poglavlju određeno je najveće naprezanje u natezi, odnosno sila na preši:

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

Najveća sila u natezi iznosi:

$$P_{\max.\max} = \sigma_{p \max.\max} \cdot A_p = 135,0 \cdot 5,5 = 742,5 \text{ kN}$$

Neposredno nakon napinjanja, naprezanje u čeliku smije iznositi:

$$\sigma_{pm0.\max} = \min \begin{cases} k_7 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1770 = 1327,5 \text{ MPa} \\ k_8 \cdot f_{p0.1,k} = 0,85 \cdot 1500 = 1275 \text{ MPa} \end{cases}$$

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

Neposredno nakon napinjanja, sila u čeliku za prednapinjanje smije iznositi:

$$P_{m0.\max} = \sigma_{pm0.\max} \cdot A_p = 127,5 \cdot 5,5 = 701,25 \text{ kN}$$

4.4 GUBICI SILE PREDNAPINJANJA

4.4.1 Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

Prednapinjanje natege vrši se u presjeku gdje je $x=0$ m. S obzirom da se prednapinjanje natege izvodi na različitim krajevima, gubici uzrokovani elastičnim skraćanjem betona su zanemarivo mali.

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

4.4.2 Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

Gubitak sile prednapinjanja kao posljedica trenja opisan je izrazom:

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

iz čega slijedi da je:

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

μ je koeficijent trenja između cijevi i natege te iznosi $\mu = 0,21$.

θ predstavlja zbroj kutova skretanja natege na duljini x i neovisan je o predznaku i smjeru.

Izražava se u radijanima, a za slučaj vođenja natege po paraboli definiran je pomoću izraza:

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

Koeficijent $k = 0,0055 \text{ m}^{-1}$ predstavlja neželjeni kut skretanja po jedinici duljine.

Natega $f=0,45$ m

$$\theta(x) = \frac{8 \cdot x \cdot f}{l_{tot}^2} = \frac{8 \cdot x \cdot 0,45}{15,66^2} = 0,01468 \cdot x$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu \cdot (\theta+k \cdot x)}) = 1 - e^{-\mu(0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}$$

Tablica 11: Prikaz odnosa gubitka sile prednapinjanja zbog trenja i početne sile prednapinjanja po presjecima

Natega	$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu \cdot (\theta+k \cdot x)})$		
	x=0	x=7,83	x=15,66
1 (f=0,45 m)	0	0,0114	0,0226

4.4.3 Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

U presjeku u kojem se vrši prednapinjanje dolazi do smanjenja početne sile prednapinjanja P_{max} kao posljedica prokliznuća klina. Sila se smanjuje za vrijednost ΔP_{sl} duž duljine djelovanja prokliznuća l_{sl} .

Potrebno je proračunati i duljinu utjecaja prokliznuća klina l_{sl} i gubitak sile prednapinjanja ΔP_{sl} da bi spoznali tok sile prednapinjanja duž natege.

Kao mjerodavan podatak za proračun, koristi se vrijednost prokliznuća klina $\Delta l_{sl} = 2,0 \text{ mm}$ koju definira proizvođač.

1. Natega $f=0,45 \text{ m}$

$$P_{max} = P_{max,max} = 742,5 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \cdot \left(\frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{742,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 8,256 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 742,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot 8,256 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 51950 \text{ N} = 51,95 \text{ kN}$$

Za sve udaljenosti, odnosno presjeke, koji prelaze duljinu djelovanja prokliznuća klina l_{sl} vrijedi:

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 742,5 \cdot (1 - e^{-0,21 \cdot (0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}) \quad \text{za } x \geq 7,83 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 7,83) = 24,23 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 15,66) = 47,67 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,83) = 742,5 - 24,23 = 718,3 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,66) = 742,5 - 47,67 = 694,83 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(l_{sl} = 7,83) = 718,3 \text{ kN} > P_{m0,max} = 701,25 \text{ kN}$$

Potrebno je smanjiti silu na preši kako bi vrijedilo:

$$P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25 \text{ kN}$$

Iz uvjeta da je $P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25$, pomoću računalnog programa Mathcad, određene su vrijednosti duljine prokliznuća klina i gubitka sile prednapinjanja za nategu 1 i nategu 2 prikazane tablicom 3.

Tablica 12: Vrijednosti gubitka sile prednapinjanja i duljine prokliznuća klina dobivene Mathcadom

Uvjet da je $P_{m0}(x) \leq P_{m0,max} = 701,25$			
Natega	P_{max} [kN]	ΔP_{sl} [kN]	l_{sl} [m]
1	726,5	51,39	8,3469

Provjera dobivenih vrijednosti:

1. Natega $f=0,45$ m

$$P_{max} = 726,5 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot \mu \cdot \left(\frac{8 \cdot f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 \cdot 195000 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{726,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 8,3469 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot 726,5 \cdot 0,21 \cdot 8,3469 \cdot \left(\frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 51,39 \text{ kN}$$

Za sve udaljenosti, odnosno presjeke, koji prelaze duljinu djelovanja prokliznuća klina l_{sl} vrijedi:

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 726,5 \cdot (1 - e^{-0,21 \cdot (0,01468 \cdot x + 0,0055 \cdot x)}) \quad \text{za } x \geq 8,3469$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 8,3469) = 25,248 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 15,66) = 46,648 \text{ kN}$$

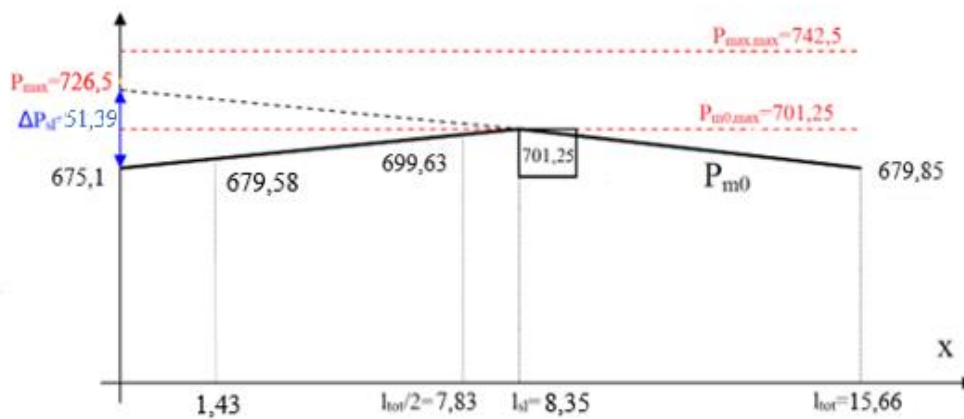
$$P_{m0}(8,3469) = 726,5 - 25,248 = 701,25 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(15,66) = 726,5 - 46,648 = 679,85 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 726,5 - 51,39 = 675,1 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(7,83) = 675,1 + \frac{701,25 - 675,1}{8,3469} \cdot 7,83 = 699,63 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(1,43) = 675,1 + \frac{701,25 - 675,1}{8,3469} \cdot 1,43 = 679,58 \text{ kN}$$



Slika 23: Dijagram gubitaka sile prednapinjanja za nategu (konačne vrijednosti)

Tablica 13: Vrijednosti gubitka sile prednapinjanja za nategu 1 (konačne vrijednosti)

X [m]	0	7,83	15,66
P_{m0} [kN]	675,1	699,63	679,85

4.4.4 Vremenski gubici

Vremenski gubici nastaju se kao posljedica relaksacije, skupljanja i puzanja, a proračunavaju se pomoću izraza:

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

gdje je:

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

ε_{cs} – procijenjena deformacija skupljanja dobivena iz mathcad-a koja iznosi $\varepsilon_{cs} = -0,47578 \text{ ‰} = -0,00047578$

$E_p = 195 \text{ 000 MPa}$ – modul elastičnosti čelika za prednapinjanje

$E_{cm} = 34 \text{ 000 MPa}$ – modul elastičnosti betona

$\Delta \sigma_{pr}$ – apsolutna vrijednost promjene naprezanja u nategama uslijed opuštanja čelika za prednapinjanje, u trenutku t na mjestu x . Određuje se za naprezanje $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 Q)$, koje predstavlja početno naprezanje u kabelu uslijed nazovi-stalnih djelovanja i prednapinjanja.

$\varphi(t, t_0) = 2,141$ – koeficijent puzanja dobiven iz mathcad-a

$\sigma_{c,QP}$ – naprezanje betona u visini natege od prednapinjanja, vlastite težine te drugih nazovi-stalnih djelovanja

$A_c = 0,22 \text{ m}^2$ – ploština betonskog presjeka

$A_p = 5,0 \text{ cm}^2$ – ploština presjeka natega u promatranom području

$I_c = 0,022 \text{ m}^4$ – moment tromosti betonskog presjeka

$z_{cp} = 0,45 \text{ m}$ – resultantna udaljenost između natege i težišta betonskog presjeka

Prema sljedećem izrazu proračunava se gubitak naprezanja uzrokovan opuštanjem za razred 2 u koji spadaju žice i užadi niske relaksacije:

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

gdje je:

σ_{pi} – najveće vlačno naprezanje na kabel umanjeno za vrijednost početnih gubitaka nastalih uslijed prednapinjanja, kod naknadnog prednapinjanja

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

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

ρ_{1000} – vrijednost relaksacijskog gubitka pri srednjoj temperaturi od 20°C i 1000 sati nakon prednapinjanja. Izražava se u postocima (%), a za razred 2 iznosi $\rho_{1000} = 2,5$.

Naprezanje u nategama na sredini raspona nakon početnih gubitaka iznosi:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{m0,1}}{A_{p1}} = \frac{699,63 \cdot 10^3}{5,5 \cdot 10^{-4}} = 1272,05 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1272,05}{1770} = 0,719$$

Gubitak naprezanja nakon 500 000 sati uzrokovan opuštanjem:

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

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,719} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,719)} \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,042$$

Trenutak konačne relaksacije – promjena naprezanja uzrokovana relaksacijom čelika nakon 500 000 sati odnosno otprilike 57 godina:

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

$$\Delta\sigma_{pr} = 1272,05 \cdot \left[0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,719} \cdot \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,719)} \cdot 10^{-5} \right]$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 53,99 \text{ MPa}$$

Moment savijanja na polovici raspona od nazovistalnih djelovanja bez P_{m0} :

$$M_{QP} = \frac{g_{k,1} + g_{k,2}}{8} \cdot l^2 = \frac{5,5 + 10,0}{8} \cdot 15^2$$

$$M_{QP} = 435,94 \text{ kNm}$$

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

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

$$\sigma_{c,QP} = \frac{435,94 \cdot 10^3 \cdot 0,45}{0,022} + \left(-\frac{699,63 \cdot 10^3}{0,22} - \frac{(699,63 \cdot 10^3) \cdot 0,45}{0,022} \cdot 0,45 \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = -0,703 \quad (\text{tlak})$$

Promjena napreznja kao posljedica puzanja, skupljanja i relaksacije (deformaciju od skupljanja i relaksacije potrebno je uzeti kao apsolutnu vrijednost, a tlačno napreznje uzeti s pozitivnim predznakom):

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

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{0,00046950 \cdot 195000 + 0,8 \cdot 53,99 - \frac{195000}{34000} \cdot 2,141 \cdot 0,45}{1 + \frac{195000}{34000} \cdot \frac{5,5 \cdot 10^{-4}}{0,22} \cdot \left(1 + \frac{0,22}{0,022} \cdot 0,45^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 2,141]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 115,62 \text{ MPa}$$

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

$$\Delta P_{c+s+r} = \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 115,62 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4} = 63,59 \text{ kN}$$

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

Natega

$$P_{m\infty} = P_{m0} - \Delta P_{c+s+r} = 699,63 - 63,59 = 636,04 \text{ kN}$$

Tablica 14: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu nakon vremenskih gubitaka

x [m]	0	7,83	15,66
$P_{m0}(x)$ [kN]	675,1	699,63	679,85
$P_{m\infty}(x)$ [kN]	611,51	636,04	616,26

4.5 GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Proračunska čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 \cdot \frac{35}{1,5} = 23,3 \text{ MPa}$$

α_{cc} je koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni učinci na tlačnu čvrstoću te neželjeni učinci kao posljedica načina na koji je beton opterećen. Preporučena vrijednost prema EN 1992-1-1 za α_{cc} je 1, te je prihvaćena nacionalnim dodatkom.

Proračunska granica popuštanja čelika za armiranje:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} \quad \rightarrow \text{ za uzdužnu armaturu i vilice}$$

Proračunska granica popuštanja čelika za prednapinjanje:

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

Vrijednost deformacije pri proračunskoj granici popuštanja čelika za prednapinjanje:

$$\varepsilon_{pd} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1304,35}{195000} = 6,69 \cdot 10^{-3} = 6,69 \text{ ‰}$$

4.5.1 Savijanje s uzdužnom silom

4.5.1.1 Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=\infty$

Statička visina čelika za prednapinjanje iznosi:

$$d_p = h - hf = 110 - 10 = 100 \text{ cm}$$

Statička visina čelika za armiranje na strani sigurnosti iznosi:

$$d_s = d_p = 100 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

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

$$M_{Ed} = \left(\frac{(5,5 + 10,0)}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,35 + \left(\frac{6}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,5$$

$$M_{Ed} = 841,64 \text{ kNm}$$

Pri postupku dimenzioniranja razmatra se da je ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje na strani sigurnosti ($\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p$).

Pretpostavka je da neutralna os prolazi kroz ploču.

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d_s^2 \cdot f_{cd}} = \frac{84164}{20 \cdot 100^2 \cdot 2,33} = 0,18 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Iz tablica za dimenzioniranje pravokutnog presjeka, za betone razreda čvrstoće C12/15 do C50/60, očitava se:

$$\varepsilon_{c,ed2} = -3,5 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s1} = 19,5 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,25$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,896$$

$$\mu_{Ed} = 0,181$$

Pretpostavlja se da dolazi do popuštanja u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature:

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

$$A_{s1} = \frac{84164 - 5,5 \cdot 130,44 \cdot 0,896 \cdot 100}{43,48 \cdot 0,896 \cdot 100} = 5,1 \text{ cm}^2$$

Odabire se armatura 3Ø16 (6,03 cm²)

U graničnom stanju ravnoteže, nakon raspucavanja, čelik za prednapinjanje poprima deformaciju:

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_{s1} = 16,0 \text{ ‰}$$

Naprezanje u natezi nakon svih gubitaka na sredini raspona:

$$\sigma_{pm\infty} = \frac{P_{m\infty,1}}{A_{p1}} = \frac{636,04 \cdot 10^3}{5,5 \cdot 10^{-4}} = 1156,44 \text{ MPa}$$

Predizduženje (preddeformacija) iznosi:

$$\varepsilon_{pm\infty} = \frac{\sigma_{pm\infty}}{E_p} = \frac{1156,44}{195000} = 5,93 \cdot 10^{-3} = 5,93 \text{ ‰}$$

Za granično stanje ravnoteže, ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje može se proračunati prema izrazu:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p = 5,93 + 16 = 21,93\text{‰}$$

$$\varepsilon_p = 21,93 \text{‰} > \varepsilon_{pd} = 6,69 \text{‰} \rightarrow \text{u čeliku za prednapinjanje došlo je do popuštanja}$$

4.5.1.2 *Provjera najvećeg i najmanjeg postotka armiranja*

Nacionalnim dodatkom definirana je preporučena minimalna ploština presjeka armature,

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

gdje b_t predstavlja srednju širinu vlačnog područja. Kod greda T-presjeka u proračun za b_t je potrebno uvrstiti samo širinu rebra.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{3,2}{500} \cdot 20 \cdot 106 \geq 0,0013 \cdot 20 \cdot 106$$

$$A_{s,min} = 3,53 > 2,756$$

$$A_{s,min} = 3,53 \text{ cm}^2$$

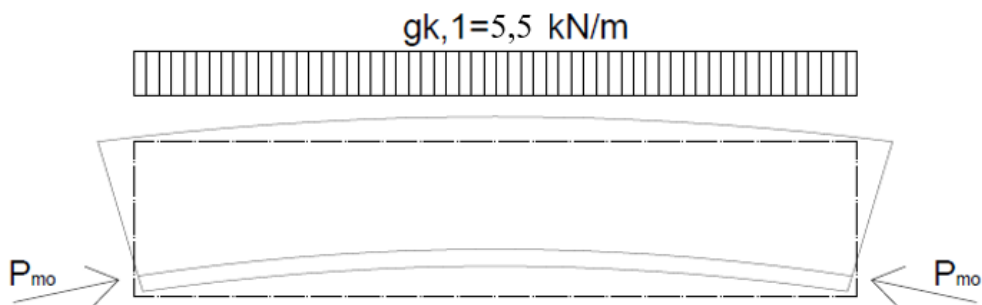
$$A_{S1,max} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 2200 = 88 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} \leq A_{S1} \leq A_{S1,max}$$

$$3,53 \text{ cm}^2 \leq 6,03 \text{ cm}^2 \leq 88 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Zadovoljeno!}$$

4.5.1.3 *Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=0$*

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



Slika 24 : Skica deformacije i unosa sile u fazi gradnje za prednapeti krovni nosač

Primjenjuju se slijedeći parcijalni koeficijenti sigurnosti:

- Za povoljno djelovanje vlastite težine $\gamma_G = 1,0$
- Za nepovoljno djelovanje prednapinjanja $\gamma_P = 1,0$

Dokaz nosivosti provodi se pomoću dimenzioniranja poprečnog presjeka u polju, u trenutku $t=0$, na savijanje s uzdužnom silom. Zanimaruje se gubitak sile prednapinjanja uzrokovan skraćanjem betona. Prednapinjanje kao predizduženje, odnosno preddeformacija, potrebno je uzeti na strani djelovanja.

Proračunski moment u polju kao posljedica djelovanja vlastite težine $g_{k,1}$:

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

$$M_{Ed,g} = \left(\frac{5,5}{8} \cdot 15^2 \right) \cdot 1,0 = 154,69 \text{ kNm}$$

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

$$N_{Ed} = -P_{m0} \cdot \gamma_P = -(P_{m0,1}) \gamma_P = -(636,04) \cdot 1,0 = -636,04 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost momenta savijanja kao posljedica djelovanja sile prednapinjanja u trenutku $t=0$ na sredini raspona:

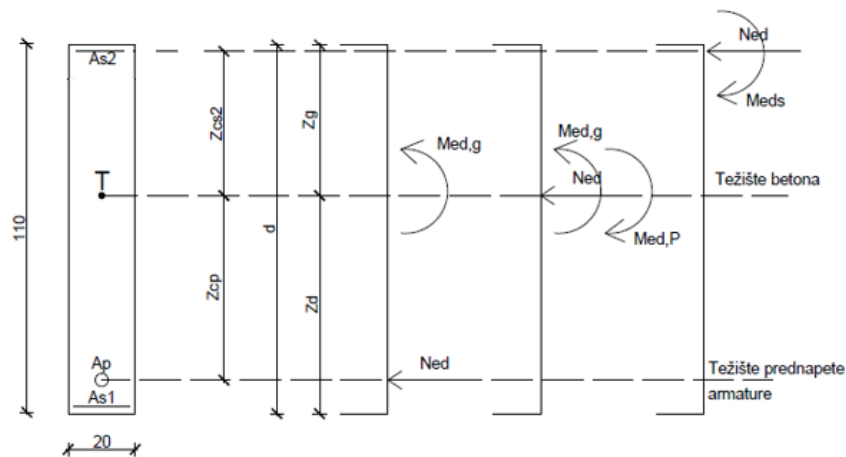
$$M_{Ed,P} = -(P_{m0} \cdot z_{cp}) \cdot \gamma_P = -((P_{m0,1}) \cdot z_{cp}) \cdot \gamma_P$$

$$M_{Ed,P} = -((636,04) \cdot 0,45) \cdot 1,0 = -286,22 \text{ kNm}$$

Rezne sile s obzirom na težište betona:

$$M_{Ed,g} + M_{Ed,P} = 154,69 - 286,22 = -131,53 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -636,04 \text{ kN}$$



Slika 25 : Skica položaja reznih sila

Udaljenost između težišta betonskog presjeka i težišta gornje armature:

$$z_{cs2} = z_g - \frac{10}{2} = 55 - \frac{10}{2} = 50 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja s obzirom na os gornje zone armature:

$$M_{Eds} = M_{Ed,g} + M_{Ed,P} - N_{Ed} \cdot z_{cs2}$$

$$M_{Eds} = -131,54 - 636,04 \cdot 0,5 = -449,56 \text{ kNm}$$

Statička visina čelika za armiranje:

$$d = h - \frac{h_f}{2} = 110 - \frac{10}{2} = 105 \text{ cm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{44956}{20 \cdot 105^2 \cdot 2,33} = 0,087 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Očitano iz tablica:

$$\varepsilon_{c,ed2} = -3,4 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = 20,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,091$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,953$$

$$\mu_{Ed} = 0,087$$

$$A_{s2} = \frac{M_{Eds}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{44956}{0,953 \cdot 105 \cdot 43,48} - \frac{636,04}{43,48} = -4,29 \text{ cm}^2$$

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

Usvaja se tlačna armatura A_{s2} $4\phi 12$ ($4,52 \text{ cm}^2$).

4.5.2 Provjera na poprečne sile

4.5.2.1 Proračunska nosivost na poprečnu silu

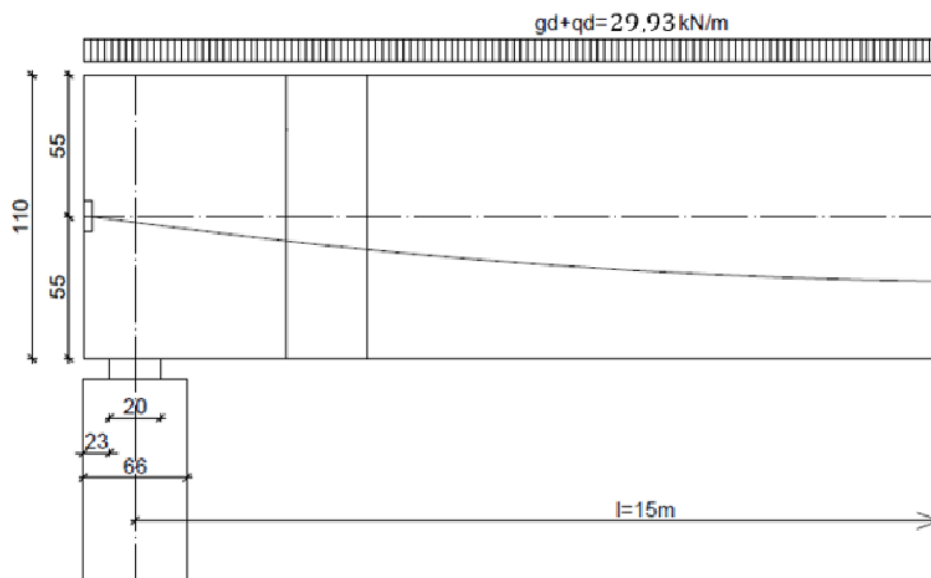
Za nagnuto vođenje natega za prednapinjanje, proračunska vrijednost poprečne sile iznosi,

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

gdje je:

V_{pd} – komponenta poprečne sile nagnute natege

V_{0d} – proračunska poprečna sila u presjeku



Slika 26 : Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Proračunsko stalno i promjenjivo djelovanje iznosi:

$$g_d + q_d = (g_{k,1} + g_{k,2}) \cdot \gamma_G + q_{k,1} \cdot \gamma_Q = (5,5 + 10,0) \cdot 1,35 + 6 \cdot 1,5$$

$$g_d + q_d = 29,93 \text{ kN/m}$$

Proračunska reducirana poprečna sila, potrebna za određivanje poprečne armature:

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

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

$$V_{0d,red} = 29,93 \cdot \left(\frac{15}{2} - 1,0 - 0,1\right)$$

$$V_{0d,red} = 191,55 \text{ kN}$$

Proračunska poprečna sila, potrebna za dokazivanje tlačnih štapova betona:

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

$$V_{0d} = 29,93 \cdot \frac{15}{2}$$

$$V_{0d} = 224,48 \text{ kN}$$

Funkcija položaja natege:

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

Prva derivacija funkcije položaja natege:

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

Nagib natega za promatrani presjek na udaljenosti $x = 0,23 + 0,20 + 1,0 = 1,43 \text{ m}$ od ruba oslonca:

Natega 1. razine:

$$\tan \alpha_1 = 4 \cdot f \cdot \left(\frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 \cdot x}{l_{tot}^2}\right) = 4 \cdot 0,45 \cdot \left(\frac{1}{15,66} - \frac{2 \cdot 1,43}{15,66^2}\right) = 0,0939$$

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

$$P_{m0,1}(1,43) = 679,58$$

Sila prednapinjanja u trenutku $t = \infty$ na udaljenosti d od ruba oslonca (lijevi oslonac):

$$P_{m\infty,1}(1,43) = P_{m0,1}(1,43) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 679,58 - 63,59 = 615,99 \text{ kN}$$

Poprečna komponenta sile prednapinjanja:

- za male kutove vrijedi $\sin \alpha = \tan \alpha$ ($\sin \alpha$ i $\gamma_p = 1$)

$$V_{pd} = P_{m\infty,1} \cdot \sin \alpha_1$$

$$V_{pd} = 615,99 \cdot 0,0939 = 57,84 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile, potrebna za određivanje poprečne armature:

$$V_{Ed,red} = V_{0d,red} - V_{pd} = 191,55 - 57,84 = 133,71 \text{ kN}$$

4.5.2.2 Proračunski potrebna poprečna armatura

Primjenjuje se postupak samostalnog odabira nagiba tlačnih štapova. Kut θ između uzdužne osi i tlačnih štapova ograničava se na:

$$1 < \cot \theta < 2,5$$

$$21,8^\circ < \theta < 45^\circ$$

Nosivost elementa na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

Minimalna vrijednost:

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

gdje je:

f_{ck} u MPa

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d \text{ [mm]}}} \leq 2$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{1000}} = 2,414 \leq 2$$

A_{sl} – površina vlačnog područja presjeka koju je potrebno sidriti za najmanje $d + l_{bd}$ iza promatranoga presjeka

$$A_{sl} = A_{s1} = 6,03 \text{ cm}^2$$

l_{bd} – proračunska duljina sidrenja

$b_w = 20 \text{ cm}$ – najmanja širina presjeka u vlačnome području

ρ_1 – koeficijent armiranja uzdužne armature

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

$$\rho_1 = \frac{6,03}{20 \cdot 100} = 0,003015 \leq 0,02$$

σ_{cp} – naprezanje kao posljedica djelovanja proračunske tlačne sile u betonu za promatrani presjek ($x = 1,43 \text{ m}$)

N_{Ed} – uzdužna sila uslijed prednapinjanja i opterećenja u promatranome presjeku. Ukoliko je sila tlačna onda je $N_{Ed} > 0$. Zanemaruje se utjecaj prisilnih deformacija.

A_c – površina betonskoga presjeka u mm^2

$$N_{Ed} = P_{m\infty,1}(1,43) = 615,99 \text{ kN}$$

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

$$\sigma_{cp} = \frac{615,99 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^5} < 0,2 \cdot 23,3$$

$$\sigma_{cp} = 2,8 \text{ MPa} < 4,66 \text{ MPa}$$

Prema nacionalnom dodatku dobivene su vrijednosti za $C_{Rd,c}$, v_{min} i k_1 :

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

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,2^{\frac{3}{2}} \cdot 35^{\frac{1}{2}} = 0,5857$$

$$k_1 = 0,15$$

Nosivost elementa na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,003015 \cdot 35)^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 2,8 \right] \cdot 200 \cdot 1000$$

$$\geq (0,5857 + 0,15 \cdot 2,8) \cdot 200 \cdot 1000$$

$$V_{Rd,c} = 189283,35N \geq 201140 N$$

$$V_{Ed,red} = 133,71kN > V_{Rd,c} = 201,11 kN$$

Potrebno je proračunati poprečnu armaturu.

Nosivost na poprečne sile u slučaju elemenata s okomitom poprečnom armaturom, odnosno sponama, proračunava se kao manja vrijednost od:

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

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

gdje je:

A_{sw} – ukupna površina presjeka poprečne armature tj. spona

s – razmak spona

f_{ywd} – proračunska čvrstoća popuštanja čelika za poprečnu armaturu

v_1 – faktor redukcije čvrstoće za beton raspucan uslijed djelovanja poprečne sile

α_{cw} – koeficijent kojim se u obzir uzima stanje naprezanja u tlačnom štapu

Za savijanje s uzdužnom silom, odabran je kut nagiba tlačnih štapova:

$$\theta = 40^\circ$$

$$\cot \theta = 1,192$$

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

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

$$V_{Ed,red} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad \rightarrow \quad s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed,red}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

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

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

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

$$s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed,red}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = \frac{1,0}{138,91} \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 43,48 \cdot 1,192$$

$$s = 33,58 \text{ cm}$$

Usvojene su dvorezne vilice (m=2) Ø8/30 cm.

4.5.2.3 Dokaz čvrstoće tlačnih štapova

Nosivost tlačnih štapova određena je izrazom:

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

Nacionalnim dodatkom definirane su preporučene vrijednosti koeficijenta v_1 i α_{cw} .

Preporučene vrijednosti za koeficijent α_{cw} :

- 1 – u slučaju neprednapetih konstrukcija
- $(1 + \sigma_{cp}/f_{cd})$ – ukoliko je $0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd}$
- 1,25 – ukoliko je $0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd}$
- $2,5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$ – ukoliko je $0,5f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0f_{cd}$

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

$$0 \leq 2,75 \leq 0,25 \cdot 23,3$$

$$0 \leq 2,75 \leq 5,825 \rightarrow$$

$$\alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) = \left(1 + \frac{2,8}{23,3}\right) = 1,12$$

Preporučena vrijednost za v_1 je v .

$$v_1 = v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right]$$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{35}{250}\right] = 0,516$$

S obzirom da zaštitna cijev natege ima vanjski promjer veličine $\phi_{duct} = 6,5$ cm, što je veće od 1/8 širine hrpta, potrebno je koristiti neto širinu hrpta pri proračunu $V_{Rd,max}$.

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

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

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1,12 \cdot 16,75 \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,516 \cdot 2,3}{1,192 + 0,839}$$

$$V_{Rd,max} = 999,47kN$$

$$V_{Rd,max} = 999,47kN > V_{Ed} = 133,71 kN$$

Uvjet nosivosti tlačnih štapova je zadovoljen.

4.5.2.4 Najmanja potrebna poprečna armatura

Za preuzimanje poprečne sile potreban je koeficijent armiranja koji se dobiva iz izraza:

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

gdje je:

- ρ_w – koeficijent armiranja poprečnom armaturom
- A_{sw} – površina presjeka poprečne armature na duljini s
- s – razmak poprečne armature u uzdužnom smjeru elementa
- b_w – širina hrpta
- α – kut između glavne armature i poprečne armature (za vertikalne spone $\alpha = 90^\circ$)

Pretpostavlja se promjer vilica $\emptyset 8$. Potrebno je proračunati minimalnu poprečnu armaturu (vilice) na osnovu pretpostavljenog promjera.

Odabiru se dvorezne vilice ($m=2$) $\emptyset 8$.

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

$$s = \frac{A_{sw}}{(\rho_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha)} - \text{potreban razmak vilica}$$

Nacionalnim dodatkom definirana je vrijednost za minimalni koeficijent armiranja:

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

Razmak vilica dobiven pomoću minimalnog koeficijenta armiranja:

$$s = \frac{A_{sw}}{(\rho_{w,min} \cdot b_w \cdot \sin \alpha)}$$

$$s = \frac{1,0}{(0,00096 \cdot 20 \cdot 1)} = 52,08 \text{ cm}$$

Nacionalnim dodatkom definirani su uvjeti za određivanje najvećeg uzdužnog razmaka spona $s_{l,max}$ ili druge poprečne armature, za beton razreda tlačne čvrstoće $\leq C50/60$:

$$\text{- Ako je } V_{Ed} \leq 0,3V_{Rd,max} \qquad s_{l,max} = 0,75d \leq 300 \text{ mm}$$

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

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

- Ako je $0,6V_{Rd,max} < V_{Ed} \leq 1,0V_{Rd,max}$

$$s_{l,max} = 0,3d \leq 300 \text{ mm}$$

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

$$133,71 \text{ kN} \leq 299,84 \text{ kN}$$

Najveći uzdužni razmak spona:

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

$$s_{l,max} = 0,75 \cdot 1000 = 750 \text{ mm} > 300 \text{ mm}$$

Prekoračena je maksimalna vrijednost stoga se usvaja:

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

Usvojen je minimalni razmak vilica $s=30 \text{ cm}$.

Minimalne vilice su dvorezne ($m=2$) $\emptyset 8/30 \text{ cm}$.

Usvojene su dvorezne vilice ($m=2$) $\emptyset 8/30 \text{ cm}$.

4.5.3 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

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

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

$\eta_2 = 1,0$ za promjere šipki $\emptyset < 32$ mm

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

Beton C35/45

DOBRI UVJETI:

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

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

LOŠIJI UVJETI:

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

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

PRORAČUNSKA DULJINA SIDRENJA

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

Pojednostavljeno može se koristiti ekvivalentna duljina sidrenja:

$$l_{b,eq} = \alpha_1 \cdot l_{b,req}$$

gdje α_1 ovisi o obliku armature (za ravne šipke $\alpha_1 = 1,0$).

Tablica 15: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
Dobri	Ø8	25,73 ≈ 26 cm
	Ø12	38,59 ≈ 39 cm
	Ø16	51,45 ≈ 52 cm

Tablica 16: Potrebne duljine sidrenja armature za loše uvjete

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA SIDRENJA, $l_{b,req}$
Lošiji	Ø8	36,85 ≈ 37 cm
	Ø12	55,27 ≈ 56 cm
	Ø16	73,70 ≈ 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 $\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 = 1$

α_6 – ovisi o postotku preklopljene armature u promatranome presjeku

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

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

Tablica 17: Potrebne duljine nastavljanja armature

UVJETI	PROMJER ŠIPKE	DULJINA NASTAVLJANJA, l_0
Dobri	Ø8	38,59 ≈ 39 cm
	Ø12	57,88 ≈ 58 cm
	Ø16	77,18 ≈ 78 cm
Lošiji	Ø8	55,27 ≈ 56 cm
	Ø12	82,91 ≈ 83 cm
	Ø16	110,54 ≈ 111 cm

4.6 GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI

4.6.1 Granično stanje naprezanja

4.6.1.1 Provjera naprezanja za raspucani ili neraspucani presjek

Efekti poput pojave puzanja, uzdužnih pukotina i mikropukotina mogu izazvati neželjene posljedice po konstrukciju, stoga je potrebno ograničiti tlačno naprezanje u betonu. Ukoliko naprezanje, pri karakterističnoj kombinaciji opterećenja, premaši kritičnu vrijednost, pojavit će se uzdužne pukotine. U proračunu se može pretpostaviti linearno puzanje ukoliko se ograniče naprezanja pri nazovistalnoj kombinaciji opterećenja. Kako bi se izbjeglo neelastično ponašanje, neželjene deformacije i raspucavanja, potrebno je ograničiti i vlačna naprezanja u armaturi. Vlačna naprezanja mogu se smatrati izbjegnutim ukoliko, pri karakterističnoj kombinaciji opterećenja, naprezanja u armaturi ne prelaze zadana ograničenja.

Potrebno je provesti provjeru stanja naprezanja za dvije kombinacije djelovanja, a to su karakteristična i nazovistalna kombinacija. Prema normi EN 1991-1-3:2003 zadani su faktori kombinacije:

$$\psi_0 = 0,5$$

$$\psi_1 = 0,2$$

$$\psi_2 = 0,0$$

Primjenom koeficijenta r modificiraju se učinci prednapinjanja u graničnom stanju uporabivosti (ukoliko su primjenjene prikladne mjere kao što je izravno mjerenje sile prednapinjanja):

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

Nacionalnim dodatkom dane su preporučene vrijednosti koeficijenata k_1 , k_2 , k_3 i k_5 , koji se koriste u izrazima za ograničenje naprezanja:

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

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

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

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

Potrebno je provesti provjere za bruto karakteristike presjeka. Kako bi se provjerila raspucalost presjeka potrebno je dobiti vrijednost kritičnog momenta raspucalosti. Ukoliko je premašena vrijednost vlačne čvrstoće betona f_{ctm} , presjek se smatra raspucalim. Proračun napreznja proveden je pomoću računalnog programa Mathcad.

Stanje izgradnje t=0 (karakteristična kombinacija, sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

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

$$g_{k,1} = 5,5 \text{ kN/m}$$

$$M_{gk,1} = \frac{g_{k,1} \cdot l^2}{8}$$

$$M_{gk,1} = \frac{5,5 \cdot 15^2}{8} = 154,69 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} = 154,69 \text{ kNm}$$

U trenutku t=0 srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m0} = P_{m0,1} = 699,63 \text{ kN}$$

U trenutku t=0 karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k0} = r \cdot P_{m0} = 1 \cdot 699,63 = 699,63 \text{ kN}$$

Moment savijanja u trenutku pojave prve pukotine iznosi (vlak na gornjem rubu):

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

$$M_{cr} = 0,04 \cdot 10^8 \cdot \left(-3,2 - \frac{699,63 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^5} + \frac{699,63 \cdot 10^3 \cdot 450}{0,04 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 289,31 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 154,69 \text{ kNm} < M_{cr} = 289,31 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = 0,482 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = 0,972 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1238,53 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = -36,62 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = -6,478 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq f_{ctm}$$

$$0,482 \text{ MPa} \leq 32 \text{ MPa}$$

$$0,482 \text{ MPa} < 32 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi A_{s1} za karakterističnu kombinaciju (vlak):

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

$$-36,62 \text{ MPa} \leq 0,8 \cdot 00 \text{ MPa}$$

$$-36,62 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1238,53 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 \text{ MPa}$$

$$1238,53 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Naprezanje na donjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced1} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$-6,478 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-6,478 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Zadovoljena je kontrola naprezanja.

Stanje eksploatacije $t=\infty$ (karakteristična kombinacija, sredina raspona)

Karakteristična kombinacija:

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

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

$$M_{Ed,rare} = \left(\frac{(5,5 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \frac{6 \cdot 15^2}{8} = 604,69 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty} = 636,04 = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 636,04 = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (vlak na donjem rubu):

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

$$M_{cr} = 0,04 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{636,04 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^5} + \frac{636,04 \cdot 10^3 \cdot 450}{0,04 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 310,58 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 636,04 \text{ kNm} > M_{cr} = 310,58 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, stoga se proračun provodi za raspucalo stanje odnosno stanje naprezanja

II (na donjem vlačnom rubu naprezanje je nula).

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -13,22 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -70,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1226,227 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 80,541 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

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

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za karakterističnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

$$-13,22 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-13,22 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

Naprezanje u nenapetoj armaturi A_{s1} za karakterističnu kombinaciju (vlak):

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

$$80,541 \text{ MPa} \leq 0,8 \cdot 500 \text{ MPa}$$

$$80,541 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1226,23 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 \text{ MPa}$$

$$1226,23 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

Zadovoljena je kontrola naprezanja.

Provjera naprezanja za nazovistalnu kombinaciju (sredina raspona, $t=\infty$)

Nazovistalna kombinacija:

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

Za nazovistalnu kombinaciju opterećenja, moment savijanja u sredini polja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(5,5 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 435,94 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 636,04 = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (na donjem rubu vlak):

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

$$M_{cr} = 0,04 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{636,04 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^5} + \frac{636,04 \cdot 10^3 \cdot 450}{0,04 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 310,58 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm} = 435,94 \text{ kNm} > M_{cr} = 282,74 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, stoga se proračun provodi za neraspucalo stanje odnosno stanje naprezanja II.

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -6,37 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -35,548 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1157,37 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 3,268 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

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

Naprezanje na gornjem rubu betonskog presjeka za nazovistalnu kombinaciju (tlak):

$$\sigma_{ced2} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$$

$$-7,031 \text{ MPa} \leq 0,45 \cdot 35 \text{ MPa}$$

$$-7,031 \text{ MPa} < 15,75 \text{ MPa}$$

Kontrola naprezanja je zadovoljena.

4.6.2 Granično stanje pukotina

Za čestu kombinaciju opterećenja, u trenutku neposredno prije raspucavanja, promatra se vlačna zona T presjeka koja se nalazi u rebro presjeka.

Minimalna armatura, potrebna za ograničenje širine pukotina, dobiva se prema izrazu:

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

gdje je:

k_c – koeficijent kojim se razmatra raspodjela naprezanja unutar presjeka, netom prije raspucavanja

Za naprezanje koje se javlja kao posljedica savijanja (za rebro T presjeka) vrijedi:

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

σ_c – predstavlja srednje naprezanje u betonu za promatrani dio presjeka

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h}$$

N_{Ed} – uzdužna sila koja se javlja kod graničnog stanja uporabivosti kao posljedica prednapinjanja i opterećenja (pozitivna ukoliko je tlačna)

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 636,04 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{636,04 \cdot 10^3}{200 \cdot (1100 - 100)} = 3,18 \text{ MPa}$$

k_1 – koeficijent kojim se razmatraju efekti na raspodjelu naprezanja, kao posljedica djelovanja uzdužne sile

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

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

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

$$h = 1100 - 100 = 1000 \text{ mm} > 1000 \text{ mm}$$

$$h^* = 1 \text{ m}$$

$f_{ct,eff}$ – vlačna čvrstoća u trenutku nastanka prve pukotine

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

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

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{3,18}{1,5 \cdot \left(\frac{1100}{1000}\right) \cdot 3,2} \right] \leq 1$$

$$k_c = 0,16 < 1$$

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

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

A_{ct} – vlačna površina presjeka neposredno prije pojave prve pukotine

$$A_{ct} = b_w \cdot z_d = 20 \cdot 55 = 1100 \text{ cm}^2$$

U vlačnoj zoni se nalazi:

$$A_{s1} = 3\phi 16 (6,03 \text{ cm}^2)$$

Steel stress ² [MPa]	Maximum bar size [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 27 : Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki

Za najveći promjer šipki $\phi 16$ i ograničenje širine pukotina $w_k=0,2 \text{ mm}$, sa slike 12 se očita naprezanje u nenapetoj armaturi:

$$\sigma_s = 200 \text{ MPa}$$

$$A_{s,min} = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{0,20 \cdot 0,65 \cdot 3,2 \cdot 1,1 \cdot 10^5}{200} = 2,29 \text{ cm}^2$$

Za ograničenje širine pukotina, minimalna armatura iznosi $A_s = 2,29 \text{ cm}^2$, a prethodno je proračunom dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi $A_{s1} = 3\phi 16 (6,03 \text{ cm}^2)$

Potrebno je provesti provjeru naprezanja za čestu kombinaciju, u sredini raspona, za $t=\infty$.

Česta kombinacija djelovanja:

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

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

$$M_{Ed,frequ} = \left(\frac{(5,5 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0,2$$

$$M_{Ed,frequ} = 469,69 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku $t=\infty$ karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k\infty} = r \cdot P_{m\infty} = 1 \cdot 636,04 = 636,04 \text{ kN}$$

U trenutku pojave prve pukotine moment savijanja iznosi (na donjem rubu vlak):

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

$$M_{cr} = 0,04 \cdot 10^8 \cdot \left(3,2 + \frac{636,04 \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^5} + \frac{636,04 \cdot 10^3 \cdot 0,45}{0,04 \cdot 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 246,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,frequ} = 469,69 \text{ kNm} > M_{cr} = 246,5 \text{ kNm}$$

Presjek je raspucan, stoga se provodi proračun za raspucalo stanje odnosno za stanje naprezanja II.

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -7,412 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -41,022 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1164,205 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 11,062 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

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

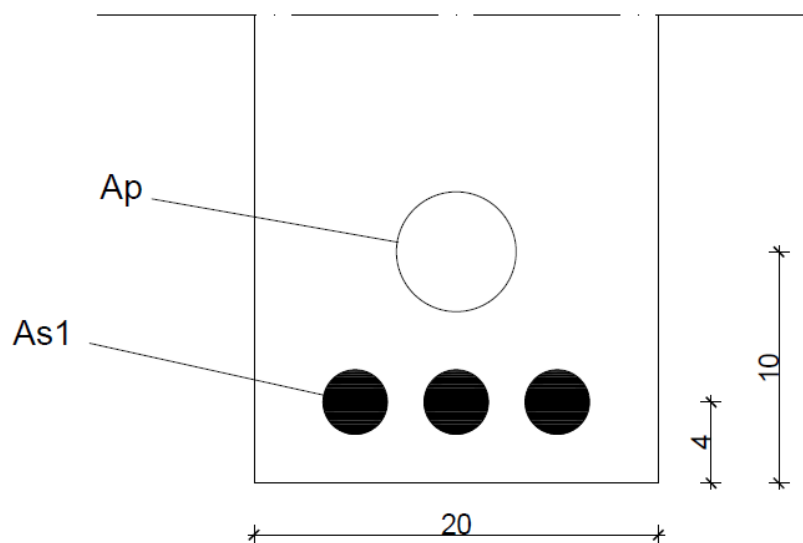
$\sigma_{s1} = 11,062 \text{ MPa}$ prema Mathcadu

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$, prema slici 12, dobiva se da je najveći mogući promjer šipki 20 mm. Proračunom je dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi promjer $\phi 16$, prema tome kriterij je zadovoljen.

Steel stress ² [MPa]	Maximum bar spacing [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 28: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki s obzirom na ograničenje širine pukotina i naprezanje

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$, prema slici 13, dobiva se da je najveći dopušteni razmak između osi šipki 150 mm. Kriterij je zadovoljen.



Slika 29: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

4.6.3 Granično stanje deformacija

Provodi se provjera za nazovistalnu kombinaciju opterećenja, u sredini raspona, za $t=\infty$.
 Provjera se provodi za idealno, stanje naprezanja I.

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

Za nazovistalnu kombinaciju djelovanja, moment savijanja u sredini polja iznosi:

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

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(5,5 + 10,0) \cdot 15^2}{8} \right) + \left(\frac{6 \cdot 15^2}{8} \right) \cdot 0$$

$$M_{Ed,perm} = 435,94 \text{ kNm}$$

U trenutku $t=\infty$ srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} = 636,04 \text{ kN}$$

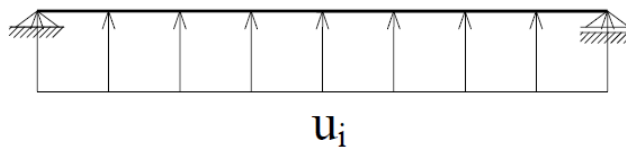
Proračunski modul elastičnosti betona iznosi:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \rho} = \frac{34000}{1 + 3,1} = 8292,68 \text{ MPa}$$

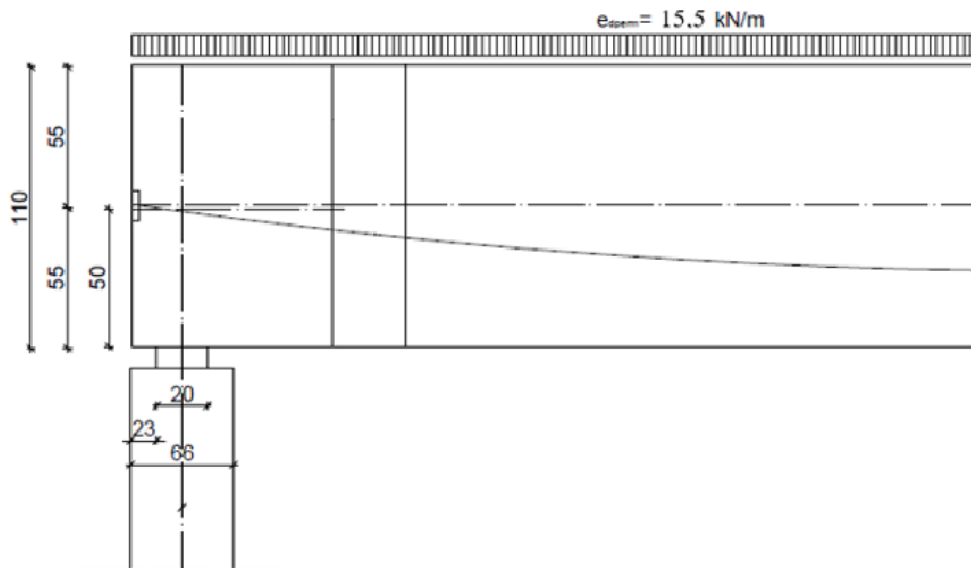
Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje u_1 i u_2 :

Natega :

$$u_1 = -P_{m\infty,1} \cdot \frac{8 \cdot f_1}{l_{tot}^2} = -636,04 \cdot \frac{8 \cdot 0,45}{15,66^2} = -9,34 \text{ kN/m}$$



Slika 30: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje

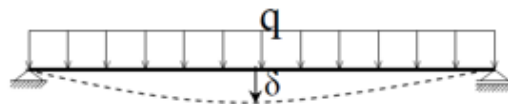


Slika 31: Položaj koncentriranog momenta

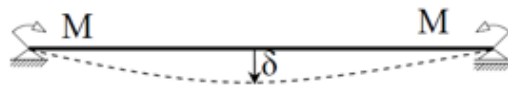
Koncentrirani moment u težištu betonskog presjeka, na oba kraja nosača:

$$M = -P_{m\infty,1} \cdot 0,5 = -636,04 \cdot 0,5 = -318,02 \text{ kNm}$$

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot l_{\text{nos}}^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



$$\delta = \frac{M \cdot l_{\text{nos}}^2}{8 \cdot E \cdot I}$$



Slika 32: Izrazi za proračun progiba slobodno oslonjene grede

Progib sredine grede:

$$\delta = \frac{5 \cdot (g_{k,1} + g_{k,2} + \psi_2 \cdot q_{k,1} + u_1) \cdot l^4}{384 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c} + \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c}$$

$$\delta = \frac{5 \cdot (5,5 \cdot 10^3 + 10,0 \cdot 10^3 + 0 \cdot 6 \cdot 10^3 - 9,34 \cdot 10^3) \cdot 15^4}{384 \cdot 8292,68 \cdot 0,022} + \frac{318,02 \cdot 10^3 \cdot 15^2}{8 \cdot 8292,68 \cdot 0,022}$$

$$\delta = 0,0576 \text{ m} = 5,76 \text{ cm}$$

Granični progib iznosi:

$$\frac{l}{250} = \frac{1500}{250} = 6 \text{ cm}$$

$$\delta = 5,79 \text{ cm} < 6,0 \text{ cm}$$

Progib zadovoljava.

5 ANALIZA REZULTATA ZA T-PRESJEK I PRAVOKUTNI PRESJEK

Usporedba razmatranih parametara za pravokutni i T-presjek je dana u tablici (Tablica 18).

Armatura za prednapinjanje

Potrebna armatura za prednapinjanje, A_p , T-presjeka iznosi 4,65 cm², a pravokutnog presjeka 4,81 cm². Za oba presjeka je usvojena natega koju čini ukupno 5 užadi, a površina presjeka svakog užesta iznosi 1,1 cm². Iz toga slijedi da je površina presjeka natega (sastavljene od 5 užadi) jednaka 5,5 cm².

Nenapeta armatura

Potrebna vlačna armatura, A_{s1} , T-presjeka iznosi 4,38 cm², a pravokutnog presjeka 5,10 cm². Za oba presjeka je usvojena jednaka vlačna armatura 3Ø16 koja iznosi 6,03 cm². Tlačna armatura, A_{s2} , također je usvojena jednaka za oba slučaja (4Ø12 koja iznosi 4,52 cm²), kao i poprečna armatura (vilice Ø8 na minimalnom razmaku od 30 cm).

Gubici sile prednapinjanja

Početni gubici prednapinjanja, P_{m0} , za oba presjeka iznose 699,69 kN na polovici raspona iz razloga što je kabel vođen istim oblikom i napinjan jednakom silom.

Vremenski gubici sile u natezi, ΔP_{c+s+r} , nastaju se kao posljedica relaksacije, skupljanja i puzanja. Nakon 500 000 sati iznose 73,23 kN za T-presjek, a 63,59 kN za pravokutni presjek.

Tablica 18: Usporedba rezultata za T-presjek i pravokutni presjek

PARAMETAR	VRIJEDNOST	
	T-PRESJEK	PRAVOKUTNI PRESJEK
A_p	4,65 cm ² (usvojeno 5,5 cm ²)	4,81 cm ² (usvojeno 5,5 cm ²)
A_{s1}	4,38 cm ² (usvojeno 3Ø16)	5,10 cm ² (usvojeno 3Ø16)
Poprečna armatura	dvorezne vilice Ø8/30	dvorezne vilice Ø8/30
P_{m0}	699,63 kN	699,63 kN
ΔP_{c+s+r}	73,23 kN	63,59 kN

Granično stanje uporabivosti

Provjere graničnog stanja uporabivosti su zadovoljene za oba presjeka. Iz sljedećih tablica je, međutim, vidljivo da su naprezanja u armaturi i gornjem rubu betonskog presjeka veća u pravokutnom presjeku. Razlog tomu je manja površina poprečnog presjeka kod pravokutnog presjeka. Posebno su značajnija veća naprezanja u gornjem rubu betona, σ_{ced2} , pravokutnog presjeka (oko 30% veća u odnosu na T-presjek). Manja količina betona kod pravokutnog presjeka rezultira manjom vlastitom težinom nosača i manjim progibom na sredini nosača (Tablica 22).

Tablica 19: Usporedba graničnog stanja naprezanja za karakterističnu kombinaciju (stanje eksploatacije) za T-presjek i pravokutni presjek

PARAMETAR	VRIJEDNOST	
	T-PRESJEK	PRAVOKUTNI PRESJEK
σ_{ced2}	-10,042 MPa	-13,22 MPa
σ_{s1}	75,45 MPa	80,541 MPa
σ_p	1206,3 MPa	1226,227 MPa

Tablica 20: Usporedba graničnog stanja naprezanja za nazovistalnu kombinaciju za T-presjek i pravokutni presjek

PARAMETAR	VRIJEDNOST	
	T-PRESJEK	PRAVOKUTNI PRESJEK
σ_{ced2}	-5,135 MPa	-6,37 MPa
σ_{s1}	1,95 MPa	3,268 MPa
σ_p	1138,81 MPa	1157,37 MPa

Tablica 21: Usporedba graničnog stanja pukotina za T-presjek i pravokutni presjek

PARAMETAR	VRIJEDNOST	
	T-PRESJEK	PRAVOKUTNI PRESJEK
σ_{ced2}	-5,89 MPa	-7,412 MPa
σ_{s1}	9,029 MPa	11,062 MPa
σ_p	1145,205 MPa	1164,205 MPa

Tablica 22: Usporedba graničnog stanja deformacija za T-presjek i pravokutni presjek

PARAMETAR	VRIJEDNOST	
	T-PRESJEK	PRAVOKUTNI PRESJEK
δ	5,90 cm	5,79 cm

6 ZAKLJUČAK

Prednaprežanjem građevinskih elemenata, osim ušteda u količini betona i čelika za armiranje, postizemo superiorniju nosivost nosača, te dugotrajniju konstrukciju sa manjim progibima. Iz tog je razloga moguće izraditi vitke nosače za velike raspone.

Iz analize u prethodnom poglavlju razvidno je da odabir poprečnog presjeka prednapetog betonskog nosača raspona 15 m kao krovnog nosača hale, između T-presjeka i pravokutnog presjeka, u relativno maloj mjeri utječe na ponašanje konstrukcije pod opterećenjem. Postotak armiranja je relativno malen za oba poprečna presjeka, a provjere graničnog stanja uporabivosti su zadovoljene i za pravokutni i za T-presjek.

Prednost T-presjeka je u manjoj potrebi za armaturom. Na obrađivanom primjeru ta razlika je relativno mala i rezultirala je usvajanjem iste armature za oba presjeka, no za veće raspone i za veća opterećenja bi došla do izražaja. Preporuke za daljnja istraživanja idu upravo u tom smjeru – provesti niz proračuna za rastuće raspone i utvrditi za koje raspone T-presjek postaje superiorniji.

LITERATURA I IZVORI

- [1] Smolčić, Ž., Prednapete betonske konstrukcije, interna predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2019.
- [2] Meštrović, D., Prednapeti beton teorija, interna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2017.
- [3] EN 1992-1-1 Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels 2004.
- [4] EN 1991-1-3 Eurocode 1, Actions on structures – Part 1: General actions – Snow loads, European Committee for Standardization, Brussels 2003.

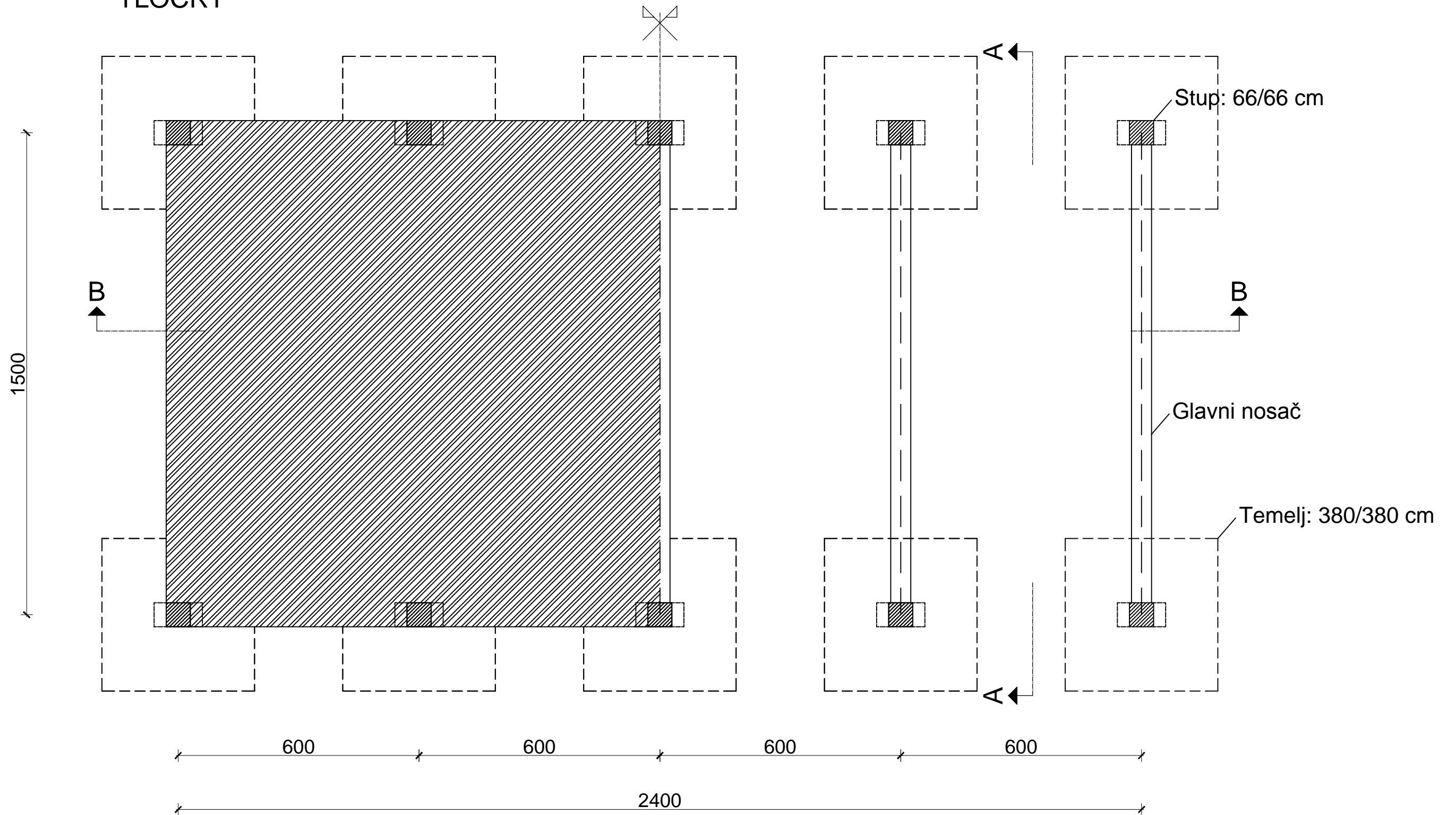
7 GRAFIČKI PRILOZI

Popis nacрта:

- | | |
|--|-----------------|
| 1. Tlocrtna dispozicija AB hale | MJ. 1:100 |
| 2. Presjek B-B | MJ. 1:100 |
| 3. Presjek A-A | MJ. 1:100 |
| 4. Plan i iskaz armature „T“ presjeka | MJ. 1:50 / 1:10 |
| 5. Plan armature „T“ presjeka, presjek A-A | MJ. 1:10 |
| 6. Plan i iskaz armature pravokutnog presjeka | MJ. 1:50 / 1:10 |
| 7. Plan armature pravokutnog presjeka, presjek A-A | MJ. 1:10 |

TLOCRTNA DISPOZICIJA HALE MJ 1:100

TLOCRT



GF GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA

Diplomski rad:
Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka

Sadržaj nacrt:
Tlocrtna dispozicija AB hale

Student:
Diego Gambaletta

Kolegij:
Prednapete betonske konstrukcije

Mentor:
dr.sc. Željko Smolčić

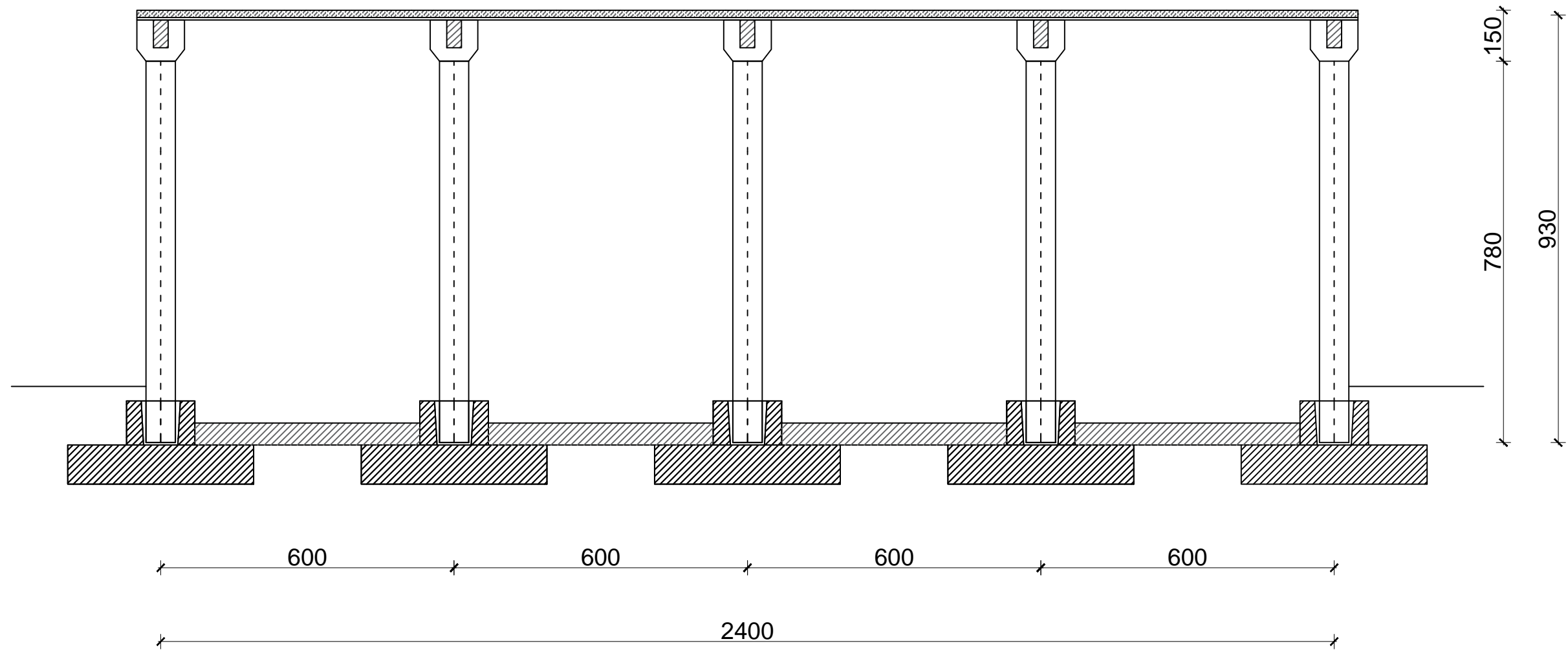
Datum:
04.2020.

Mjerilo:
1:100

List:
1

PRESJEK HALE MJ 1:100

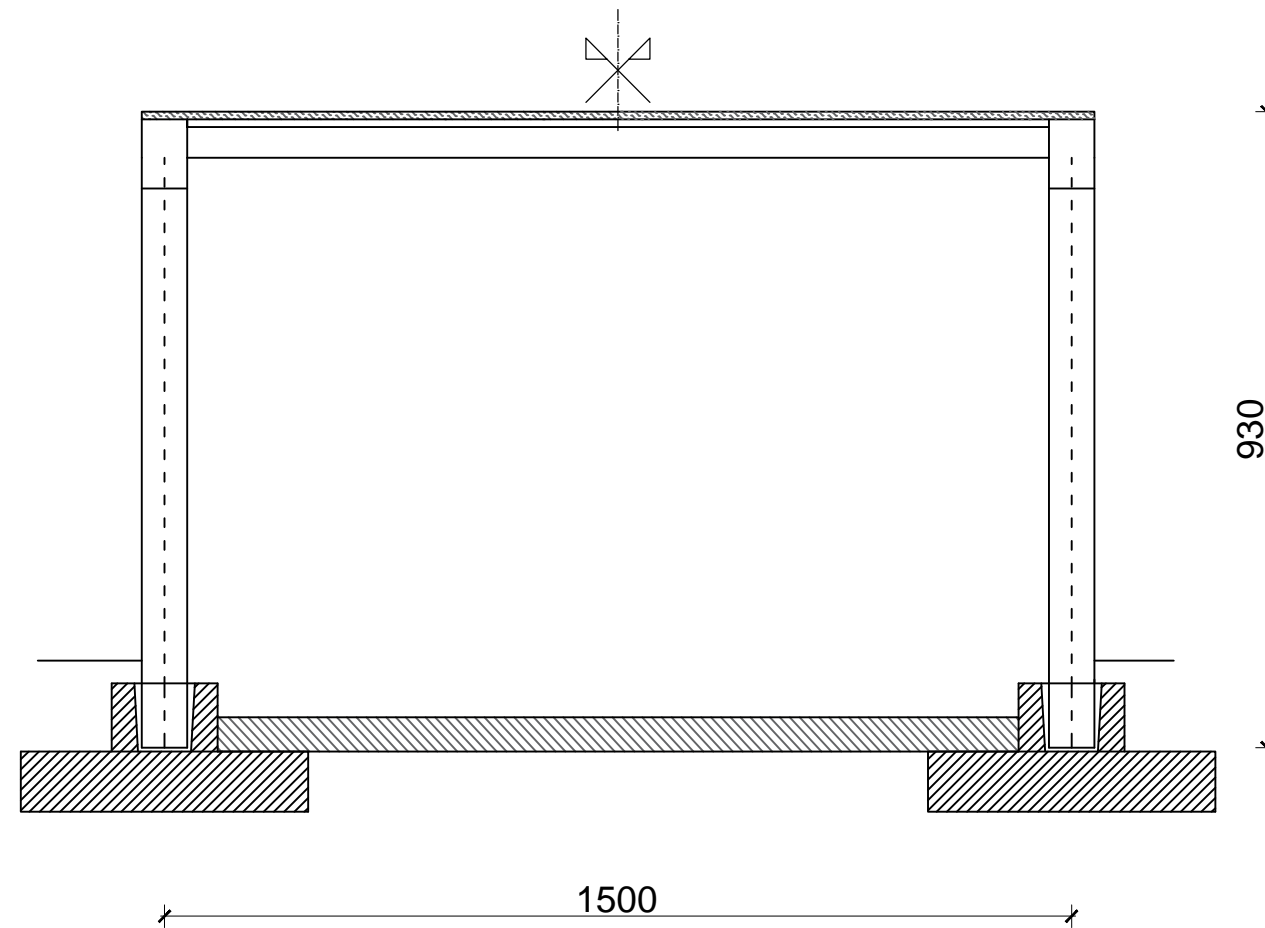
PRESJEK B-B



GF GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA			
Diplomski rad: Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka		Sadržaj nacrt: Presjek B-B	
Student: Diego Gambaletta		Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije	
Mentor: dr.sc. Željko Smolčić	Datum: 04.2020.	Mjerilo: 1:100	List: 2

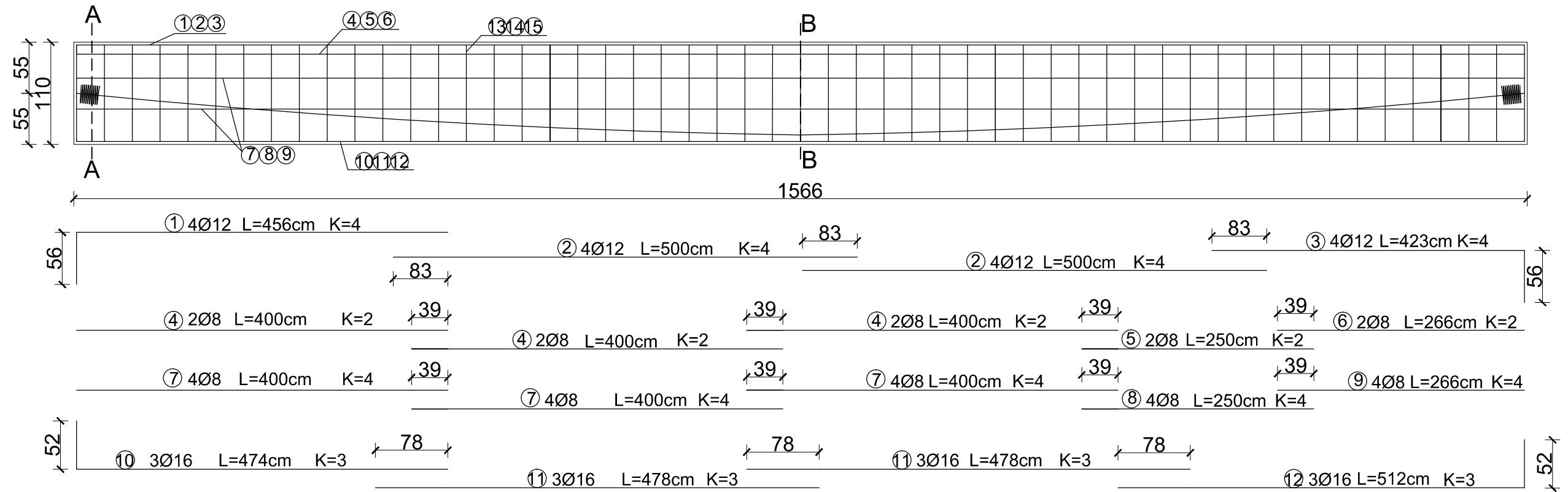
PRESJEK HALE MJ 1:100

PRESJEK A-A

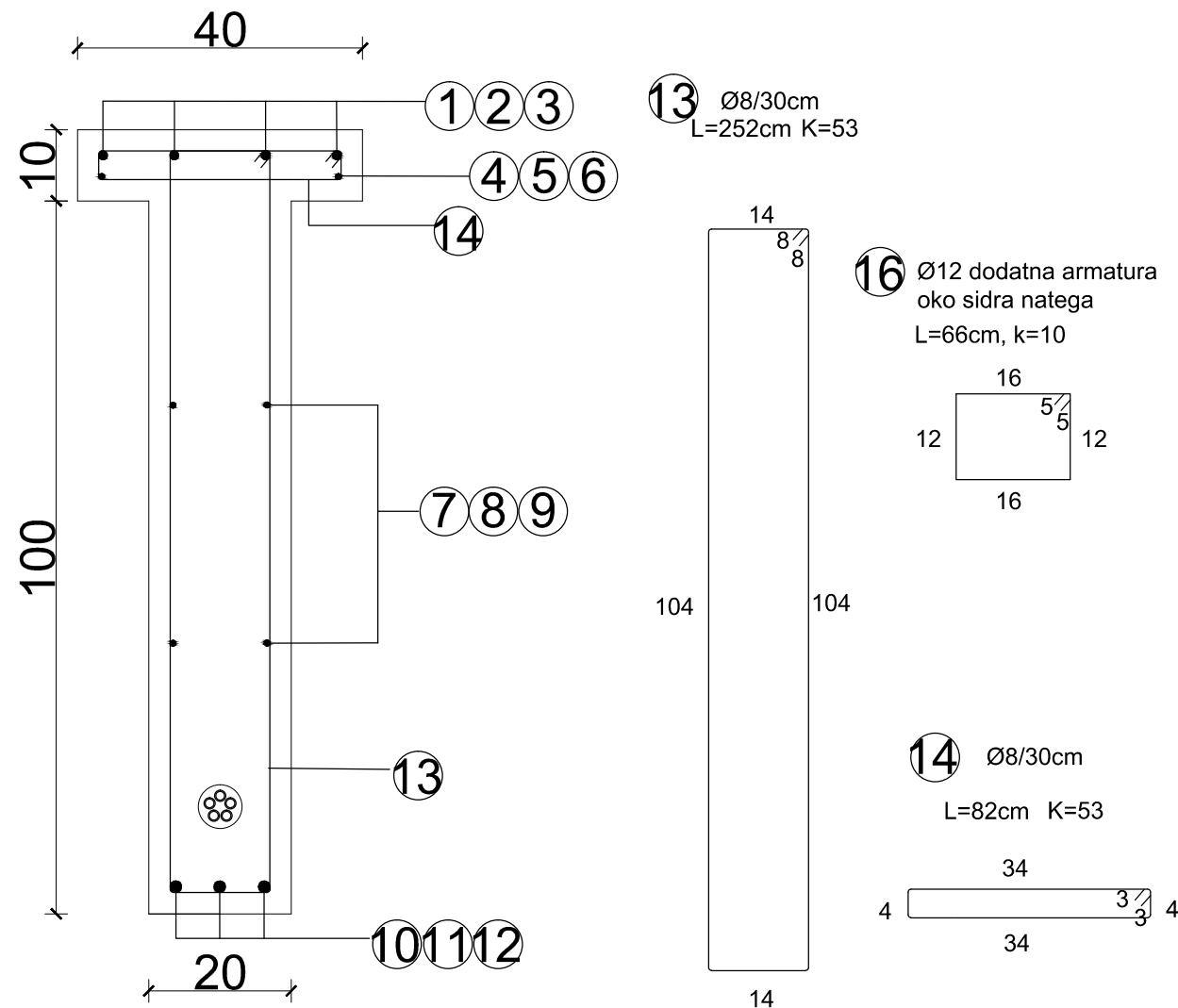


GF	GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA		
Diplomski rad: Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka	Sadržaj nacrt: Presjek A-A		
Student: Diego Gambaletta	Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije		
Mentor: dr.sc. Željko Smolčić	Datum: 04.2020.	Mjerilo: 1:100	List: 3

PLAN I ISKAZ ARMATURE "T" PRESJEKA MJ 1:50



MJ 1:10 B-B



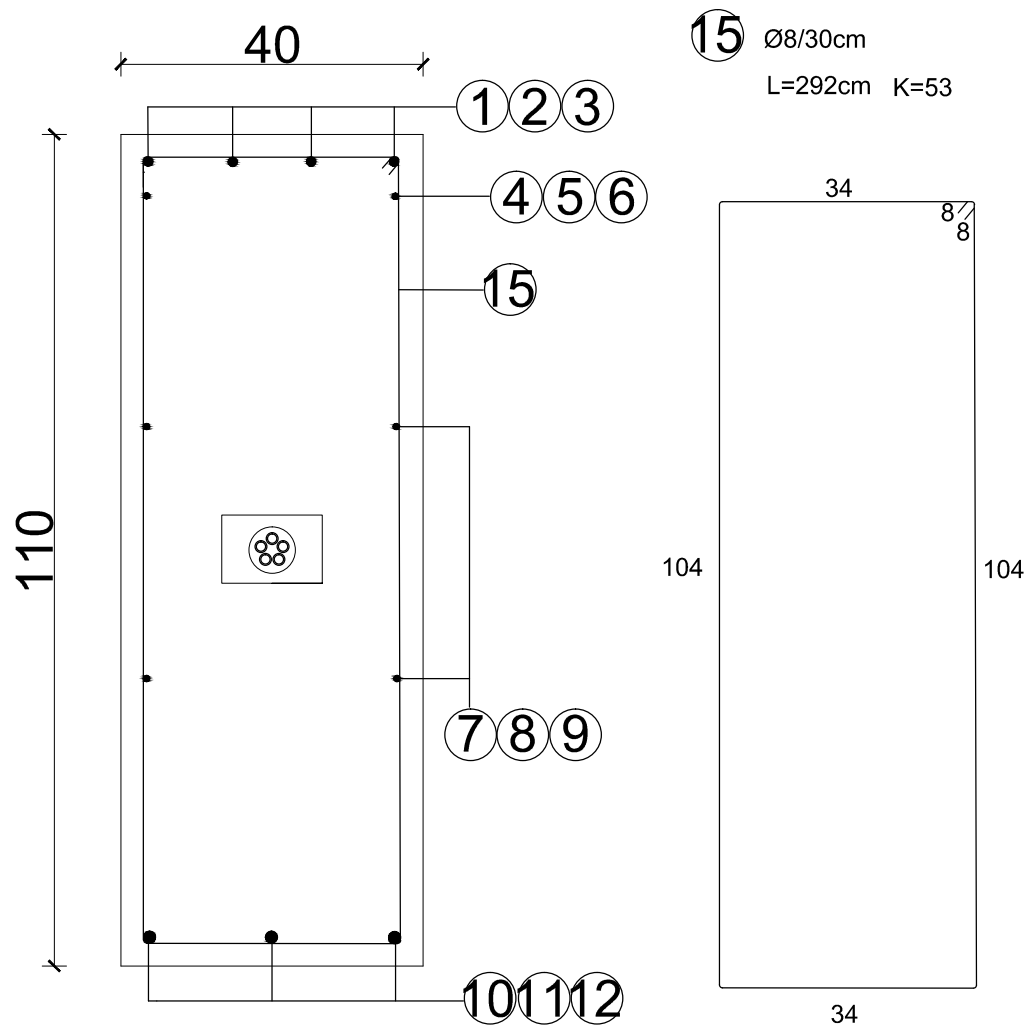
ISKAZ NENAPETE ARMATURE ZA 1 NOSAČ						
POZ.	DULJINA (m)	Ø (mm)	KOM.	UKUPNA DULJINA		
				Ø8	Ø12	Ø16
1	4,56	12	4		18,24	
2	5,00	12	8		40,00	
3	4,23	12	4		16,92	
4	4,00	8	6	24,00		
5	2,50	8	2	5,00		
6	2,66	8	2	5,32		
7	4,00	8	12	48,00		
8	2,50	8	4	10,00		
9	2,66	8	4	10,64		
10	4,74	16	3			14,22
11	4,78	16	6			28,68
12	5,12	16	3			15,36
13	2,52	8	53	133,56		
14	0,82	8	53	43,46		
15	2,92	8	53	154,76		
16	0,66	12	10			6,60
UKUPNO (m)				434,74	81,76	58,26
MASA(kg/m)				0,405	0,911	1,621
UKUPNO PO PROMJERIMA (kg)				176,07	74,48	94,44
UKUPNO (kg)				344,99		

ISKAZ PREDNAPETE ARMATURE		
POZ.	DULJINA (m)	KOM.
1	15,66	1
UKUPNO (m)		15,66
MASA(kg/m)		5,9
UKUPNO (kg)		92,39

GF GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA			
Diplomski rad: Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka		Sadržaj nacрта: Plan i iskaz armature "T" presjeka	
Student: Diego Gambaletta		Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije	
Mentor: dr.sc. Željko Smolčić	Datum: 04.2020.	Mjerilo: 1:50 / 1:10	List: 4

PRESJEK A-A

MJ 1:10



GF

GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA

Diplomski rad:
Usporedba proračuna prednapetog
pravokutnog i T-presjeka

Sadržaj nacrt:
Plan armature "T" presjeka
Presjek A-A

Student:
Diego Gambaletta

Kolegij:
Prednapete betonske konstrukcije

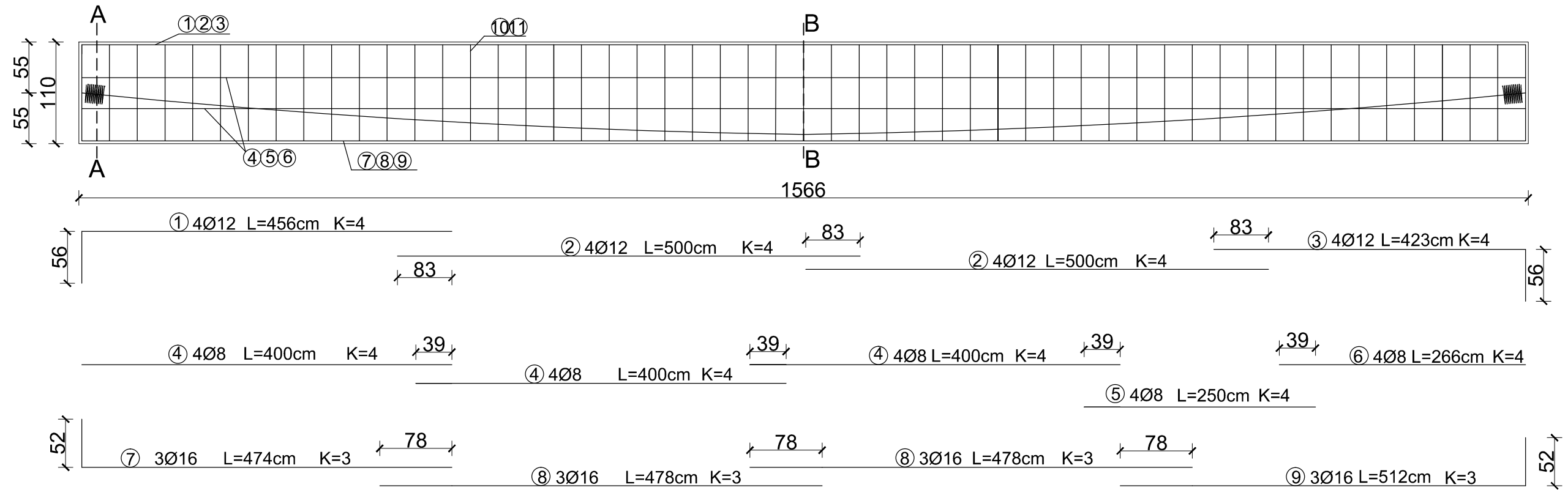
Mentor:
dr.sc. Željko Smolčić

Datum:
04.2020.

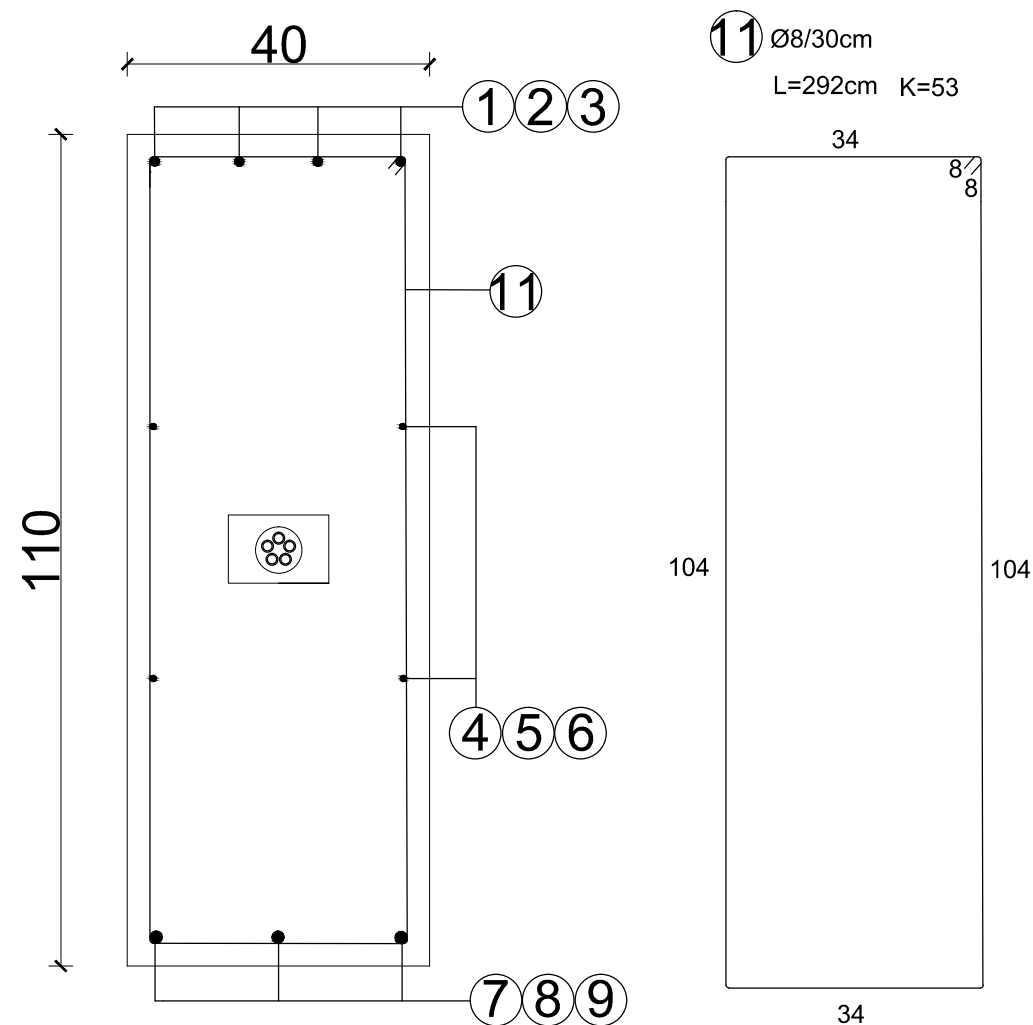
Mjerilo:
1:10

List:
5

PLAN I ISKAZ ARMATURE PRAVOKUTNOG PRESJEKA MJ 1:50



MJ 1:10 B-B



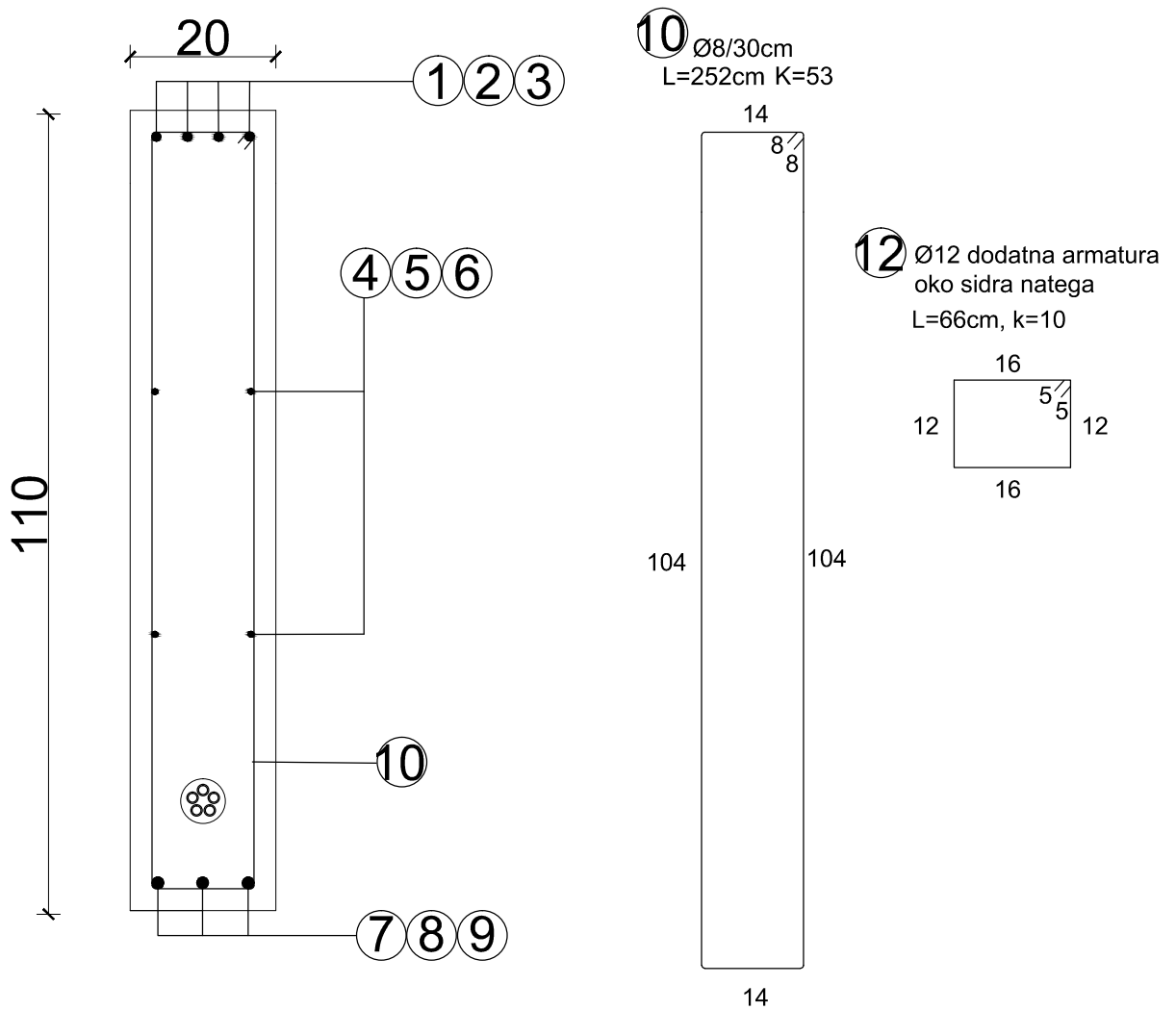
POZ.	DULJINA (m)	Ø (mm)	KOM.	UKUPNA DULJINA		
				Ø8	Ø12	Ø16
1	4,56	12	4		18,24	
2	5,00	12	8		40,00	
3	4,23	12	4		16,92	
4	4,00	8	12	48,00		
5	2,50	8	4	10,00		
6	2,66	8	4	10,64		
7	4,74	16	3			14,22
8	4,78	16	6			28,68
9	5,12	16	3			15,63
10	2,52	8	53	133,56		
11	2,92	8	53	154,76		
12	0,66	12	10		6,60	
UKUPNO (m)				356,96	81,76	58,53
MASA(kg/m)				0,405	0,911	1,621
UKUPNO PO PROMJERIMA (kg)				144,57	74,48	94,88
UKUPNO (kg)				313,93		

POZ.	DULJINA (m)	KOM.
1	15,66	1
UKUPNO (m)		15,66
MASA(kg/m)		5,9
UKUPNO (kg)		92,39

GF GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA			
Diplomski rad: Usporedba proračuna prednapetog pravokutnog i T-presjeka		Sadržaj nacрта: Plan i iskaz armature pravokutnog presjeka	
Student: Diego Gambaletta		Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije	
Mentor: dr.sc. Željko Smolčić	Datum: 04.2020.	Mjerilo: 1:50 / 1:10	List: 6

PRESJEK A-A

MJ 1:10



GF

GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA

Diplomski rad:
Usporedba proračuna prednapetog
pravokutnog i T-presjeka

Sadržaj nacрта:
Plan armature pravokutnog presjeka
Presjek A-A

Student:
Diego Gambaletta

Kolegij:
Prednapete betonske konstrukcije

Mentor:
dr.sc. Željko Smolčić

Datum:
04.2020.

Mjerilo:
1:10

List:
7