

Projektna dokumentacija {1}

Ispisuju se samo neophodni proračuni, dokazi i provere. Nije neophodno obrazlagati način na koji se došlo do usvojenog rešenja, prikazan u fazi razrade. Delovi teksta koji su, u nastavku, dati u italiku (kao ova napomena) **se ne ispisuju u projektima**. Ovi delovi sadrže komentare i objašnjenja namenjena studentima, kao i (privremeno) neuspele dokaze, koji se izostavljaju iz konačnog teksta.

Sadržaj projekta konstrukcije (proračuni koji se prikazuju) se numerišu. Uobičajeni redosled poglavlja je 1: Tehnički opis sa uslovima za izvođenje, 2: Predmer i predračun, 3 i dalje se odnosi na statički proračun. S obzirom da je potrebno da se prvo sračuna sekundarni krovni nosač (rožnjača ili koruba, POS 1) – koji daje opterećenja (Δg , q_1 – sneg i q_2 – vetar) glavnog nosača, poglavlje 3 bi pripalo njemu. Glavnom nosaču POS 2 je, u ovom primeru, dodeljeno sledeće poglavlje 4.

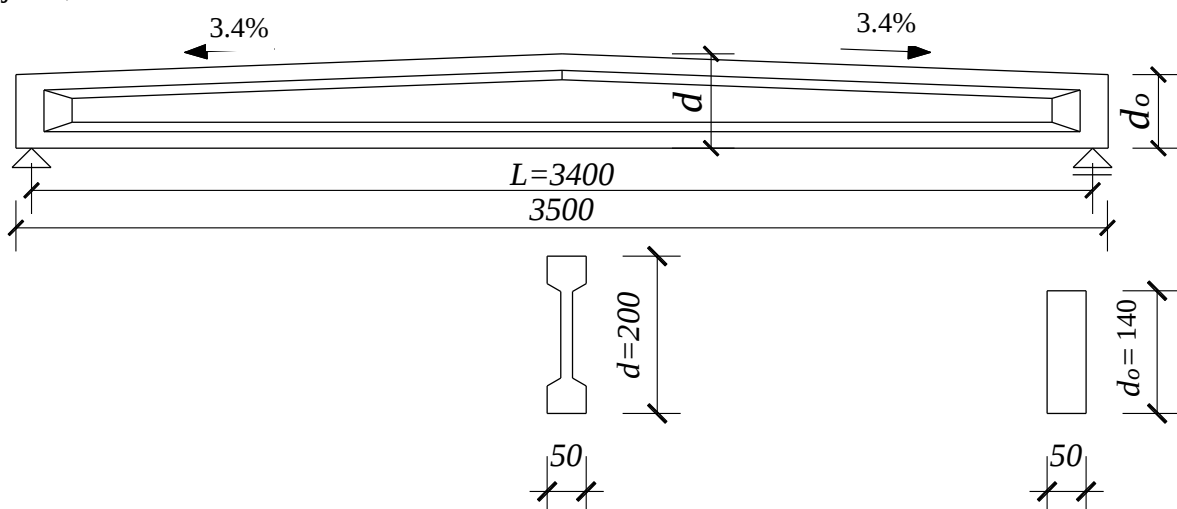
U okviru poglavlja vrši se numeracija podtačaka i stavljaju podnaslovi koji objašnjavaju koji će proračun biti urađen u nastavku. Numeracija je potrebna radi lakšeg snalaženja, posebno kada se podaci iz neke tačke koriste u kasnijim poglavljima (tada se navodi, na primer: 'reakcija POS 1, prema tački 3.3, iznosi ...'). Numeracija podpoglavlja i redosled proračuna nisu propisani i zavise od projektanta (mogu biti i drugačiji od onog koji sledi u primeru). Treba težiti logičnom redosledu – izbegavati pozivanje na tačke koje slede kasnije. {n}

4. POS 2 - Prethodno napregnuti glavni krovni nosač

4.1. Opis rešenja {2}

Za opis se koristi plan oplata i plan kablova. U tekstu proračuna daje se skica (oplata) u maloj razmeri koja sadrži osnovne kote i tipične preseke (srednji, krajnji), klasu betona. Daje se funkcionalni opis nosača i opis načina oslanjanja. Objavljuje se statički sistem koji će se koristiti pri proračunu.

Glavni krovni nosač POS 2 je rešen kao prethodno napregnuta greda simetričnog „I“ preseka promenljive visine sa gornjim pojasom u dvostranom nagibu od 3,4 %. Visina preseka u sredini raspona je 200 cm, a na osloncu 140 cm. Raspon nosača je $L = 34,00$ m. Ukupna dužina nosača je 35,00 m.



POS 2 nosi opterećenje sa krova koje se prenosi sa rožnjača POS 1, postavljenih na razmaku 3,45 m, i prenosi horizontalna opterećenja u poprečnom ramu koji formira sa stubovima POS 3.

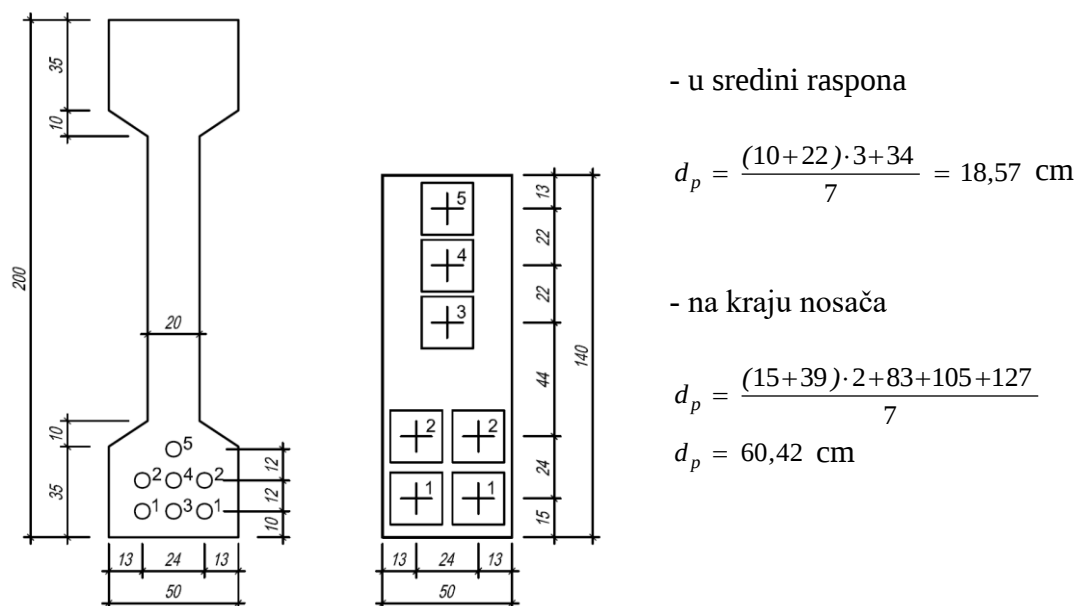
POS 2 se direktno oslanjanja stubove POS3 preko pločice za centrisanje. Veza je rešena anker zavrtnejevima (po dva zavrtnja $\varnothing 36$ u ravni oslonca) i može da prenese silu smicanja, dok je moment na spoju sa stubom zanemarljiv. POS 2 se proračunava kao prosta greda raspona $L = 34,00$ m, a uticaj dopunske podužne sile iz rama (na spoju POS 2 i POS 3) proverice se u tački ... Za proračun gubitaka sile prethodnog napreznja usvojeno je da se nanošenje dodatnog stalnog tereta (montaža POS 1 i krovnog pokrivača) vrši oko 90. dana. Prosečna relativna vlažnost sredine usvojena za proračun iznosi $RH = 60 \%$.

Usled horizontalnih opterećenja i temperature nastaje sila na spoju nosača sa stubom. Kao normalna sila, ima najčešće zanemarljivu veličinu u odnosu na trajnu normalnu silu od PN. Ipak, zajedno sa svojim (redukcionim) momentom (sila deluje na donjoj ivici nosača) može da stvara probleme, ako je prevelika. Nosač se može osloboditi ovih uticaja postavljanjem na ležišta koja omogućavaju pomeranje sa malim otporom, na primer neopren. Ovo ima svoju cenu, a veza zahteva izradu kompletnog rešenja. Nosač je uzak i visok i mora se osigurati da ne može da spadne (prevrće se) sa stuba pri montaži, po montaži i u ekscennoj situaciji – na primer sleganju temelja ili udaru vozila u stub.

4.2. Opis usvojenog prethodnog napreznja

Usvojen je sledeći raspored kablova raspona u sredini i kotvi na kraju nosača:

Prikazuju se tipični preseki (srednji sa rasporedom kablova i krajnji sa rasporedom kotvi).
Odstojanje rezultantnog kabla od ivice 1:



Navodi se metod PN, potrebna starost betona, broj i vrsta kablova, naziv sistema PN, tip kotve, postupak utezanja (sa jednog ili oba kraja), vrsta i veličina (prečnik) zaštitne cevi, vrsta injektiranja.

- Klasa betona C35/45, cement klase R
- PN naknadnim utezanjem sa 7 kablova $6\varnothing 15,2$ IMS SPB sistema
- utezanje pri starosti betona od najmanje 16 dana
- užad od čelika sa niskom relaksacijom (EN 10138 - klasa 2)
- poršina jednog kabla $8,34 \text{ cm}^2$, ukupna površina kablova $A_p = 7 \times 8,34 = 58,38 \text{ cm}^2$
- tip kotve S6/15, utezanje sa oba kraja (aktivna kotva na svakom kraju kabla)
- zaštitne cevi metalne, unutrašnjeg prečnika 60 mm
- injektiranje cementnim mlekom
- sila na presi **910 kN** (*vidi komentar u narednom pasusu*)
- sumarna sila na presi je $P^0 = 7 \times 910 = 6370 \text{ kN}$.

Definiše se potrebna sila na presi, za postizanje projektovanog PN.

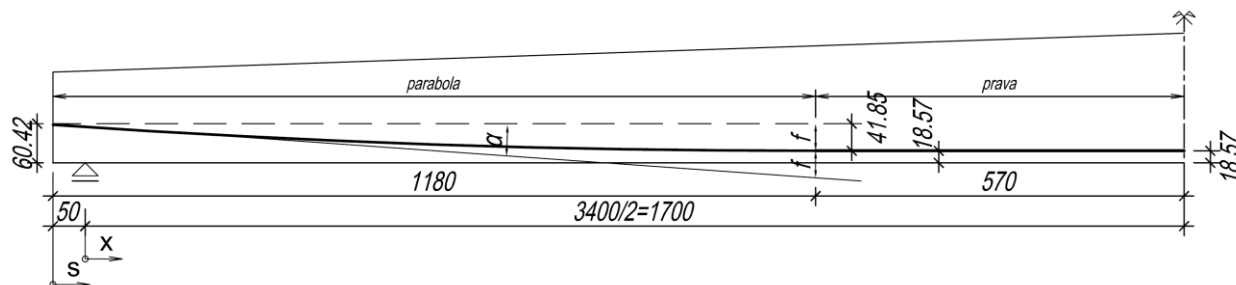
Potrebna sila na presi zavisi od veličine gubitaka i pre njenog konačnog usvajanja treba proveriti pretpostavljene vrednosti gubitaka i izvršiti korekciju, ako se pretpostavljeni i sračunati gubici dosta razlikuju. Time se postiže konačni rezultat (veličina napona) koji je projektovan u fazi razrade. Korekcija se može uraditi i zbog drugih razloga, što je objašnjeno u nastavku. Ovo je pedantna varijanta, ali zahteva jednu međuiterciju (ima više računanja).

Alternativna varijanta je da se odmah usvoji sila na presi koja odgovara pretpostavljenim gubicima, a da se zatim sračunaju veličine gubitaka koje odgovaraju ovako usvojenoj sili. Potom se nastavlja proračun napona sa sračunatim gubicima, pa na šta izađe. Na taj način sračunato konačno stanje može da se razlikuje od onog iz faze razrade, no najčešće (kada su gubici u fazi razrade dobro procenjeni) i ono sasvim zadovoljava. Ako uspe – imamo urađen proračun, ako ne, imamo međuiterciju i počinjemo ponovo od ove stavke, sa korigovanim silom na presi.

U primeru je u fazi razrade pretpostavljena je početnoj sila $P_0 = 5920$ kN (tačka 9.), kojoj, sa pretpostavljenim početnim gubicima od 10%, odgovara sila na presi (po kablu) od $(5920/(1 - 0,10))/7 = 940$ kN. Proračuni koji slede u nastavku prvo prvo su bili urađeni sa ovolikom vrednošću sile, ali je pri detaljnoj proveru napona sa karakteristikama neto preseka konstatovano prekoračenje napona. Takođe, proračun vremenskih gubitaka pokazao je nešto manje gubitke od pretpostavljenih 20 %. S obzirom da je nakon ovih proračuna odlučeno da se izvrši korekcija sile na presi, oni nisu prikazani u nastavku, jer se u projektnoj dokumentaciji ne daju neuspele varijante ili varijante koje nisu konačne. Zato je sila na presi izmenjena (umanjena) i proračun ponovljen sa silom na presi od 910 kN po kablu (oko 3 % manje u odnosu na prethodnih 940 kN). Prikazan je samo ovaj drugi, zadovoljavajući, proračun sa korigovanim vrednošću sile.

Sumarna sila na presi nema fizičko značenje. Potrebna je u proračunu i zato je navedena. Daje se opis i prikaz trase rezultantnog kabla.

Kao optimalno rešenje usvojena je trasa rezultantnog kabla koja se sastoji od pravolinijskog dela na srednjih $2 \times 5,70$ m raspona, sa maksimalnim ekscentricitetom koji se dobija odstojanjem rezultantnog kabla od 18,57 cm od donje ivice. Na preostaloj dužini nosača kablovi su trasirani kombinacijom pravih i kružnih delova. Svi kablovi su pred kotvom pravolinijski u potrebnoj dužini (80 cm ili više). Rezultantni kabl se, na delu od kraja nosača do početka središnjeg pravolinijskog dela, za proračun gubitaka sile PN aproksimira parabolom koja polazi od težišta kotvi, a sa horizontalnom tangentom (temenom) na prelazu na pravolinijski deo. Zaštita kotvi se postiže dobetoniravanjem kraja nosača nakon utezanja kablova u dužini 12 cm. Dobetonirani deo ima vertikalne završni (krajnji) presek. Kablovi polaze od krajnjih preseka pod odgovarajućim nagibima (prema pojedinačnim trasama) koji se ostvaruju nišama. {n}



4.3. Analiza opterećenja {3}

4.3.1. Stalno opterećenje:

Sopstvena težina nosača

- površina preseka u sredini raspona $A_c = 6400 \text{ cm}^2$
- ordinata opterećenja u sredini $g_1 = 0,64 \times 25,0 = 16,00 \text{ kN/m}^2$

- visina preseka se smanjuje 3,4 cm/m' prema osloncima skraćivanjem rebra koje je širine 20 cm; sopstvena težina opada $0,034 \times 0,20 \times 25,0 = 0,17 \text{ (kN/m')/m'}$
- ordinata opterećenja nad osloncem $g_2 = 16,00 - 0,17 \times 17,00 = 13,11 \text{ kN/m'}$

Od rožnjače POS 2 (tačka 3.3....)

- reakcija rožnjače $R(g) = 45,85 \text{ kN}$, na svakih 3,50 m
svedeno na jednakopodeljeno opterećenje $\Delta g = 2 \times 45,85 / 3,50 = 26,20 \text{ kN/m'}$

4.3.2. Promenljiva opterećenja:

Od rožnjače POS 2

- reakcija rožnjače od snega $R(q_1) = 7,53 \text{ kN}$, na svakih 3,50 m
svedeno na jednakopodeljeno opterećenje $q_1 = 2 \times 7,53 / 3,50 = 4,30 \text{ kN/m'}$
- reakcija rožnjače od vetra $R(q_2) = 3,85 \text{ kN}$, na svakih 3,50 m
svedeno na jednakopodeljeno opterećenje $q_2 = 2 \times 3,85 / 3,50 = 2,20 \text{ kN/m'}$

Pregled ψ koeficijenata za kombinacije dejstava:

dejstvo	ψ_0	ψ_1	ψ_2
sneg	0,5	0,2	0
vetar	0,6	0,2	0

4.4. Statički uticaji

Prikazuju se M, V, N dijagrami i veličine reakcija. Ovde nisu dati zbog uštede prostora, s obzirom da nisu neophodni za delove proračuna koji se obrađuju u okviru primera.

Momenti savijanja **u sredini raspona:**

- od sopstvene težine (trapezastog opterećenja $g_2 - g_1 - g_2$)
 $M(g) = [13,11/8 + (16,00 - 13,11)/12] \times 34,0^2 = 2172,8 \text{ kNm} = M_{\min}$
- od dodatnog stalnog tereta
 $M(\Delta g) = 26,20 \times 34,0^2 / 8 = 3786 \text{ kNm}$
- od promenljivih tereta
 $M(q_1) = 4,30 \times 34,0^2 / 8 = 621,4 \text{ kNm}$
 $M(q_2) = 2,20 \times 34,0^2 / 8 = 317,9 \text{ kNm}$
- ukupni moment u sredini raspona od kvazi-stalnog opterećenja
 $M_{qp, \max} = 2173 + 3786 + 0 \times 621,4 + 0 \times 317,9 = 5959 \text{ kNm}$.
- ukupni moment u sredini raspona za karakterističnu kombinaciju
 $M_{rare} = 2173 + 3786 + 317,9 + 0,5 \times 621,4 = 6588 \text{ kNm}$, ili
 $M_{rare} = 2173 + 3786 + 621,4 + 0,6 \times 317,9 = 6771 \text{ kNm}$
 $M_{rare, \max} = 6771 \text{ kNm}$

Presek sa najnepovoljnijim odnosom opterećenja i geometrijskih karakteristika nalazi se na oko $L/6$ od sredine ($L/3 = 11,33 \text{ m}$ od oslonca). Moment savijanja od jednakopodeljenog opterećenja u ovom preseku iznosi 8/9 od momenta u sredini raspona. **Za presek na $x = 2/6L$:**

$$M(g) = (8/9) \times 2173 = 1932 \text{ kNm} = M_{\min}$$

$$M(\Delta g) = (8/9) \times 3786 = 3365 \text{ kNm}$$

$$M_{qp, \max} = (8/9) \times 5843 = 5194 \text{ kNm}$$

$$M_{rare, \max} = (8/9) \times 6655 = 5916 \text{ kNm } \{n\}$$

4.5. Proračun gubitaka u fazi PN {4}

Proračun se može sprovoditi detaljno, u više izabranih preseka u kojima će se kasnije vršiti dokaz napona (na primer $x=0$, $x=1/6 L$, $x=2/6L$, $x=3/6L$), ili skraćeno, kada se gubitak sračuna u jednom (reprezentativnom) preseku i ista relativna vrednost koristi za sve preseke. Skraćeni postupak se može koristiti kod jednostavnog PN, na primer kada su svi kablovi slične dužine i oblika, što je ovde slučaj. Za reprezentativni presek izabraćemo presek u sredini raspona. Zbog poređenja i zbog prikaza principa detaljnog proračuna uradiće se i proračun u 'kritičnom' preseku, na $x=2/6L$ i u preseku na kraju nosača. {n}

4.5.1. Gubitak od trenja {5}

Koeficijenti trenja uzimaju se iz kataloga ili propisa. Važno je da katalog bude usklađen sa važećim standardom. Koeficijenti u propisima su uobičajeno na strani sigurnosti i njihova primena daje manje ekonomična rešenja.

Prema katalogu IMS SPB: $\mu = 0,25 \text{ 1/rad}$
 $k = 0,0015 \text{ 1/m}$

4.5.1.1. Presek u sredini raspona

Rezultantni kabl ima jednoznačnu krivinu pa se skretni ugao može odrediti kao ugao između početne tangente i tangente u sredini raspona. Tangenta u sredini je horizontalna, pa je skretni ugao jednak nagibu početne tangente. Kablovi kod kotvi startuju pod različitim uglovima. Trasa resultantnog kabla se može zadovoljavajuće aproksimirati parabolom prema slici u Tački 4.2 i tako naći pravac prosečne početne tangente.

$$\operatorname{tg} \theta = 2 \times 41,85 / 1180 = 0,0709; \quad \theta = 0,0708 \text{ rad (atan}(0,0709) = 0,0708)$$

$$\text{dužina kabla } s \approx 0,50 + x = 0,50 + 34,00/2 = 17,50 \text{ m}$$

$$0,25 \times 0,0708 + 0,0015 \times 17,50 = 0,0440$$

$$\text{koeficijent sile (gubitka) } \Delta_r = e^{-0,044} = 0,957$$

sila u sredini raspona nakon gubitka od trenja je

$$P = 0,957 \times 6370 = 6096 \text{ kN}$$

Gubitak od trenja je $(1 - 0,957) \times 100 \% = 4,3 \%$

4.5.1.2. Presek na $x = 2/6L = 11,33 \text{ m}$ od oslonca

Rezultantni kabl je i u ovom preseku horizontalan – trasa je tako usvojena jer je i u ovom, kritičnom, preseku bio potreban maksimalni ekscentricitet, pa je skretni ugao isti kao i za presek u sredini raspona.

$$\theta = 0,0708$$

$$\text{dužina kabla } s \approx 0,50 \text{ m} + x = 0,50 + 34,00/3 = 11,83 \text{ m}$$

$$0,25 \times 0,0708 + 0,0015 \times 11,83 = 0,0354$$

$$\text{koeficijent sile (gubitka, tj. ostatka) } \Delta_r = e^{-0,0354} = 0,965$$

sila na $x=2/6L$ nakon gubitka od trenja je

$$P = 0,965 \times 6370 = 6147 \text{ kN}$$

Gubitak od trenja je $(1 - 0,965) \times 100 \% = 3,5 \%$. Gubitak od trenja je ovde manji, ali, kao što će se videti u nastavku, postoji gubitak od uklinjanja – koji ne doseže do sredine raspona – pa će ukupni početni gubici biti slični.

4.5.1.3. Presek na kraju nosača

Gubitka od trenja nema, s obzirom da se svi kablovi utežu obostrano. $\Delta_r = 1,0$.

Kada se (svi) kablovi utežu samo sa jedne strane (uobičajeno po polovina sa svake – ovde bi bilo 4 sa jedne, 3 sa druge), gubici od trenja u preseku na kraju su približno jednaki gubicima preseka u sredini! {n}

4.5.2. Gubitak od elastičnog skraćanja pri utezanju {6}

4.5.2.1. Presek u sredini raspona

modul betona C35/45 - $E_{cm} = 34 \text{ GPa}$ (Tabela 3.1 EN1992-1-1)

modul kablova $E_p = 195 \text{ GPa}$ (katalog IMS)

$M_{min} = 2173 \text{ kNm}$ (tačka 4.4)

geometrijske karakteristike preseka u sredini raspona (slika preseka data je u tački 4.2)

$A_c = 6400 \text{ cm}^2$

$I_c = (50 \cdot 200^3 - 30 \cdot 120^3) / 12 = 29\,013\,000 \text{ cm}^4$

ekscentricitet kablova $z_{cp} = 200/2 - 18,57 = 81,43 \text{ cm}$

sila PN u preseku nakon gubitaka od trenja 6297 kN (tačka 4.5.1.1)

Relativni gubitak sile iznosi:

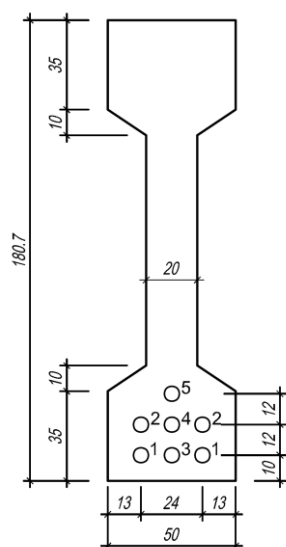
$$1 - \Delta_{el} = 0,5 \cdot \frac{195}{34} \cdot 58,38 \cdot \left(\frac{1}{6400} + \frac{81,43^2}{29\,013\,000} - \frac{217300 \cdot 81,43}{6096 \cdot 29\,013\,000} \right) = 0,0477 \text{ (4,8 \%)}$$

$$\Delta_{el} = 1 - 0,048 = 0,952 \text{ (4,8 \%)}$$

Sila u sredini raspona nakon gubitaka od trenja i elastičnog skraćanja

$$P = 6096 \times 0,952 = 5803 \text{ kN.}$$

4.5.2.2. Presek na $x = 2/6L = 11,33 \text{ m}$ od oslonca



Odstojanje resultantnog kabla od ivice 1:

- isto kao u sredini raspona

$$d_p = \frac{(10 + 22) \cdot 3 + 34}{7} = 18,57 \text{ cm}$$

Geometrijske karakteristike preseka:

visina preseka $h = 200 - 0,034 \times 5,67 \times 100 \approx 180,7 \text{ cm}$

$A_c = 50 \cdot 180,7 - 30 \cdot 100,7 = 6013,4 \text{ cm}^2$

$I_c = (50 \cdot 180,7^3 - 30 \cdot 100,7^3) / 12 = 22\,022\,000 \text{ cm}^4$

$z_{cp} = 180,7/2 - 18,57 = 71,8 \text{ cm}$

Moment savijanja u preseku:

$$M(g) = 1932 \text{ kNm} \quad (\text{tačka 4.4}).$$

Sila PN u preseku nakon gubitaka od trenja 6343 kN. (tačka 4.5.1.2)

Relativni gubitak sile iznosi:

$$1 - \Delta_{el} = 0,5 \cdot \frac{195}{34} \cdot 58,38 \cdot \left(\frac{1}{6013,4} + \frac{71,8^2}{22\,022\,000} - \frac{193200 \cdot 71,8}{6147 \cdot 22\,022\,000} \right) = 0,0499 \quad (5,0 \%)$$

$$\Delta_{el} = 1 - 0,050 = 0,950$$

Sila na $x=2/6L$ nakon gubitaka od trenja i elastičnog skraćanja

$$P = 6147 \times 0,950 = 5840 \text{ kN}.$$

4.5.2.3. Presek na kraju nosača

Gubitak od elastičnog skraćanja je mali, s obzirom da je sila PN skoro centrična, a presek masivan, pravougaoni 50×140 cm.

Približno, kao da je sila sasvim centrična, na preseku 50×140 cm:

$$\Delta_{el} = 1 - 0,5 \times (195/34) \times 58,38 / (50 \times 140) = 1 - 0,024 = 0,976 \text{ {n}}$$

4.5.3. Gubitak od uklinjavanja {7}

Proračunava se pod pretpostavkom da se ne prostire do sredine raspona ($x_{sl} \leq L/2$).

uvlačenje klina 4 mm (katalog IMS SPB)

$$\mu = 0,25 \quad 1/\text{rad}$$

$$k = 0,0015 \quad 1/\text{m}$$

$$\text{koeficijent povratnog trenja } \mu_s \approx 1,5 \times \mu = 0,375 \quad 1/\text{rad}$$

$$\text{skretni ugao trase po m': } 0,0708/17,50 = 0,00405 \text{ rad/m}$$

$$0,5 \times (\mu + \mu_s) \times 0,00405 + k = 0,00276 \quad 1/\text{m}$$

$$s_{sl} = \sqrt{\frac{19500 \cdot 58,38 \cdot 0,004}{6370 \cdot 0,00276}} = 16,1 \text{ m } (\leq L/2)$$

U preseku u sredini raspona nema gubitaka od uklinjavanja $\Delta_{sl} = 1,0$.

Relativni gubitak (koeficijent preostale sile) u preseku na $x=2/6L$

(odstojanje od kotvi iznosi $s = 0,50 + 34,00/3 = 11,8 \text{ m}$):

$$\Delta_{sl} = 1 - 2 \times 0,00276 \times (15,8 - 11,8) = 0,978$$

Koeficijent preostale sile **na kraju nosača** iznosi

$$\Delta_{sl} = 1 - 2 \times 0,00276 \times (15,8 - 0) = 0,913$$

U preseku na kraju nosača (odstojanje od kotve = 0) gubici od uklinjavanja su najveći. Gubitak od uklinjavanja na mestu kotve je 8,7 %.{n}

4.5.4. Početni gubici, sumarno {8}

Ukupni koeficijent gubitaka (preostale sile) je $\Delta_0 = \Delta_\tau \times \Delta_{el} \times \Delta_{sl}$. Sila je $P_0 = \Delta_0 \times P^0$.

U sredini raspona sila iznosi:

$$P_0 = 0,957 \times 0,952 \times 1,0 \times 6370 = 0,911 \times 6370 = 5803 \text{ kN (početni gubici 8,9 \%)}$$

U preseku na $x=2/6L$ sila iznosi:

$$P_0 = 0,965 \times 0,950 \times 0,978 \times 6370 = 0,897 \times 6370 = 5711 \text{ kN (početni gubici 10,3 \%)}$$

Na kraju nosača (oslonac) sila je:

$$P_0 = 1,0 \times 0,976 \times 0,913 \times 6370 = 0,891 \times 6370 = 5676 \text{ kN (početni gubici 10,9 \%)}$$

Početni gubici su dobro pretpostavljeni (pretpostavljeno je oko 10 %; povećani gubici kod oslonca ne stvaraju probleme kod ovog tipa nosača). Ako bi se proračun gubitaka sprovodio skraćeno, samo u reprezentativnom preseku – za šta bismo ovde izabrali presek u sredini raspona, nakon ovog koraka proračuna usvaja se ista veličina gubitaka za sve preseke. Oni iznose oko 9,0 % - koeficijent (preostale) sile je $\Delta_0 = 0,910$. {n}

ZADATAK 4

Za kabl prema slici ispod (tip trase 2) sračunati promenu sile duž raspona usled gubitaka od trenja (veličinu sile odrediti u presecima nad osloncima i u sredinama raspona). Sila na presi je 1000 kN. Podaci za proračun:

utezanje sa **levog** kraja

$$\mu = 0.31 \text{ (1/rad);}$$

$$k = 0.001 \text{ (1/m)}$$

$$a = 12 \text{ m}$$

$$b = 8 \text{ m}$$

$$c = 75 \text{ cm}$$

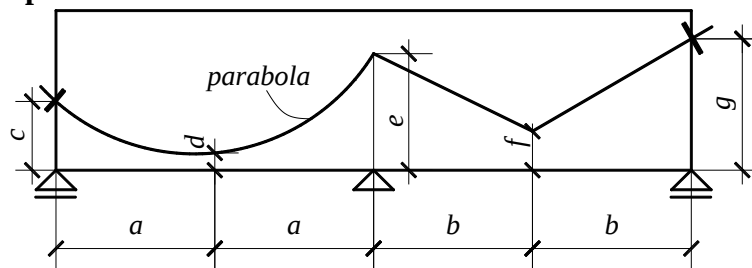
$$d = 10 \text{ cm}$$

$$e = 90 \text{ cm}$$

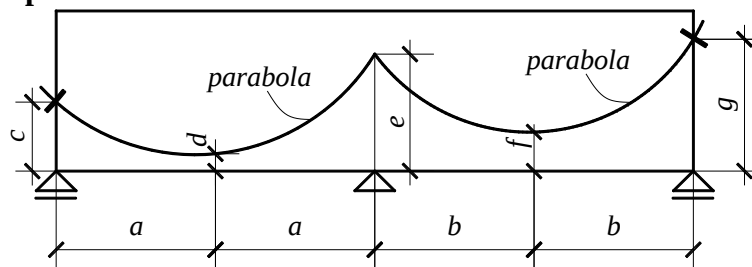
$$f = 15 \text{ cm}$$

$$g = 95 \text{ cm}$$

Tip 1



Tip 2



Tip 3

