

Proračun prednapetog nosača hale

Antulov-Fantulin, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:157:720323>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



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**

Ivan Antulov-Fantulin

Proračun prednapetog nosača hale

Diplomski rad

Rijeka, 2019.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Redovni diplomski sveučilišni studij građevinarstva
Smjer: Konstrukcije
Kolegij: Prednapete betonske konstrukcije**

**Ivan Antulov-Fantulin
JMBAG: 0114026919**

Proračun prednapetog nosača hale

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2019.

ZADATAK

IZJAVA

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

Ivan Antulov-Fantulin

U Rijeci, 02. rujna 2019.

Zahvala

Zahvaljujem se svom 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 i 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 zahvalnost dugujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili uz mene i pružali mi potporu za vrijeme cjelokupnog 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 proveden je postupak dimenzioniranja i proračuna prednapetog krovnog nosača proizvodne hale. Rad se svodi na provjeru graničnog stanja nosivosti (GSN), gdje se provode provjere na moment savijanja i poprečne sile, te graničnog stanja uporabivosti (GSU), gdje se provode provjere naprezanja, pukotina i deformacija. Sve potrebne provjere su zadovoljene, a cijeli proračun proveden je u skladu s normom za proračun prednapetih elemenata EN 1992.

Ključne riječi: prednapeti beton, GSN, GSU, nosač, proračun, dimenzioniranje

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 describes the procedure of dimensioning and calculating the prestressed roof beam of the production hall. The main topic of the paper is to check and calculate the ultimate limit state (ULS), where bending moment and shear force are being checked, and the serviceability limit state (SLS) where stresses, cracks and deformations are checked. All the necessary checks are fulfilled, and the entire analysis was implemented in accordance with the standard for calculating prestressed elements EN 1992.

Keywords: prestressed concrete, ULS, SLS, beam, structure design, dimensioning

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEHNIČKI OPIS | 3 |
| 2.1. Svojstva materijala | 5 |
| 3. STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA | 6 |
| 4. PROCJENA VELIČINA | 8 |
| 4.1. Procjena površine čelika za prednapinjanje..... | 8 |
| 4.2. Procjena površine čelika za armiranje | 11 |
| 4.3. Geometrijske karakteristike nosača | 12 |
| 5. NAJVEĆA NAPREZANJA U NATEZI..... | 14 |
| 6. GUBICI SILE PREDNAPINJANJA | 15 |
| 6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije | 15 |
| 6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja | 15 |
| 6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina | 16 |
| 6.4. Vremenski gubici..... | 21 |
| 7. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI | 25 |
| 7.1. Savijanje s uzdužnom silom | 25 |
| 7.1.1. Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=\infty$ | 25 |
| 7.1.2. Provjera najvećeg i najmanjeg postotka armiranja | 28 |
| 7.1.3. Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=0$ | 29 |
| 7.2. Provjera na poprečne sile..... | 31 |
| 7.2.1. Proračunska nosivost na poprečnu silu | 31 |
| 7.2.2. Proračunski potrebna poprečna armatura..... | 34 |
| 7.2.3. Dokaz čvrstoće tlačnih štapova | 37 |
| 7.2.4. Najmanja potrebna poprečna armatura..... | 38 |
| 7.3. Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature | 40 |
| 8. GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI..... | 42 |
| 8.1. Granično stanje naprezanja..... | 42 |
| 8.1.1. Provjera naprezanja za raspucani ili neraspucani presjek..... | 42 |
| 8.2. Granično stanje pukotina | 47 |
| 8.3. Granično stanje deformacija | 51 |
| 9. ZAKLJUČAK | 54 |
| 10. GRAFIČKI PRILOZI – NACRTI..... | 57 |

POPIS SLIKA

Slika 1: Tlocrtne dimenzije proizvodne hale

Slika 2: Geometrijske karakteristike nosača

Slika 3: Statički sustav prednapetog nosača

Slika 4: Položaj natega u nosaču

Slika 5: Poprečni presjek nosača – „T“ presjek

Slika 6: Skica i dimenzije natege

Slika 7: Geometrijske karakteristike presjeka nosača

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

Slika 9: Dijagram gubitaka sile prednapinjanja za nategu 2 (konačne vrijednosti)

Slika 10: Skica deformacije i unosa sile u fazi gradnje za prednapeti krovni nosač

Slika 11: Skica položaja reznih sila

Slika 12: Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Slika 13: Skica udaljenosti a_v

Slika 14: Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki

Slika 15: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki s obzirom na ograničenje širine pukotina i naprezanje

Slika 16: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

Slika 17: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje

Slika 18: Položaj koncentriranog momenta

Slika 19: Izrazi za proračun progiba slobodno oslonjene grede

POPIS TABLICA

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

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

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

Tablica 4: Vrijednost sile prednapinjanja nakon početnih gubitaka za nategu 1

Tablica 5: Vrijednost sile prednapinjanja nakon početnih gubitaka za nategu 2

Tablica 6: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu 1 nakon vremenskih gubitaka

Tablica 7: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu 2 nakon vremenskih gubitaka

Tablica 8: Tablica za dimenzioniranje T-presjeka za betone razreda čvrstoće od C12/15 do C50/60

Tablica 9: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete

Tablica 10: Potrebne duljine sidrenja armature za lošije uvjete

Tablica 11: Potrebne duljine nastavljanja armature za dobre uvjete

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]

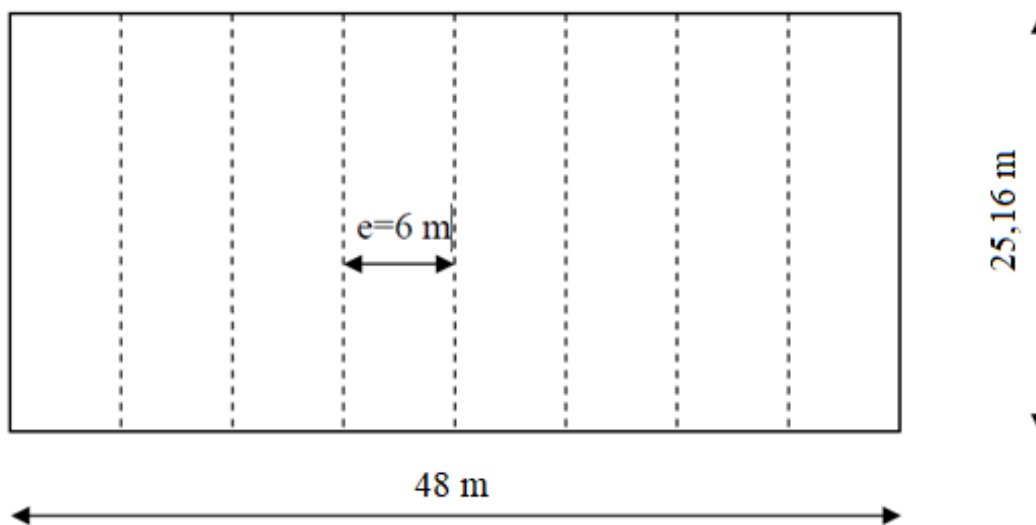
Primjena prednapetog betona u građevinarstvu je velika. Primjenjuje se u gotovo svim granama građevinarstva, a samo neki od objekata su potporni zidovi, nuklearne

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 provesti proračun jednog prednapetog krovnog nosača proizvodne hale te upoznati čitatelje s osnovnim formulama i koracima potrebnim za uspješno projektiranje prednapetih elemenata. Rad je napisan u osam glavnih poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja, drugo poglavlje se odnosi na tehnički opis gdje su iznesene dimenzije proizvodne hale, geometrijske karakteristike nosača te svojstva materijala koji se primjenjuju. Treće poglavlje odnosi se na određivanje vrijednosti glavnog i promjenjivog djelovanja te definiranje položaja natega u nosaču. Kroz četvrto poglavlje provodi se procjena potrebne površine čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje, odnosno potrebnog broja užadi u natezi, na osnovu najvećeg naprezanja. Također tablicom su dane bruto, neto i idealne vrijednosti geometrijskih karakteristika nosača, dobivene pomoću računalnog programa Mathcad. Peto poglavlje odnosi se na određivanje najvećeg naprezanja u natezi, odnosno određivanja naprezanja i sile koje mogu iznositi neposredno nakon napinjanja. Kroz šesto poglavlje proračunati su svi gubici sile prednapinjanja koje je potrebno uzeti u obzir, a to su gubitak sile zbog elastične deformacije, trenja, prokliznuća klina i vremenski gubici. Oduzimanjem svih dobivenih gubitaka od početne sile prednapinjanja, dobiva se stvarna sila prednapinjanja s kojom se provodi proračun graničnog stanja nosivosti. Sedmo poglavlje odnosi se na proračun graničnog stanja nosivosti koje obuhvaća provjere na savijanje s uzdužnom silom i provjere na poprečne sile. Osmo poglavlje odnosi se na proračun graničnog stanja uporabivosti koje obuhvaća provjere graničnog stanja naprezanja, pukotina i deformacija.

2. TEHNIČKI OPIS

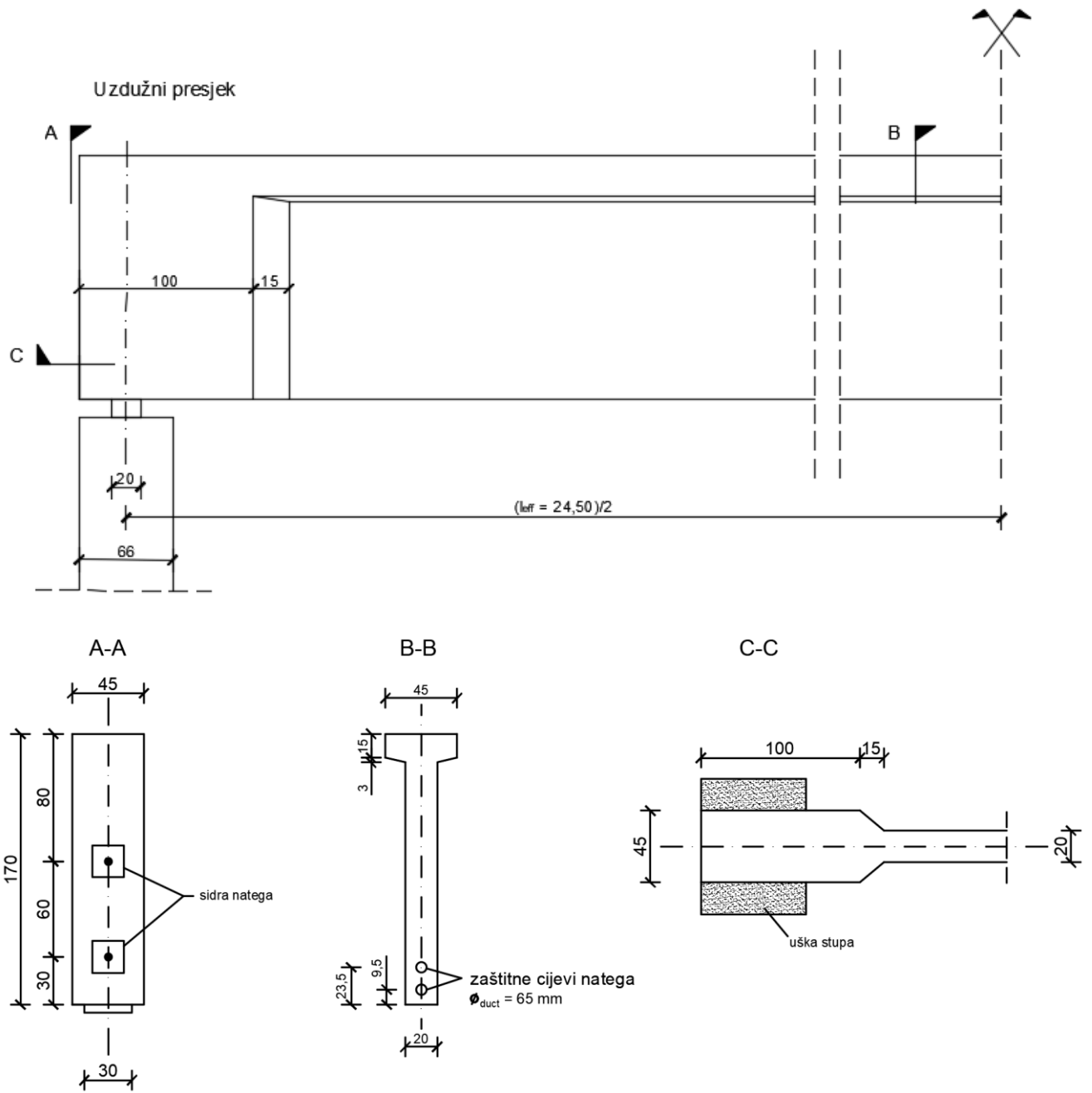
Proizvodna hala izvedena je od betonskih stupova i predgotovljenih prednapetih betonskih elemenata. Montažni stupovi hale zajedno sa sekundarnim nosačima čine statički sustav okvira u uzdužnome smjeru, dok stupovi i prednapeti krovni nosači u poprečnome smjeru čine poprečne okvire. Osne dimenzije proizvodne hale su 48,0 m x 25,16 m, a površina prizemlja iznosi približno 1208 m². Izvedba prednapinjanja elemenata provedena je sustavom sprezanja pomoću naknadno injektiranog cementnog morta.



Slika 1: Tlocrtne dimenzije proizvodne hale [1]

Proračun se provodi za jednostavni prednapeti nosač. 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 $E_{cm} = 34\,000 \text{ MPa}$

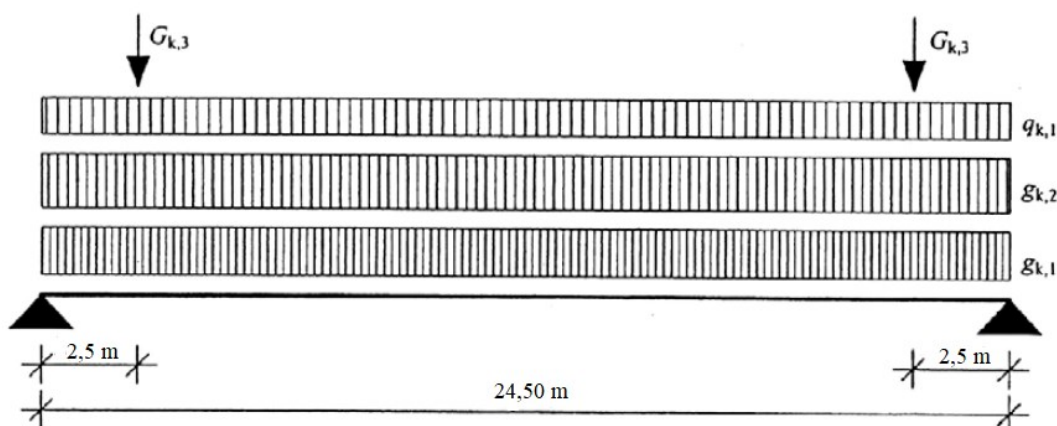
Čelik za armiranje B500A:

- 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. STALNA I PROMJENJIVA DJELOVANJA



Slika 3: Statički sustav prednapetog nosača [1]

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

$$A_c = (b_{eff} - b_w) * h_f + b_w * h = (45 - 20) * 16,5 + 20 * 170$$

$$A_c = 3812,5 \text{ cm}^2 = 0,381 \text{ m}^2$$

Stalno djelovanje

- Krovni nosač: $g_{k,1} = \gamma * A_c = 25 * 0,381 = 9,53 \text{ kN/m}$
- 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.

$$g_{k,2} = (7,2 * 0,2 + 0,23) * 6,0 = 10,02 \text{ kN/m}$$

$$g_{k,1} + g_{k,2} = 9,53 + 10,02 = 19,55 \text{ kN/m}$$

$G_{k,3}$ je vrijednost koja predstavlja dodatnu vlastitu težinu od proširenja nosača nad osloncem i ovješene podesta. Pojednostavljeno, uzeto je:

$$G_{k,3} = 0 \text{ kN}$$

Opterećenje snijegom

- $s = 1,24 \text{ kN/m}^2$
- Za ploču širine 6,0 m: $q_{k,1} = s * 6,0 = 1,24 * 6,0 = 7,44 \text{ kN/m}$
- 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 dvije razine.
- Jednadžba parabole opisana je izrazom:

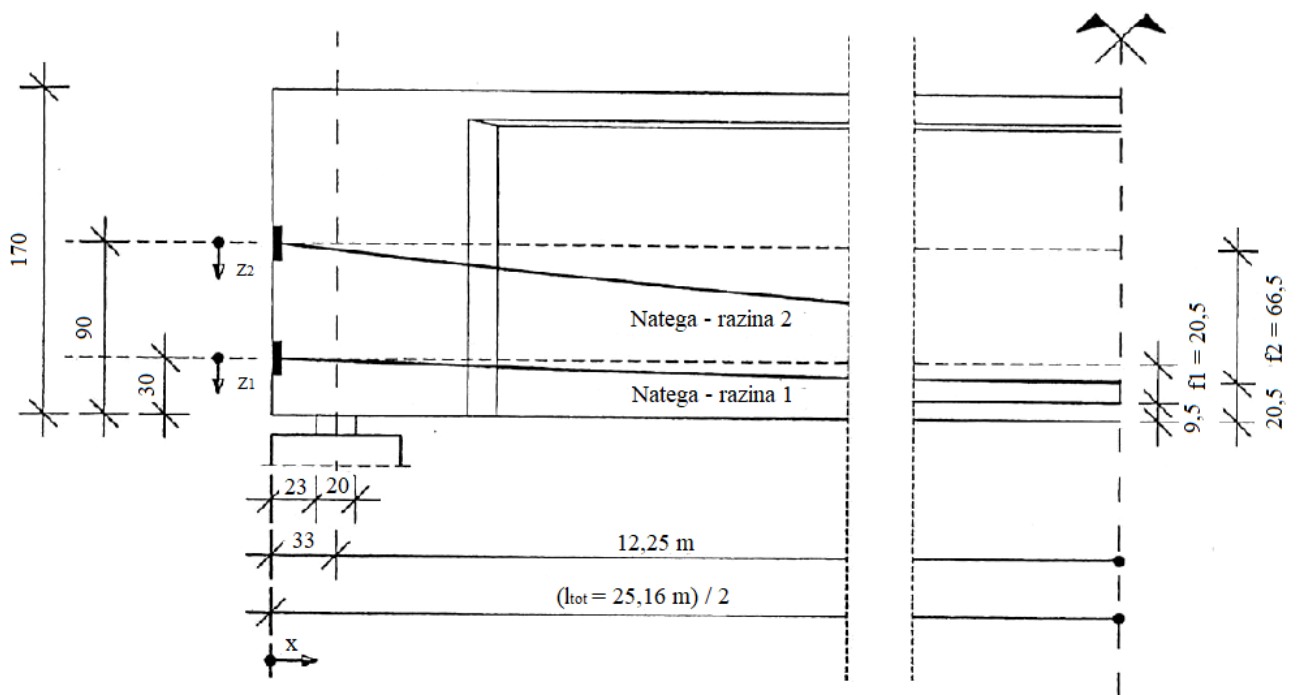
$$z(x) = 4 * f * \left(\frac{x}{l_{tot}} - \frac{x^2}{l_{tot}^2} \right),$$

gdje je f oznaka za strelicu parabole natege.

- Kut skretanja natege opisan je izrazom:

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

- Strelice parabola natega iznose:
 - Za razinu natege 1: $f_1 = 30,0 - 9,5 = 20,5 \text{ cm}$
 - Za razinu natege 2: $f_2 = 90,0 - 23,5 = 66,5 \text{ cm}$



Slika 4: Položaj natega u nosaču [1]

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

$$z_g = h - z_d = 170 - 93,3 = 76,7 \text{ cm}$$

Vrijednost momenta tromosti betonskog presjeka dobiva se iz izraza:

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

$$I_c = \frac{(45 - 20) * 16,5^3}{12} + [(45 - 20) * 16,5] * \left(76,7 - \frac{16,5}{2}\right)^2 + \frac{20 * 170^3}{12} + (20 * 170) * \left(93,3 - \frac{170}{2}\right)^2$$

$$I_c = 10\,364\,646,46 \text{ cm}^4 \approx 0,104 \text{ m}^4$$

Moment otpora gornjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_g = \frac{I_c}{z_g} = \frac{0,104}{0,767} = 0,13559 \text{ m}^3$$

Moment otpora donjeg ruba presjeka iznosi:

$$W_d = \frac{I_c}{z_d} = \frac{0,104}{0,933} = 0,11147 \text{ m}^3$$

Udaljenost gornjeg ruba jezgre:

$$k_g = \frac{W_d}{A_c} = \frac{0,11147}{0,381} = 0,293 \text{ m}$$

Udaljenost donjeg ruba jezgre:

$$k_d = \frac{W_g}{A_c} = \frac{0,13559}{0,381} = 0,356 \text{ m}$$

Udaljenost težišta betonskog presjeka od težišta prednapete armature:

$$z_{cp} = z_d - \left(\frac{23,5 + 9,5}{2}\right) = 93,30 - \left(\frac{23,5 + 9,5}{2}\right) = 76,8 \text{ cm} = 0,768 \text{ m}$$

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:

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + G_{k,3} * 2,5 + \left(\frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(9,53 + 10,02) * 24,50^2}{8} \right) + 0 * 2,5 + \left(\frac{7,44 * 24,50^2}{8} \right) * 0$$

$$M_{Ed,perm} = 1466,86 \text{ kNm}$$

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 [1]:

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

iz čega slijedi da je:

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

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

$$P_{m\infty} = \frac{M_{Ed,perm} - f_{ctm} * W_d}{z_{cp} + k_g} = \frac{146686 - 0,32 * 0,11147 * 10^6}{76,8 + 29,3}$$

$$P_{m\infty} = 1046,33 \text{ kN}$$

Pomoću koeficijenta „m“ u obzir se uzimaju vremenski gubici naprezanja u čeliku uzrokovanih puzanjem, skupljanjem i relaksacijom [1].

Kako bi se uzeli u obzir početni gubici, koji nastaju kao posljedica trenja, prokliznuća klina i elastične deformacije, potrebno je primijeniti koeficijent „δ“ [1].

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

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

Potrebna površina prednapete armature dobiva se iz izraza:

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

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

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

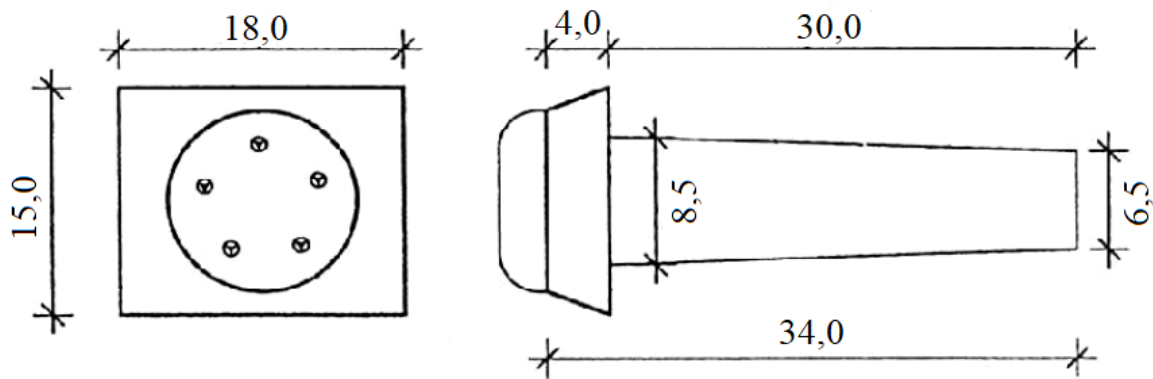
$$\sigma_{p \max, \max} = 1350 \text{ MPa}$$

$$A_p = \frac{P_{m\infty}}{\delta * m * \sigma_{p, \max}} = \frac{1046,33}{0,75 * 135,0} = 10,33 \text{ cm}^2$$

Usvajaju se dvije natege ukupne površine:

$$A_p = 2 * 5,5 = 11 \text{ cm}^2$$

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



Slika 6: Skica i dimenzije natege [1]

4.2. 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:

$$d_p = h - \left(\frac{9,5 + 23,5}{2} \right) = 170 - 16,5 = 153,5 \text{ cm}$$

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

$$d_s = d_p = 153,5 \text{ cm}$$

Vrijednost kraka unutarnjih sila uzima se kao:

$$z_p = z_s = z \approx 0,9 * d_p = 0,9 * 153,5 = 138,15 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

$$M_{Ed} = (G_{k,3} * 2,5) * \gamma_G + \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2})}{8} * l^2 \right) * \gamma_G + \left(\frac{q_{k,1}}{8} * l^2 \right) * \gamma_Q$$

$$M_{Ed} = (0 * 2,5) * 1,35 + \left(\frac{(9,53 + 10,02)}{8} * 24,5^2 \right) * 1,35 + \left(\frac{7,44}{8} * 24,5^2 \right) * 1,5$$

$$M_{Ed} = 2817,61 \text{ kNm}$$

Pretpostavka je da do popuštanja dolazi u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature dobiva se prema sljedećem izrazu:

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

$$A_{s1} = \frac{281761 - 11 * 130,44 * 0,9 * 153,5}{43,5 * 0,9 * 153,5} = 13,90 \text{ cm}^2$$

Odabire se vlačna armatura $A_{s1} = 2\text{Ø}25 + 3\text{Ø}20$ ($9,82 + 9,43 = 19,25 \text{ cm}^2$).

Osim vlačne armature, odabire se i tlačna armatura $A_{s2} = 4\text{Ø}28$ ($24,6 \text{ cm}^2$).

4.3. 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 jednu nategu iznosi $A_p = 5,5 \text{ cm}^2$

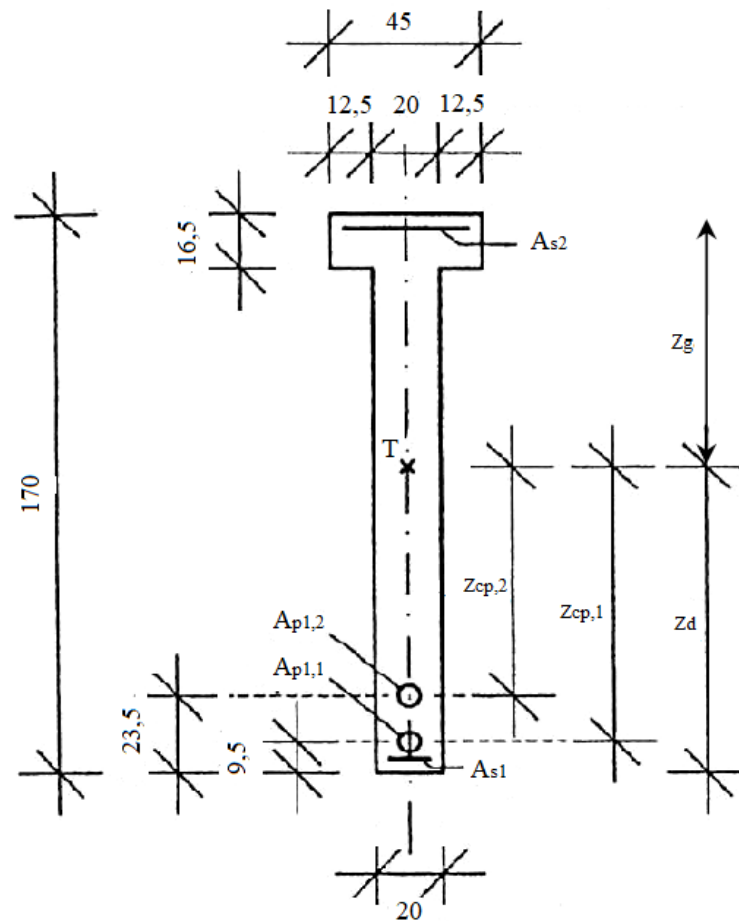
$$\alpha_{E,p} = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195000}{34000} = 5,74$$

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

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 | $A_c [m^2]$ | $I_c [m^4]$ | $z_d [m]$ | $z_g [m]$ | $z_{cp,1} [m]$ | $z_{cp,2} [m]$ | $z_{cp} [m]$ |
|---------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------------|----------------|--------------|
| Bruto | 0,381 | 0,104 | 0,933 | 0,767 | 0,838 | 0,698 | 0,768 |
| Neto | 0,375 | 0,100 | 0,947 | 0,753 | 0,852 | 0,712 | 0,782 |
| Idealno | 0,408 | 0,119 | 0,923 | 0,777 | 0,828 | 0,688 | 0,758 |



Slika 7: Geometrijske karakteristike presjeka nosača [1]

5. 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:

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

Neposredno nakon napinjanja, naprezanje u čeliku smije iznositi:

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

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

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

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

6. GUBICI SILE PREDNAPINJANJA

6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog elastične deformacije

Prednapinjanje natege 1 vrši se u presjeku gdje je $x=0$ m, a prednapinjanje natege 2 na suprotnome kraju odnosno u presjeku gdje je $x=25,16$ m. S obzirom da se prednapinjanje natega izvodi na različitim krajevima, gubici uzrokovani elastičnim skraćanjem betona su zanemarivo mali.

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

6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

Gubitak sile prednapinjanja kao posljedica trenja opisan je izrazom:

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

iz čega slijedi da je:

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

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:

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

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

1. Natega $f=0,205$ m

$$\theta(x) = \frac{8 * x * f}{l_{tot}^2} = \frac{8 * x * 0,205}{25,16^2} = 0,00259 * x$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k*x)}) = 1 - e^{-\mu(0,00259*x+0,0055*x)}$$

2. Natega $f=0,665$ m

$$\theta(x) = \frac{8 * x * f}{l_{tot}^2} = \frac{8 * x * 0,665}{25,16^2} = 0,00840 * x$$

$$\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu(\theta+k*x)}) = 1 - e^{-\mu(0,00840*x+0,0055*x)}$$

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

| Natega | $\frac{\Delta P_{\mu}(x)}{P_{max}} = (1 - e^{-\mu*(\theta+k*x)})$ | | |
|---------------|---|---------|---------|
| | x=0 | x=12,58 | x=25,16 |
| 1 (f=0,205 m) | 0 | 0,02115 | 0,04184 |
| 2 (f=0,665 m) | 0 | 0,03605 | 0,07081 |

6.3. 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} [1].

Potrebno je proračunati i duljinu utjecaja prokliznuća klina l_{sl} i gubitak sile prednapinjanja ΔP_{sl} da bi spoznali tok sile prednapinjanja duž natega [1].

Kao mjerodavan podatak za proračun, koristi se vrijednost prokliznuća klina $\Delta l_{sl} = 2,0 \text{ mm}$ koju definira proizvođač [1].

1. Natega f=0,205 m

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

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} * E_p * A_p}{P_{max} * \mu * \left(\frac{8 * f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 * 195000 * 10^6 * 5,5 * 10^{-4}}{742,5 * 10^3 * 0,21 * \left(\frac{8 * 0,205}{25,16^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 13,04 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 * 742,5 * 10^3 * 0,21 * 13,04 * \left(\frac{8 * 0,205}{25,16^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 32901,16 \text{ N} = 32,90 \text{ kN}$$

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

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 742,5 * (1 - e^{-0,21*(0,00259*x+0,0055*x)}) \quad \text{za } x \geq 13,04 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 13,04) = 16,27 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 25,16) = 31,07 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(13,04) = 742,5 - 16,27 = 726,23 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(25,16) = 742,5 - 31,07 = 711,43 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(l_{sl} = 13,04) = 726,23 \text{ kN} > P_{m0,max} = 701,25 \text{ kN}$$

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_0 [kN] | ΔP_{sl} [kN] | l_{sl} [m] |
| 1 | 717,2 | 32,3 | 13,27 |
| 2 | 722,2 | 42,5 | 10,09 |

Provjera dobivenih vrijednosti:

1. Natega $f=0,205$ m

$$P_{max} = 717,2 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} * E_p * A_p}{P_{max} * \mu * \left(\frac{8 * f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 * 195000 * 10^6 * 5,5 * 10^{-4}}{717,2 * 10^3 * 0,21 * \left(\frac{8 * 0,205}{25,16^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 13,27 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 * 717,2 * 0,21 * 13,27 * \left(\frac{8 * 0,205}{25,16^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 32,3 \text{ kN}$$

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

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 717,2 * (1 - e^{-0,21 * (0,00259 * x + 0,0055 * x)}) \quad \text{za } x \geq 13,27$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 13,27) = 15,99 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 25,16) = 30,01 \text{ kN}$$

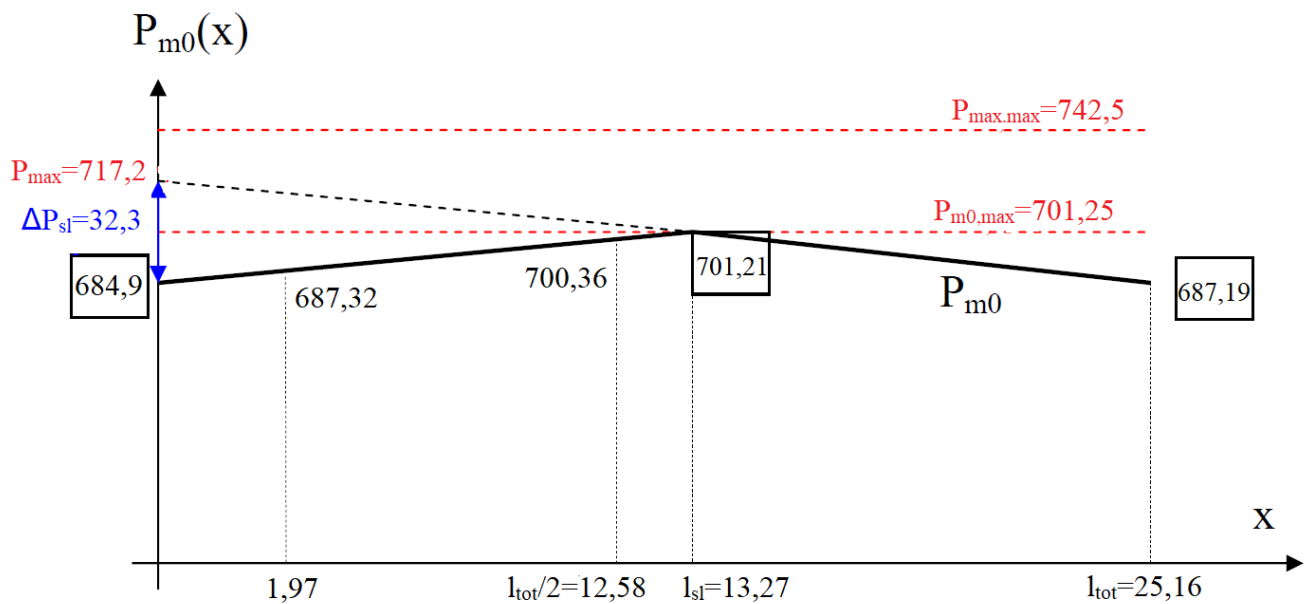
$$P_{m0}(13,27) = 717,2 - 15,99 = 701,21 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(25,16) = 717,2 - 30,01 = 687,19 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 717,2 - 32,3 = 684,9 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(12,58) = 684,9 + \frac{701,21 - 684,9}{13,27} * 12,58 = 700,36 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(1,97) = 684,9 + \frac{701,21 - 684,9}{13,27} * 1,97 = 687,32 \text{ kN}$$



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

Tablica 4: Vrijednost sile prednapinjanja nakon početnih gubitaka za nategu 1

| | | | |
|---------------|-------|--------|--------|
| X [m] | 0 | 12,58 | 25,16 |
| P_{m0} [kN] | 684,9 | 700,36 | 687,19 |

2. Natega $f=0,665$ m

$$P_{max} = 722,2 \text{ kN}$$

$$l_{sl} = \sqrt{\frac{\Delta l_{sl} * E_p * A_p}{P_{max} * \mu * \left(\frac{8 * f}{l_{tot}^2} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,002 * 195000 * 10^6 * 5,5 * 10^{-4}}{722,2 * 10^3 * 0,21 * \left(\frac{8 * 0,665}{25,16^2} + 0,0055\right)}}$$

$$l_{sl} = 10,09 \text{ m}$$

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

$$\Delta P_{sl} = 2 * 722,2 * 0,21 * 10,09 * \left(\frac{8 * 0,665}{25,16^2} + 0,0055\right)$$

$$\Delta P_{sl} = 42,5 \text{ kN}$$

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

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

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

$$\Delta P_{\mu}(x) = 722,2 * (1 - e^{-0,21 * (0,00840 * x + 0,0055 * x)}) \quad \text{za } x \geq 10,09$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 10,09) = 20,96 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{\mu}(x = 25,16) = 51,14 \text{ kN}$$

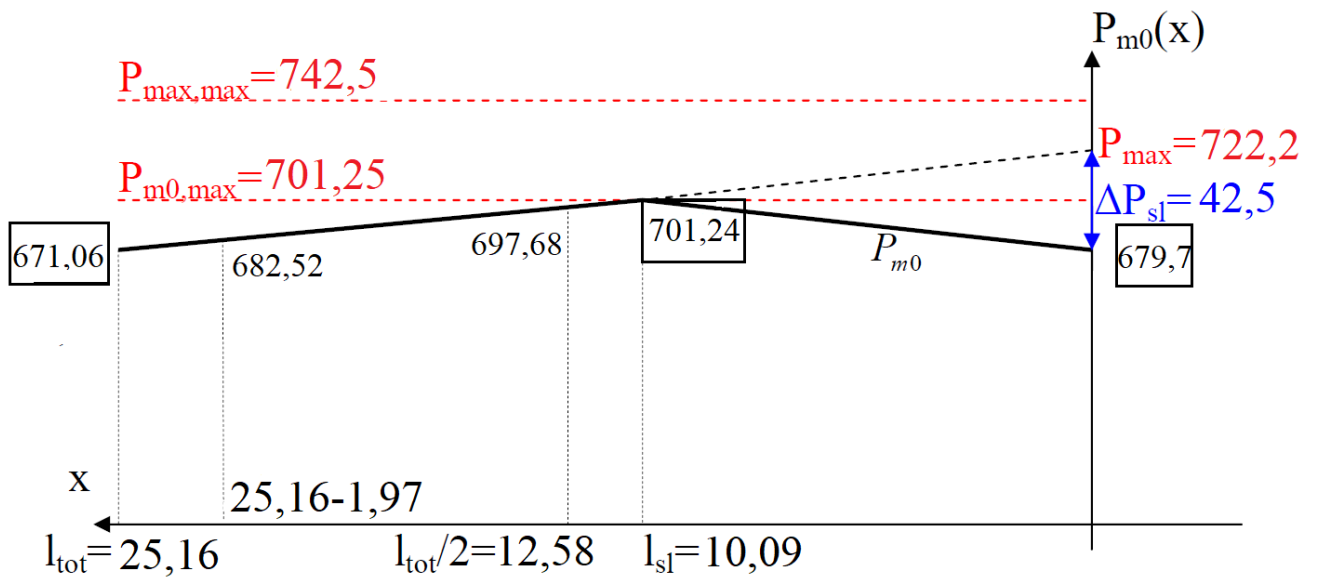
$$P_{m0}(10,09) = 722,2 - 20,96 = 701,24 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(25,16) = 722,2 - 51,14 = 671,06 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{sl} = 722,2 - 42,5 = 679,7 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(12,58) = 679,7 + \frac{701,24 - 679,7}{25,16 - 10,09} * 12,58 = 697,68 \text{ kN}$$

$$P_{m0}(25,16 - 1,97) = 679,7 + \frac{701,24 - 679,7}{25,16 - 10,09} * 1,97 = 682,52 \text{ kN}$$



Slika 9: Dijagram gubitaka sile prednapinjanja za nategu 2 (konačne vrijednosti) [1]

Tablica 5: Vrijednost sile prednapinjanja nakon početnih gubitaka za nategu 2

| | | | |
|---------------|--------|--------|-------|
| X [m] | 25,16 | 12,58 | 0 |
| P_{m0} [kN] | 671,06 | 697,68 | 679,7 |

6.4. Vremenski gubici

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

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

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 koja iznosi $\varepsilon_{cs} = -0,564 \text{ ‰} = -0,000564$

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

$E_{cm} = 34\,000 \text{ MPa}$ – 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.

$\varphi(t, t_0) = 3,1$ – koeficijent puzanja

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

$A_c = 0,381 \text{ m}^2$ – ploština betonskog presjeka

$A_p = 11 \text{ cm}^2$ – ploština presjeka natega u promatranom području

$I_c = 0,104 \text{ m}^4$ – moment tromosti betonskog presjeka

$z_{cp} = 0,768 \text{ m}$ – 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:

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

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:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{m0,1} + P_{m0,2}}{A_{p1} + A_{p2}} = \frac{700,36 * 10^3 + 697,68 * 10^3}{5,5 * 10^{-4} + 5,5 * 10^{-4}} = 1270,95 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1270,95}{1770} = 0,718$$

Gubitak naprezanja nakon 500 000 sati uzrokovan opuštanjem:

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

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,718} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75*(1-0,718)} * 10^{-5}$$

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

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

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

$$\Delta\sigma_{pr} = 1270,95 * \left[0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,718} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75*(1-0,718)} * 10^{-5} \right]$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 53,71 \text{ MPa}$$

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

$$M_{QP} = \frac{g_{k,1} + g_{k,2}}{8} * l^2 + G_{k,3} * 2,5 = \frac{9,53 + 10,02}{8} * 24,5^2 + 0 * 2,5$$

$$M_{QP} = 1466,86 \text{ kNm}$$

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

$$\sigma_{c,QP} = \frac{M_{QP} * z_{cp}}{I_c} + \left(-\frac{P_{m0,1} + P_{m0,2}}{A_c} - \frac{(P_{m0,1} + P_{m0,2}) * z_{cp}}{I_c} * z_{cp} \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = \frac{1466,86 * 10^3 * 0,768}{0,104} + \left(-\frac{700,36 * 10^3 + 697,68 * 10^3}{0,381} - \frac{(700,36 * 10^3 + 697,68 * 10^3) * 0,768}{0,104} \right)$$

$$\sigma_{c,QP} = 10,83 - 11,60 = -0,766 \text{ MPa} \quad (\text{tlak})$$

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

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

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{0,000564 * 195000 + 0,8 * 53,71 + \frac{195000}{34000} * 3,1 * 0,766}{1 + \frac{195000}{34000} * \frac{11 * 10^{-4}}{0,381} * \left(1 + \frac{0,381}{0,104} * 0,768^2\right) * [1 + 0,8 * 3,1]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 140,90 \text{ MPa}$$

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

$$\Delta P_{c+s+r} = \Delta\sigma_{p,c+s+r} * A_p = 140,90 * 10^3 * 5,5 * 10^{-4} = 77,50 \text{ kN}$$

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

1. Natega

$$P_{m\infty} = P_{m0} - \Delta P_{c+s+r} = 700,36 - 77,50 = 622,86 \text{ kN}$$

Tablica 6: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu I nakon vremenskih gubitaka

| x [m] | 0 | 12,58 | 25,16 |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| $P_{m0}(x)$ [kN] | 684,9 | 700,36 | 687,19 |
| $P_{m\infty}(x)$ [kN] | 607,4 | 622,86 | 609,69 |

2. Natega

$$P_{m\infty} = P_{m0} - \Delta P_{c+s+r} = 697,68 - 77,50 = 620,18 \text{ kN}$$

Tablica 7: Srednje vrijednosti sile prednapinjanja za nategu 2 nakon vremenskih gubitaka

| | | | |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| x [m] | 0 | 12,58 | 25,16 |
| $P_{m0}(x)$ [kN] | 679,7 | 697,68 | 671,06 |
| $P_{m\infty}(x)$ [kN] | 602,2 | 620,18 | 593,56 |

7. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Proračunska čvrstoća betona:

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

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 [1].

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:

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

7.1. Savijanje s uzdužnom silom

7.1.1. Dimenzioniranje presjeka u sredini polja $t=\infty$

Statička visina čelika za prednapinjanje iznosi:

$$d_p = h - \left(\frac{9,5 + 23,5}{2} \right) = 170 - 16,5 = 153,5 \text{ cm}$$

Statička visina čelika za armiranje na strani sigurnosti iznosi:

$$d_s = d_p = 153,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja u sredini raspona iznosi:

$$M_{Ed} = (G_{k,3} * 2,5) * \gamma_G + \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2})}{8} * l^2 \right) * \gamma_G + \left(\frac{q_{k,1}}{8} * l^2 \right) * \gamma_Q$$

$$M_{Ed} = (0 * 2,5) * 1,35 + \left(\frac{(9,53 + 10,02)}{8} * 24,5^2 \right) * 1,35 + \left(\frac{7,44}{8} * 24,5^2 \right) * 1,5$$

$$M_{Ed} = 2817,61 \text{ kNm}$$

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.

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{281761}{45 * 153,5^2 * 2,33} = 0,114 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

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

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

$$\varepsilon_{s1} = 19,5 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,152$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,937$$

$$\mu_{Ed} = 0,115$$

$$x = \xi * d = 0,152 * 153,5 = 23,33 \text{ cm} > h_f = 16,5 \text{ cm}$$

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.

$$\frac{b_{eff}}{b_w} = \frac{45}{20} = 2,25 < 5 \quad - \text{uvjet nije zadovoljen}$$

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

1. Iteracija

$$\frac{b_{eff}}{b_w} = \frac{45}{20} = 2,25$$

$$\frac{h_f}{d} = \frac{16,5}{153,5} = 0,107$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,17 \text{ (pretpostavljeno)}$$

Na osnovu navedenih parametara iz tablice se očita $\lambda_b = 0,855$

Tablica 8: Tablica za dimenzioniranje T-presjeka za betone razreda čvrstoće od C12/15 do C50/60 [1]

| 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:

$$b_i = \lambda_b * b_{eff} = 0,855 * 45 = 38,48 \text{ cm}$$

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

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b_i * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{281761}{38,48 * 153,5^2 * 2,33} = 0,133 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Iz tablica se ponovno očita:

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

$$\varepsilon_{s1} = 16,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,179$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,925$$

$$\mu_{Ed} = 0,134$$

Dobivena vrijednost $\xi = 0,179$ u prvoj iteraciji ne razlikuje se previše od pretpostavljene vrijednosti $\xi = 0,17$, stoga nije potrebno provoditi daljnje iteracije.

Pretpostavlja se da dolazi do popuštanja u prednapetoj armaturi:

$$\sigma_p = f_{pd}$$

Potrebna površina vlačne armature:

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

$$A_{s1} = \frac{281761 - 11 * 130,44 * 0,925 * 153,5}{43,48 * 0,925 * 153,5} = 12,64 \text{ cm}^2$$

Odabire se armatura 2Ø25+3Ø20 (9,82+9,42=19,24 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:

$$\sigma_{pm\infty} = \frac{P_{m\infty,1} + P_{m\infty,2}}{A_{p1} + A_{p2}} = \frac{622,86 * 10^3 + 620,18 * 10^3}{5,5 * 10^{-4} + 5,5 * 10^{-4}} = 1130,04 \text{ MPa}$$

Predizduženje (preddeformacija) iznosi:

$$\varepsilon_{pm\infty} = \frac{\sigma_{pm\infty}}{E_p} = \frac{1130,04}{195000} = 5,80 * 10^{-3} = 5,80 \text{ ‰}$$

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

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pm\infty} + \Delta\varepsilon_p = 5,80 + 16 = 21,8 \text{ ‰}$$

$\varepsilon_p = 21,8 \text{ ‰} > \varepsilon_{pd} = 6,69 \text{ ‰} \rightarrow$ u čeliku za prednapinjanje došlo je do popuštanja

7.1.2. Provjera najvećeg i najmanjeg postotka armiranja

Nacionalnim dodatkom definirana je preporučena minimalna ploština presjeka armature,

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

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

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{3,2}{500} * 20 * 166 \geq 0,0013 * 20 * 166$$

$$A_{s,min} = 5,52 > 4,32$$

$$A_{s,min} = 5,52 \text{ cm}^2$$

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

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

$$A_c = h * b_{eff}$$

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

$$A_c = 2,5 * h_f * b_{eff}$$

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

$$A_c = h * b_{eff}$$

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

$$A_c = 3,0 * h_f * b_{eff}$$

Beton C35/45

$$0,45 * 166 = 74,7 \text{ cm} > h_f = 16,5 \text{ cm} \rightarrow \text{slučaj b)}$$

$$A_c = 2,5 * h_f * b_{eff} = 2,5 * 16,5 * 45 = 1856,25 \text{ cm}^2$$

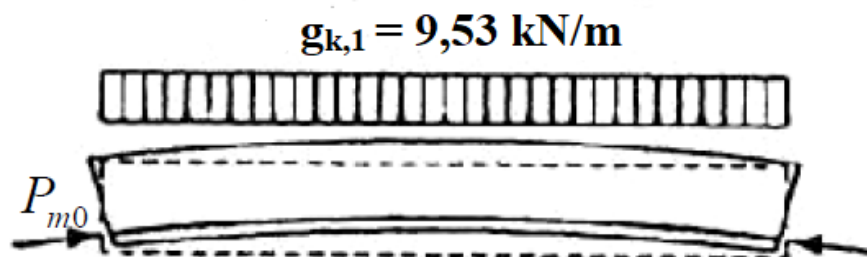
$$A_{S1,max} = 0,022 * A_c = 0,022 * 1856,25 = 40,84 \text{ cm}^2$$

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

$$5,52 \text{ cm}^2 \leq 19,24 \text{ cm}^2 \leq 40,84 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{Zadovoljeno!}$$

7.1.3. 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 10: Skica deformacije i unosa sile u fazi gradnje za prednapeti krovni nosač [1]

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. Zanemaruje se gubitak sile prednapinjanja uzrokovan skraćanjem betona. Prednapinjanje kao predizduženje, odnosno preddeformacija, potrebno je uzeti na strani djelovanja [1].

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

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

$$M_{Ed,g} = \left(\frac{9,53}{8} * 24,5^2 \right) * 1,0 = 715,05 \text{ kNm}$$

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

$$N_{Ed} = -P_{m0} * \gamma_P = -(P_{m0,1} + P_{m0,2})\gamma_P = -(700,36 + 697,68) * 1,0 = -1398,04 \text{ kN}$$

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

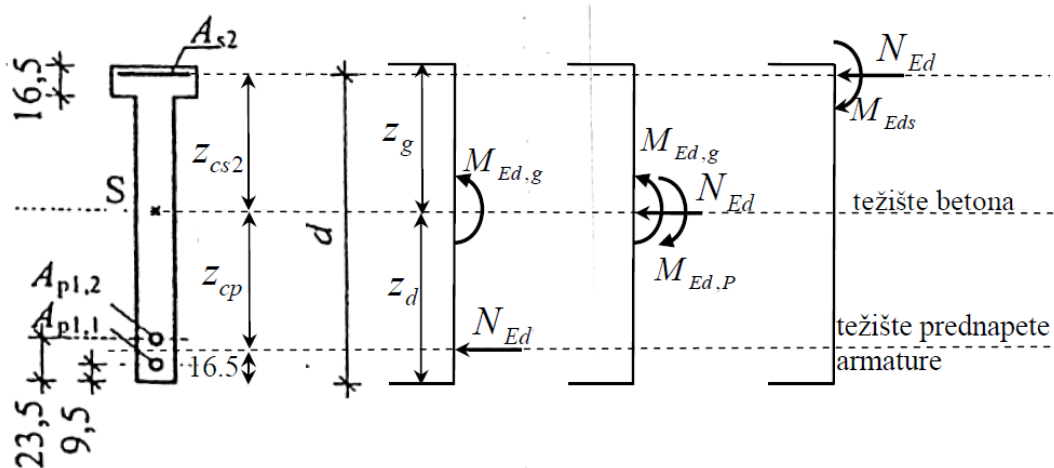
$$M_{Ed,P} = -(P_{m0} * z_{cp}) * \gamma_P = -((P_{m0,1} + P_{m0,2}) * z_{cp}) * \gamma_P$$

$$M_{Ed,P} = -((700,36 + 697,68) * 0,768) * 1,0 = -1073,69 \text{ kNm}$$

Rezne sile s obzirom na težište betona:

$$M_{Ed,g} + M_{Ed,P} = 715,05 - 1073,69 = -358,64 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1398,04 \text{ kN}$$



Slika 11: Skica položaja reznih sila [1]

Udaljenost između težišta betonskog presjeka i težišta gornje armature:

$$z_{cs2} = z_g - \frac{h_f}{2} = 76,7 - \frac{16,5}{2} = 68,45 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja s obzirom na os gornje zone armature:

$$M_{Eds} = M_{Ed,g} + M_{Ed,p} - N_{Ed} * z_{cs2}$$

$$M_{Eds} = 715,05 - 1073,69 - 1398,04 * 0,6845 = -1315,60 \text{ kNm}$$

Statička visina čelika za armiranje:

$$d = h - \frac{h_f}{2} = 170 - \frac{16,5}{2} = 161,75 \text{ cm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{131560}{20 * 161,75^2 * 2,33} = 0,108 < \mu_{Rd,lim} = 0,296$$

Očitano iz tablica:

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

$$\varepsilon_{s2} = 20,0 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,145$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0,940$$

$$\mu_{Ed} = 0,110$$

$$A_{s2} = \frac{M_{Eds}}{\zeta * d * f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{131560}{0,940 * 161,75 * 43,48} - \frac{1398,04}{43,48} = -12,25 \text{ cm}^2$$

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

Usvaja se tlačna armatura $A_{s2} 4\phi 28$ ($24,6 \text{ cm}^2$).

7.2. Provjera na poprečne sile

7.2.1. Proračunska nosivost na poprečnu silu

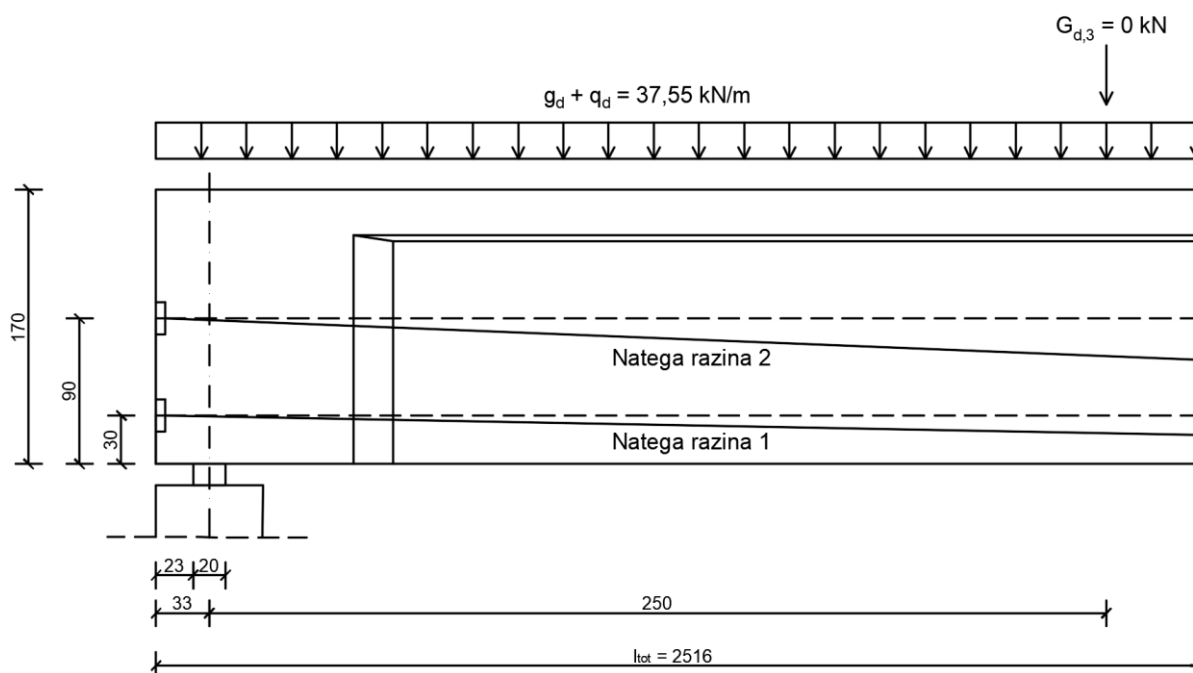
Za nagnuto vođenje natega za prednapinjanje, proračunska vrijednost poprečne sile iznosi,

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

gdje je:

V_{pd} – komponenta poprečne sile nagnute natega

V_{0d} – proračunska poprečna sila u presjeku



Slika 12: Proračunska djelovanja i mjesto proračuna poprečne sile

Proračunsko stalno i promjenjivo djelovanje iznosi:

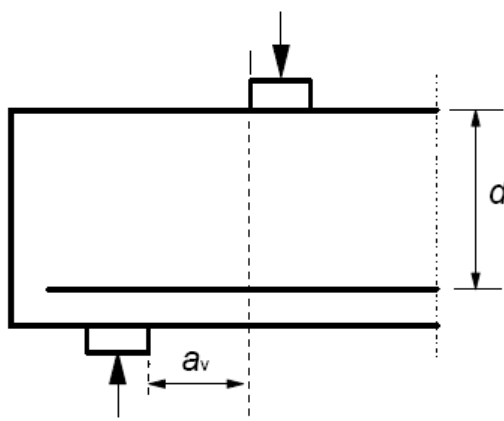
$$g_d + q_d = (g_{k,1} + g_{k,2}) * \gamma_G + q_{k,1} * \gamma_Q = (9,53 + 10,02) * 1,35 + 7,44 * 1,5$$

$$g_d + q_d = 37,55 \text{ kN/m}$$

$$G_{d,3} = G_{k,3} * \gamma_G = 0 * 1,35 = 0 \text{ kN}$$

Redukcija zbog utjecaja koncentrirane sile na udaljenosti a_v :

$$a_v = 2,50 - 0,10 = 2,40 \text{ m}$$



Slika 13: Skica udaljenosti a_v [1]

Kod svih elemenata koji su s gornje strane opterećeni koncentriranom silom unutar granica $0,5d \leq a_v \leq 2d$ od ruba oslonca, potrebno je doprinos takvog opterećenja na poprečnu silu pomnožiti s $\beta = a_v/2d$. Pretpostavlja se da je uzdužna armatura potpuno usidrena na osloncu. Ukoliko je udaljenost $a_v < 0,5d$, potrebno je koristiti vrijednost $a_v = 0,5d$ [1].

S obzirom da koncentrirana sila $G_{d,3}$ zadana u ovome radu iznosi 0, nije potrebno proračunavati vrijednost β .

Proračunska reducirana poprečna sila, potrebna za određivanje poprečne armature:

$$V_{0d,red} = (g_d + q_d) * \frac{l}{2} - (g_d + q_d)(d + 0,1) + \beta * G_{d,3}$$

$$V_{0d,red} = (g_d + q_d) * \left(\frac{l}{2} - d - 0,1\right) + \beta * G_{d,3}$$

$$V_{0d,red} = 37,55 * \left(\frac{24,50}{2} - 1,535 - 0,1\right) + 0$$

$$V_{0d,red} = 398,59 \text{ kN}$$

Proračunska poprečna sila, potrebna za dokazivanje tlačnih štapova betona:

$$V_{0d} = (g_d + q_d) * \frac{l}{2} + G_{d,3}$$

$$V_{0d} = 37,55 * \frac{24,5}{2} + 0$$

$$V_{0d} = 459,99 \text{ kN}$$

Funkcija položaja natege:

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

Prva derivacija funkcije položaja natege:

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

Nagib natega za promatrani presjek na udaljenosti $x = 0,23 + 0,20 + 1,535 = 1,97 \text{ m}$ od ruba oslonca:

Natega 1. razine:

$$\tan \alpha_1 = 4 * f * \left(\frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 * x}{l_{tot}^2}\right) = 4 * 0,205 * \left(\frac{1}{25,16} - \frac{2 * 1,97}{25,16^2}\right) = 0,0275$$

Natega 2. razine:

$$\tan \alpha_2 = 4 * f * \left(\frac{1}{l_{tot}} - \frac{2 * x}{l_{tot}^2} \right) = 4 * 0,665 * \left(\frac{1}{25,16} - \frac{2 * 1,97}{25,16^2} \right) = 0,0892$$

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

$$P_{m0,1}(1,97) = 687,32$$

$$P_{m0,2}(1,97) = 682,52$$

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

$$P_{m\infty,1}(1,97) = P_{m0,1}(1,97) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} * A_p = 687,32 - 77,50 = 609,82$$

$$P_{m\infty,2}(1,97) = P_{m0,2}(1,97) - \Delta\sigma_{p,c+s+r} * A_p = 682,52 - 77,50 = 605,02$$

Poprečna komponenta sile prednapinjanja:

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

$$V_{pd} = P_{m\infty,1} * \sin \alpha_1 + P_{m\infty,2} * \sin \alpha_2$$

$$V_{pd} = 609,82 * 0,0275 + 605,02 * 0,0892 = 70,74 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile, potrebna za određivanje poprečne armature:

$$V_{Ed,red} = V_{0d,red} - V_{pd} = 398,59 - 70,74 = 327,85 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost poprečne sile, potrebna za dokazivanje tlačnih štapova:

$$V_{Ed} = V_{0d} - V_{pd} = 459,99 - 70,74 = 389,25 \text{ kN}$$

7.2.2. 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:

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

Minimalna vrijednost:

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

gdje je:

f_{ck} u MPa

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{1535}} = 1,361 \leq 2$$

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

$$A_{sl} = A_{s1} = 19,24 \text{ cm}^2$$

l_{bd} – proračunska duljina sidrenja

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

ρ_1 – koeficijent armiranja uzdužne armature

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

$$\rho_1 = \frac{19,24}{20 * 153,5} = 0,00627 \leq 0,02$$

σ_{cp} – naprezanje kao posljedica djelovanja proračunske tlačne sile u betonu za promatrani presjek ($x = 1,97 \text{ m}$)

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

$$N_{Ed} = P_{m\infty,1}(1,97) + P_{m\infty,2}(1,97) = 609,82 + 605,02 = 1214,84 \text{ kN}$$

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

$$\sigma_{cp} = \frac{1214,84 * 10^3}{3,81 * 10^5} < 0,2 * 23,3$$

$$\sigma_{cp} = 3,189 \text{ MPa} < 4,66 \text{ MPa}$$

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

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

$$v_{min} = 0,035 * k^{\frac{3}{2}} * f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 * 1,361^{\frac{3}{2}} * 35^{\frac{1}{2}} = 0,329$$

$$k_1 = 0,15$$

Nosivost elementa na poprečnu silu bez poprečne armature:

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

$$V_{Rd,c} = \left[0,12 * 1,361 * (100 * 0,00627 * 35)^{\frac{1}{3}} + 0,15 * 3,189 \right] * 200 * 1535$$

$$\geq (0,329 + 0,15 * 3,189) * 200 * 1535$$

$$V_{Rd,c} = 287228,40 \text{ N} \geq 247856,45 \text{ N}$$

$$V_{Rd,c} = 287,23 \text{ kN} \geq 247,86 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,red} = 327,85 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 287,23 \text{ kN}$$

Potrebno je proračunati poprečnu armaturu.

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

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

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

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:

$$\theta = 40^\circ$$

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

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

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

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

Odabiru se dvorezne vilice (m=2) Ø8:

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

$$z = 0,9 * d$$

$$s = \frac{A_{sw}}{V_{Ed,red}} * z * f_{ywd} * \cot \theta = \frac{1,0}{327,85} * 0,9 * 153,5 * 43,48 * 1,192$$

$$s = 21,84 \text{ cm}$$

Usvojene su dvorezne vilice (m=2) Ø8/20 cm.

7.2.3. Dokaz čvrstoće tlačnih štapova

Nosivost tlačnih štapova određena je izrazom:

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

Nacionalnim dodatkom definirane su preporučene vrijednosti koeficijenata 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 $0,5f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0f_{cd}$

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

$$0 \leq 3,189 \leq 0,25 * 23,3$$

$$0 \leq 3,189 \leq 5,825 \rightarrow$$

$$\alpha_{cw} = \left(1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) = \left(1 + \frac{3,189}{23,3}\right) = 1,137$$

Preporučena vrijednost za v_1 je v .

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

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

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 $V_{Rd,max}$.

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

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

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} * b_w * z * v_1 * f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1,137 * 16,75 * 0,9 * 153,5 * 0,516 * 2,3}{1,192 + 0,839}$$

$$V_{Rd,max} = 1537,42 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = 1537,42 \text{ kN} > V_{Ed} = 389,25 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti tlačnih štapova je zadovoljen.

7.2.4. Najmanja potrebna poprečna armatura

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

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

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 $\phi 8$. Potrebno je proračunati minimalnu poprečnu armaturu (vilice) na osnovu pretpostavljenog promjera.

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

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

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

Nacionalnim dodatkom definirana je vrijednost za minimalni koeficijent armiranja:

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

Razmak vilica dobiven pomoću minimalnog koeficijenta armiranja:

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

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

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

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

$$327,85 \text{ kN} \leq 461,23 \text{ kN}$$

Najveći uzdužni razmak spona:

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

$$s_{l,max} = 0,75 * 1535 = 1151,25 > 300 \text{ mm}$$

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 ($m=2$) $\emptyset 8/20 \text{ cm}$.

7.3. Proračun duljina sidrenja i nastavljanja armature

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

$$l_{b,req} = \frac{\phi}{4} * \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

gdje je f_{bd} proračunska čvrstoća prijanjanja.

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd}$$

η_1 – koeficijent koji ovisi o tome gdje se nalazi šipka za vrijeme betoniranja (za dobre uvjete

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

$\eta_2 = 1,0$ za promjere šipki $\phi < 32 \text{ mm}$

$f_{ctd} = 1,50 \text{ MPa}$ za beton C35/45

Beton C35/45:

DOBRI UVJETI:

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

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

LOŠIJI UVJETI:

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

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

PRORAČUNSKA DULJINA SIDRENJA

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

Pojednostavljeno, može se koristiti ekvivalentna duljina sidrenja:

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

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

Tablica 9: Potrebne duljine sidrenja armature za dobre uvjete

| UVJETI | PROMJERI | DULJINA SIDRENJA |
|--------|-----------|---|
| Dobri | $\phi 12$ | $32,16 * 1,2 = 38,59 \approx 39 \text{ cm}$ |
| | $\phi 20$ | $32,16 * 2,0 = 64,32 \approx 65 \text{ cm}$ |
| | $\phi 25$ | $32,16 * 2,5 = 80,4 \approx 81 \text{ cm}$ |
| | $\phi 28$ | $32,16 * 2,8 = 90,05 \approx 91 \text{ cm}$ |

Tablica 10: Potrebne duljine sidrenja armature za lošije uvjete

| UVJETI | PROMJERI | DULJINA SIDRENJA |
|--------|----------|---|
| Lošiji | Ø12 | $46,06 * 1,2 = 55,27 \approx 56 \text{ cm}$ |
| | Ø20 | $46,06 * 2,0 = 92,12 \approx 93 \text{ cm}$ |
| | Ø25 | $46,06 * 2,5 = 115,2 \approx 116 \text{ cm}$ |
| | Ø28 | $46,06 * 2,8 = 128,97 \approx 129 \text{ cm}$ |

NASTAVLJANJE ARMATURE

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

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

α_6 – ovisi o postotku preklapljene armature u promatranome presjeku

Ukoliko preklapamo sve šipke u istom presjeku onda je:

$$\alpha_6 = 1,5$$

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

Tablica 11: Potrebne duljine nastavljanja armature za dobre uvjete

| UVJETI | PROMJERI | DULJINA SIDRENJA |
|--------|----------|---|
| Dobri | Ø12 | $1,5 * 39 = 58,5 \approx 59 \text{ cm}$ |
| | Ø20 | $1,5 * 65 = 97,5 \approx 98 \text{ cm}$ |
| | Ø25 | $1,5 * 81 = 121,5 \approx 122 \text{ cm}$ |
| | Ø28 | $1,5 * 91 = 136,5 \approx 137 \text{ cm}$ |

8. GRANIČNO STANJE UPORABIVOSTI

8.1. Granično stanje naprezanja

8.1.1. 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 [1].

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 [1]. Proračun naprezanja proveden je pomoću računalnog programa Mathcad.

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

Karakteristična kombinacija:

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

$$g_{k,1} = 9,53 \text{ kN/m}$$

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

$$M_{gk,1} = \frac{9,53 * 24,5^2}{8} = 715,05 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = M_{gk,1} = 715,05 \text{ kNm}$$

U trenutku t=0 srednja vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{m0} = P_{m0,1} + P_{m0,2} = 700,36 + 697,68 = 1398,04 \text{ kN}$$

U trenutku t=0 karakteristična vrijednost sile prednapinjanja iznosi:

$$P_{k0} = r * P_{m0} = 1 * 1398,04 = 1398,04 \text{ kN}$$

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

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

$$M_{cr} = 1,36 * 10^8 * \left(-3,2 - \frac{1398,04 * 10^3}{3,81 * 10^5} + \frac{1398,04 * 10^3 * 768}{1,36 * 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 139,46 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 715,05 \text{ kNm} > M_{cr} = 139,46 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -1,220 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -8,532 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1239,52 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = -34,27 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = -5,937 * 10^6 Pa$$

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

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

$$-1,22 MPa \leq 0,6 * 35 MPa$$

$$-1,22 MPa < 21 MPa$$

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

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

$$-34,27 MPa \leq 0,8 * 500 MPa$$

$$-34,27 MPa < 400 MPa$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1239,52 MPa \leq 0,75 * 1770 MPa$$

$$1239,52 MPa < 1327,5 MPa$$

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

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

$$-5,937 MPa \leq 0,6 * 35 MPa$$

$$-5,937 MPa < 21 MPa$$

Zadovoljena je kontrola naprezanja.

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

Karakteristična kombinacija:

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

$$M_{Ed,rare} = \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + G_{k,3} * 2,5 + \frac{q_{k,1} * l^2}{8}$$

$$M_{Ed,rare} = \left(\frac{(9,53 + 10,02) * 24,5^2}{8} \right) + 0 * 2,5 + \frac{7,44 * 24,5^2}{8} = 2025,09 kNm$$

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

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} + P_{m\infty,2} = 622,86 + 620,18 = 1243,04 kN$$

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

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 1243,04 = 1243,04 \text{ kN}$$

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

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

$$M_{cr} = 1,11 * 10^8 * \left(3,2 + \frac{1243,04 * 10^3}{3,81 * 10^5} + \frac{1243,04 * 10^3 * 768}{1,11 * 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,rare} = 2025,09 \text{ kNm} > M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

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:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -11,875 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -62,151 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1200,809 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 84,187 * 10^6 \text{ Pa}$$

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

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

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

$$-11,88 \text{ MPa} \leq 0,6 * 35 \text{ MPa}$$

$$-11,88 \text{ MPa} < 21 \text{ MPa}$$

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

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

$$84,19 \text{ MPa} \leq 0,8 * 500 \text{ MPa}$$

$$84,19 \text{ MPa} < 400 \text{ MPa}$$

Naprezanje u prednapetoj armaturi za karakterističnu kombinaciju (tlak):

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

$$1200,81 \text{ MPa} \leq 0,75 * 1770 \text{ MPa}$$

$$1200,81 \text{ MPa} < 1327,5 \text{ MPa}$$

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:

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + G_{k,3} * 2,5 + \left(\frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(9,53 + 10,02) * 24,5^2}{8} \right) + 0 * 2,5 + \left(\frac{7,44 * 24,5^2}{8} \right) * 0$$

$$M_{Ed,perm} = 1466,86 \text{ kNm}$$

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

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} + P_{m\infty,2} = 622,86 + 620,18 = 1243,04 \text{ kN}$$

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

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 1243,04 = 1243,04 \text{ kN}$$

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

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

$$M_{cr} = 1,11 * 10^8 * \left(3,2 + \frac{1243,04 * 10^3}{3,81 * 10^5} + \frac{1243,04 * 10^3 * 768}{1,11 * 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,perm} = 1466,86 \text{ kNm} < M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -6,345 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -35,233 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1131,359 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 4,506 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = 0,937 * 10^6 \text{ Pa}$$

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

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

$$-6,35 \text{ MPa} \leq 0,45 * 35 \text{ MPa}$$

$$-6,35 \text{ MPa} < 15,75 \text{ MPa}$$

Kontrola naprezanja je zadovoljena.

8.2. 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:

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

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:

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

σ_c – predstavlja srednje naprezanje u betonu za promatrani dio presjeka

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

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

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 1243,04 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{1243,04 * 10^3}{200 * (1700 - 165)} = 4,05 \text{ MPa}$$

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

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

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

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

$$h = 1700 - 165 = 1535 \text{ mm} > 1000 \text{ mm}$$

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

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

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

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

$$k_c = 0,4 * \left[1 - \frac{4,05}{1,5 * \left(\frac{1700}{1000}\right) * 3,2} \right] \leq 1$$

$$k_c = 0,20 < 1$$

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

$$A_{ct} = b_w * z_d = 20 * 93,30 = 1866 \text{ cm}^2$$

U vlačnoj zoni se nalazi:

$$A_{s1} = 2\phi 25 + 3\phi 20 (9,82 + 9,43 = 19,25 \text{ cm}^2)$$

| 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 14: Određivanje naprezanja s obzirom na ograničenje širine pukotina i najveći promjer šipki

[1]

Za najveći promjer šipki $\phi 25$ i ograničenje širine pukotina $w_k = 0,2 \text{ mm}$, sa slike 12 se očita naprezanje u nenapetoj armaturi:

$$\sigma_s = 160 \text{ MPa}$$

$$A_{s,min} = \frac{k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{0,20 * 0,65 * 3,2 * 1,866 * 10^5}{160} = 4,85 \text{ cm}^2$$

Za ograničenje širine pukotina, minimalna armatura iznosi $A_s = 4,85 \text{ cm}^2$, a prethodno je proračunom dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi $A_{s1} = 2\phi 25 + 3\phi 20$ ($9,82 + 9,43 = 19,25 \text{ cm}^2$).

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

Česta kombinacija djelovanja:

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

$$M_{Ed,frequ} = \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + G_{k,3} * 2,5 + \left(\frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_1$$

$$M_{Ed,frequ} = \left(\frac{(9,53 + 10,02) * 24,5^2}{8} \right) + 0 * 2,5 + \left(\frac{7,44 * 24,5^2}{8} \right) * 0,2$$

$$M_{Ed,frequ} = 1578,51 \text{ kNm}$$

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

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} + P_{m\infty,2} = 622,86 + 620,18 = 1243,04 \text{ kN}$$

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

$$P_{k\infty} = r * P_{m\infty} = 1 * 1243,04 = 1243,04 \text{ kN}$$

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

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

$$M_{cr} = 1,11 * 10^8 * \left(3,2 + \frac{1243,04 * 10^3}{3,81 * 10^5} + \frac{1243,04 * 10^3 * 768}{1,11 * 10^8} \right)$$

$$M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,frequ} = 1578,51 \text{ kNm} < M_{cr} = 1672,00 \text{ kNm}$$

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

Vrijednosti dobivene u Mathcadu:

$$\sigma_{ced2}(\varepsilon_{c0}, k) = -7,052 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{s2}(\varepsilon_{c0}, k) = -38,947 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_p(\varepsilon_{c0}, k) = 1135,290 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{s1}(\varepsilon_{c0}, k) = 9,205 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_{ced1}(\varepsilon_{c0}, k) = 1,772 * 10^6 Pa$$

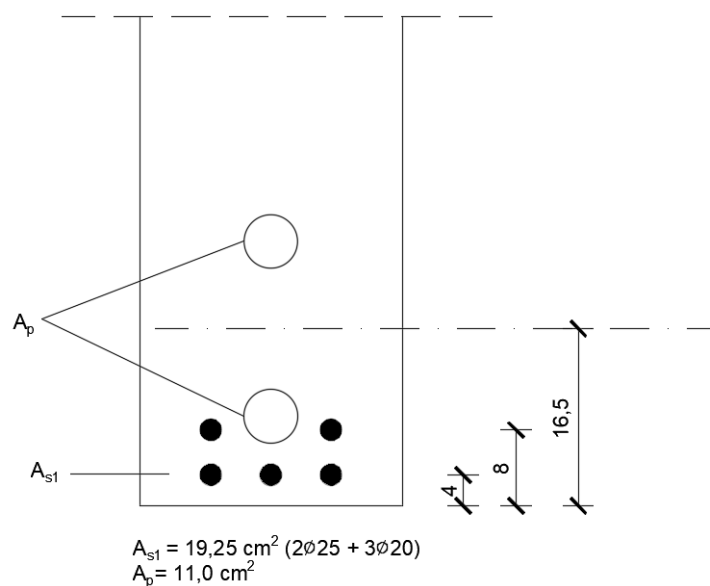
$\sigma_{s1} = 9,21 MPa$ prema Mathcadu

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 160 MPa$, prema slici 12, dobiva se da je najveći mogući promjer šipki 25 mm. Proračunom je dobiveno da se u vlačnoj zoni nalazi promjer od 20 i 25 mm ($2\phi 25 + 3\phi 20$), prema tome kriterij je zadovoljen.

| Steel stress ² [MPa] | Maximum bar spacing [mm] | | |
|------------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| | $w_k=0,4 mm$ | $w_k=0,3 mm$ | $w_k=0,2 mm$ |
| 160 | 300 | 300 | 200 |
| 200 | 300 | 250 | 150 |
| 240 | 250 | 200 | 100 |
| 280 | 200 | 150 | 50 |
| 320 | 150 | 100 | - |
| 360 | 100 | 50 | - |

Slika 15: Određivanje najvećeg dopuštenog razmaka šipki s obzirom na ograničenje širine pukotina i naprezanje [1]

Za naprezanje u armaturi $\sigma_s = 160 MPa$, prema slici 13, dobiva se da je najveći dopušteni razmak između osi šipki 200 mm. Kriterij je zadovoljen.



Slika 16: Položaj armaturnih šipki u donjoj zoni

8.3. 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:

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(g_{k,1} + g_{k,2}) * l^2}{8} \right) + G_{k,3} * 2,5 + \left(\frac{q_{k,1} * l^2}{8} \right) * \psi_2$$

$$M_{Ed,perm} = \left(\frac{(9,53 + 10,02) * 24,5^2}{8} \right) + 0 * 2,5 + \left(\frac{7,44 * 24,5^2}{8} \right) * 0$$

$$M_{Ed,perm} = 1466,86 \text{ kNm}$$

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

$$P_{m\infty} = P_{m\infty,1} + P_{m\infty,2} = 622,86 + 620,18 = 1243,04 \text{ kN}$$

Proračunski modul elastičnosti betona iznosi:

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

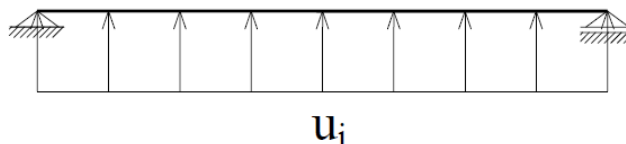
Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje u_1 i u_2 :

Natega 1:

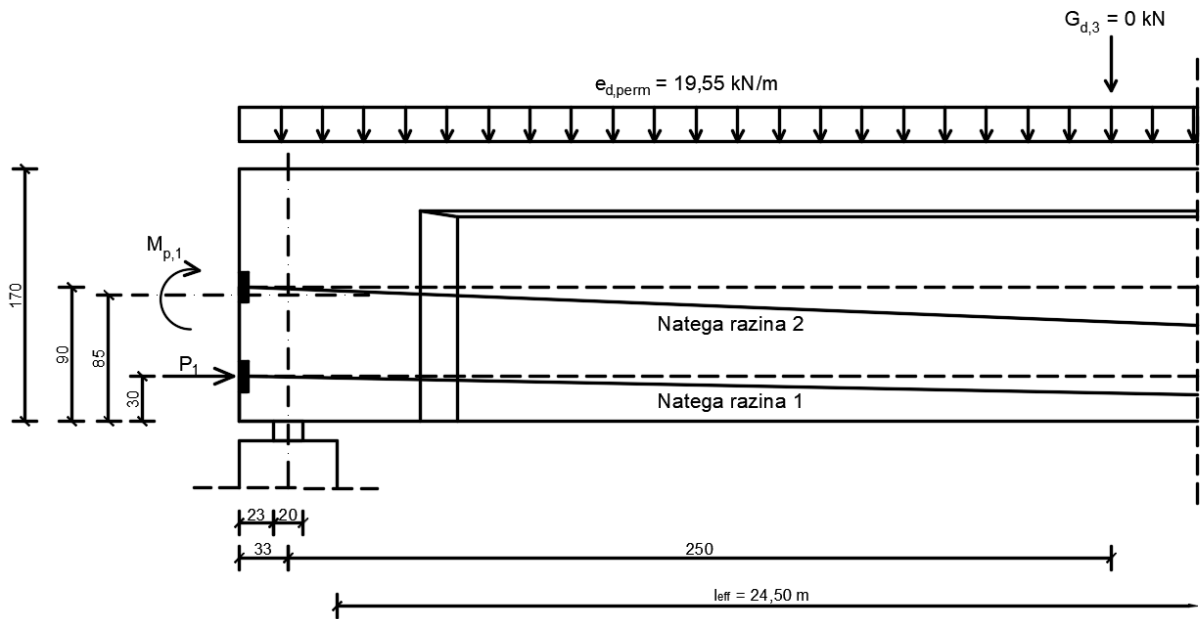
$$u_1 = -P_{m\infty,1} * \frac{8 * f_1}{l_{tot}^2} = -622,86 * \frac{8 * 0,205}{25,16^2} = -1,61 \text{ kN/m}$$

Natega 2:

$$u_2 = -P_{m\infty,2} * \frac{8 * f_2}{l_{tot}^2} = -620,18 * \frac{8 * 0,665}{25,16^2} = -5,21 \text{ kN/m}$$



Slika 17: Zamjenjujuće kontinuirano opterećenje [1]

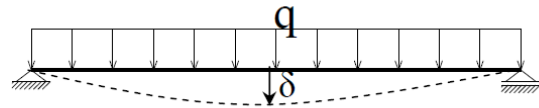


Slika 18: Položaj koncentriranog momenta

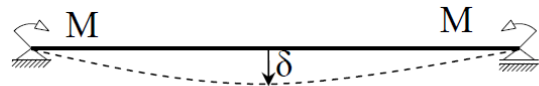
Koncentrirani moment u težištu betonskog presjeka, na oba kraja nosača:

$$M = -P_{m\infty,1} * (0,85 - 0,30) = -622,86 * 0,55 = -342,57 \text{ kNm}$$

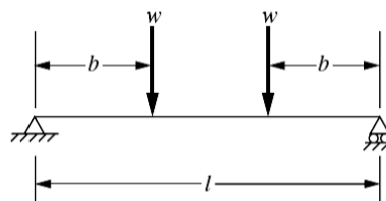
$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot l_{tot}^4}{384 \cdot E \cdot I}$$



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



$$\delta = \frac{wb}{24EI} (3l^2 - 4b^2)$$



Slika 19: Izrazi za proračun progiba slobodno oslonjene grede [1]

Progib sredine grede:

$$\delta = \frac{5 * (g_{k,1} + g_{k,2} + \psi_2 * q_{k,1} + u_1 + u_2) * l^4}{384 * E_{c,eff} * I_c} + \frac{G_{k,3} * b}{24 * E_{c,eff} * I_c} * (3l^2 - 4b^2) + \frac{M * l^2}{8 * E_{c,eff} * I_c}$$

$$G_{k,3} = 0 \text{ kN}$$

$$\delta = \frac{5 * (9,53 * 10^3 + 10,02 * 10^3 + 0 * 7,44 * 10^3 - 1,61 * 10^3 - 5,21 * 10^3) * 24,5^4}{384 * 8292,68 * 0,120}$$

$$+ \frac{342,57 * 10^3 * 24,5^2}{8 * 8292,68 * 0,120}$$

$$\delta = 0,086 \text{ m} = 8,6 \text{ cm}$$

Granični progib iznosi:

$$\frac{l}{250} = \frac{2450}{250} = 9,8 \text{ cm}$$

$$\delta = 8,6 \text{ cm} < 9,8 \text{ cm}$$

Progib zadovoljava.

9. ZAKLJUČAK

Beton je materijal koji posjeduje veliku tlačnu čvrstoću i malu vlačnu čvrstoću. Usljed djelovanja temperaturnih promjena, skupljanja betona i vanjskog opterećenja, vrlo brzo se dostigne vlačna čvrstoća betona. Dostizanjem vlačne čvrstoće, dolazi do pojave pukotina i raspucavanja vlačnog područja betonskog presjeka. Kako bi se izbjegle pojave pukotina, pogotovo kod građevina velikih raspona kao što su mostovi, primjenjuje se prednapeti beton. Prednapete betonske konstrukcije su zapravo armiranobetonske konstrukcije koje su prednapinjanjem dodatno stlačene. Može ih se opisati kao spreg betona, čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje. Primjenom prednapetih betonskih konstrukcija povećava se nosivost, smanjuju se deformacije, smanjuje se vlastita težina odnosno dimenzije presjeka, eliminiraju se pukotine te se umanjuje učinak djelovanja poprečnih sila. Prednapinjanje se najčešće ostvaruje pomoću natega koje su izrađene od čelika visoke čvrstoće.

Ovaj rad svodi se na proračun odnosno dimenzioniranje jednog prednapetog krovnog nosača proizvodne hale. Zadani podaci na osnovu kojih se provodi proračun su tlocrtne dimenzije, svojstva materijala, geometrijske karakteristike presjeka te položaj natega za prednapinjanje. Statički sustav nosača je slobodno oslonjena greda raspona 24,50 m, koji ima „T“ presjek visine 170 cm, širine pojasnice 45 cm te širine hrpta 20 cm. Nosač je izrađen od betona čvrstoće C35/45, čelika za armiranje B500A i čelika za prednapinjanje 1500/1770. Nosač je opterećen stalnim djelovanjem od vlastite težine i težine krovne konstrukcije, promjenjivim djelovanjem snijega i djelovanjem sila od prednapinjanja. Vođenje natega provodi se po paraboli u dvije razine. Za svaku nategu određena je strelica parabole. Temeljem najvećeg naprezanja i procijenjene veličine površine čelika za prednapinjanje, određen je broj užadi u natezi. Natega se sastoji ukupno 5 užadi, a površina presjeka svakog užeta iznosi 1,1 cm². Iz toga slijedi da je površina presjeka jedne natege (sastavljene od 5 užadi) jednaka 5,5 cm², a ukupna površina presjeka obje natege iznosi 11 cm². Proračunom je određena potrebna površina vlačne armature koja iznosi $A_{s1} = 2\text{Ø}25 + 3\text{Ø}20$ (9,82 + 9,43 = 19,25 cm²) i tlačne armature $A_{s2} = 4\text{Ø}28$ (24,6 cm²).

Od početne sile prednapinjanja oduzeti su svi gubici sile kako bi se odredila konačna sila prednapinjanja. Gubici se javljaju kao posljedica elastične deformacije, trenja, prokliznuća klina, relaksacije, skupljanja i puzanja. Gubitak sile prednapinjanja od elastične

deformacije se zanemaruje iz razloga što se prednapinjanje natega izvodi na različitim krajevima pa su gubici uzrokovani elastičnim skraćanjem betona zanemarivo mali.

Nakon što su proračunati svi gubici sile prednapinjanja, provedene su provjere graničnog stanja nosivosti. Provedena je provjera na savijanje s uzdužnom silom u sredini polja u trenutku $t=0$ i $t=\infty$. Također, provedena je i provjera na poprečnu silu te je proračunata potrebna poprečna armatura kojom su usvojene dvorezne vilice ($m=2$) $\varnothing 8/20$ cm. Uvjet nosivosti tlačnih štapova je zadovoljen. Osim graničnog stanja nosivosti potrebno je i provjeriti granično stanje uporabivosti. U graničnom stanju uporabivosti provjeravalo se granično stanje naprezanja, pukotina i deformacija. Kod graničnog stanja naprezanja potrebno je ograničiti naprezanja kako bi se izbjegle neželjene pukotine i mikropukotine, a provjera stanja naprezanja provodila se za dvije kombinacije djelovanja, karakterističnu i nazovistalnu kombinaciju. Provjera graničnog stanja pukotina i deformacija provodila se za sredinu raspona u trenutku $t=\infty$.

Zadovoljene su sve potrebne provjere za proračun prednapetog nosača, stoga se može zaključiti da je nosač pravilno dimenzioniran i proračunat.

LITERATURA I IZVORI

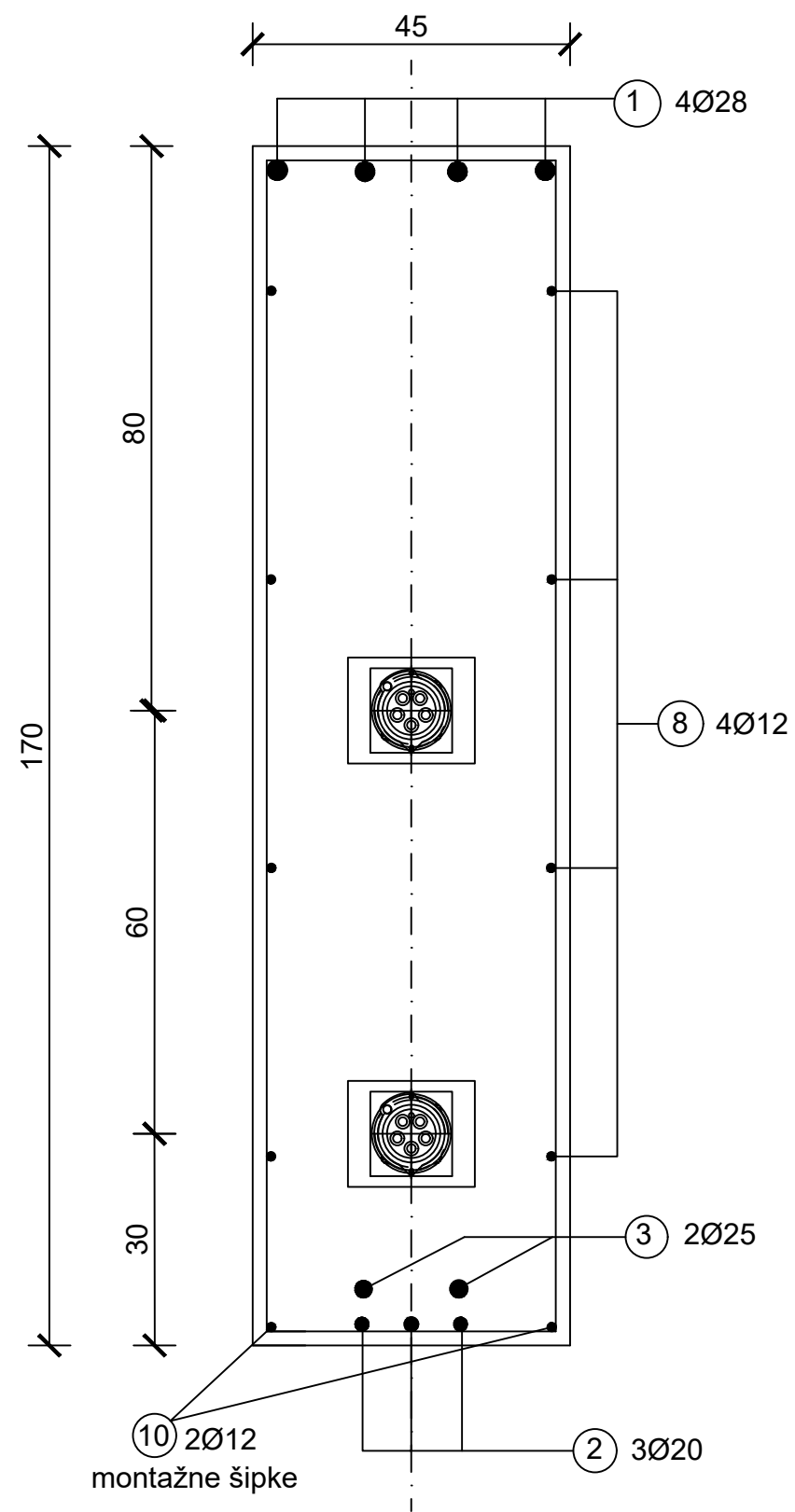
- [1] Smolčić, Ž., Prednapete betonske konstrukcije, interna predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2019.
- [2] Meštrović, D., Prednapeti beton teorija, interna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka 2017.
- [3] EN 1992-1-1 Eurocode 2, Design of concrete structures – 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.

10. GRAFIČKI PRILOZI – NACRTI

Popis nacрта:

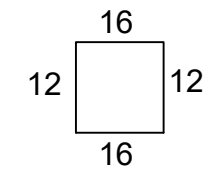
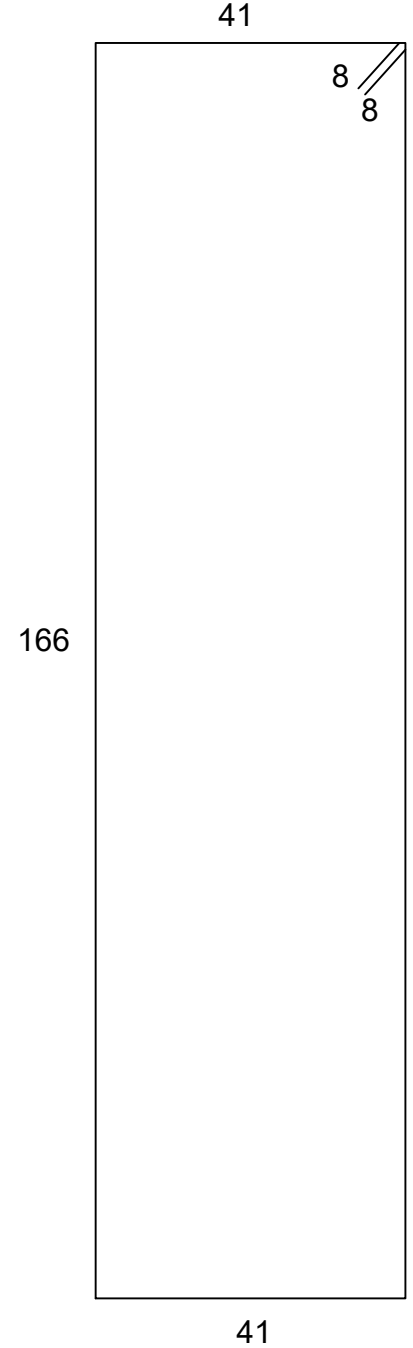
1. Plan i iskaz prednapete i nenapete armature, mjerilo 1:50/1:10
2. Plan prednapete i nenapete armature, presjek A-A, mjerilo 1:10

PRESJEK A-A MJ. 1:10



6 Ø8/20 cm
L=430
k= 10

9 Ø12 cm dodatna armatura
oko sidra natega
L=56
k= 20



GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI

Diplomski rad
**PRORAČUN PREDNAPETOG NOSAČA
HALE**

Sadržaj nacrt:
**PLAN PREDNAPETE I NENAPETE
ARMATURE, PRESJEK A-A**

Student:
Ivan Antulov-Fantulin

Kolegij:
PREDNAPETE BETONSKE KONSTRUKCIJE

Mentor:
dr. sc. **Željko Smolčić**

Datum:
02.09.2019.

Mjerilo:
1:10

List:
2