

# Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača

---

**Jerković, Matea**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:157:820880>

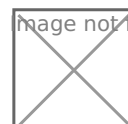
*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**



*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**

**Matea Jerković**

**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog  
rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Konstrukcije  
Masivni mostovi**

**Matea Jerković  
JMBAG: 0114028037**

**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog  
rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2022.**

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom 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.

---

Matea Jerković

U Rijeci, rujan 2022.

## *Zahvala*

*Zahvaljujem mentorici Ivani Štimac Grandić na nesebičnoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog diplomskog rada. Veliko hvala mojoj obitelji, dečku i prijateljima na strpljenju, ogromnoj podršci i motivaciji tijekom studiranja.*

## **SAŽETAK**

U uvodu rada dan je kratki pregled konstrukcija grednih rebrastih mostova te njihovog oblikovanja. Prikazani su i neki od primjera takvih mostova izgrađenih u Hrvatskoj. U nastavku rada proveden je proračun i dimenzioniranje tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta koji prevodi dvosmjernu cestu na kojoj je ograničenje prometovanja veće od 50 km/h. Osnovna razlika varijanti je broju glavnih nosača rebraste rasponske konstrukcije. U radu su za sve varijante proračunani i dimenzionirani glavni i poprečni nosači, odabrani ležaji i prijelazne naprave te izrađeni iskazi materijala. Izrađeni su nacrti za jednu varijantu mosta.

**KLJUČNE RIJEČI:** gredni mostovi, rebrasti mostovi, dimenzioniranje, glavni nosači, poprečni nosači.

## **ABSTRACT**

In the introduction of the thesis, a brief overview of the constructions of ribbed deck bridges and their design is given. Also, some examples of such bridges built in Croatia are shown. The main part of the thesis deals with the structural analysis and design of three variant solutions of the ribbed bridge decks which carry two-line road with a traffic limit of more than 50 km/h. The main difference between the variant solutions of ribbed bridge decks is the number of the main beams. The main and transverse beams were calculated to satisfy ULS and SLS, the bearings and bridge joint devices were selected, and the material specifications were made for all variant solutions. Detailed plots for one bridge variant were done.

**KEY WORDS:** ribbed bridges, deck bridges, structural analysis, main beams, transverse beams.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA SA 3 GLAVNA NOSAČA.....	3
2.1. Osnovna geometrija.....	3
2.1.1. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka.....	4
2.2. Analiza opterećenja.....	6
2.2.1. Stalno opterećenje.....	6
2.2.2. Promjenjivo opterećenje.....	7
2.3. Određivanje reznih sila.....	8
2.3.1. Moment savijanja.....	8
2.3.2. Poprečne sile.....	11
2.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje.....	12
2.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje.....	15
2.5. Određivanje zone vođenja težišta kabela.....	20
2.6. Proračun gubitaka sile u kablovima.....	24
2.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja.....	24
2.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina.....	26
2.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona.....	26
2.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu t.....	30
2.6.5. Stvarne sile u kabelima.....	37
2.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču.....	38
2.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija).....	39
2.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija).....	44
2.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje).....	51

2.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje).....	52
2.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija).....	57
2.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača.....	60
2.8. Sile kočenja i ubrzanja .....	63
2.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji.....	63
2.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača.....	66
3. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA S 4 GLAVNA NOSAČA.....	78
3.1. Osnovna geometrija .....	78
3.1.1. Geometrijske karakteristike presjeka.....	79
3.2. Analiza opterećenja.....	81
3.2.1. Stalno opterećenje.....	81
3.2.2. Promjenjivo opterećenje.....	82
3.3. Određivanje reznih sila.....	82
3.3.1. Moment savijanja.....	82
3.3.2. Poprečne sile.....	86
3.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje .....	87
3.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje.....	89
3.5. Određivanje zone vođenja težišta kabela.....	94
3.6. Proračun gubitaka sile u kablovima .....	98
3.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja.....	98
3.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina.....	99
3.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona...100	
3.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu $t$ .....	104
3.6.5. Stvarne sile u kabelima.....	111
3.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču .....	112



3.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija) .....	113
3.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija) .....	118
3.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje) .....	125
3.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje).....	126
3.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija).....	131
3.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača.....	135
3.8. Sile kočenja i ubrzanja .....	137
3.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji .....	138
3.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača .....	141
4. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA SA 5 GLAVNIH NOSAČA.....	154
4.1. Osnovna geometrija .....	154
4.1.1. Geometrijske karakteristike presjeka.....	155
4.2. Analiza opterećenja.....	157
4.2.1. Stalno opterećenje .....	157
4.2.2. Promjenjivo opterećenje.....	158
4.3. Određivanje reznih sila.....	158
4.3.1. Moment savijanja.....	159
4.3.2. Poprečne sile.....	162
4.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje .....	163
4.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje.....	165
4.5. Određivanje zone vođenja težišta kabela.....	171
4.6. Proračun gubitaka sile u kablovima .....	175
4.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja.....	175
4.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina.....	176
4.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona...177	

4.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu t .....	181
4.6.5. Stvarne sile u kabelima.....	188
4.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču .....	189
4.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija) .....	191
4.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija) .....	195
4.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje) .....	202
4.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje).....	203
4.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija).....	208
4.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača.....	211
4.8. Sile kočenja i ubrzanja .....	214
4.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji .....	215
4.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača .....	217
5. ISKAZ MATERIJALA .....	228
6. ZAKLJUČAK .....	231
7. LITERATURA .....	232

## **Popis slika**

Slika 1. Vijadukt Bukovo na autocesti Rijeka - Zagreb

Slika 2. Vijadukt Osojnik na autocesti Rijeka - Zagreb

Slika 3. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče

Slika 4. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom

Slika 5. Poprečni presjek mosta s 3 glavna nosača

Slika 6. Poprečni presjek glavnog rubnog nosača

Slika 7. Opterećenje prema modelu 1

Slika 8. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača

Slika 9. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona

Slika 10. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona

Slika 11. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

Slika 12. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

Slika 13. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

Slika 14. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

Slika 15. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

Slika 16. Općeniti poprečni presjek

Slika 17. Postupak Wuczkowski

Slika 18. Dimenzije betonske prizme ispod sidrišta

Slika 19. Područje uvođena sile prednapinjanja

Slika 20. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

- Slika 21. Raspored armaturnih šipki u hrptu
- Slika 22. Pojasnica glavnog nosača
- Slika 23. Armatura pojasnice glavnog nosača
- Slika 24. Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom
- Slika 25. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje
- Slika 26. Poprečni nosač
- Slika 27. Kontinuirani nosač
- Slika 28. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru
- Slika 29. Prva varijanta prometnog opterećenja
- Slika 30. Druga varijanta prometnog opterećenja
- Slika 31. Treća varijanta prometnog opterećenja
- Slika 32. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment
- Slika 33. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču
- Slika 34. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče
- Slika 35. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom
- Slika 36. Poprečni presjek mosta s 4 glavna nosača
- Slika 37. Poprečni presjek glavnog rubnog nosača
- Slika 38. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača
- Slika 39. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona
- Slika 40. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona
- Slika 41. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

Slika 42. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

Slika 43. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

Slika 44. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

Slika 45. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

Slika 46. Općeniti poprečni presjek

Slika 47. Postupak Wuczkowski

Slika 48. Područje uvođena sile prednapinjanja

Slika 49. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

Slika 50. Raspored armaturnih šipki u hrptu

Slika 51. Pojasnica glavnog nosača

Slika 52. Armatura pojasnice glavnog nosača

Slika 53. Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom

Slika 54. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje

Slika 55. Poprečni nosač

Slika 56. Kontinuirani nosač

Slika 57. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru

Slika 58. Prva varijanta prometnog opterećenja

Slika 59. Druga varijanta prometnog opterećenja

Slika 60. Treća varijanta prometnog opterećenja

Slika 61. Četvrta varijanta prometnog opterećenja

Slika 62. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment

Slika 63. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču

Slika 64. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče

Slika 65. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom

Slika 66. Poprečni presjek mosta s 5 glavnih nosača

Slika 67. Poprečni presjek glavnog rubnog nosača

Slika 68. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača

Slika 69. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona

Slika 70. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona

Slika 71. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

Slika 72. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

Slika 73. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

Slika 74. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

Slika 75. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

Slika 76. Općeniti poprečni presjek

Slika 77. Postupak Wuczkowski

Slika 78. Područje uvođena sile prednapinjanja

Slika 79. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

Slika 80. Raspored armaturnih šipki u hrptu

Slika 81. Pojasnica glavnog nosača

Slika 82. Armatura pojasnice glavnog nosača

Slika 83. Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom

Slika 84. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje

Slika 85. Poprečni nosač

Slika 86. Kontinuirani nosač

Slika 87. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru

Slika 88. Prva varijanta prometnog opterećenja

Slika 89. Druga varijanta prometnog opterećenja

Slika 90. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment

Slika 91. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču

## **Popis priloga**

Prilog 1 : Poprečni presjek mosta B-B	M 1:50
Prilog 2 : Rubni detalj A	M 1:25
Prilog 3 : Uzdužni presjek mosta A-A	M 1:50
Prilog 4 : Pogled na most u uzdužnom smjeru	M 1:100
Prilog 5 : Tlocrt mosta i presjek kroz rebra C-C	M 1:150
Prilog 6 : Nacrt armature glavnog nosača	M 1:50
Prilog 7 : Nacrt armature poprečnog nosača	M 1:50
Prilog 8 : Nacrt kabela za prednapinjanje	M 1:50



## 1. UVOD

Prema statičkom sustavu razlikujemo lučne, viseće, ovješene, gredne, zategnute i rešetkaste masivne mostove. Gredni mostovi su oni kojima ćemo posvetiti pažnju ovim radom. Takvi mostovi mogu biti jednorasponski ili višerasponski. Kada se govori o njihovom poprečnom presjeku tada razlikujemo mostove s pločastim presjekom, rebrastim i sandučastim. U nastavku rada fokus je stavljen na dimenzioniranje rebrastog mosta s više rebara. [1]

Rebrasti mostovi razvili su se iz pločastih grednih mostova olakšanjem njihove nosive konstrukcije. Različite vrste rebrastih grednih mostova razvile su se zahvaljujući prednapinjanju. Što se tiče nosivosti, u uzdužnom smjeru za to su zaslužni nosači koji su povezani kolničkom pločom. Također uloga ploče je raspodjela prometnog opterećenja na nosače kao i povezivanje glavnih nosača u poprečnom smjeru. Broj uzdužnih nosača ovisi o načinu izvedbe, širini mosta odnosno njegovoj namjeni. Kada je riječ o izvedbi pješačkog mosta tada je dovoljan jedan glavni nosač. Za cestovne mostove koji se izvode na mjestu gradnje primjenjuje se izvedba mosta sa 2 nosača. Veći broj nosača, od 3 do 10, primjenjiv je u slučajevima polumontažne i montažne gradnje. Isto tako i visina rasponske konstrukcije utječe na broj nosača pa tako je potreban veći broj nosača ako se radi o manjoj visini rasponske konstrukcije. Što se tiče visine uzdužnih nosača odnosno rebara ona ovisi o tome radi li se o prednapetom ili armiranom betonu te o statičkom sustavu. Širina rebara pak ovisna je o armaturi koju je potrebno ugraditi kao i kabelima. Uzdužne nosače vrlo često osim ploče povezuju i poprečni nosači koji mogu biti okomiti na njih ili postavljeni paralelno s rubom mosta. [1]

Pozitivne strane rebrastih grednih mostova su relativno male količine betona kao i čelika te mogućnost montažne gradnje. Armiranobetonski rebrasti mostovi se danas ne grade često zbog ekonomičnosti prednapetih. Korištenjem prednapetog betona povećava se njihova trajnost zbog smanjene opasnosti od pojave pukotina. Kao što je ranije spomenuto, zbog manje količine materijala moguće je graditi vitkije konstrukcije. S druge strane njihove mane su nešto kompliciranija armatura i oplata. Većom debljinom hrpta također su moguće pojave pukotina pa je i to jedna od stavki na koju valja obratiti pozornost. [2]

Zbog svojih pozitivnih strana gredni mostovi često se mogu uočiti i na hrvatskim cestama. Čak 80% mostova na hrvatskim autocestama čine mostovi malih do srednjih raspona od čega je 90% rebrastih mostova. Neki od primjera koji se mogu vidjeti vozeći se autocestom Rijeka – Zagreb prikazani su na slici 1 te na slici 2. [3]



Slika 1. Vijadukt Bukovo na autocesti Rijeka – Zagreb [4]



Slika 2. Vijadukt Osojnik na autocesti Rijeka – Zagreb [4]

Mostovi koji će se dimenzionirati u ovom diplomskom radu razlikovat će se po broju glavnih nosača međutim imati će ostale zajedničke karakteristike. Raspon koji je bilo potrebno premostiti je 24 m. Debljina ploče iznad T-presjeka je 20 cm. Širina kolnika je 7,20 m. Širina pješačkih hodnika je 100 cm. Širina hrpta glavnog nosača je 40 cm. Mostovi će imati odbojnice i metalnu ogradu. Klasa betona glavnih nosača kod mostova sa 4 i 5 nosača je C45/55 dok je kod mosta sa 3 glavna nosača bilo potrebno povećati klasu betona pa je to onda C50/60. Što se tiče prednapinjanja ono se izvodi na jednom kraju.

Svi proračuni provedeni su u skladu s normama nizova HRN EN 1991, HRN EN 1992, HRN EN 206 te prema nacionalnim dodacima navedenih normi.

## 2. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA SA 3 GLAVNA NOSAČA

### 2.1. Osnovna geometrija

- Širina konstrukcije:

$$\begin{aligned} s_k &= \text{širina kolnika} + \text{širina odbojnika} + \text{širina pješačkih staza} \\ &\quad + \text{širina od ograde do ruba konstrukcije} \\ &= 720 + 2 * 100 + 2 * 100 + 2 * 16 = 1152 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Broj glavnih nosača (prednapeti T-presjeci):  $n = 3$

- Širina glavnog nosača:

$$b = \frac{s_k}{n} = \frac{1152}{3} = 384 \text{ cm}$$

- Raspon konstrukcije:  $L = 24 \text{ m}$

- Visina glavnog nosača ( $\frac{L}{14} \leq h \leq \frac{L}{20}$ ):

$$h = \frac{L}{14} = \frac{24}{14} = 1,7 \text{ m} \quad ; \quad h = \frac{L}{20} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ m}$$

- o Usvojena visina nosača:  $h = 1,7 \text{ m}$

- Širina hrpta T-presjeka:  $b_w = 40 \text{ cm}$

- Debljina pojasnice T-presjeka:

- o Određuje se iz uvjeta da je sudjelujuća širina jednaka stvarnoj širini:

$$b = b'$$

$$b' = b_w + 20 * h_2$$

$$h_2 = \frac{b' - b_w}{20} = \frac{384 - 40}{20} = 17,2 \text{ cm}$$

$$h_2 \geq 17,2 \text{ cm}$$

- o Usvajamo  $h_2 = 18 \text{ cm}$

- Visina hrpta:  $h_1 = h - h_2 = 170 - 18 = 152 \text{ cm}$

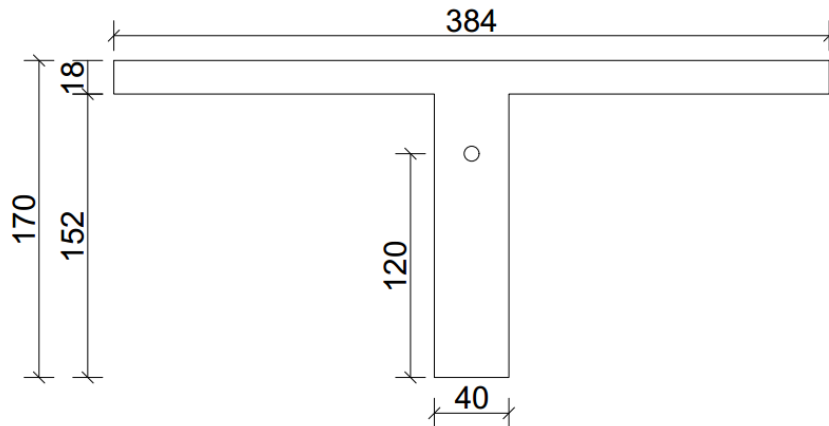
Usvojene dimenzije glavnog nosača bez ploče:

- Visina glavnog nosača,  $h = 170 \text{ cm}$
- Širina glavnog nosača,  $b = 384 \text{ cm}$
- Debljina hrpta,  $b_w = 40 \text{ cm}$

- Debljina pojasnice T-presjeka,  $h_2 = 18 \text{ cm}$
- Visina hrpta,  $h_1 = 152 \text{ cm}$

### 2.1.1. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka

a) Presjek bez ploče

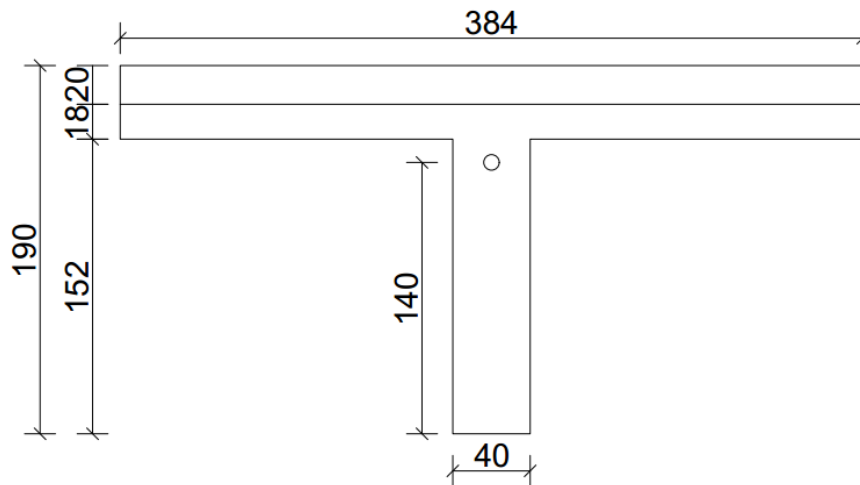


Slika 3. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče

Tablica 1. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka bez ploče

Presjek bez ploče		
Površina poprečnog presjeka, $A'$	1,2992	m <sup>2</sup>
Moment inercije, $I'$	0,353	m <sup>4</sup>
Udaljenost težišta poprečnog presjeka od donjeg ruba, $y_T' = y_d'$	1,2	m
Udaljenost težišta poprečnog presjeka od gornjeg ruba, $y_g' = h - y_d'$	0,5	m
Moment otpora obzirom na donji rub presjeka, $W_d' = I' / y_d'$	0,2941	m <sup>3</sup>
Moment otpora obzirom na gornji rub presjeka, $W_g' = I' / y_g'$	0,706	m <sup>3</sup>
Udaljenost gornjeg ruba jezgre, $k_d = W_g' / A'$	0,5434	m
Udaljenost donjeg ruba jezgre, $k_g' = W_d' / A'$	0,2264	m

b) Presjek s pločom

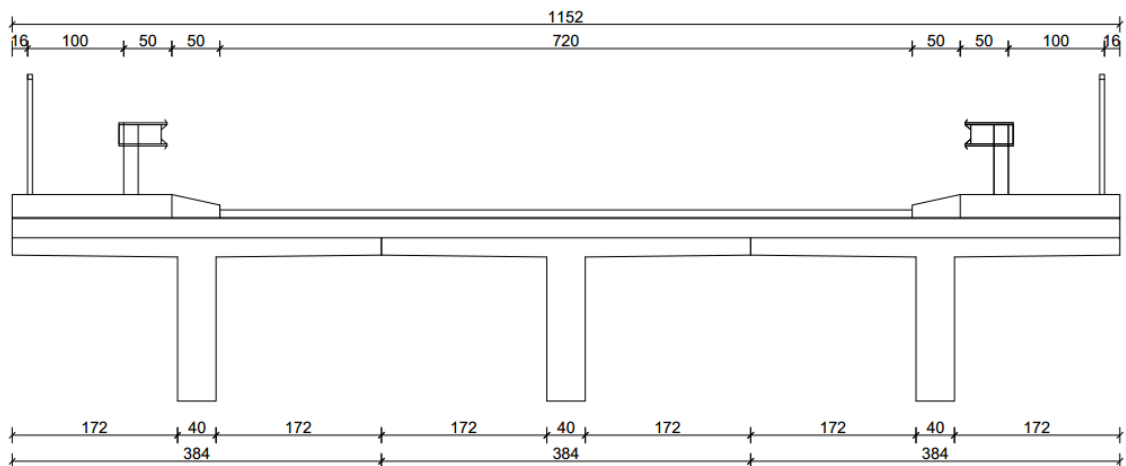


Slika 4. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom

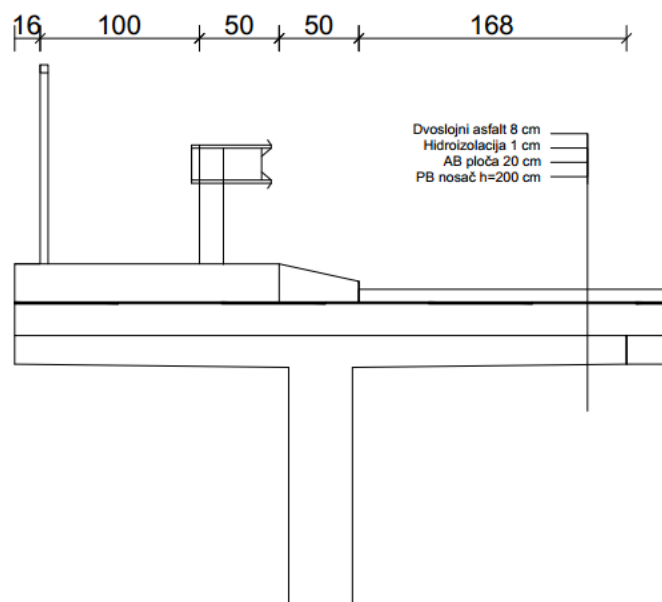
Tablica 2. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka s pločom

Presjek s pločom		
Površina poprečnog presjeka, $A''$	2,0672	m <sup>2</sup>
Moment inercije, $I''$	0,540	m <sup>4</sup>
Udaljenost težišta poprečnog presjeka od donjeg ruba, $y_T''=y_d''$	1,4	m
Udaljenost težišta poprečnog presjeka od gornjeg ruba, $y_g''=h-y_d''$	0,5	m
Moment otpora obzirom na donji rub presjeka, $W_d''=I''/y_d''$	0,3857	m <sup>3</sup>
Moment otpora obzirom na gornji rub presjeka, $W_g''=I''/y_g''$	1,08	m <sup>3</sup>
Udaljenost gornjeg ruba jezgre, $k_d''=W_g''/A''$	0,5224	m
Udaljenost donjeg ruba jezgre, $k_g''=W_d''/A''$	0,1866	m

## 2.2. Analiza opterećenja



Slika 5. Poprečni presjek mosta s 3 glavna nosača



Slika 6. Poprečni presjek rubnog nosača

### 2.2.1. Stalno opterećenje

- a) Vlastita težina nosača bez ploče

$$g_1 = A' * \gamma_C = 1,2992 * 25 = 32,48 \text{ kN/m'}$$

- b) Vlastita težina nosača s pločom

$$g_2 = A'' * \gamma_C = 2,0672 * 25 = 51,68 \text{ kN/m'}$$

- c) Vlastita težina gornjih slojeva na srednjem nosaču

- Površina hidroizolacije i asfalta:  $A_{hidro+asf} = (0,01 + 0,08) * 2,875 = 0,26$

$$g_s = A_{hidro+asf} * \gamma_{as} = 0,26 * 18 = 4,7 \text{ kN/m'}$$

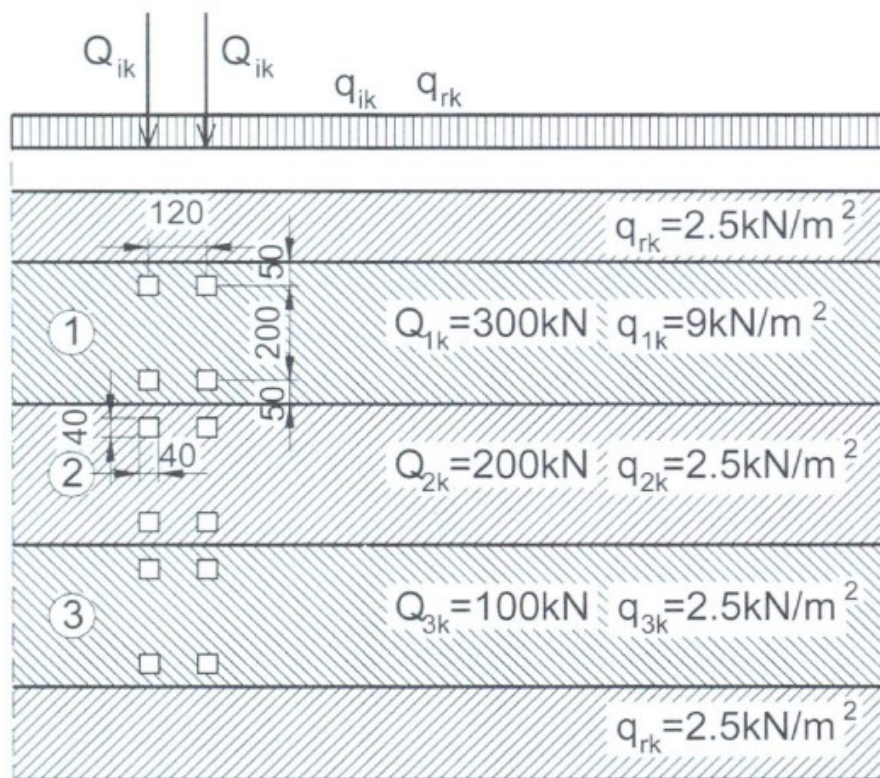
- d) Vlastita težina gornjih slojeva na rubnom nosaču

- Hidroizolacija:  $0,01 \cdot 3,84 \cdot 18 = 0,7 \text{ kN/m'}$
- Pješačka staza + rubnjak:  $0,462 \cdot 24 = 11,1 \text{ kN/m'}$
- Asfalt:  $0,08 \cdot 0,72 \cdot 18 = 1 \text{ kN/m'}$
- Odbojna ograda:  $0,4 \text{ kN/m'}$
- Vijenac:  $1,5 \text{ kN/m'}$
- Pješačka ograda:  $0,4 \text{ kN/m'}$

$$g_r = 15,1 \text{ kN/m'}$$

### 2.2.2. Promjenjivo opterećenje

- Analiza utjecaja prometnog opterećenja izvodit će se prema modelu 1 sa slike 7, sukladno normi EN 1991-2 [5]
- Model se sastoji od koncentriranog i kontinuiranog opterećenja proizvedenog osobnim i teškim vozilima
- Osovinski tereti postavljeni su na razmacima od 1,2 m
- Razmak kotača iznosi 2 m
- Površina nalijeganja kotača k 40x40 cm



Slika 7. Opterećenje prema modelu 1 [5]

- Određivanje broja prometnih trakova, njihove širine i preostale širine na kolniku određuje se prema niže navedenoj tablici

Tablica 3. Određivanje broja i širine prometne trake te preostale širine kolnika

širina kolnika $w$ [m]	broj prometnih traka	širina prometne trake [m]	preostala širina kolnika [m]
$<5,4$	1	3	$w-3$
$5,4 \leq w < 6$	2	$w/2$	0
$\geq 6$	$n = \text{Int}(w/3)$	3	$w-3 \cdot n$

- Širina kolnika:  $w = 7,20 \text{ m}$
- Širina prometne trake:  $w/2 = 7,2/2 = 3 \text{ m}$
- Broj prometnih traka:  $n = 2$
- Preostala širina kolnika:  $1,2 \text{ m}$

### 2.3. Određivanje reznih sila

- Za stalno opterećenje sustav funkcionira kao jednostavne grede složene jedna do druge
- Za prometno opterećenje sustav funkcionira kao roštiljna konstrukcija

#### 2.3.1. Moment savijanja

a) Moment savijanja za stalno opterećenje

$M_{g_1}$  – moment na nosaču bez ploče

$$M_{g_{1,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 1753,92 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,3}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{g_1 * l^2}{8} = \frac{32,48 * 24^2}{8} = 2338,56 \text{ kNm}$$

$M_{g_2}$  – moment na nosaču s pločom i opremom

$$M_{g_{2,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{2,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 3606,12 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{2,3}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{(g_2 + g_r) * l^2}{8} = \frac{(49,68 + 15,1) * 24^2}{8} = 4808,16 \text{ kNm}$$



b) Moment savijanja za promjenjivo opterećenje

- Poprečna razdioba prikazana na slici 8 napravljena je za nosač 1 (krajnji lijevi) koji je najopterećeniji dok za ostale nosače nije
- Na taj je način određeno koliki dio ukupnog prometnog opterećenja u poprečnom smjeru prihvaća navedeni nosač
- Poprečni utjecaji  $\eta$  izračunati su za svako pojedino polje
- Prometna opterećenja:

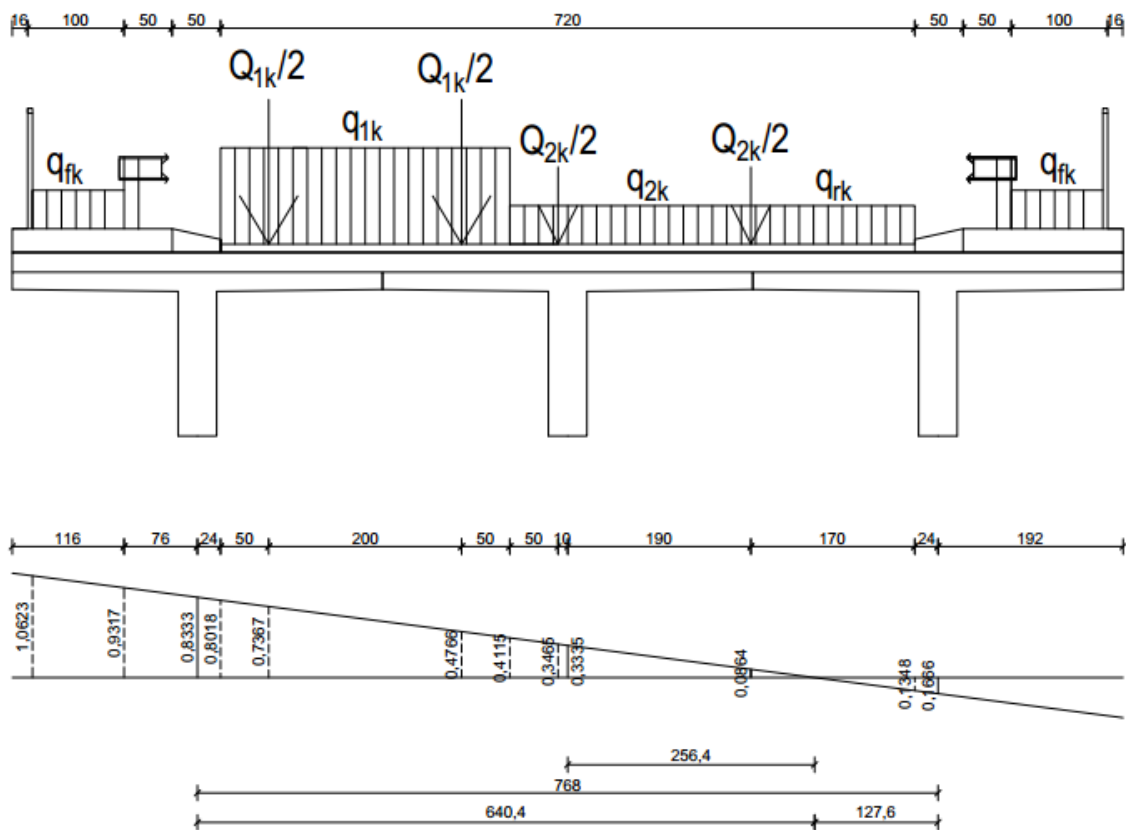
$$Q_{1k} = 300kN \text{ (težina jedne osovine)}$$

$$Q_{2k} = 200kN \text{ (težina jedne osovine)}$$

$$q_{1k} = 9kN/m^2$$

$$q_{2k} = 2,5kN/m^2$$

$$q_{fk} = 2,5kN/m^2$$



Slika 8. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača

- Sva kontinuirana opterećenja koja djeluju povoljno se zanemaruju
- U obzir se uzimaju samo cjelovita dvoosovinska opterećenja koja djeluju nepovoljno

- Poprečni utjecaji za nosač 1:

$$\eta Q_{1k} = (0,7367 + 0,4766) * \frac{Q_{1k}}{2} = 1,2133 * 150 = 182,0 \text{ kN}$$

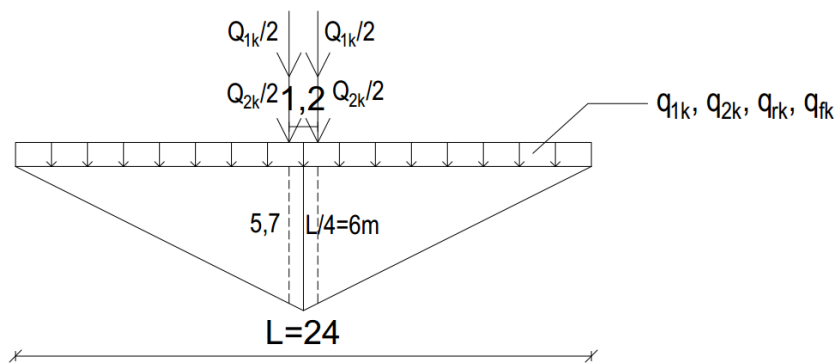
$$\eta Q_{2k} = (0,3465 + 0,0864) * \frac{Q_{2k}}{2} = 0,4329 * 100 = 43,3 \text{ kN}$$

$$\eta q_{1k} = \left( \frac{0,8018 + 0,4115}{2} * 3 \right) * q_{1k} = 1,82 * 9,0 = 16,4 \text{ kN}$$

$$\eta q_{2k} = \left( \frac{0,4115}{2} * 3,164 \right) * q_{2k} = 0,651 * 2,5 = 1,6 \text{ kN}$$

$$\eta q_{fk} = \left( \frac{1,0623 + 0,9317}{2} * 1 \right) * q_{fk} = 0,997 * 2,5 = 2,5 \text{ kN}$$

- Poprečni utjecaji kombinirani su s uzdužnim utjecajima za moment savijanja
- Opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji za slobodno oslonjenu gredu kao što je prikazano na slici 9 za polovicu raspona te na slici 10 za četvrtinu raspona



Slika 9. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona

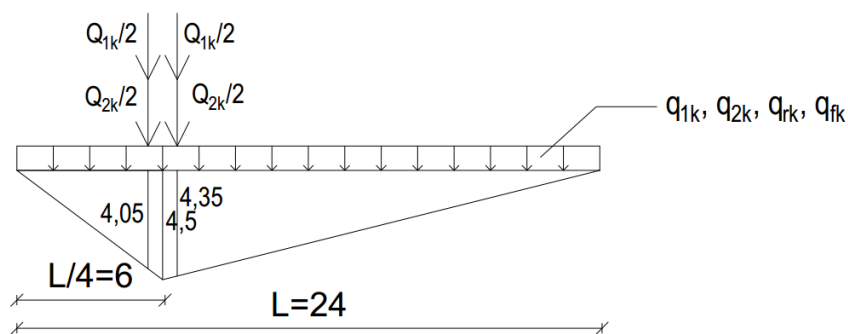
$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * 2 * 5,7 = 182,0 * 11,4 = 2074,7 \text{ kNm}$$

$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * 2 * 5,7 = 43,3 * 11,4 = 493,62 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 6 * \frac{24}{2} = 16,4 * 72 = 1180,8 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 6 * \frac{24}{2} = 1,6 * 72 = 115,2 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 6 * \frac{24}{2} = 2,5 * 72 = 187,5 \text{ kNm}$$



Slika 10. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona

$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (4,05 + 4,35) = 182,0 * 8,4 = 1528,8 \text{ kNm}$$

$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (4,05 + 4,35) = 43,3 * 8,4 = 363,72 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 16,4 * 27 = 442,8 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 1,6 * 27 = 43,2 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 4,5 * \frac{24}{4} = 2,5 * 27 = 67,5 \text{ kNm}$$

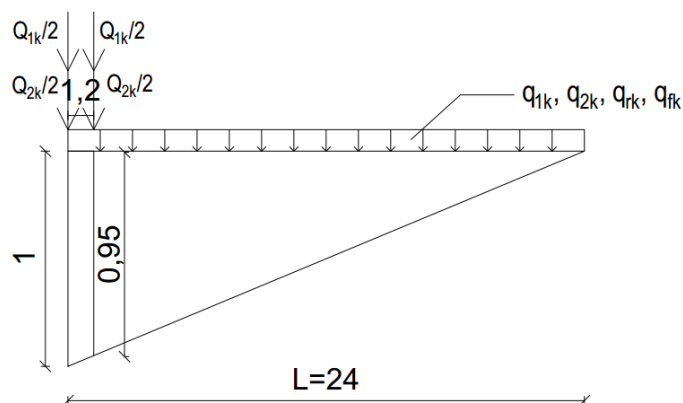
### 2.3.2. Poprečne sile

a) Stalno opterećenje

$$V_g = \frac{(g_2 + g_r) * l}{2} = \frac{(51,68 + 15,1) * 24}{2} = 801,36 \text{ kN}$$

b) Promjenjivo opterećenje

- Poprečni utjecaj isti je kao i za momente savijanja
- Opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji
- Osovine su postavljene na kraj nosača dok je kontinuirano opterećenje raspoređeno po cijeloj dužini nosača kao što je prikazano na slici 11



Slika 11. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (1 + 0,95) = 182 * 1,95 = 354,9 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (1 + 0,95) = 43,3 * 1,95 = 84,44 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 1 * \frac{24}{2} = 16,4 * 12 = 196,8 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 1 * \frac{24}{2} = 1,6 * 12 = 19,2 \text{ kN}$$

$$V_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 1 * \frac{24}{2} = 2,5 * 12 = 30 \text{ kN}$$

#### 2.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje

- Prema HRN RN 1992-2 i NA, najmanji razred čvrstoće za elemente od prednapetog betona je C30/37
- Razredi izloženosti prema EN 206-1 [6]:
  - o Okolina s prisutnošću soli za odmrzavanje i zamrzavanja:
  - o XD3 – korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora – min C35/45
  - o XF4 – korozija betona uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem sa sredstvom za odmrzavanje ili morskom vodom – min C30/37
- Odabrana je klasa betona C50/60
- Zahtjevi za ograničenje širine pukotina i dekompresiju dani su u tablici 4

Tablica 4. Preporučene vrijednosti  $w_{max}$  i odgovarajuća kombinacijska pravila [7]

Br. retka	Razred izloženosti	Konstrukcijski elementi od armiranoga betona i konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s nespregnutim nategama		Konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s naknadnim prednapinjanjem		Konstrukcijski elementi od prednapetoga betona s prethodnim prednapinjanjem <sup>a</sup>	
		$w_{max}$ mm	Dokaz rastlačenja	$w_{max}$ mm	Dokaz rastlačenja	$w_{max}$ mm	Dokaz rastlačenja
1	XC1 <sup>b</sup>	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	nije potreban	0,2 za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	0,2 za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>
2	XC2, XC3 <sup>d</sup> , XC4 <sup>e</sup> , XD1, XF1, XF2, XF3	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>		0,2 za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za česte kombinacije djelovanja
3	XA1, XA2, XD2	0,3 za nazovistalne kombinacije djelovanja <sup>c</sup>		0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>
4	XA3, XD3, XF4	0,3 za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>		0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	za česte kombinacije djelovanja <sup>c</sup>	–	0,2 za karakteristične kombinacije djelovanja <sup>c</sup>

NAPOMENE:  
 1. redak ne vrijedi za mostove i slične nosive konstrukcije izložene atmosferskim utjecajima.  
 2. redak vrijedi za uobičajene mostove s izolacijom i zastorom ili dijelove mostova u području utjecaja izmaglice.  
 3. redak vrijedi za posebne slučajeve.  
 4. redak vrijedi za površinu mosta bez izolacije i zastora po kojoj se izravno vozi, rubne grede i dijelove mostova (npr. stupovi i upornjaci) u blizini kolnika do visine 5 m (područje prskanja).  
<sup>a</sup> Nije dopušteno za željezničke mostove.  
<sup>b</sup> Za razred izloženosti XC1 širina pukotina nema utjecaja na trajnost. Navedene granične vrijednosti širine pukotina imaju za cilj osiguranje prihvatljivog izgleda.  
<sup>c</sup> Karakteristična, česta i nazovistalna kombinacija djelovanja definirane su u normi HRN EN 1990:2011.  
<sup>d</sup> Kod zahtjeva za nepropusnost građevine treba osigurati smanjene širine pukotina.

- Za razred izloženosti XD3 i konstrukcijske elemente od prednapetog betona s naknadnim prednapinjanjem:

- o  $w_{max} = 0,2mm$  za karakteristične kombinacije djelovanja

Česta kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$M_{Ed} \left( \frac{L}{2} \right) = M_{g2,3} + 0,75 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{Qfk}$$

$$= 4808,16 + 0,75 * 2074,7 = 6364,19 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} \left( \frac{L}{4} \right) = M_{g2,2} + 0,75 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{Qfk}$$

$$= 3606,12 + 0,75 * 1528,8 = 4752,72 \text{ kNm}$$

- Za razred izloženosti XD3 i prednapinjanje sa sprežanjem ostvareno naknadnim injektiranjem, razred širenja pukotina i rasterećenja je C

Karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{0,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$\begin{aligned} M'_{Ed} \left( \frac{L}{2} \right) &= M_{g2,3} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{qfk} \\ &= 4808,16 + 2074,7 + 0,75 * 493,62 + 0,4 * 1180,8 + 0,4 * 115,2 \\ &\quad + 0,4 * 187,5 = 7846,475 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Usvajamo:  $M_{dek} = 7847 \text{ kNm}$

$$\begin{aligned} M'_{Ed} \left( \frac{L}{4} \right) &= M_{g2,2} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{qfk} \\ &= 3606,12 + 1528,8 + 0,75 * 363,72 + 0,4 * 442,8 + 0,4 * 43,2 \\ &\quad + 0,4 * 67,5 = 5629,11 \text{ kNm} \end{aligned}$$

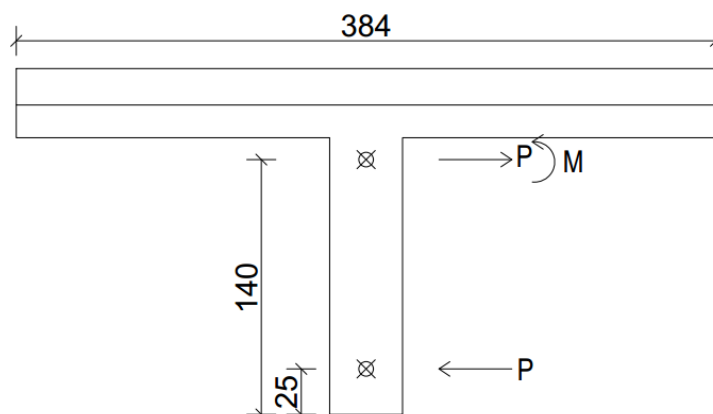
- Usvajamo:  $M_{dek} = 5630 \text{ kNm}$

Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno:

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} - \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

- Predznak + → tlak
- Predznak - → vlak

- U proračun se uzima sila prednapinjanja u kablovima za vrijeme eksploatacije  $P_{m\infty}$  i karakteristike T-presjeka s pločom kao što je prikazano na slici 12



Slika 12. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

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

$$y_{cp}'' = y_d'' - \xi = 140 - 25 = 115 \text{ cm}$$

$$P_{m\infty} > \frac{M_{dek}}{y_{cp}'' + k_g''} = \frac{7847}{1,15 + 0,1866} = 5870,87 \text{ kN}$$

- Potrebna sila u kabelima za trajno stanje – u eksploataciji (nakon svih gubitaka) mora biti:  $P_{m\infty} > 5870 \text{ kN}$

#### 2.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje

- Kabeli za prednapinjanje koji se koriste su EN 10138-3-Y1860S [8]
- Nazivna vlačna čvrstoća im iznosi  $f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$

Potrebna količina kabela za prednapinjanje:

$$A_{pot} = \frac{P_{m0}}{\sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} \text{ uz uvjet } \sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$\sigma_p$  – naprezanje u kabelu nakon početnih gubitaka

$\delta$  - početni gubici u kabelima

$\sigma_{p0}$  - dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,8 * f_{pk} = 0,8 * 186 = 148 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,9 * f_{p0,1k} = 0,9 * 0,86 * 186 = 144 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{p0} = 144 \text{ kN/cm}^2$$

$\sigma_{pm0}$  maksimalno naprezanje nakon otpuštanja preše

$$\sigma_{pm0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 * f_{pk} = 0,75 * 186 = 139,5 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,85 * f_{p0,1k} = 0,85 * 0,86 * 186 = 136 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

Procjena gubitaka u kabelima

- Početni gubici 10-20% → usvajamo 10% →  $\delta = 0,9$

- Vremenski gubitci 10-20% → usvajamo 15% →  $m = 0,85$

$P_{m0} = P_0 * \delta$  - sila u kabelima nakon početnih gubitaka

$P_{m\infty} = P_{m0} * m$  - sila u kabelima nakon ukupnih gubitaka (u eksploataciji)

$$A_{pot} \geq \frac{P_{m\infty}}{m * \sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} = 0,9 * 144 = 129,6$$

$$\sigma_p = 129,6 \text{ kN/cm}$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$$A_{pot} \geq \frac{5870}{0,85 * 129,6} = 52,28 \text{ cm}^2$$

- Odabrani sustav prednapinjanja je DYWIDAG [2]
- Površina jednog užeta kabela iznosi 1,5 cm<sup>2</sup>
- Potreban broj užadi je:

$$\text{Broj užadi} > \frac{\text{potrebna površina}}{\text{površina jednog užeta}} = \frac{52,28}{1,5} = 34,89$$

- Usvojeni broj užadi:  $n_z > 35$

Zaštitni sloj betona

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 + 10 = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

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

$$c_{min,b} = \emptyset = 10 \text{ mm}$$

- Za razred izloženosti XD3 te razred betona C45/55, razred konstrukcije je S3

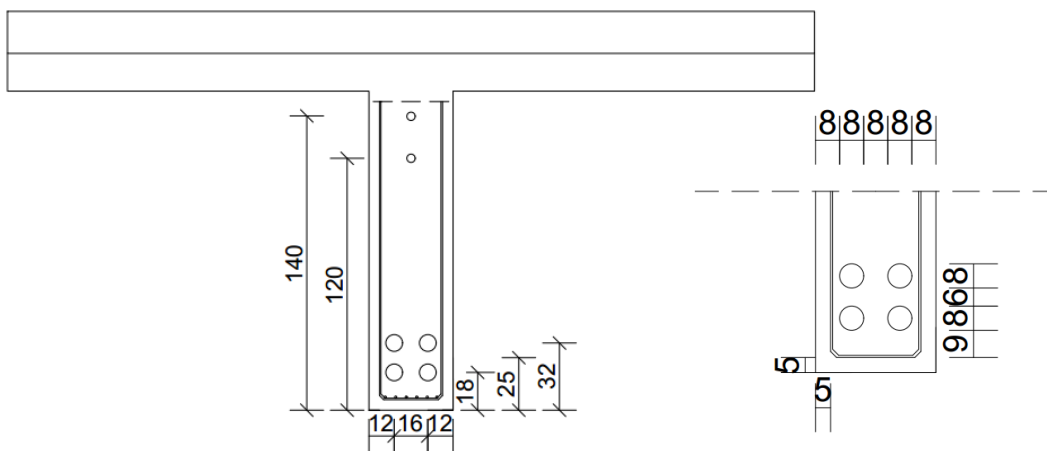
$$c_{min,dur} = 40 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \quad \Delta c_{dur,st} = 0 \quad \Delta c_{dur,add} = 0$$

$$c_{min} = \max\{10; 40; 10\} = 40 \text{ mm}$$



- Usidrenje kabela na krajevima greda postavlja se tako da je težište sile prednapinjanja ispod težišta poprečnog presjeka nosača a 1/3 sile prednapinjanja sidri se u donjoj trećini visine rebra
- Radi uvođenja sile prednapinjanja u nosač i prenošenja ležajne reakcije, nosač se mora produžiti preko osi ležaja  $h/3$  ( $170/3 = 57 \text{ cm}$ ) ili  $60 \text{ cm}$
- Usvajamo: 4 kabela s po 9 užadi = 36 kabela (iz kataloga kabela 6809 [9]) s težištem  $\xi = 25 \text{ cm}$  od donjeg ruba kao na slici 13
- Promjer cijevi za kabele je  $80 \text{ cm}$



Slika 13. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

- Stvarna ukupna površina kabela:  $A_p = n * A_1 = 36 * 1,5 = 54 \text{ cm}^2$

Maksimalna ukupna sila koju možemo unijeti:

$$P_{0,max} = A_p * \sigma_{p0} = 54 * 144 = 7776 \text{ kN}$$

$$P_{m0,max} = P_{0,max} * \delta = 7776 * 0,9 = 6998,4 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty,max} = P_{m0,max} * m = 6998,4 * 0,85 = 5948,64 \text{ kN}$$

- Izračunata potrebna sila:  $P_{m\infty} \geq 5870 \text{ kN}$

- Usvaja se sila:  $P_{m\infty} = 5870 \text{ kN}$

$$P_{m0} = 6906 \text{ kN}$$

$$P_0 = 7674 \text{ kN}$$

Stvarno dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} = \frac{P_0}{A_p} = \frac{7674}{54} = 142,11 \approx 142 \text{ kN/cm}^2$$

Uvjeti koji moraju biti ispunjeni u fazi gradnje:

- Presjek je ispunjen rupama od kabela za prednapinjanje koje u ovoj fazi nisu još injektirane pa računamo s neto presjekom (pretpostavljeno umanjenje geometrijskih karakteristika 5%)

$$A^n = A' * 0,95 = 1,2992 * 0,95 = 1,234 \text{ m}^2$$

$$W_d^n = W_d' * 0,95 = 0,2941 * 0,95 = 0,279 \text{ m}^2$$

$$W_g^n = W_g' * 0,95 = 0,706 * 0,95 = 0,671 \text{ m}^2$$

- a) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena granica od  $0,45 * f_{ck}$  da bi puzanje bilo linearno:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje vrijedi:

$$N_{Ed} = P_{m0}$$

$$M_{Ed} = M_{g1}$$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

**Za  $x = L/4$ :**

$$y_{cp}' = y_d' - \xi = 120 - 41,5 = 78,5 \text{ cm}$$

$$P_{m0, donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1,2}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp}'}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 5 + \frac{1753,92 * 10^2}{0,279 * 10^6}}{\frac{1}{1,234 * 10^4} + \frac{0,785 * 10^2}{0,279 * 10^6}} = 7943,3 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,donje}^{II}$$

$$6906 \text{ kN} < 7943,3 \text{ kN}$$

- o Uvjet je zadovoljen

**Za  $x = L/2$  :**

$$y_{cp}' = y_d' - \xi = 120 - 25 = 95 \text{ cm}$$

$$P_{m0,donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1,3}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp}'}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 5 + \frac{2338,6 * 10^2}{0,279 * 10^6}}{\frac{1}{1,234 * 10^4} + \frac{0,95 * 10^2}{0,279 * 10^6}} = 7326,03 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,donje}^{II}$$

$$6906 \text{ kN} < 7326,06 \text{ kN}$$

- o Uvjet je zadovoljen

- b) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena srednje vlačno naprezanje u betonu:

$$f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2 \text{ za beton C50/60}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje:  $N_{Ed} = P_{m0}$  ;  $M_{Ed} = M_{g1}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

**Za  $x = L/4$  :**

$$P_{m0,gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1,2}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,41) + \frac{1753,92 * 10^2}{0,671 * 10^6}}{\frac{0,785 * 10^2}{0,671 * 10^6} - \frac{1}{1,234 * 10^4}} = 18674,44 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,gornje}^{II}$$

$$6906 \text{ kN} < 18674,44 \text{ kN}$$

○ Uvjet je zadovoljen

**Za  $x = L/2$  :**

$$P_{m0,gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1,3}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,41) + \frac{2338,56 * 10^2}{0,671 * 10^6}}{\frac{0,95 * 10^2}{0,671 * 10^6} - \frac{1}{1,234 * 10^4}} = 12528,71 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,gornje}^{II}$$

$$6906 \text{ kN} < 12528,71 \text{ kN}$$

○ Uvjet je zadovoljen

## 2.5. Određivanje zone vođenja težišta kabela

- Težište određujemo na čelu nosača gdje je  $x = 0$

a) Za eksploataciju:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} + \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{M_{dek}}{P_{m\infty}} - k_g''$$

$$\text{Za } x = 0 \rightarrow M_{dek} = 0$$

$$y_{cp}^0'' \geq -k_g'' = -0,1866 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}^0'' = 1,4 + 0,1866 = 1,587 \text{ m}$$

- Uvjet da na gornjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_g''} + \frac{M_{dek}}{W_g''} < 0,45 * f_{ck}$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{-0,45 * f_{ck} * W_g''}{P_{m\infty}} + k_d'' = \frac{-0,45 * 5 * 10^4 * 1,08}{5870} + 0,5224 = -3,617 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}'' = 1,4 + 3,617 = 5,017 \text{ m}$$

- b) Za stanje gradnje:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

$$y_{cp}' \leq \frac{0,45 * f_{ck} * W_d^n}{P_{m0}} - k_g^n = \frac{0,45 * 5 * 10^4 * 0,279}{6906} - 0,226 * 0,95 = 0,694 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 1,2 - 0,694 = 0,51 \text{ m}$$

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $f_{ctm}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

$$y_{cp}' \leq \frac{-f_{ctm} * W_g^n}{P_{m0}} + k_d^n = \frac{-(-0,41) * 10^4 * 0,671}{6906} + 0,543 * 0,95 = 0,914 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 1,2 - 0,914 = 0,29 \text{ m}$$

- Presjek uvjeta:

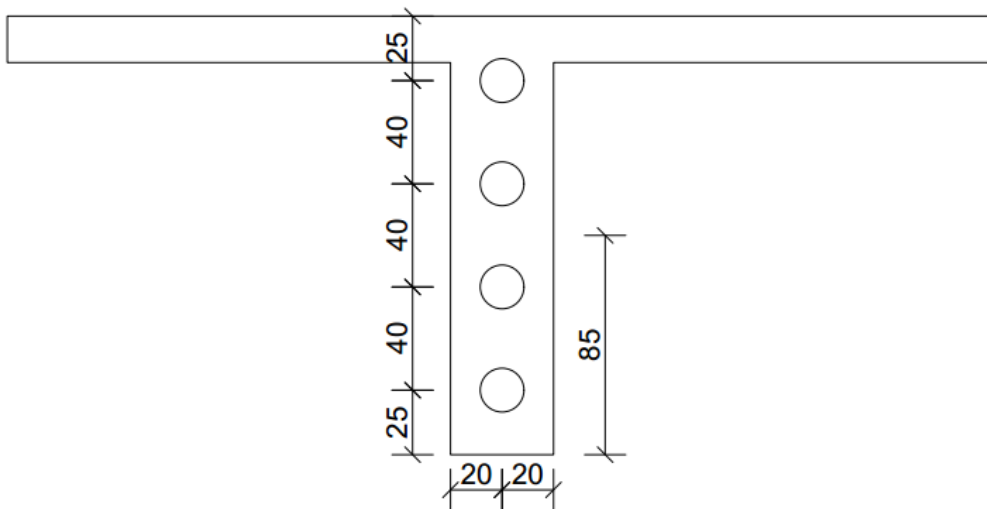
$$\xi_0 \geq 0,29 \text{ m}$$

$$\xi_0 \leq 1,59 \text{ m}$$

$$0,29 \text{ m} \leq \xi_0 \leq 1,59 \text{ m}$$

## Raspored kabela na čelu prema pravilima o minimalnim razmacima između kabela i do ruba nosača

- Podatci proizvođača za kabel 6809:
  - o Promjer kotve:  $\varnothing a = 170\text{mm}$
  - o Razmak osi kabela: 305 mm
  - o Razmak osi kabela od ruba nosača: 175 mm (uzeti veću vrijednost jer debljina sigurnosnog sloja nije 3 cm )



Slika 14. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

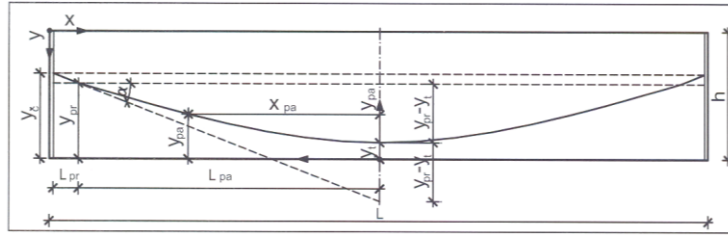
- Osi kabela na čelu nosača postavljena su na razmaku od 40 cm, a od rubova nosača za 25 cm u horizontalnom i vertikalnom smjeru
- Težište natega na čelu nosača nalazi se na 85 cm od donjeg ruba
- Usvajamo  $\xi_0 = 0,85\text{ m}$  (zadovoljava gornje uvijete + nalazi se ispod težišta nosača bez ploče)

Linije vođenja kabela dobivene su pomoću Excela, stoga je priložen list iz navedenog programa.

### Linija vođenja kabela

$L_{pr} = 60$  cm  
 $L_{pa} = 1200$  cm

pr-pravac  
 pa-parabola



### Nagib tangente i visinski položaj kabela na prijelazu s pravca na parabolu

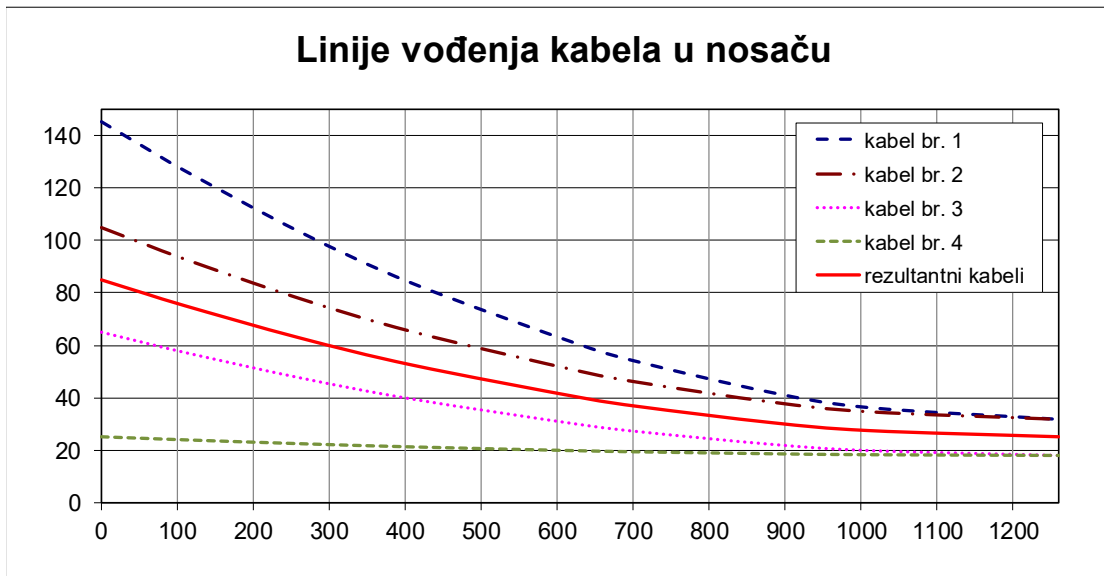
kabel br.	$y_{\epsilon}$ (cm)	$y_t$ (cm)	$\text{tg}\alpha = (y_{\epsilon} - y_t) / (L_{pr} + L_{pa} / 2)$	$y_{pr} = y_{\epsilon} - \text{tg}\alpha * L_{pr}$ (cm)
1	145,00	32,00	0,1712	134,73
2	105,00	32,00	0,1106	98,36
3	65,00	18,00	0,0712	60,73
4	25,00	18,00	0,0106	24,36
rezultantni	85,00	25,00	0,0909	79,55

### Izraz za proračun točaka na paraboli

$$y_{pa} = [(y_{pr} - y_t) * (L_{pa} + L_{pr} - x)^2] / L_{pa}^2 + y_t \text{ (cm)}$$

### Udaljenost osi kabela od donjeg ruba (cm)

kabel br.	x (cm)									
	0	60	110	260	410	630	710	880	1010	1260
1	145,00	134,73	126,35	103,34	83,54	60,31	53,58	42,30	36,46	32,00
2	105,00	98,36	92,95	78,09	65,30	50,29	45,94	38,65	34,88	32,00
3	65,00	60,73	57,24	47,67	39,44	29,78	26,98	22,28	19,85	18,00
4	25,00	24,36	23,84	22,42	21,19	19,75	19,34	18,64	18,28	18,00
rezultantni	85,00	79,55	75,09	62,88	52,37	40,03	36,46	30,47	27,37	25,00



## 2.6. Proračun gubitaka sile u kablovima

Sila u kabelu u vremenu t:

$$P_{mt} = P_0 - \Delta P_{el} - \Delta P_{c+s+r}(t) - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_{sl}$$

Gdje je:

$P_0$  – početna sila neposredno nakon prednapinjanja

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

$\Delta P_{sl}$  – gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

$\Delta P_{el}$  – gubitak sile zbog elastičnog deformiranja betona

$\Delta P_{c+s+r}(t)$  – gubitak sile zbog puzanja i skupljanja betona te relaksacije čelika u vremenu (t)

$P_{m0} \rightarrow t = 0$  sila umanjena za početne gubitke  $\Delta P_{\mu}(x)$ ,  $\Delta P_{sl}$  i  $\Delta P_{el}$

$P_{m\infty} \rightarrow t = \infty$

### 2.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)})$$

- koeficijent trenja između kabela i zaštitne cijevi (tehničke specifikacije izvođača):  $\mu = 0,19 \text{ rad}^{-1}$
- $\theta = \frac{8 * f * x}{l_{tot} * l_{tot}}$  – zbroj kutova skretanja kabela na duljini x; f – strelica parabole
- nenamjerni kut skretanja kabela (tehničke specifikacije izvođača):  $k = 0,005 \text{ rad/m}$
- $P_0 = 7674 \text{ kN}$

**Za x = 0 m:**

$$\theta = 0$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 7674 * (1 - e^{-0,19 * (0 + 0,005 * 0)}) = 0 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 7674 - 0 = 7674 \text{ kN}$$



**Za  $x = l_{\text{tot}}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{4,8}{635} * 6,3 = 0,05$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 7674 * (1 - e^{-0,19 * (0,05 + 0,005 * 6,3)}) = 103,5 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 7674 - 103,5 = 7570,5 \text{ kN}$$

**Za  $x = 12,60 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{4,8}{635} * 12,6 = 0,1$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 7674 * (1 - e^{-0,19 * (0,1 + 0,005 * 12,6)}) = 191,5 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 7674 - 191,5 = 7482,5 \text{ kN}$$

**Za  $x = 3l_{\text{tot}}/4 = 18,9 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{4,8}{635} * 18,9 = 0,14$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 7674 * (1 - e^{-0,19 * (0,14 + 0,005 * 18,9)}) = 292,5 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 7674 - 292,5 = 7381,5 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{\text{tot}} = 25,2 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{4,8}{635} * 25,2 = 0,19$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 7674 * (1 - e^{-0,19 * (0,19 + 0,005 * 25,2)}) = 378,2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 7674 - 378,2 = 7295,8 \text{ kN}$$

### 2.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

- Smanjenje na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * P_0 * l_e * \mu * \left( \frac{\theta}{x} + k \right)$$

- Iznos smanjenja u presjeku x:

$$\Delta P_{sl}(x) = \Delta P'_{sl} * \frac{l_e - x}{l_e}$$

- utjecaj prokliznuća klina najveći je na čelu nosača i smanjuje se sa duljinom kabela
- kada je zadovoljen uvjet  $x > l_e$  u presjeku x nema utjecaja prokliznuća klina
- duljina utjecaja prokliznuća klina:

$$l_e = \sqrt{\frac{\Delta L * E_p * A_p}{P_0 * \mu * \left( \frac{\theta}{x} + k \right)}} = \sqrt{\frac{0,001 * 19500 * 54}{7674 * 0,19 * \left( \frac{0,19}{25,2} + 0,005 \right)}} = 8,27 \text{ m}$$

- o modul elastičnosti kabela:  $E_p = 195000 \text{ N/mm}^2$
- o duljina prokliznuća klina:  $\Delta L = 1 \text{ mm}$

Smanjenje sile na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * P_0 * l_e * \mu * \left( \frac{\theta}{x} + k \right) = 2 * 7674 * 8,27 * 0,19 * \left( \frac{0,19}{25,2} + 0,005 \right) = 254,6 \text{ kN}$$

Iznos smanjenja sile u presjeku x

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\Delta P_{sl}(x) = 254,6 * \frac{8,27 - 6,3}{8,27} = 60,6 \text{ kN}$$

U ostalim presjecima ne postoji utjecaj prokliznuća klina.

### 2.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}$$

- Početno naprezanje u visini težišta kabela umanjeno za gubitke trenja i prokliznuća klina:  $\Delta \sigma_c = \frac{P'_0}{A_c} * \left( 1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2 \right) = \frac{P'_0}{A'} * \left( 1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}^2 \right)$

- Početna sila umanjena za gubitke trenja:

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl}$$

- Modul elastičnosti betona:  $E_{cm} = 36000 \text{ N/mm}^2$
- $j = \frac{n-1}{2n} = \frac{4-1}{2 \cdot 4} = 0,375$
- Ukupan broj kabela:  $n = 4$

**Za  $x = 0 \text{ m}$ :**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 7674 - 0 - 254,6 = 7419,4 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}^2\right) = \frac{7419,4}{1,2992} * \left(1 + \frac{1,2992}{0,353} * 0,35^2\right) \\ &= 8285,47 \text{ kN/m}^2 = 0,83 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 54 * 19500 * \frac{0,375 * 0,83}{3600} = 91,04 \text{ kN} \approx 91 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 254,6 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 91 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 0 + 254,6 + 91 = 345,6 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 7674 - 345,6 = 7328,4 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{7328,4}{7674} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$P'_o = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 7674 - 103,5 - 60,6 = 7509,9 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_c &= \frac{P'_o}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_o}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{7509,9}{1,2992} * \left(1 + \frac{1,2992}{0,353} * 0,80^2\right) \\ &= 19396,09 \text{ kN/m}^2 = 1,94 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta\sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 54 * 19500 * \frac{0,375 * 1,94}{3600} = 212,79 \text{ kN} \approx 213 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 103,5 + 60,6 + 213 = 377,1 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 7674 - 377,1 = 7296,9 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{7296,9}{7674} = 0,95$$

$\delta_{procijenjeno} = 0,9$  pretpostavka zadovoljava

**Za  $x = 12,60 \text{ m}$ :**

$$P'_o = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 7674 - 191,5 - 0 = 7482,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_c &= \frac{P'_o}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_o}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{7482,5}{1,2992} * \left(1 + \frac{1,2992}{0,353} * 0,60^2\right) \\ &= 13390,19 \text{ kN/m}^2 = 1,34 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta\sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 54 * 19500 * \frac{0,375 * 1,34}{3600} = 146,98 \text{ kN} \approx 147 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 191,5 + 0 + 147 = 338,5 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 7674 - 338,5 = 7335,5 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{7335,5}{7674} = 0,95$$

$\delta_{procijenjeno} = 0,9$  pretpostavka zadovoljava

**Za  $x = 3l_{tot}/4 = 18,9$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 7674 - 292,5 - 0 = 7381,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{7381,5}{1,2992} * \left(1 + \frac{1,2992}{0,353} * 0,8^2\right) \\ &= 19064,46 \text{ kN/m}^2 = 1,91 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 54 * 19500 * \frac{0,375 * 1,91}{3600} = 209,5 \text{ kN} \approx 210 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 292,5 + 0 + 210 = 502,5 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 7674 - 502,5 = 7171,5 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{7171,5}{7674} = 0,93$$

$\delta_{procijenjeno} = 0,9$  pretpostavka zadovoljava

**Za  $x = l_{tot} = 25,2$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 7674 - 378,2 - 0 = 7295,8 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{7295,8}{1,2992} * \left(1 + \frac{1,2992}{0,353} * 0,35^2\right) \\ &= 8147,44 \text{ kN/m}^2 = 0,82 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 54 * 19500 * \frac{0,375 * 0,82}{3600} = 89,94 \text{ kN} \approx 90 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 378,2 + 0 + 90 = 468,2 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 7674 - 468,2 = 7205,8 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{7205,8}{7674} = 0,94$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

#### 2.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu t

$$\Delta P_t(t) = A_p * \Delta \sigma_{c+s+r}$$

$$= A_p * \frac{\varepsilon_{cs} * E_p + 0,8 * \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} * \varphi(t, t_0) * \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} * \frac{A_p}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c''}{I_c} * y_{cp}''^2\right) * [1 + 0,8 * \varphi(t, t_0)]}$$

- Tlak uzimamo s pozitivnim predznakom
- Promatrano vrijeme:  $t = \infty$
- Trenutak unošenja sile prednapinjanja:  $t_0 = 7 \text{ dana}$

#### Skupljanje betona:

- Deformacija skupljanja:  $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$ 
  - o Deformacija skupljanja zbog sušenja:  $\varepsilon_{cd,\infty} = k_h * \varepsilon_{cd,0}$
  - o Deformacija autogenog skupljanja:  $\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (f_{ck} - 10) * 10^{-6}$

Tablica 5. Nazivne vrijednosti slobodnog skupljanja pri sušenju za beton s cementom CEM razreda N [10]

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relativna vlažnost (u %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

- Element se nalazi na otvorenom (vlažnost 80%)

$$\varepsilon_{cd,0} = \left[0,24 - \frac{45 - 40}{60 - 40} (0,24 - 0,19)\right] * 10^{-3} = 0,23 * 10^{-3}$$

- Srednji polumjer elementa:

$$h_0 = \frac{2 * A_c''}{u} = \frac{2 * 2,0672}{11,48} = 0,360 = 360 \text{ mm}$$

- o Opseg poprečnog presjeka koji je izložen sušenju:

$$u = 2 * (3,84 + 1,52 + 0,38) = 11,48 \text{ m}$$

Tablica 6. Vrijednosti  $k_h$  u zavisnosti o srednjem polumjeru elementa  $h_0$  u mm [10]

$h_0$	$k_h$
100	1,0
200	0,85
300	0,75
$\geq 500$	0,70

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,75 * 0,23 * 10^{-3} = 0,17 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (50 - 10) * 10^{-6} = 0,1 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cs} = (0,17 + 0,1) * 10^{-3} = 0,27 * 10^{-3}$$

### Puzanje betona:

- Vlažna okolina RH=80%
- Cement razreda N

$$\varphi(t_\infty, 7) = 1,9$$

- Najveće vlačno naprezanje na kabel umanjeno za početne gubitke:

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = \frac{P_{m0}}{A_p}$$

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

**Za x = 0 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{7328,4}{54} = 135,71 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{135,71}{186} = 0,73$$

**Za x = l<sub>tot</sub>/4 = 6,3 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{7296,9}{54} = 135,13 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{135,13}{186} = 0,73$$

**Za x = l<sub>tot</sub>/2 = 12,60 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{7335,5}{54} = 135,84 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{135,84}{186} = 0,73$$

**Za x = 3l<sub>tot</sub>/4 = 18,9 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{7171,5}{54} = 132,81 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{132,81}{186} = 0,71$$

**Za x = l<sub>tot</sub> = 25,2 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{7205,8}{54} = 133,44 \text{ kN/cm}^2$$



$$\mu = \frac{133,44}{186} = 0,72$$

- Vrijednost gubitaka zbog opuštanja 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temperaturi od 20°C (prema tehničkim karakteristikama proizvođača):  $\rho_{1000} = 2,5\%$
- Vrijeme nakon prednapinjanja (za konačno stanje 57 god):  $t = 500000$  sati
- Za čelik razreda 2 gubitak zbog opuštanja se računa prema formuli:

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

**Za x = 0 m, x = 6,3 m, x = 12,6 m**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,73} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,73)} * 10^{-5} = 0,045$$

**Za x = 18,9 m:**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,71} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,71)} * 10^{-5} = 0,041$$

**Za x = 25,2 m:**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,72} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,72)} * 10^{-5} = 0,043$$

Konačna relaksacija uslijed relaksacije čelika nakon 500000 sati

**Za x = 0 m, x = 6,3 m, x = 12,6 m**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,045 * \sigma_{pi} = 0,045 * 135,71 = 6,1 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 18,9 m:**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,041 * \sigma_{pi} = 0,041 * 132,8 = 5,4 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 25,2 m:**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,043 * \sigma_{pi} = 0,043 * 133,44 = 5,5 \text{ kN/cm}^2$$

Naprezanje betona u visini natega od vlastite težine (uključujući početne gubitke) i početnog prednapinjanja te ostalih nazovistalnih djelovanja

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I_c''} + \left( \frac{P_{m0}}{A_c''} + \frac{P_{m0}}{I_c''} * y_{cp}''^2 \right)$$

**Za x = 0 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 55}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{7328,4}{1,1952 * 10^4} + \frac{7328,4}{0,311 * 10^8} * 55^2 \right) = 1,33 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 6,3 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{3606,12 * 10^2 * 100}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{7296,9}{1,1952 * 10^4} + \frac{7296,9}{0,311 * 10^8} * 100^2 \right) = 1,8 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 12,6 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{4808,16 * 10^2 * 115}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{7335,5}{1,1952 * 10^4} + \frac{7335,5}{0,311 * 10^8} * 115^2 \right) = 2 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 18,9 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{3606,12 * 10^2 * 100}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{7171,5}{1,1952 * 10^4} + \frac{7171,5}{0,311 * 10^8} * 100^2 \right) = 1,7 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 25,2 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 55}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{7205,8}{1,1952 * 10^4} + \frac{7205,8}{0,311 * 10^8} * 55^2 \right) = 1,3 \text{ kN/cm}^2$$

Gubitak sile prednapinjanja

**Za  $x = 0$  m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 54 * \frac{0,27 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,1 + \frac{19500}{3600} * 1,85 * 1,33}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{54}{2,0672 * 10^4} * \left(1 + \frac{2,0672 * 10^4}{0,54 * 10^8} * 0,55^2\right) * [1 + 0,8 * 1,9]} \\ &= 54 * \frac{22,913}{1,0357} = 1194,65 \text{ kN} \approx 1195 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{7328,4 - 1195}{7328,4} = \frac{6133,4}{7328,4} = 0,84$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,84 * 0,9 = 0,76$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{6133,4}{7674} = 0,79$

**Za  $x = 6,3$  m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 54 * \frac{0,27 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,1 + \frac{19500}{3600} * 1,85 * 1,8}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{54}{2,0672 * 10^4} * \left(1 + \frac{2,0672 * 10^4}{0,54 * 10^8} * 1^2\right) * [1 + 0,8 * 1,9]} \\ &= 54 * \frac{27,623}{1,0357} = 1440,23 \text{ kN} \approx 1440 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{7296,9 - 1440}{7296,9} = \frac{5856,9}{7296,9} = 0,8$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,8 * 0,9 = 0,72$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5856,9}{7674} = 0,75$

**Za x = 12,6 m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 54 * \frac{0,27 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,1 + \frac{19500}{3600} * 1,85 * 2}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{54}{2,0672 * 10^4} * \left(1 + \frac{2,0672 * 10^4}{0,54 * 10^8} * 1,15^2\right) * [1 + 0,8 * 1,9]} \\ &= 54 * \frac{29,627}{1,0357} = 1544,71 \text{ kN} \approx 1545 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{7335,5 - 1545}{7335,5} = \frac{5790,5}{7335,5} = 0,8$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,8 * 0,9 = 0,72$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5790,5}{7674} = 0,75$

**Za x = 18,9 m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 54 * \frac{0,27 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 5,4 + \frac{19500}{3600} * 1,85 * 1,7}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{54}{2,0672 * 10^4} * \left(1 + \frac{2,0672 * 10^4}{0,54 * 10^8} * 1^2\right) * [1 + 0,8 * 1,9]} \\ &= 54 * \frac{26,62}{1,0357} = 1387,93 \text{ kN} \approx 1388 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{7171,5 - 1388}{7171,5} = \frac{5783,5}{7171,5} = 0,81$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,81 * 0,9 = 0,73$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5783,5}{7674} = 0,75$

**Za x = 25,2 m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 54 * \frac{0,27 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 5,5 + \frac{19500}{3600} * 1,85 * 1,3}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{54}{2,0672 * 10^4} * \left(1 + \frac{2,0672 * 10^4}{0,54 * 10^8} * 0,55^2\right) * [1 + 0,8 * 1,9]} \\ &= 54 * \frac{22,612}{1,0357} = 1178,96 \text{ kN} \approx 1179 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{7205,8 - 1179}{7205,8} = \frac{6026,8}{7205,8} = 0,84$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,84 * 0,9 = 0,76$

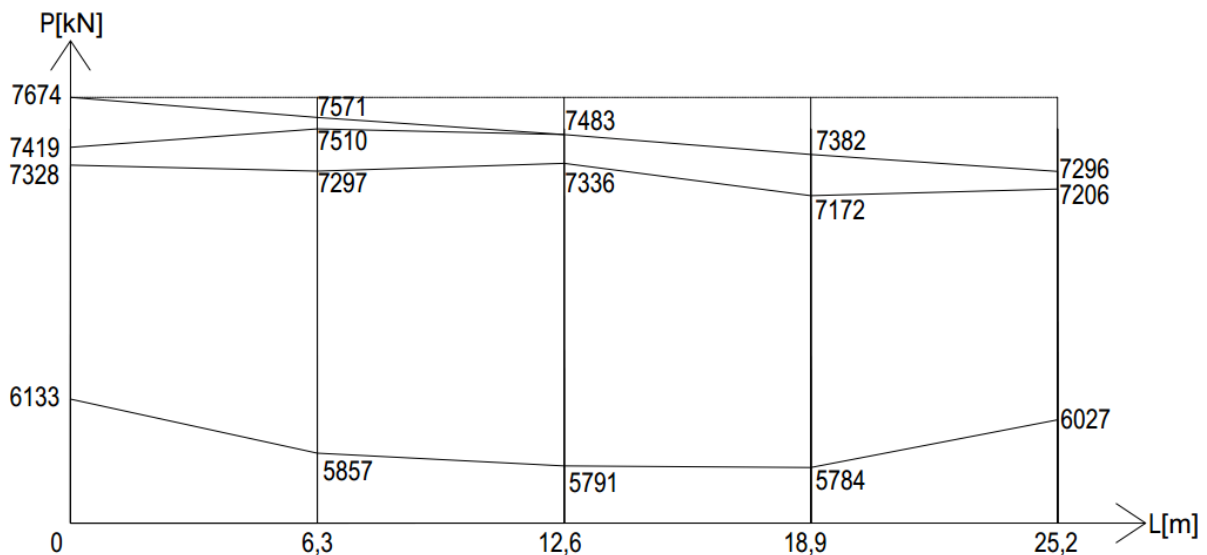
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{6026,8}{7674} = 0,79$

### 2.6.5. Stvarne sile u kabelima

Vrijednosti stvarnih sila u kabelima dane su tablici 7.

Tablica 7. Stvarne sile u kabelima

X [m]	P <sub>0</sub> [kN]	P <sub>m0</sub> [kN]	P <sub>m∞</sub> [kN]
0	7674	7328,4	6133,4
6,3	7674	7296,9	5856,9
12,6	7674	7335,5	5790,5
18,9	7674	7171,5	5783,5
25,2	7674	7205,8	6026,8



Slika 15. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

## 2.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču

### Stalna i prolazna proračunska situacija:

(stalno opterećenje, promjenljivo opterećenje i prednapinjanje)

Proračunski moment savijanja za stalna i prolazna djelovanja:

$$M_{Ed} = \gamma_g * M_{g2} + \gamma_Q * M_Q$$

- Stalno djelovanje i promjenljivo opterećenje izazivaju nepovoljne učinke, a prednapinjanje pozitivne, stoga su parcijalni koeficijenti jednaki:

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ za prometna opterećenja}$$

- Utjecaj prednapinjanja uzimamo u obzir kod izračuna potrebne neprednapete armature

$$M_{g2} = 4808,16 \text{ kNm}$$

$$M_Q = M_{Q1k} + M_{Q2k} + M_{q1k} + M_{q2k} + M_{qfk} = 2074,7 + 493,62 + 1180,8 + 115,2 + 187,5 = 4051,82 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 4808,16 + 1,35 * 4051,82 \approx 11960 \text{ kNm}$$

Proračunska poprečna sila za stalna i prolazna djelovanja:

$$V_{Ed} = \gamma_g * V_g + \gamma_Q * V_Q$$

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ kada se uzimaju sva djelovanja}$$

$$V_g = 801,36 \text{ kN}$$

$$V_Q = V_p = V_{Q1k} + V_{Q2k} + V_{q1k} + V_{q2k} + V_{qfk} \\ = 354,9 + 84,44 + 196,8 + 19,2 + 30 = 685,34 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1,35 * 801,36 + 1,35 * 685,34 = 2007 \text{ kN}$$

- Poprečnu silu na ležaju možemo reducirati:
  - a) Za utjecaj stalnog tereta koji se prenosi direktno u ležaj na udaljenosti  $d$  od lica ležaja  $V_{red,1}$ :

$$V_{red,1} = \left(\frac{a}{2} + d\right) * [\gamma_g * (g_2 + g_r)] = \left(\frac{0,30}{2} + 1,83\right) * [1,35 * (51,68 + 15,1)]$$

$$= 178,5 \text{ kN}$$

- Širina ležaja:  $a = 30 \text{ cm}$
- Statička visina:  $d = 183 \text{ cm}$

b) Za utjecaj skretne sile u kabelima  $V_{red,2}$ :

$$V_{red,2} = \gamma_p * P_{m\infty} * \sin\alpha$$

- Učinak sile prednapinjanja je pozitivan i stoga je parcijalni faktor jednak:

$$\gamma_p = 1,0$$

$$\operatorname{tg}\alpha = 0,085 \text{ rad} \rightarrow \alpha = 4,86^\circ$$

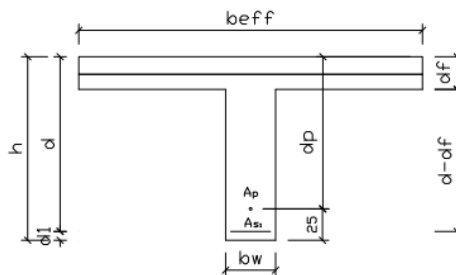
$$V_{red,2} = 1 * 6153 * \sin(4,86^\circ) = 521,29 \text{ kN}$$

- Reducirana poprečna sila:

$$V'_{Ed} = V_{Ed} - V_{red,1} - V_{red,2} = 2007 - 178,5 - 521,29 = 1307,21 \text{ kN}$$

### 2.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

#### Određivanje potrebne nosive armature



Slika 16. Općeniti poprečni presjek

- Proračun sudjelujuće širine T – presjeka

$$b_w = 40 \text{ cm}$$

$$d_f = 38 \text{ cm}$$

$$h = 190 \text{ cm}$$

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

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * b_i + 0,1 * l_0 \leq \min\{b_1; 0,2l_0\}$$

$$l_0 = l = 2400 \text{ cm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * 172 + 0,1 * 2400 = 274,4 \text{ cm}$$

$$\leq \min\{172; 0,2 * 2400 = 480\} = 172 \text{ cm}$$

$$b_{eff} = 2 * 172 + 40 = 384 \text{ cm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d_s = h - d_1 = 190 - 7 = 183 \text{ cm} - \text{statička visina nenapete armature}$$

$$d_p = h - 25 = 190 - 25 = 165 \text{ cm} - \text{statička visina prednapete armature}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 * \frac{50}{1,5} = 28,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_{cc} = 0,85 \quad \text{za mostove}$$

- Granica popuštanja čelika za prednapinjanje:

$$\sigma_{pd} = \frac{0,9 * f_{pk}}{\gamma_p} = \frac{0,9 * 186}{1,15} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{Eds} = M_{Ed} + F_p * (d_s - d_p) = 11960 + (54 * 145,6) * (1,83 - 1,65)$$

$$= 13375,23 \text{ kNm}$$

- Pretpostavka da neutralna os prolazi kroz ploču:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{1337523}{384 * 183^2 * 2,83} = 0,037$$



$$\xi = \frac{x}{d} = 0,070 \qquad \zeta = \frac{z}{d} = 0,975$$

$$x = d_s * \xi = 183 * 0,070 = 12,81 \text{ cm} < 38 \text{ cm}$$

- N.O. prolazi kroz ploču, presjek dimenzioniramo kao pravokutni dimenzija  $b_{eff}/h$

$$\begin{aligned} A_{s1} &= \frac{M_{Eds} - A_p * \sigma_{pd} * (z_s - (d_s - d_p))}{f_{yd} * z_s} \\ &= \frac{1337523 - 54 * 145,6 * (0,975 * 183 - (183 - 165))}{43,48 * (0,975 * 183)} \\ &= 9,82 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje za granično stanje loma (za  $t = \infty$ ):

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E_s} * \left[ \sigma_{pm,\infty} - \alpha_e * \left( \frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''^2}{I''} - \frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I''} \right) \right] + \Delta\varepsilon_p$$

- Deformacija  $\Delta\varepsilon_p$  dobiva se iz omjera sličnosti trokuta:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{d_p - x} = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{x}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{\xi * d_s} * (d_p - \xi * d_s) = \frac{3,5 * 10^{-3}}{0,070 * 183} * (165 - 0,070 * 183) = 0,04158 = 41,6\text{‰}$$

$$\sigma_{pm,\infty} = \frac{P_{m\infty}}{A_p} = \frac{6153}{54} = 113,94 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{(\infty,28)}} = \frac{36}{1 + 1,6} = 13,8 \text{ GPa}$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{195}{13,8} = 14,13$$

$$t_0 = 28 \text{ d}$$

$$\varphi_{(\infty,28)} = 1,6$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \frac{1}{19500} * \left[ 113,9 - 14,13 * \left( \frac{6153}{2,0672 * 10^4} + \frac{6153 * 115^2}{0,540 * 10^8} - \frac{480816 * 115}{0,540 * 10^8} \right) \right] \\ &\quad + 0,0416 = 0,0468 = 46,8\text{‰} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{pd} = \frac{\sigma_{pd}}{E_p} = \frac{145,6}{19500} = 7,47\text{‰}$$

$$\varepsilon_p > \varepsilon_{pd} \quad \rightarrow \quad \sigma_{pd} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

- Najmanja ploština uzdužne armature u gredama:

$$\begin{aligned} A_{s1,min} &= \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d; 0,0013 * b_t * d \right\} \\ &= \max \left\{ 0,26 * \frac{4,1}{500} * 40 * 183; 0,0013 * 40 * 183 \right\} \\ &= \max \{ 15,6; 9,52 \} = 15,6 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Najveća ploština uzdužne armature u gredama:

$$A_{s1} \leq 0,04 * A_c = 0,04 * 2,0672 * 10^4 = 826,88 \text{ cm}^2$$

- Krhki slom:

- o Za prednapete konstrukcije dana je metoda kojom se može dokazati da neće doći do krhkog sloma [5] :

$$A_{s1} = \frac{M_{rep}}{f_{yk} * z_s} \quad z_s = 0,9 * d \quad f_{ctm} = 4,1 \text{ MPa} \quad \text{za C50/60}$$

$$M_{rep} = f_{ctm} * W_d'' = 0,41 * 0,386 * 10^6 = 158260 \text{ kNcm}$$

$$A_{s1} = \frac{158260}{50 * 0,9 * 183} = 19,22 \text{ cm}^2$$

- Usvojena je armatura 8Ø18  $A_{s1} = 20,36 \text{ cm}^2$

Provjera nenapete armature za pojavu kose pukotine:

- Koristimo vertikalne sponne ( $\alpha = 90^\circ$ ), nagib tlačnih štapova  $\theta = 40^\circ$  ( $ctg\theta = 1,2$ )
- Armaturu iz polja vodimo do oslonca  $A_{sl,prov} = A_{s1} = 20,36 \text{ cm}^2$
- Armaturu provjeravamo na vlačnu silu  $T_{Ed}$  (sila u donjem vlačnom pojasu) koja se javlja nad ležajem (Mörschova rešetka)

$$T_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{1}{2} * V'_{Ed} * (ctg\theta - ctg\alpha)$$

$$M_{Ed} = 0 \quad \text{nad ležajem}$$

$$z \approx 0,9 * d$$

$$T_{Ed} = 0 + \frac{1}{2} * 1307,21 * (ctg40 - ctg90) = 778,94 \text{ kN}$$

$$A_{sl,req} = \frac{T_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{778,94}{43,48} = 17,91 \text{ cm}^2 < A_{sl,prov} = 20,36 \text{ cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

Stvarno zajedničko težište armature:

$$d_x = \frac{F_p * x_p + F_{s1} * d_1}{F_p * F_{s1}} = \frac{(A_p * \sigma_p) * x_p + (A_{s1} * f_{yd}) * d_1}{A_p * \sigma_p + A_{s1} * f_{yd}}$$

$$= \frac{(54 * 145,16) * 25 + (20,36 * 43,48) * 7}{54 * 145,16 + 20,36 * 43,48} = 23,17 \text{ cm}$$

$$d_t = 183 - 23,17 = 159,83 \text{ cm} \approx 160 \text{ cm}$$

### Sidrenje na osloncu

- Osnovna duljina sidrenja:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

- o Promatrane šipke se nalaze u dobrim uvjetima prionjivosti:  $f_{bd} = 4,05 \text{ MPa}$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{43,48}{0,405} = 26,84\emptyset$$

- Za  $\emptyset 18$   $l_{b,rqd} = 26,84 * 18 = 48,3 \text{ cm}$
- Potrebna duljina sidrenja:  $l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$
- Za slučaj sidrenja ravnim šipkama:  $\alpha_1 = 1,0$
- Ostale  $\alpha$  usvajamo kao 1,0

$$l_{bd} = l_{b,rqd} = 48,3 \approx 50 \text{ cm} \geq l_{b,min}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,3 * l_{b,rqd}; 10 * \emptyset; 10 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 50; 10 * 1,8; 10\}$$

$$= \max\{15; 18; 10\} = 18 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava

### Duljina nastavljanja preklapanjem:

- Potrebna duljina prijeklopa:  $l_0 = l_{b,rqd} * \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * \alpha_6 \geq l_{0,min}$
- Preklapamo više od 50% armature u jednom presjeku:  $\alpha_6 = 1,5$

$$l_0 = 50 * 1,5 = 75 \text{ cm} \geq l_{0,min}$$

$$l_{0,min} = \max\{0,3 * \alpha_6 * l_{b,rqd}; 15 * \emptyset; 20 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 1,5 * 50; 15 * 1,8; 20\} \\ = \max\{22,5; 27; 20\} = 27 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava
- Usvajamo duljinu prijeklopa  $l_0 = 75 \text{ cm}$

### 2.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

Ograničenje naprezanja u betonu i provjera rastlačenja u eksploataciji

- provjere se vrše za karakterističnu, čestu i nazovistalnu kombinaciju djelovanja te za idealni presjek

$$A_{c,id} = A_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p = 2,0672 + (5,42 - 1) * 0,0054 = 2,1 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,id} = I_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}'' * y_p$$

$$y_p = y_{cp}'' - y_{ci} = y_{cp}'' - \frac{(\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}''}{A_{c,id}}$$

$$y_p(L = 0) = y_p(L) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,55 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0054 * 0,55}{2,1} = 0,54 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{2}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 1,15 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0054 * 1,15}{2,1} = 1,14 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{4} = \frac{3L}{4}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 1 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0054 * 1}{2,1} = 1 \text{ m}$$

$$I_{c,id} = 0,54 + (5,42 - 1) * 0,0054 * 1,15 * 1,14 = 0,63 \text{ m}^4$$

$$W_{dc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_d''} = \frac{0,63}{1,4} = 0,45 \text{ m}^3$$

$$W_{gc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_g''} = \frac{0,63}{0,5} = 1,26 \text{ m}^3$$

a) Karakteristična kombinacija djelovanja

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{2}\right) = 6364,19 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{4}\right) = M_{Ed}\left(\frac{3L}{4}\right) = 4752,72 \text{ kNm}$$

- Kriterij rastlačenja – tlačno naprezanje ne smije preći  $0,6 * f_{ck}$ , a vlačno naprezanje se ne smije pojaviti

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 6133,4 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{6133,4}{2,1 * 10^4} + \frac{6133,4 * 0,54 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 1,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5790,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5790,5}{2,1 * 10^4} + \frac{5790,5 * 1,14 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{6364,19 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 0,33 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5856,9 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5856,9}{2,1 * 10^4} + \frac{5856,9 * 1 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{4752,72 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 0,52 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5783,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5783,5}{2,1 * 10^4} + \frac{5783,5 * 1 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{4752,72 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 0,5 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 6026,8 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{6026,8}{2,1 * 10^4} + \frac{6026,8 * 0,54 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 1 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

**Za L=0:**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{6133,4}{2,1 * 10^4} - \frac{6133,4 * 0,54 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{1,26 * 10^6} \\ &= 0,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5790,5}{2,1 * 10^4} - \frac{5790,5 * 1,14 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{6364,19 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,3 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5856,9}{2,1 * 10^4} - \frac{5856,9 * 1 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{4752,72 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,37 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5783,5}{2,1 * 10^4} - \frac{5783,5 * 1 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{4752,72 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,36 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{6026,8}{2,1 * 10^4} - \frac{6026,8 * 0,54 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 5 = 3 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

b) Nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

**Za L=0 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 6133,4 \text{ kN}$$

**Za L/2 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 4808,16 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5790,5 \text{ kN}$$

**Za L/4 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 3606,12 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5856,9 \text{ kN}$$

**Za 3L/4 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 3606,12 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5783,5 \text{ kN}$$

**Za L :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 6026,8 \text{ kN}$$

Tlačno naprezanje ne smije preći  $0,45 * f_{ck}$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

**Za L=0 :**

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{6133,4}{2,1 * 10^4} + \frac{6133,4 * 0,54 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,45 * 10^6} \\ &= 1,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava



- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{6133,4}{2,1 * 10^4} - \frac{6133,4 * 0,54 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$

$$= 0,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L/2 :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5790,5}{2,1 * 10^4} + \frac{5790,5 * 1,14 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{4808,16 * 10^2}{0,45 * 10^6}$$

$$= 0,67 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5790,5}{2,1 * 10^4} - \frac{5790,5 * 1,14 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{4808,16 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$

$$= 0,13 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L/4 :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5856,9}{2,1 * 10^4} + \frac{5856,9 * 1 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{3606,12 * 10^2}{0,45 * 10^6}$$

$$= 0,96 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5856,9}{2,1 * 10^4} - \frac{5856,9 * 1 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{3606,12 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$

$$= 0,04 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za 3L/4 :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5783,5}{2,1 * 10^4} + \frac{5783,5 * 1 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{3606,12 * 10^2}{0,45 * 10^6}$$
$$= 0,76 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5783,5}{2,1 * 10^4} - \frac{5783,5 * 1 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{3606,12 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,1 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{6026,8}{2,1 * 10^4} + \frac{6026,8 * 0,54 * 10^2}{0,45 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,45 * 10^6}$$
$$= 1,01 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{6026,8}{2,1 * 10^4} - \frac{6026,8 * 0,54 * 10^2}{1,26 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{1,26 * 10^6}$$
$$= 0,03 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- naprezanje u nategama (kabelima) nakon svih gubitaka pri nazovistalnoj kombinaciji djelovanja ne treba premašiti  $0,65 * f_{pk}$

$$\sigma_{pm,\infty} = \frac{P_{m\infty}}{A_p} = \frac{5790,5}{54} = 107,23 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,65 * f_{pk} = 0,65 * 186$$
$$= 120,9 \text{ kN/cm}^2$$

- uvjet zadovoljava

### 2.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje)

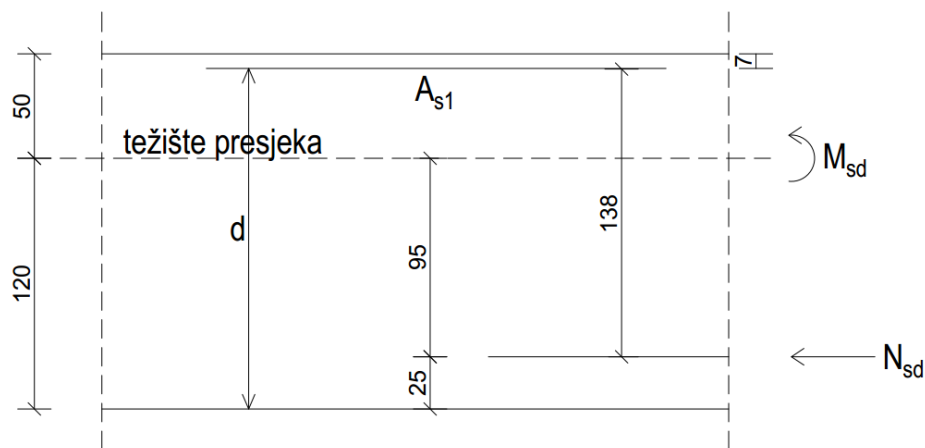
- Stalno opterećenje (povoljan učinak) i prednapinjanje (nepovoljan učinak)

$$M_{Ed} = \gamma_G * M_{g1} = 1,0 * 2338,56 = 2338,56 \text{ kNm}$$

- o za povoljni učinak  $\gamma_G = 1,0$

$$N_{Ed} = \gamma_p * P_{m0} = 1,0 * 7335,5 = 7335,5 \text{ kN}$$

- o za povoljni učinak za mostove  $\gamma_p = 1,0$



Slika 17. Postupak Wuczkowski

$$d_1 = 7 \text{ cm}$$

$$d = 170 - 7 = 163 \text{ cm}$$

- Postupak Wuczkowski:

$$M_{Eds} = -M_{Ed} + N_{Ed} * 1,38 = -2338,56 + 7335,5 * 1,38 = 7784,43 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_w * d^2 * f_{cd}} = \frac{778443}{40 * 163^2 * 2,83} = 0,25 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,368; \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,847$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds}}{\zeta * d * f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{778443}{0,847 * 163 * 43,48} - \frac{7335,5}{43,48} = -39,03 \text{ cm}^2$$

- Nije potrebna nosiva armatura

#### 2.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje)

- Treba zadovoljiti uvjet da vlačno naprezanje u betonu ne bude veće od srednje vrijednosti vlačne čvrstoće betona  $f_{ctm}$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} < 0,6 * f_{ck}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} < 0,6 * f_{ck}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 7328,4 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} &= \frac{7328,4}{1,234 * 10^4} + \frac{7328,4 * 0,35 * 10^2}{0,279 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,279 * 10^6} \\ &= 1,5 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} &= \frac{7328,4}{1,234 * 10^4} - \frac{7328,4 * 0,35 * 10^2}{0,671 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,671 * 10^6} \\ &= -0,21 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$|0,21| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,41| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 7335,5 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 2338,56 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{7335,5}{1,234 * 10^4} + \frac{7335,5 * 0,95 * 10^2}{0,279 * 10^6} - \frac{2338,56 * 10^2}{0,279 * 10^6}$$

$$= 2,2 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{7335,5}{1,234 * 10^4} - \frac{7335,5 * 0,95 * 10^2}{0,671 * 10^6} + \frac{2338,56 * 10^2}{0,671 * 10^6}$$

$$= -0,096 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,096| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,41| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

#### Za L/4 :

$$N_{Ed} = P_{m0} = 7296,9 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1753,92 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{7296,9}{1,234 * 10^4} + \frac{7296,9 * 0,785 * 10^2}{0,279 * 10^6} - \frac{1753,92 * 10^2}{0,279 * 10^6}$$

$$= 2,02 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{7296,9}{1,234 * 10^4} - \frac{7296,9 * 0,785 * 10^2}{0,671 * 10^6} + \frac{1753,92 * 10^2}{0,671 * 10^6}$$

$$= -0,095 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,095| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,41| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 7171,5 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1753,92 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{7171,5}{1,234 * 10^4} + \frac{7171,5 * 0,785 * 10^2}{0,279 * 10^6} - \frac{1753,92 * 10^2}{0,279 * 10^6}$$

$$= 1,97 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{7171,5}{1,234 * 10^4} - \frac{7171,5 * 0,785 * 10^2}{0,671 * 10^6} + \frac{1753,92 * 10^2}{0,671 * 10^6}$$

$$= -0,036 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,036| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,41| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 7205,8 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{7205,8}{1,234 * 10^4} + \frac{7205,8 * 0,35 * 10^2}{0,279 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,279 * 10^6}$$

$$= 1,5 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 5 = 2,25 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{7205,8}{1,234 * 10^4} - \frac{7205,8 * 0,35 * 10^2}{0,671 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,671 * 10^6}$$

$$= -0,21 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,21| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,41| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

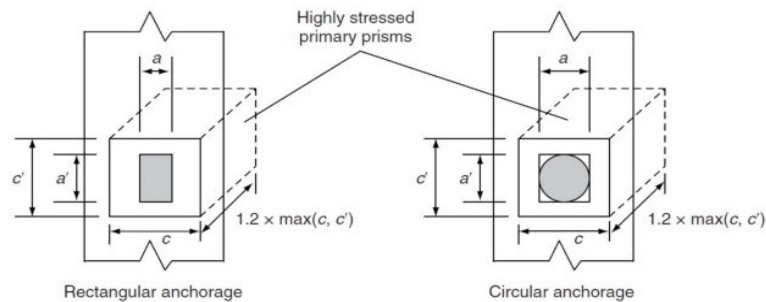
## Osiguranje područja uvođenja sile prednapinjanja

$\gamma_{p,unfav} = 1,2 \rightarrow$  za provjeru lokalnih učinaka (tlačnih naprezanja)

$$P_{d,uk} = P_0 = 7674 \text{ kN}$$

$$P_d = \frac{P_0}{n} = \frac{7674}{4} = 1918,5 \text{ kN}$$

Za slučaj s više ili jednako 2 kabela dimenzioniranje prizme izvodi se kao na slici 18.



Slika 18. Dimenzije betonske prizme ispod sidrišta [11]

$$c * c' = \frac{P_d}{0,6 * f_{ck}(t)} = \frac{1918,5 * 1000}{0,6 * 50} = 63950 \text{ mm}^2$$

- Za slučaj jednakih stranica  $c = c' = \sqrt{63950} = 252,88 \text{ mm}$  ;  $c = 255 \text{ mm}$
- Duljina na kojoj treba rasporediti armaturu za preuzimanje sila cijepanja:  $1,2 * 255 \approx 310 \text{ mm}$
- Najmanja ploština armature za preuzimanje sila cijepanja dobiva se po izrazu:

$$A_s = 0,15 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,15 * \frac{1918,5}{43,48} * 1,2 = 7,94 \text{ cm}^2$$

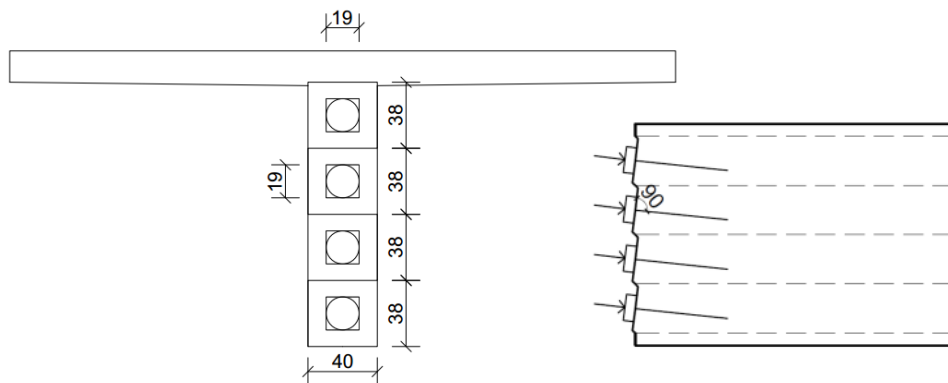
- Kako bi izbjegli proračun pukotina, naprezanje u armaturi potrebno je ograničiti na 250 MPa:

$$A_s = 0,15 * \frac{1918,5}{25/1,15} * 1,2 = 15,86 \text{ cm}^2$$

- za svaki kabel  $6\emptyset 14/31\text{cm}$   $A_s = 18,48 \text{ cm}^2$
- Dobivena armatura vrijedi i za horizontalni i vertikalni smjer
- Armatura na čelu nosača (ploština unošenja sile) ne smije biti manja od:

$$A_{sr} = 0,03 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,03 * \frac{1918,5}{25/1,15} * 1,2 = 3,18 \text{ cm}^2$$

- za oba smjera za svaki kabel  $2\emptyset 16$   $A_{sr} = 4,02 \text{ cm}^2$



- Slika 19. Područje uvođenja sile prednapinjanja

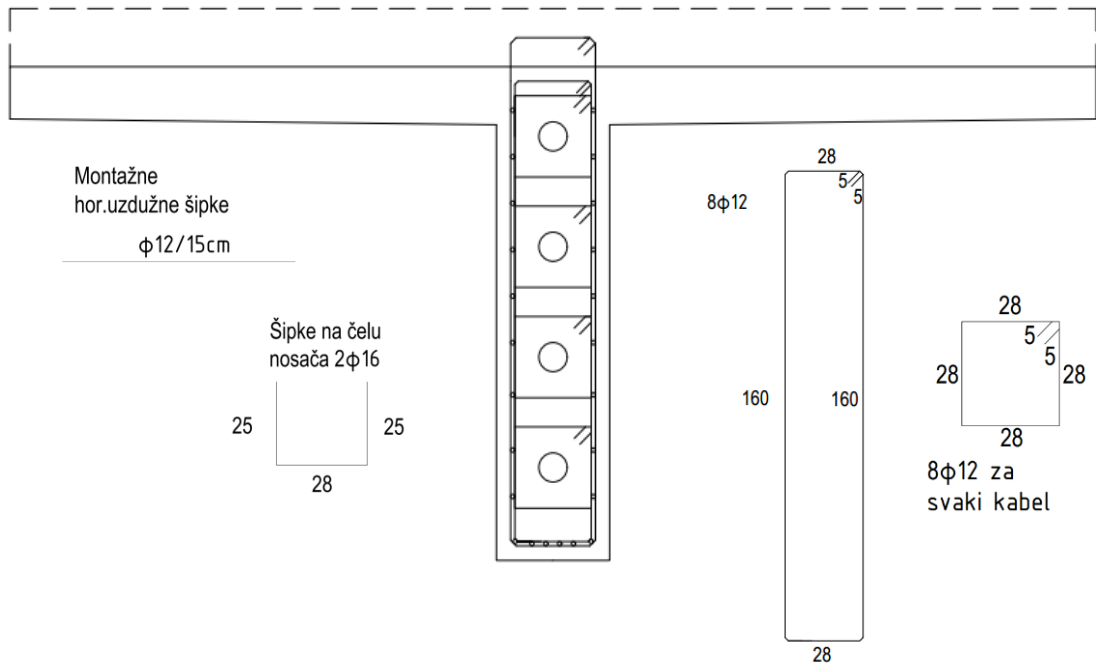
Tablica 8. Armatura za prihvaćanje sile cijepanja

Horizontalni smjer	Vertikalni smjer
$\frac{y_{p2}}{y_2} = \frac{19/2}{40/2} = 0,475 \rightarrow 0,18$	$\frac{y_{p1}}{y_1} = \frac{19/2}{38/2} = 0,5 \rightarrow 0,17$
$T = 0,17 * P_d * \gamma_{p,unfav} = 0,17 * 1918,5 * 1,2 = 391,4 \text{ kN}$	
$A_{sH} = \frac{391,4}{25/1,15} = 18 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_2 = 40 \text{ cm}$	$A_{sr} = \frac{391,4}{25/1,15} = 18 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_1 = 38 \text{ cm}$
Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sH} = 18,1 \text{ cm}^2$	Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sr} = 18,1 \text{ cm}^2$

- Odabire se veća duljina rasprostiranja u oba smjera  $8\emptyset 12/40 \text{ cm}$   $A_s = 18,1 \text{ cm}^2$



## Skica horizontalne i vertikalne armature za prihvaćanje sila cijepanja:



Slika 20. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

### 2.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija)

#### Provjera nosivosti tlačnih štapova:

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

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

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{6133,4 * 1000 \text{ N}}{2,0672 \text{ m}^2} = 2,98 \text{ MPa} < 0,25 * f_{cd} = 0,25 * 25,5 = 6,375 \text{ MPa}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 6133,4 \text{ kN}$$

- za  $0 < \sigma_{cp} < 0,25 * f_{cd}$ :

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{2,98}{25,5} = 1,117$$

$$v_1 = v = 0,6 * \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 * \left[ 1 - \frac{50}{250} \right] = 0,48$$

- Za prednapete nosače s injektiranim metalnim cijevima najmanja širina presjeka u vlačnoj zoni  $b_{w,nom}$  računa se (samo za  $V_{Rd,max}$ ):

$$b_{w,nom} = \begin{cases} b_w - 0,5 * \sum \emptyset & \text{za } \emptyset > b_w/8 \\ b_w & \text{za } \emptyset \leq b_w/8 \end{cases}$$

- o gdje je  $\emptyset$  vanjski promjer cijevi a  $\sum \emptyset$  se određuje za najnepovoljniji presjek.

$$\emptyset = 6,5 \text{ cm} > \frac{b_w}{8} = \frac{40}{8} = 5 \text{ cm}$$

$$b_{w,nom} = 40 - 0,5 * (6,5 + 6,5) = 33,5 \text{ cm}$$

$$z = 0,9 * d = 0,9 * 183 = 164,7 \text{ cm} \quad \text{ctg } \theta = 1,2 \quad (\theta = 40^\circ)$$

$$V_{Rd,max} = 1,117 * 33,5 * 164,7 * 0,48 * \frac{2,55}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 3709,92 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 2007 \text{ kN} \leq V_{Rd,max} = 3709,92 \text{ kN}$$

### Proračun minimalne armature

- Najveći uzdužni razmak poprečne armature iz uvjeta najmanje poprečne armature:

$$\rho_{w,min} = 0,15 * \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = 0,15 * \frac{0,41}{43,48} = 0,0014$$

- Pretpostavljeni promjer  $\emptyset 10$ :

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$S_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 * m}{b_w * \rho_{w,min}} = \frac{0,785 * 2}{40 * 0,0014} = 28,04 \text{ cm}$$

- Najveći uzdužni razmak  $S_{l,max}$  iz odnosa  $V_{Ed}/V_{Rd,max}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{1307,21}{3709,92} = 0,35$$

$$S_{l,max} = \min\{0,75 * d; 30\} = \min\{0,75 * 183; 30\} = \min\{137,25; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Odabire se minimalna armatura  $\emptyset 10/25\text{cm}$
- Proračun poprečne sile koju nose spone na razmaku 25cm:

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}}{S_{l,max}} * z * f_{ywd} * \cot \theta = \frac{0,785 * 2}{25} * 164,7 * 43,48 * 1,2 = 539,66 \text{ kN}$$

### Proračun potrebne armature

$$s = \frac{A_{sw}^{1*m*z*f_{ywd}}}{V_{Ed}} * \cot \theta = \frac{0,785*2*164,7*43,48}{1307,21} * 1,2 = 10,32 \text{ cm}$$

- Usvajamo  $s = 10 \text{ cm}$
- Najveća djelotvorna površina presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi),  $\cot \theta = 1$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sw,max} * f_{ywd}}{b_w * s} &= \frac{0,785 * 2 * 43,48}{40 * 10} = 0,2 \leq \frac{1}{2} * \frac{\alpha_{cw} * v_1 * f_{cd}}{\sin \alpha} \\ &= \frac{1}{2} * \frac{1,117 * 0,48 * 2,83}{1} = 0,76 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

Tamo gdje je poprečna sila manja od 540 kN postavljaju se minimalne vilice  $\frac{\phi 10}{25 \text{ cm}}$ , a ostatak grede  $\frac{\phi 10}{10 \text{ cm}}$ . Odnosno, minimalne vilice se postavljaju od polovice raspona s oba dvije strane na duljini od 4,96 m.

### Uzdužna armatura u hrptu za grede visoke 1m ili više

$$A_s = \frac{k * k_c * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5$$

$$\sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w * (d - 2,5 * (h - d)) = 40 * (183 - 2,5 * (190 - 183)) = 6620 \text{ cm}^2$$

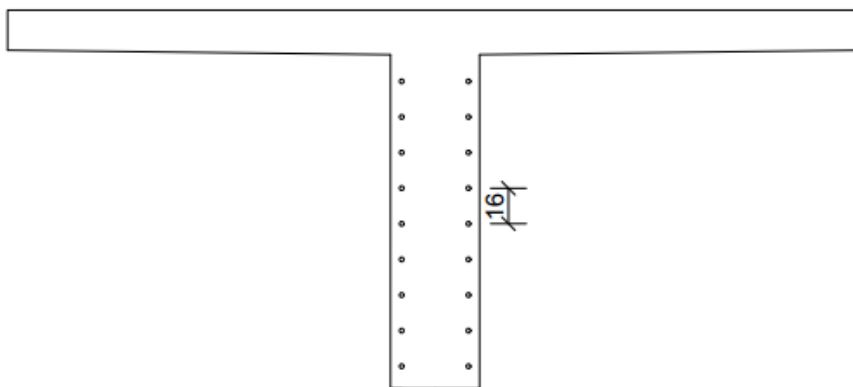
$$k_c = 1,0 \text{ za čisti vlak}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,41 \frac{kN}{cm^2}$$

- early thermal cracking:  $f_{ct,eff} = 0,3 \frac{kN}{cm^2}$

$$A_s = \frac{0,5 * 1 * 0,30 * 6620}{43,48} = 22,8 \text{ cm}^2$$

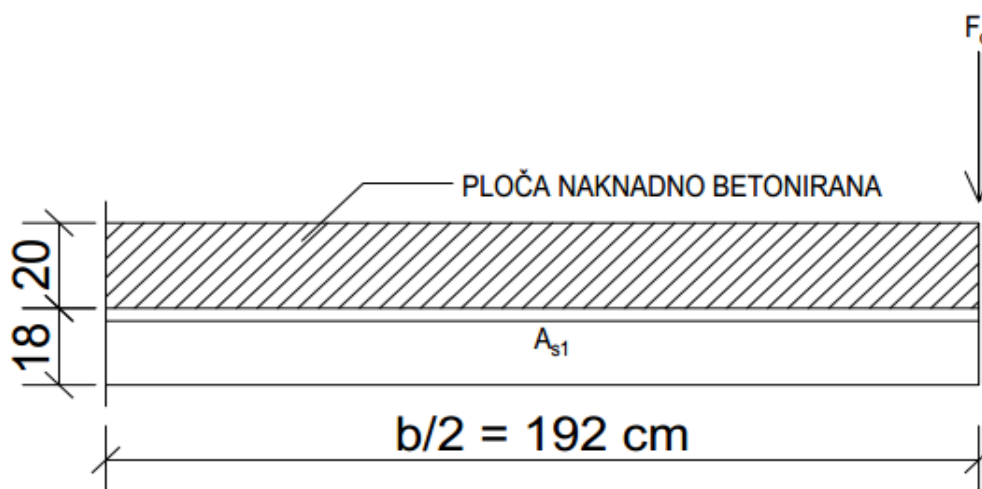
- Najveći razmak šipki je 200 mm
- Usvojeno 18Ø14 (25,72 cm<sup>2</sup>) na razmaku od 16 cm (u hrptu dva stupca po 9 šipki) kao na slici 21



Slika 21. Raspored armaturnih šipki u hrptu

### 2.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača

- Kritična faza – faza betoniranja ploče (ona još ne nosi)



Slika 22. Pojasnica glavnog nosača

$$d_1 = c + \frac{\emptyset}{2} = 2,5 + \frac{1}{2} = 3 \text{ cm}$$

$$d = h - d_1 = 18 - 3 = 15 \text{ cm}$$

### Analiza opterećenja:

- Stalno:
  - o stalno od pojasnice  $0,18 * 25 = 4,5 \text{ kN/m'}$
  - o stalno od ploče  $0,2 * 25 = 5 \text{ kN/m'}$
  - o ukupno:  $g = 9,5 \text{ kN/m'}$
- Promjenljivo:  $F_q = 1,5 \text{ kN}$

$$M_g = 9,5 * \frac{1,92^2}{2} = 17,5 \text{ kNm/m'}$$

$$M_q = 1,5 * 1,92 = 2,88 \text{ kNm/m'}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 17,5 + 1,5 * 2,88 = 27,95 \text{ kNm/m'}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_p * d^2 * f_{cd}} = \frac{2795}{100 * 15^2 * 2,83} = 0,044 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,076 ; \zeta = \frac{z}{d} = 0,972$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{2795}{0,972 * 15 * 43,48} = 4,41 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

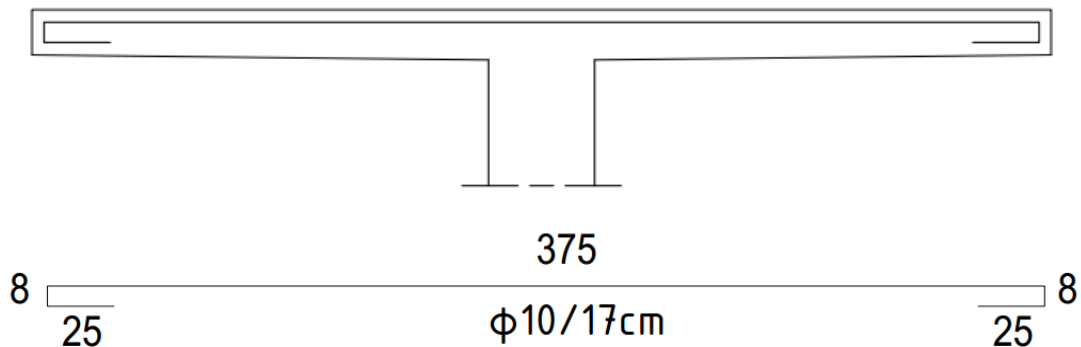
- Minimalna armatura:

$$\begin{aligned} A_{s1,min} &= \max \left\{ 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t * d ; 0,0013 * b_t * d \right\} \\ &= \max \left\{ 0,26 \frac{4,1}{500} * 100 * 15 ; 0,0013 * 100 * 15 \right\} = \max\{3,2; 1,95\} \\ &= 3,2 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Najveći razmaci glavne armature u ploči:

$$s_{max} = \min\{1,5h; 25\} = \min\{1,5 * 18; 25\} = \min\{27; 25\} = 25 \text{ cm}$$

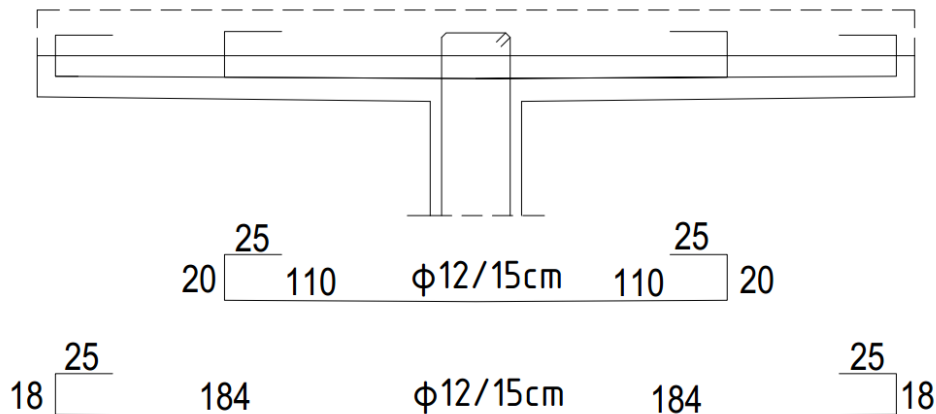
- Usvajamo  $\emptyset 10/17\text{cm}$  ( $4,62\text{ cm}^2/\text{m}'$ )



Slika 23. Armatura pojasnice glavnog nosača

- Na svim površinama konstrukcija betoniranih na mjestu treba iz konstrukcijskih razloga ugraditi armaturu od najmanje  $\emptyset 10/17\text{cm}$
- Uzdužna armatura u gornjoj zoni ploče na cijeloj širini mosta  $\emptyset 10/25\text{cm}$
- Poprečna armatura u gornjoj zoni ploče  $\emptyset 12/15\text{ cm}$
- Montažne uzdužne šipke u pojasnici  $\emptyset 12/20\text{ cm}$

#### Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom:



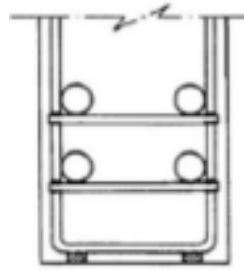
Slika 24. Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom

#### Napomena:

- Kako ne bi došlo do pomicanja kabela (tj. zaštitnih cijevi) za vrijeme betoniranja zaštitnu cijev je potrebno vezati za podupirače ili postavljenu armaturu kao na slici

25

- Na taj način će se osigurati projektirana geometrija kabela



Slika 25. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje

## 2.8. Sile kočenja i ubrzanja

- $Q_{1k}$  treba primijeniti kao uzdužnu silu koja djeluje na površini kolnika

$$Q_{1k} = 0,6 * \alpha_{Q1} * (2 * Q_{1k}) + 0,10 * \alpha_{q1} * q_{1k} * w_1 * L$$

$$180\alpha_{Q1}(kN) \leq Q_{1k} \leq 900 (kN)$$

$$\alpha_{Q1} = 1, \alpha_{q1} = 1 \rightarrow \text{faktori prilagodbe}$$

$$Q_{1k} = 300 \text{ kN}$$

$$q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$w_1 = 3 \text{ m}$$

$$L = 25,2 \text{ m} \rightarrow \text{ukupna duljina rasponske konstrukcije}$$

$$Q_{1k} = 0,6 * 1 * (2 * 300) + 0,10 * 1 * 9 * 3 * 25,2 = 428,04 \text{ kN} \approx 428 \text{ kN}$$

### 2.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji

- Jednolika promjena temperature ovisi o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi koja može biti postignuta na mostu
- Kod konstrukcija koje imaju omogućen pomak rasponske konstrukcije ovakva promjena temperature uzrokuje promjenu duljine konstrukcije (elementa)
- Minimalna  $T_{min}$  i maksimalna  $T_{max}$  temperatura zraka u hladu se određuju u skladu s nacionalnim dodatkom za određeno poručje [12] [13]
- Za područje Rijeke:

$$T_{max} = 40^{\circ}C$$

$$T_{min} = -10^{\circ}C$$

- Vjerojatna (početna) proračunska temperatura mosta  $T_0$  je temperatura na kojoj je element ugrađen (ukoliko nema pravih podataka uzima se  $T_0 = 10^{\circ}C$ )

- Najveći raspon negativne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,neg} = T_0 - T_{e.min} = 10 - (-10) = 20^{\circ}C$$

- Najveći raspon pozitivne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,pos} = T_{e.max} - T_0 = 40 - 10 = 30^{\circ}C$$

- Ukupni raspon proračunskih temperatura mosta:

$$\Delta T_N = T_{e.max} - T_{e.min} = 40 - (-10) = 50^{\circ}C$$

- Kod proračuna pomaka za proračun ležaja i prijelaznih naprava najveći rasponi uzimaju se kao:

$$(\Delta T_{N,neg} + [20])^{\circ}C = 20 + 20 = 40^{\circ}C$$

$$(\Delta T_{N,pos} + [20])^{\circ}C = 30 + 20 = 50^{\circ}C$$

- Ako je temperatura ugradnje poznata onda je:  $(\Delta T_{N,neg} - [10])^{\circ}C$  i  $(\Delta T_{N,pos} + [10])^{\circ}C$

- Mjerodavno:  $\Delta T = 50^{\circ}C$

$$\Delta L = \alpha_T * \Delta T * L_0 = 1,10 * 10^{-5} * 50 * 24 = 0,0132 \text{ m} = 13,2 \text{ mm}$$

$$u_1 = \frac{\Delta L}{2} = \frac{13,2}{2} = 6,6 \text{ mm} \rightarrow \text{pomak koji se ostvaruje na svakom od oslonaca}$$

- Pomak od kočne sile - silu dijelimo s brojem elastomernih ležajeva:

$$H_2 = \frac{Q_{1k}}{8} = \frac{428}{8} = 53,5 \text{ kN} \text{ po osloncu}$$

- Pretpostavljene dimenzije elastomernog ležaja su :  $a * b * t = 200 * 350 * 52 = 37 \text{ mm}$  [14]

$$u_2 = \frac{H_2 * T_e}{G * A} = \frac{53500 * 37}{1 * 200 * 350} = 28,28 \text{ mm}$$

$$T_e = 37 \text{ mm} - \text{nominalna visina elastomernih slojeva}$$



$G = 1N/mm^2$  - modul posmika

$$A = a * b$$

- Ukupni pomak:  $u_{max} = u_1 + u_2 = 6,6 + 28,28 = 34,88 \text{ mm} \approx 35 \text{ mm}$

- Provjeravaju se tri uvjeta:

1. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,25 * u_{max}$

2. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,50 * u_{max}$

3. Uvjet:  $v_{xyd} = u_{max}$

- Minimalna sila koja se može javiti na osloncu:

$$N_{d,min} = \frac{g_1 * L_u}{2} = \frac{32,48 * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} = 409,25 \text{ kN}$$

$$N_d = \frac{(g_2 + \Delta g)L_u}{2} + V_p = \frac{(51,68 + 15,1) * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} + 685,34 \\ = 1526,77 \text{ kN}$$

- Za svaki uvjet odabire se ležaj:

1. uvjet: za ležaj  $800 * 800 * 235$

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 13511 \text{ kN} > N_d = 1526,77 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 1794 \text{ kN} > N_{d,min} = 409,25 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet minimalne sile

2. uvjet: za ležaj  $300 * 400 * 105$

$$v_{xyd} = 38,5 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 1576 \text{ kN} > N_d = 1526,77 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 299 \text{ kN} < N_{d,min} = 409,25 \text{ kN}$$

3. uvjet: za ležaj  $200 * 350 * 52$

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 1268 \text{ kN} < N_d = 1526,77 \text{ kN}$$

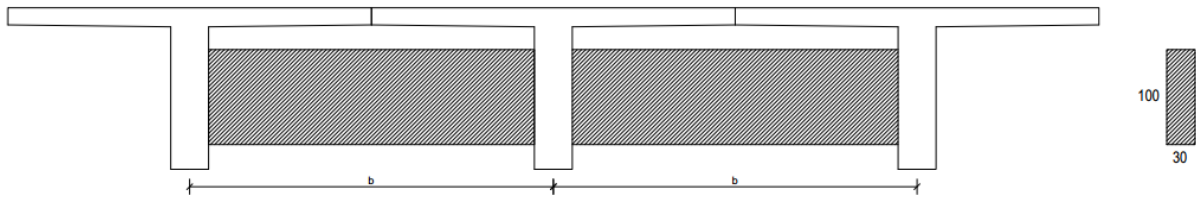
$$N_{d,min} = 242 \text{ kN} < N_{d,min} = 409,25 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet sile

- Odabran je ležaj dimenzija  $300 * 400 * 105$

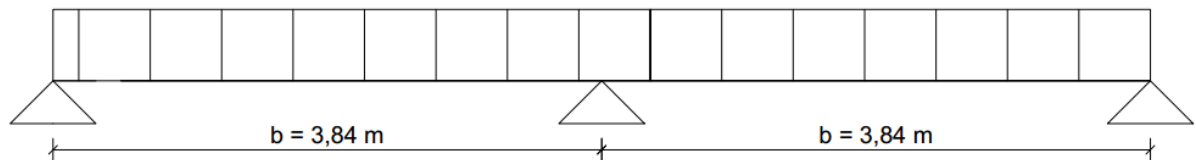
## 2.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača

- Poprečni nosač je oslonjen na hrptove glavnih nosača



Slika 26. Poprečni nosač

- za proračun reznih sila od vlastite težine koristimo pojednostavljenu shemu (kontinuirani nosač) prikazanu na slici 27



Slika 27. Kontinuirani nosač

### Rezne sile od vlastite težine nosača:

Momenti savijanja:

- Iz tablica za proračun kontinuiranih nosača

$$M_g^{max} = 0,07 * g * b^2 = 0,07 * (0,30 * 1 * 25) * 3,84^2 = 7,74 \text{ kNm}$$

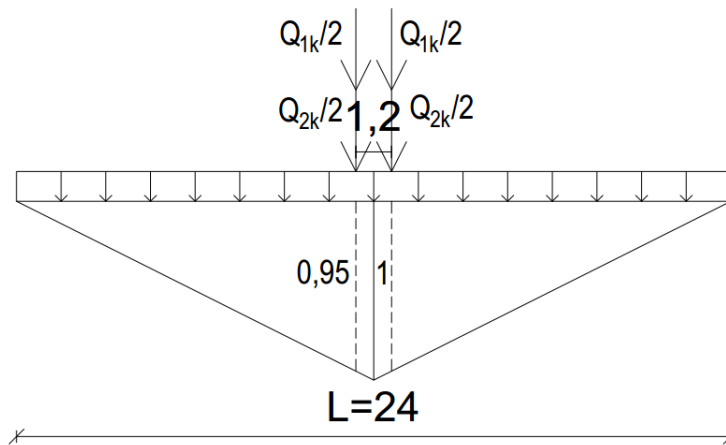
$$M_g^{min} = -0,125 * g * b^2 = -0,125 * (0,30 * 1 * 25) * 3,84^2 = -13,82 \text{ kNm}$$

Poprečna sila:

$$V_g = 1,250 * g * b = 1,250 * (0,30 * 1 * 25) * 3,84 = 36 \text{ kN}$$

### Rezne sile od pokretnog opterećenja:

- za poprečni nosač prvo razmatramo koliki dio opterećenja u uzdužnom smjeru prihvaća, to radimo uz pomoć utjecajne linije za poprečni nosač u uzdužnom smjeru vidljivu na slici 28



Slika 28. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru

$$\eta Q_{1k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{1k}}{2} = 2 * 0,95 * 150 = 285 \text{ kN}$$

$$\eta Q_{2k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{2k}}{2} = 2 * 0,95 * 100 = 190 \text{ kN}$$

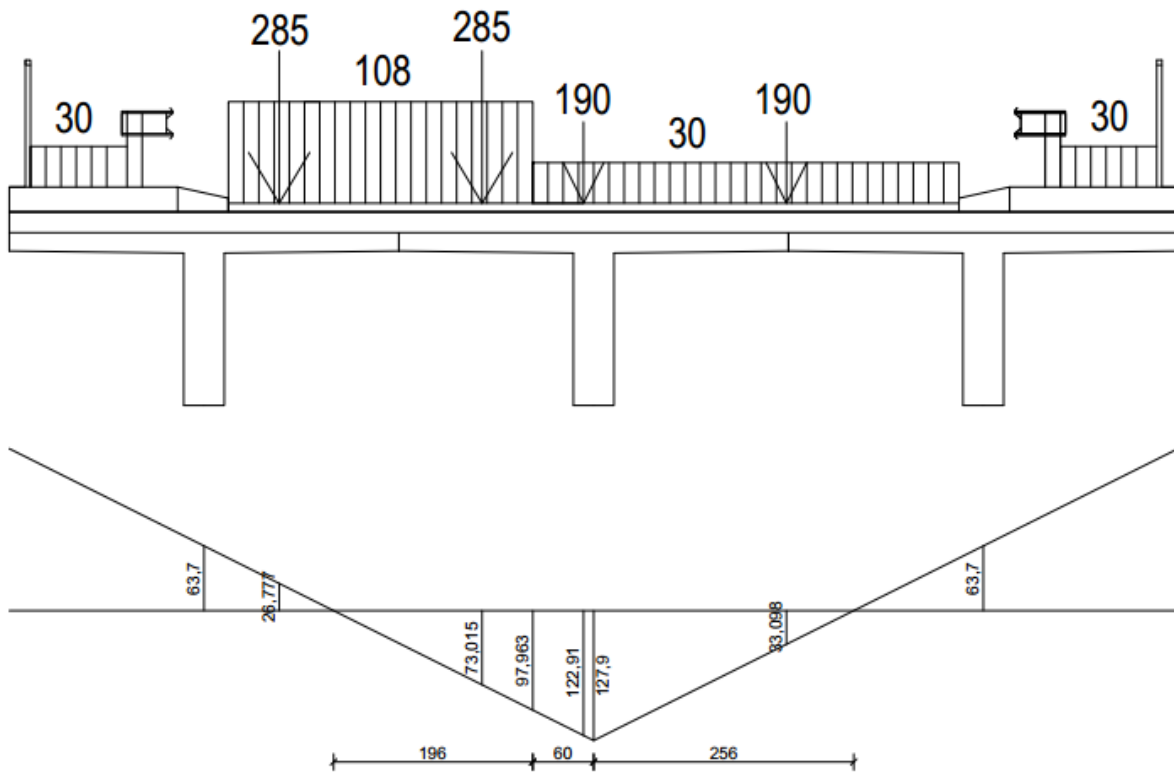
$$\eta q_{1k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{1k} = 12 * 9,0 = 108 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{2k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{2k} = 12 * 2,5 = 30 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{fk} = \eta q_{2k} = 30 \text{ kN/m'}$$

Rezne sile zatim računamo pomoću utjecajnih linija u poprečnom smjeru. Prometno opterećenje se postavlja u različite položaje kao na slikama 29, 30 i 31 kako bi se dobila najveća vrijednost momenta savijanja na poprečnom nosaču.

## 1. Varijanta



Slika 29. Prva varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je postavljeno maksimalno lijevo
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za prvu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (0,730 - 0,268) = 285 * 0,462 = 131,7 \text{ kNm}$$

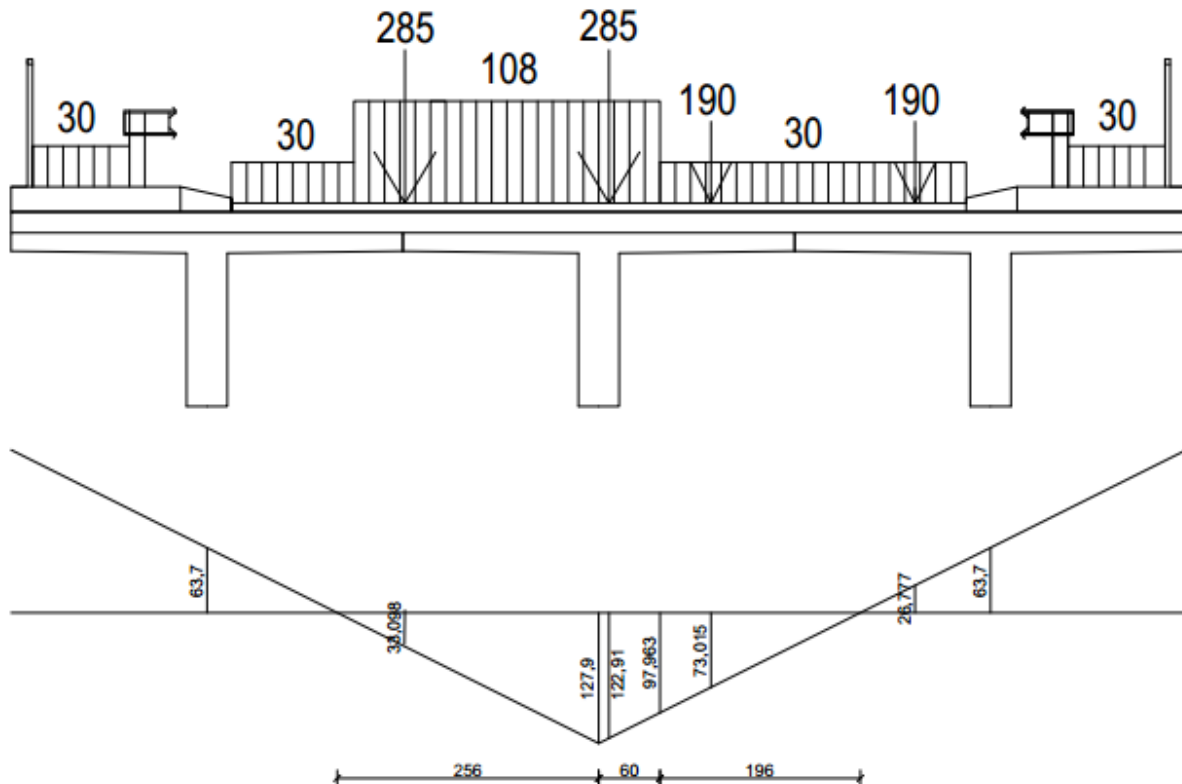
$$M_{Q2k}^{max} = \eta Q_{2k} * (1,229 + 0,331) = 190 * 1,56 = 296,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,980}{2} * 1,963 \right) = 108 * 0,962 = 103,9 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,980 + 1,279}{2} * 0,6 + \frac{1,279}{2} * 2,563 \right) = 30 * 2,32 = 69,6 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} M_p^{max} &= M_{Q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{q2k}^{max} \\ &= 131,7 + 296,4 + 103,9 + 69,6 = 601,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

## 2. Varijanta



Slika 30. Druga varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je pomaknuto u desno (2.trak uz desni rubnjak)
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za drugu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (1,229 + 0,331) = 285 * 1,56 = 444,6 \text{ kNm}$$

$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{1,279}{2} * 2,563 + \frac{0,980 + 1,279}{2} * 0,6 + \right) = 108 * 2,32$$

$$= 250,6 \text{ kNm}$$

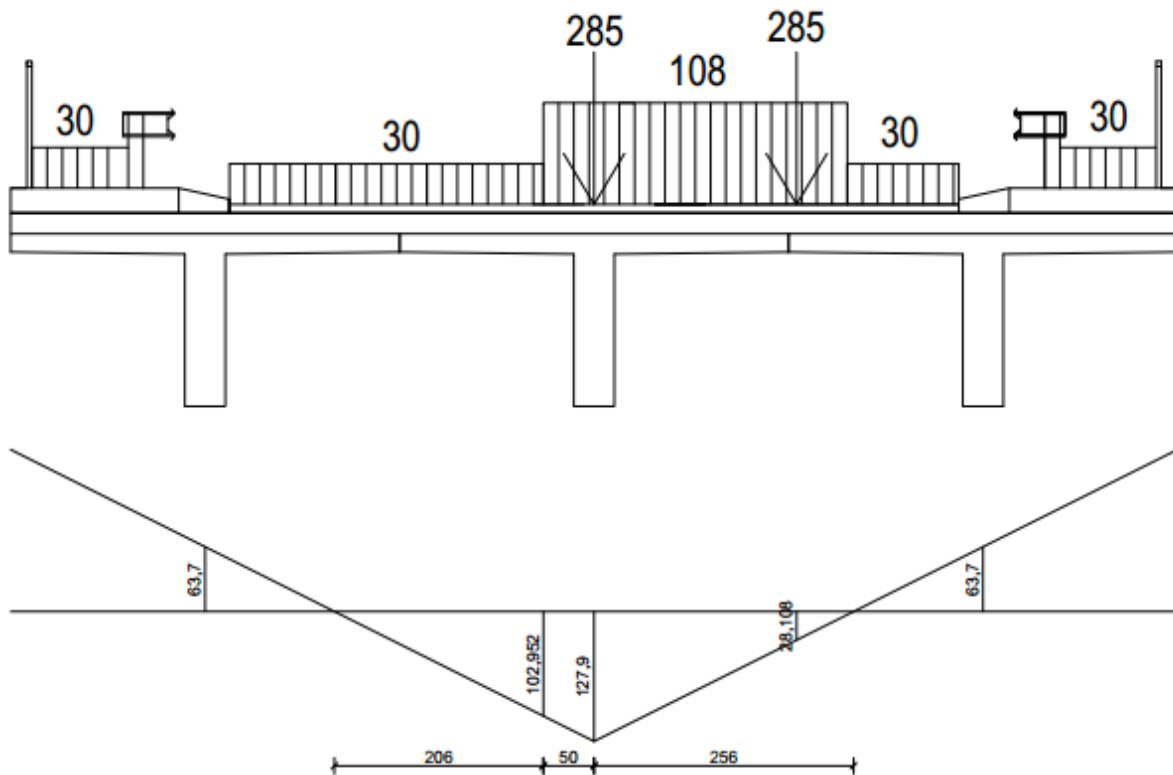
$$M_{Q2k}^{max} = \eta Q_{2k} * (0,730 - 0,268) = 190 * 0,462 = 87,8 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,980}{2} * 1,963 \right) = 30 * 0,962 = 28,9 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 444,6 + 250,6 + 87,8 + 28,9$$

$$= 811,9 \text{ kNm}$$

### 3. Varijanta



Slika 31. Treća varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je smješteno u položaj da je jedan kotač opt. na 1. pt iznad maksimalne ordinate (2.pt nema)
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za treću varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (1,279 + 0,281) = 285 * 1,56 = 444,6 \text{ kNm}$$

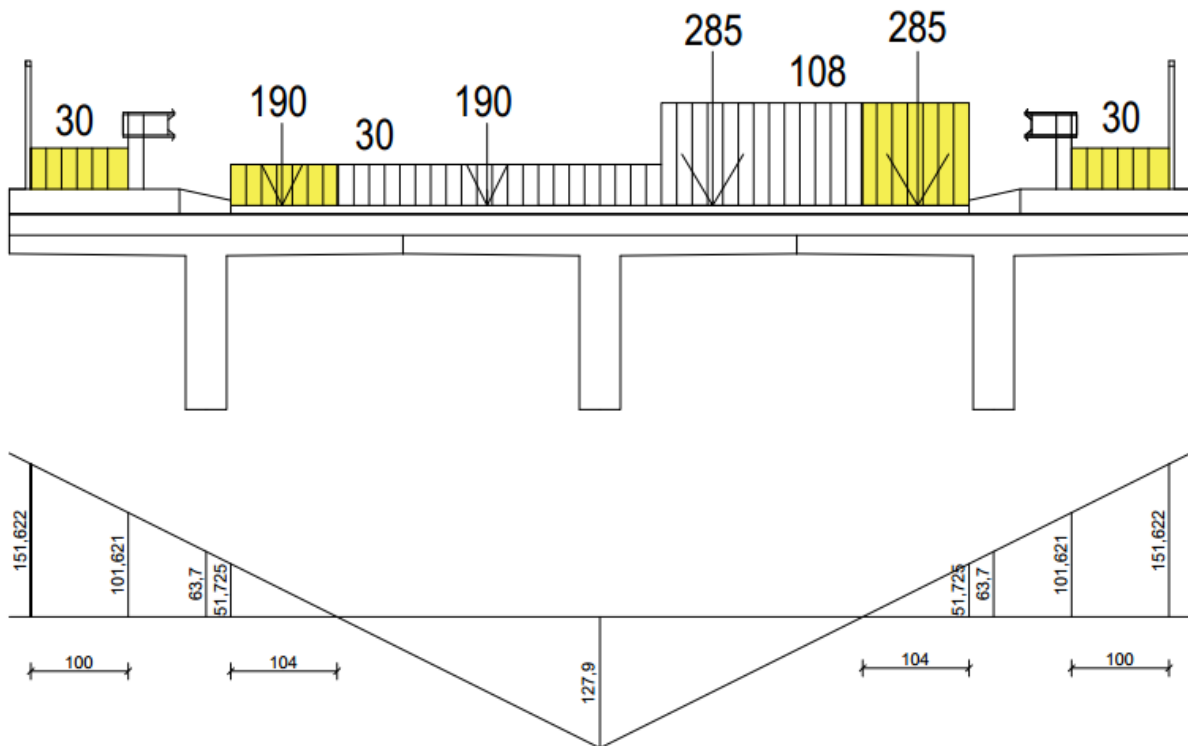
$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{1,03 + 1,279}{2} * 0,5 + \frac{1,279 * 2,56}{2} \right) = 108 * 2,21 = 238,7 \text{ kNm}$$

$$M_{qrk}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{1,03}{2} * 2,06 \right) = 30 * 1,06 = 31,8 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{qrk}^{max} = 444,6 + 238,7 + 31,8 = 715,1 \text{ kNm}$$

- Mjerodavna je druga varijanta

## Određivanje minimalnih momenata



Slika 32. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment

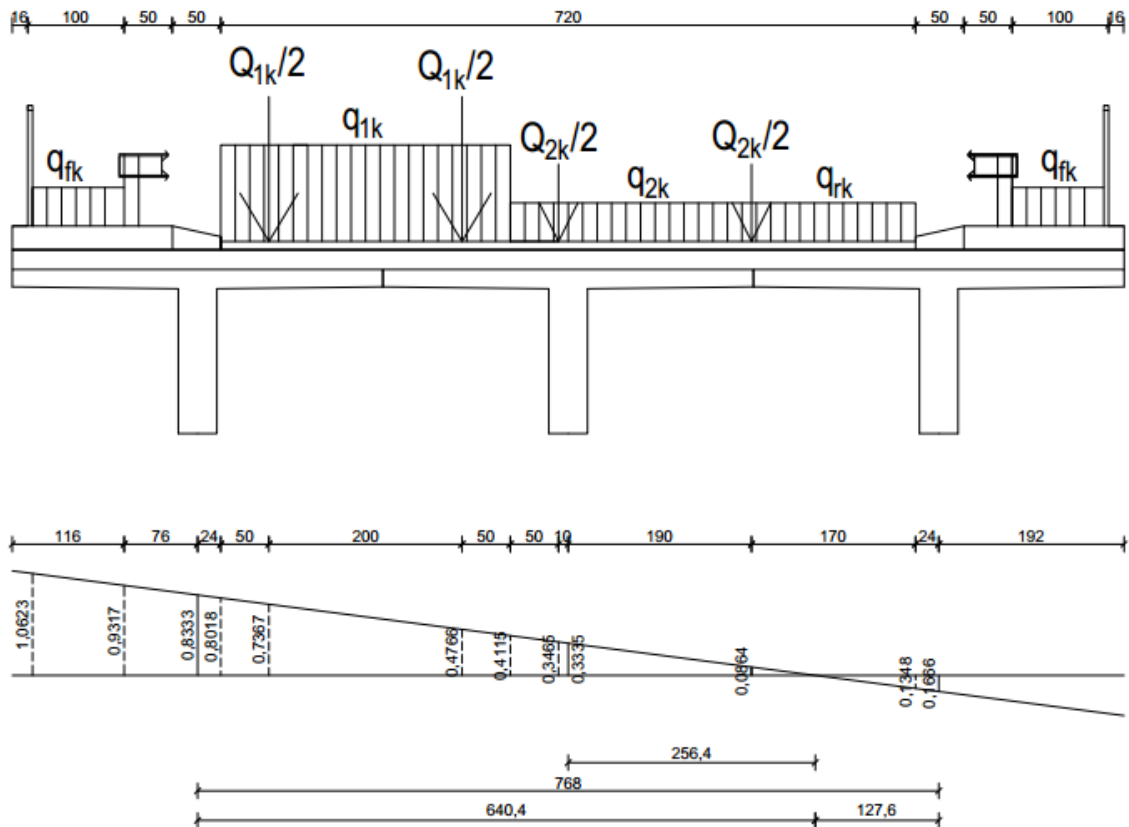
$$M_{q1k}^{\min} = \eta_{q1k} * \left( \frac{-0,517}{2} * 1,04 \right) = 108 * (-0,269) = -29,1 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{\min} = \eta_{q2k} * \left( \frac{-0,517}{2} * 1,04 \right) = 30 * (-0,269) = -8,07 \text{ kNm}$$

$$M_{qfk}^{\min} = \eta_{qfk} * \left( \frac{-1,516 - 1,016}{2} * 1,0 * 2 \right) = 30 * (-2,53) = -75,9 \text{ kNm}$$

$$M_p^{\min} = M_{q1k}^{\min} + M_{q2k}^{\min} + M_{qfk}^{\min} = -29,1 - 8,07 - 75,9 = -113,07 \text{ kNm}$$

## Određivanje poprečne sile:



Slika 33. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (0,7367 + 0,4766) = 285 * 1,213 = 345,71 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (0,3465 + 0,0864) = 190 * 0,433 = 82,27 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,8018 + 0,4115}{2} * 3 \right) = 108 * 1,82 = 196,56 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,4115}{2} * 3,164 \right) = 30 * 0,651 = 19,53 \text{ kN}$$

$$V_p = V_{Q_{1k}} + V_{Q_{2k}} + V_{q_{1k}} + V_{q_{2k}} = 345,71 + 82,27 + 196,56 + 19,53 = 644,07 \text{ kN}$$



### Dimenzioniranje poprečnog nosača:

- Beton C40/50

$$f_{cd} = \frac{4,0}{1,5} = 2,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Čelik B500B

- Donja zona:

$$M_g = 7,74 \text{ kNm}$$

$$M_p = 811,9 \text{ kNm}$$

- Gornja zona:

$$M_g = -13,82 \text{ kNm}$$

$$M_p = -113,07 \text{ kNm}$$

- Predlaže se gornju zonu armirati s 1/3 armature iz donje zone

- Poprečne sile:

$$V_g = 36 \text{ kN}$$

$$V_p = 644,07 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 1,35 * M_g + 1,35 * M_p = 1,35 * 7,74 + 1,35 * 811,9 = 1106,51 \text{ kNm}$$

$$\approx 1107 \text{ kNm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d = 100 - 7 = 93 \text{ cm}$$

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{110700}{30 * 93^2 * 2,67} = 0,16 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,219; \zeta = \frac{z}{d} = 0,909$$

$$A_{s1} = \frac{M_{sd}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{110700}{0,909 * 93 * 43,48} = 30,1 \text{ cm}^2$$

- Minimalna armatura:

$$A_{s1,min} = \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d; 0,0013 * b * d \right\}$$

$$= \max \left\{ 0,26 * \frac{3,5}{500} * 30 * 93; 0,0015 * 30 * 93 \right\} = \max\{5,08; 4,19\}$$

$$= 5,08 \text{ cm}^2$$

- Odabire se 8Ø22 (30,4 cm<sup>2</sup>)
- Gornju zonu armiramo s trećinom armature iz donje zone, odabire se 4Ø18 (10,17 cm<sup>2</sup>)

Osnovna duljina sidrenja:

- Gornja zona (loši uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{0,7 * f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{0,7 * 3,7} = 42 * \emptyset$$

- o Za Ø18:  $l_{b,rqd} = 42 * 18 = 75,6 \approx 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{3,7} = 29,38 * \emptyset$$

- o Za Ø22:  $l_{b,rqd} = 29,38 * 22 = 64,6 \approx 65 \text{ cm}$

Potrebna duljina sidrenja na osloncu:

- Za slučaj sidrenja ravnom šipkom  $\alpha_a = 1,0$
- Gornja zona:

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø18  $l_{b,net} = 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø22  $l_{b,net} = 65 \text{ cm}$

Duljina nastavljanja preklapanjem ( $\alpha_1 = 2$ ):

- Gornja zona:

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 18$   $l_s = 152 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 22$   $l_s = 130 \text{ cm}$

**Dimenzioniranje na poprečne sile:**

$$V_{sd} = 1,35 * V_g + 1,35 * V_p = 1,35 * 36 + 1,35 * 644,1 = 918,14 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd1} = (\tau_{Rd} * k * (1,2 + 40 * \rho_l) + 0,15 * \sigma_{cp}) * b_{w,nom} * d$$

$$\tau_{Rd} = 0,041 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,67 = 0,27 \geq 1$$

○ Uvjet ne zadovoljava:  $k = 1$

$$\rho_l = \frac{A_{s1}}{b * d} = \frac{30,1}{30 * 93} = 0,01 < 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd1} = (0,041 * 1 * (1,2 + 40 * 0,01)) * 30 * 93 = 183,02 \approx 183 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 918 \text{ kN} > V_{Rd1} = 183 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova:

$$V_{Rd2} = 0,5 * v * f_{cd} * b_w * z$$

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} = 0,7 - \frac{40}{200} = 0,5 \geq 0,5$$

○ Uvjet zadovoljava

$$z \approx 0,9 * d = 0,9 * 93 = 83,7 \text{ cm}$$

$$V_{Rd2} = 0,5 * 0,5 * 2,67 * 30 * 83,7 = 1676,09 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 918,14 \text{ kN} < V_{Rd2} = 1676,09 \text{ kN}$$

- Nosivost tlačnih štapova zadovoljava

Proračun spona:

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot f_{ywd} \cdot m \cdot z}{V_{sd} - V_{Rd1}} = \frac{0,785 \cdot 43,48 \cdot 2 \cdot 83,7}{918,14 - 183} = 7,77 \text{ cm}$$

- Proračun maksimalnog razmaka spona iz uvjeta najmanjeg postotka armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_{w,min}$ )

$$\rho_{w,min} = 0,0013 \quad \text{za } f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw,uk}}{s_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha}$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min} \cdot \sin \alpha} = \frac{0,785 \cdot 2}{30 \cdot 0,0013 \cdot 1} = 40,26 \text{ cm}$$

- Najveći dopušteni razmak spona:

$$\frac{V_{sd}}{V_{Rd2}} = \frac{918,14}{1676,09} = 0,55$$

$$s_{l,max} = \min\{0,6 \cdot d; 30\} = \min\{0,6 \cdot 93; 30\} = \min\{55,8; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Usvajamo minimalnu armaturu  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$

Proračun poprečne sile  $V_{Rd,s}^{min}$  koju nose minimalne spona  $s_{l,max} = 25 \text{ cm}$ :

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg } \theta = \frac{0,785 \cdot 2}{25} \cdot 83,7 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 274 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature:

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot \text{ctg } \theta$$

$$s = \frac{0,785 \cdot 2 \cdot 83,7 \cdot 43,48}{918,14} \cdot 1,2 = 8,47 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona  $s = 10 \text{ cm}$ .

Najveća djelotvorna ploština presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi) za  $\text{ctg}\theta = 1$ :

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\sin \alpha}$$

$$\frac{0,785 \cdot 2 \cdot 43,48}{30 \cdot 10} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1 \cdot 0,48 \cdot 2,55}{1}$$

$$0,228 < 0,612$$

Usvaja se  $\phi 10/10 \text{ cm}$  duž cijelog poprečnog nosača.

#### **Uzdužna armatura u hrptu:**

$$A_s = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5, \quad \sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w \cdot (d - 2,5(h - d)) = 30 \cdot (93 - 2,5(100 - 93)) = 3020 \text{ cm}^2$$

$$k_c = 1,0 \quad \text{za čisti vlak}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_s = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 0,41 \cdot 3020}{43,48} = 15,24 \text{ cm}^2$$

Najveći razmak šipki je 200 mm pa je usvojeno:

18 $\phi$ 10 (15,7 cm<sup>2</sup>) na razmaku 16 cm, složeno u dva reda po 9 šipki, vertikalno u hrptu.

### 3. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA S 4 GLAVNA NOSAČA

#### 3.1. Osnovna geometrija

- Širina konstrukcije:

$$\begin{aligned}s_k &= \text{širina kolnika} + \text{širina odbojnika} + \text{širina pješačkih staza} \\ &+ \text{širina od ograde do ruba konstrukcije} \\ &= 720 + 2 * 100 + 2 * 100 + 2 * 16 = 1152 \text{ cm}\end{aligned}$$

- Broj glavnih nosača (prednapeti T-presjeci):  $n = 4$
- Širina glavnog nosača:

$$b = \frac{s_k}{n} = \frac{1152}{3} = 288 \text{ cm}$$

- Raspon konstrukcije:  $L = 24 \text{ m}$
- Visina glavnog nosača ( $\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{20}$ ):

$$h = \frac{L}{15} = \frac{24}{15} = 1,6 \text{ m} \quad ; \quad h = \frac{L}{20} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ m}$$

- o Usvojena visina nosača:  $h = 1,4 \text{ m}$
- Širina hrpta T-presjeka:  $b_w = 40 \text{ cm}$
- Debljina pojasnice T-presjeka:
  - o Određuje se iz uvjeta da je sudjelujuća širina jednaka stvarnoj širini:

$$b = b'$$

$$b' = b_w + 20 * h_2$$

$$h_2 = \frac{b' - b_w}{20} = \frac{288 - 40}{20} = 12,4 \text{ cm}$$

$$h_2 \geq 12,0 \text{ cm}$$

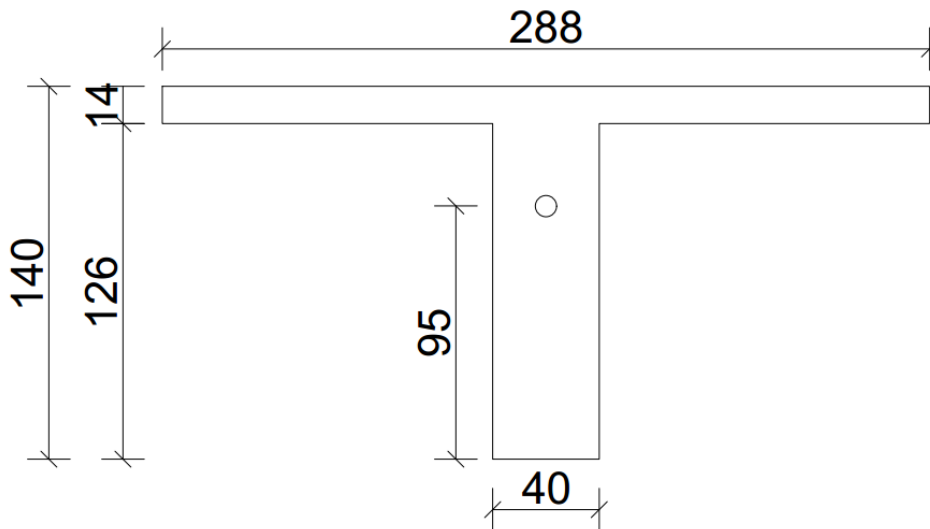
- o Usvajamo  $h_2 = 14 \text{ cm}$
- Visina hrpta:  $h_1 = h - h_2 = 140 - 14 = 126 \text{ cm}$

Usvojene dimenzije glavnog nosača bez ploče:

- Visina glavnog nosača,  $h = 140$  cm
- Širina glavnog nosača,  $b = 288$  cm
- Debljina hrpta,  $b_w = 40$  cm
- Debljina pojasnice T-presjeka,  $h_2 = 14$  cm
- Visina hrpta,  $h_1 = 126$  cm

### 3.1.1. Geometrijske karakteristike presjeka

a) Presjek bez ploče

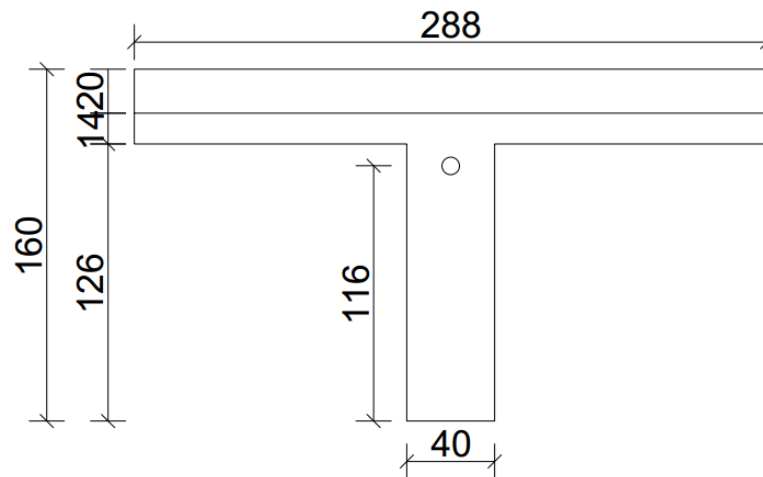


Slika 34. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče

Tablica 9. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka bez ploče

Presjek bez ploče		
$A'$	0,9072	m <sup>2</sup>
$I'$	0,177	m <sup>4</sup>
$y_T' = y_d'$	0,95	m
$y_g' = h - y_d'$	0,45	m
$W_d' = I' / y_d'$	0,186	m <sup>3</sup>
$W_g' = I' / y_g'$	0,393	m <sup>3</sup>
$k_d = W_g' / A'$	0,433	m
$k_g' = W_d' / A'$	0,205	m

b) Presjek s pločom



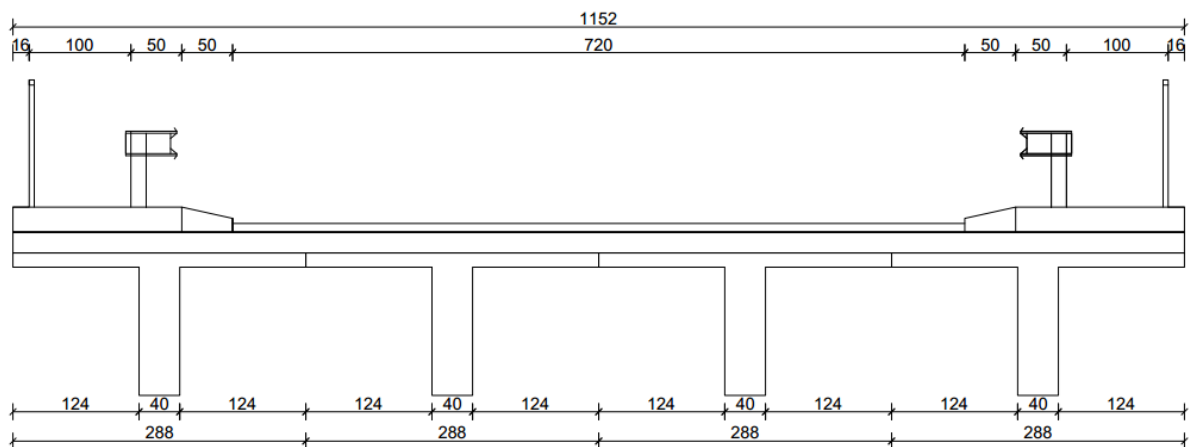
Slika 35. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom

Tablica 10. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka s pločom

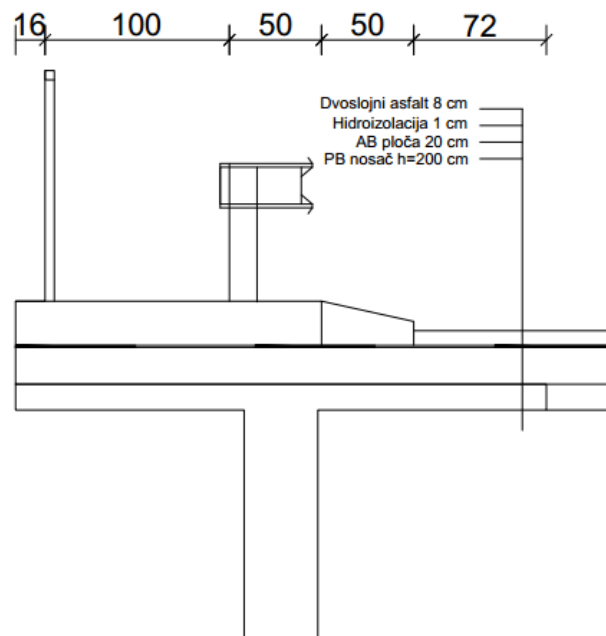
Presjek s pločom		
$A''$	1,483	m <sup>2</sup>
$I''$	0,289	m <sup>4</sup>
$y_T'' = y_d''$	1,16	m
$y_g'' = h - y_d''$	0,440	m
$W_d'' = I'' / y_d''$	0,249	m <sup>3</sup>
$W_g'' = I'' / y_g''$	0,657	m <sup>3</sup>
$k_d'' = W_g'' / A''$	0,443	m
$k_g'' = W_d'' / A''$	0,168	m



### 3.2. Analiza opterećenja



Slika 36. Poprečni presjek mosta s 4 glavna nosača



Slika 37. Poprečni presjek glavnog rubnog nosača

#### 3.2.1. Stalno opterećenje

- a) Vlastita težina nosača bez ploče

$$g_1 = A' * \gamma_C = 0,9072 * 25 = 22,68 \text{ kN/m'}$$

- b) Vlastita težina nosača s pločom

$$g_2 = A'' * \gamma_C = 1,483 * 25 = 37,08 \text{ kN/m'}$$

- c) Vlastita težina gornjih slojeva na srednjem nosaču

- Površina hidroizolacije i asfalta:  $A_{hidro+asf} = (0,01 + 0,08) * 2,88 = 0,26$

$$g_s = A_{hidro+asf} * \gamma_{as} = 0,26 * 18 = 4,7 \text{ kN/m'}$$

d) Vlastita težina gornjih slojeva na rubnom nosaču

- Hidroizolacija:  $0,01 \cdot 2,88 \cdot 18 = 0,5 \text{ kN/m'}$
- Pješačka staza + rubnjak:  $0,462 \cdot 24 = 11,1 \text{ kN/m'}$
- Asfalt:  $0,08 \cdot 0,72 \cdot 18 = 1,0 \text{ kN/m'}$
- Vijenac:  $1,5 \text{ kN/m'}$
- Odbojna ograda:  $0,4 \text{ kN/m'}$
- Pješačka ograda:  $0,4 \text{ kN/m'}$

$$g_r = 14,9 \approx 15 \text{ kN/m'}$$

### 3.2.2. Promjenjivo opterećenje

- Analiza utjecaja prometnog opterećenja izvodit će prema modelu 1 sukladno normi EN 1991-2 na isti način kao u poglavlju 2.2.2.
- Određivanje broja prometnih trakova, njihove širine i preostale širine na kolniku izvodi na isti način, te prema istoj tablici kao u poglavlju 2.2.2.
- Širina kolnika:  $w = 7,2 \text{ m}$
- Širina prometne trake:  $3 \text{ m}$
- Broj prometnih traka:  $n = \frac{w}{3} = \frac{7,2}{3} = 2,4 ; n = 2$
- Preostala širina kolnika:  $w - 3 * n = 7,2 - 3 * 2 = 1,2 \text{ m}$

### 3.3. Određivanje reznih sila

- Za stalno opterećenje sustav funkcionira kao jednostavne grede složene jedna do druge
- Za prometno opterećenje sustav funkcionira kao roštiljna konstrukcija

#### 3.3.1. Moment savijanja

a) Moment savijanja za stalno opterećenje

$M_{g_1}$  – moment na nosaču bez ploče

$$M_{g_{1,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 1224,72 \text{ kNm}$$

$$M_{g_1}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{g_1 * l^2}{8} = \frac{22,68 * 24^2}{8} = 1632,96 \text{ kNm}$$

$M_{g_2}$  – moment na nosaču s pločom i opremom

$$M_{g_{2,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 2812,32 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{2,2}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{(g_2 + g_r) * l^2}{8} = \frac{(37,08 + 15) * 24^2}{8} = 3749,76 \text{ kNm}$$

b) Moment savijanja za promjenjivo opterećenje

- Poprečna razdioba prikazana na slici 38 napravljena je za nosač 1 (krajnji lijevi) koji je najopterećeniji dok za ostale nosače nije
- Na taj je način određeno koliki dio ukupnog prometnog opterećenja u poprečnom smjeru prihvaća navedeni nosač
- Poprečni utjecaji  $\eta$  izračunati su za svako pojedino polje
- Prometna opterećenja:

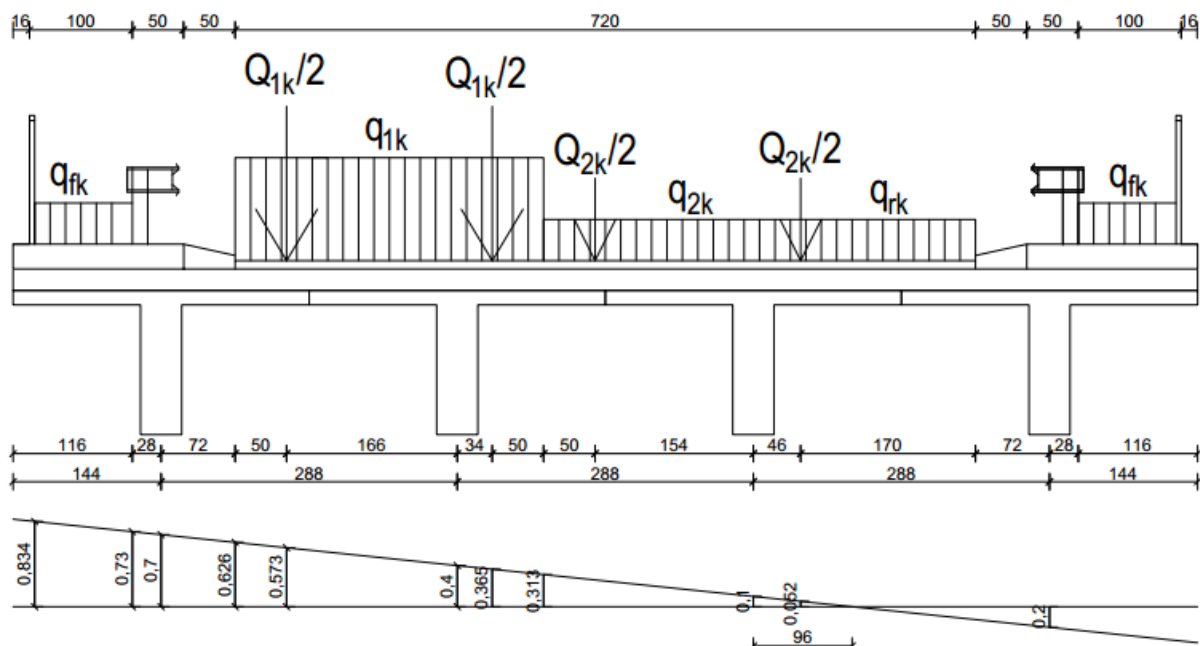
$$Q_{1k} = 300 \text{ kN (težina jedne osovine)}$$

$$Q_{2k} = 200 \text{ kN (težina jedne osovine)}$$

$$q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{fk} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$



Slika 38. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača

- Sva kontinuirana opterećenja koja djeluju povoljno se zanemaruju
- U obzir se uzimaju samo cjelovita dvoosovinska opterećenja koja djeluju nepovoljno
- Poprečni utjecaji za nosač 1:

$$\eta Q_{1k} = (0,573 + 0,365) * \frac{Q_{1k}}{2} = 0,938 * 150 = 140,7 \text{ kN}$$

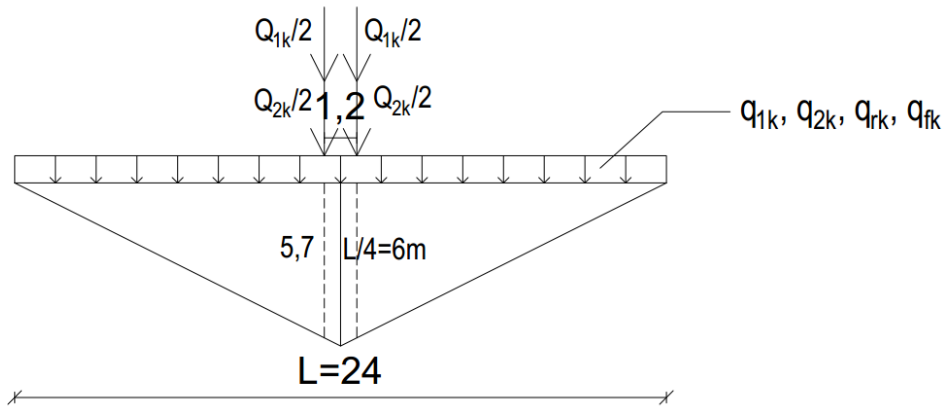
$$\eta Q_{2k} = (0,26 + 0,052) * \frac{Q_{2k}}{2} = 0,312 * 100 = 31,2 \text{ kN}$$

$$\eta q_{1k} = \left( \frac{0,626 + 0,313}{2} * 3 \right) * q_{1k} = 1,4085 * 9,0 = 12,68 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{2k} = \left( \frac{0,313}{2} * (2,0375 + 0,9583) \right) * q_{2k} = 0,4688 * 2,5 = 1,17 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{fk} = \left( \frac{0,834 + 0,73}{2} * 1 \right) * q_{fk} = 0,782 * 2,5 = 1,96 \text{ kN/m'}$$

- Poprečni utjecaji kombinirani su s uzdužnim utjecajima za moment savijanja
- Opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji za slobodno oslonjenu gredu kao što je prikazano na slici 39 za polovicu raspona te na slici 40 za četvrtinu raspona



Slika 39. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona

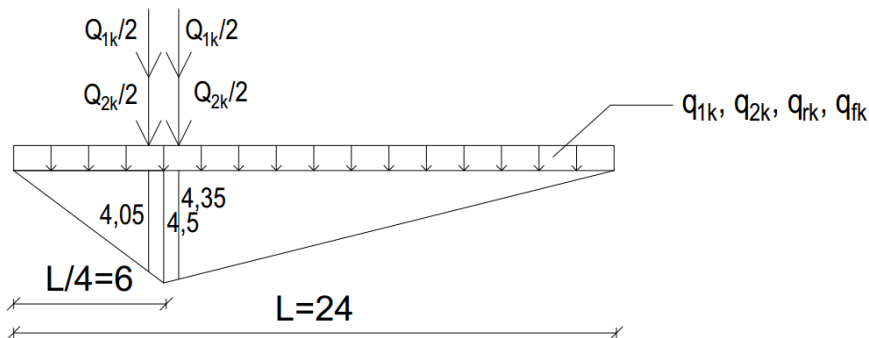
$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * 2 * 5,7 = 140,7 * 11,4 = 1603,98 \approx 1604 \text{ kNm}$$

$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * 2 * 5,7 = 31,2 * 11,4 = 355,68 \approx 356 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 12 * 6 = 12,68 * 72 = 912,96 \approx 913 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 12 * 6 = 1,17 * 72 = 84,24 \approx 84 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 12 * 6 = 1,96 * 72 = 141,12 \approx 141 \text{ kNm}$$



Slika 40. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona

$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (4,05 + 4,35) = 140,7 * 8,4 = 1181,9 \text{ kNm}$$

$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (4,05 + 4,35) = 31,2 * 8,4 = 262,0 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 12,68 * 27 = 342,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 1,17 * 27 = 31,6 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 4,5 * \frac{24}{4} = 1,96 * 27 = 52,9 \text{ kNm}$$

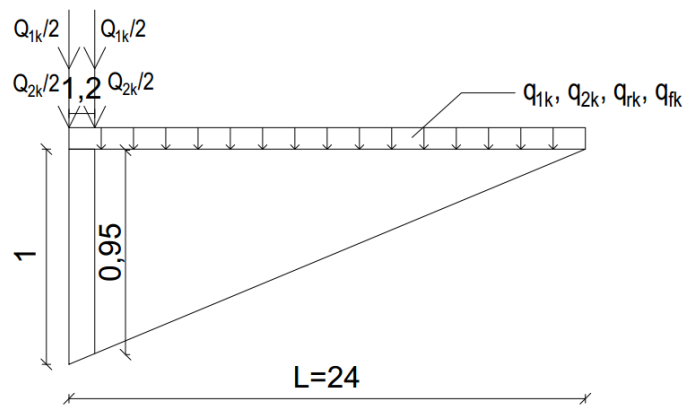
### 3.3.2. Poprečne sile

a) Stalno opterećenje

$$V_g = \frac{(g_2 + g_r) * l}{2} = \frac{(37,08 + 15) * 24}{2} = 624,96 \approx 625 \text{ kN}$$

b) Promjenjivo opterećenje

- Poprečni utjecaj isti je kao i za momente savijanja
- Opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji
- Osovine su postavljene na kraj nosača dok je kontinuirano opterećenje raspoređeno po cijeloj dužini nosača kao što je prikazano na slici 41



Slika 41. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (1 + 0,95) = 140,7 * 1,95 = 274,37 \approx 274 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (1 + 0,95) = 31,2 * 1,95 = 60,84 \approx 61 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 1 * \frac{24}{2} = 12,68 * 12 = 152,16 \approx 152 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 1 * \frac{24}{2} = 1,17 * 12 = 14,04 \approx 14 \text{ kN}$$

$$V_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 1 * \frac{24}{2} = 1,96 * 12 = 23,52 \approx 24 \text{ kN}$$

### 3.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje

- Razredi izloženosti prema EN 206-1:
  - o Okolina s prisutnošću soli za odmrzavanje i zamrzavanja:
  - o XD3 – korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora – min C35/45
  - o XF4 – korozija betona uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem sa sredstvom za odmrzavanje ili morskom vodom – min C30/37
- Odabrana je klasa betona: C45/55
- Za razred izloženosti XD3 i konstrukcijske elemente od prednapetog betona s naknadnim prednapinjanjem:
  - o  $w_{max} = 0,2mm$  za karakteristične kombinacije djelovanja (iz Tablice 4. u poglavlju 2.4.)

Česta kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$\begin{aligned} M_{Ed}\left(\frac{L}{2}\right) &= M_{g2,3} + 0,75 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{q1k} + 0 * M_{q2k} + 0 * M_{qfk} \\ &= 3749,76 + 0,75 * 1604 = 4952,76 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Ed}\left(\frac{L}{4}\right) &= M_{g2,2} + 0,75 * M_{Q1k} + 0 * M_{Q2k} + 0 * M_{q1k} + 0 * M_{q2k} + 0 * M_{qfk} \\ &= 2812,32 + 0,75 * 1181,9 = 3698,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Za razred izloženosti XD3 i prednapinjanje sa sprežanjem ostvareno naknadnim injektiranjem, razred širenja pukotina i rasterećenja je C

Karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{0,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$\begin{aligned} M'_{Ed}\left(\frac{L}{2}\right) &= M_{g2,3} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{qfk} \\ &= 3749,76 + 1604 + 0,75 * 356 + 0,4 * 913 + 0,4 * 84 + 0,4 * 141 \\ &= 6075,96 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Usvajamo:  $M_{dek} = 6076 \text{ kNm}$

$$M'_{Ed}\left(\frac{L}{4}\right) = M_{g2,2} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{qfk}$$

$$= 2812,32 + 1181,9 + 0,75 * 262 + 0,4 * 342,4 + 0,4 * 31,6 + 0,4 * 52,9 = 4361,48 \text{ kNm}$$

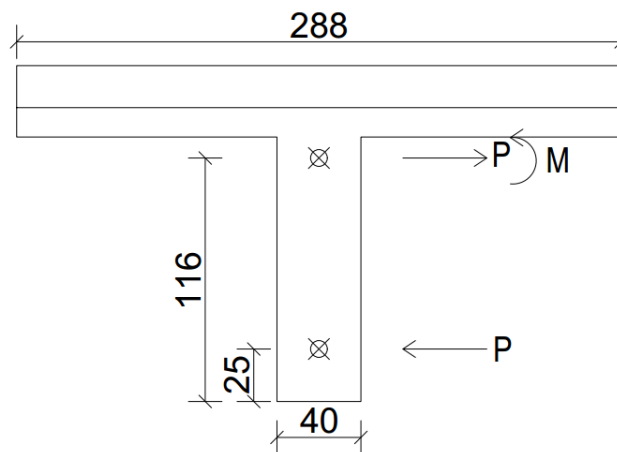
- Usvajamo:  $M_{dek} = 4362 \text{ kNm}$

Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno:

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} - \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

- Predznak + → tlak
- Predznak - → vlak

- U proračun se uzima sila prednapinjanja u kablovima za vrijeme eksploatacije  $P_{m\infty}$  i karakteristike T-presjeka s pločom kao što je prikazano na slici 42



Slika 42. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

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

$$y_{cp}'' = y_d'' - \xi = 116 - 25 = 91 \text{ cm}$$

$$P_{m\infty} > \frac{M_{dek}}{y_{cp}'' + k_g''} = \frac{6076}{1,16 + 0,168} = 4575 \text{ kN}$$



- Potrebna sila u kabelima za trajno stanje – u eksploataciji (nakon svih gubitaka) mora biti:  $P_{m\infty} > 4575 \text{ kN}$

### 3.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje

- Kabeli za prednapinjanje koji se koriste su EN 10138-3-Y1860S
- Nazivna vlačna čvrstoća im iznosi  $f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$

Potrebna količina kabela za prednapinjanje:

$$A_{pot} = \frac{P_{m0}}{\sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} \text{ uz uvjet } \sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$\sigma_p$  - naprezanje u kabelu nakon početnih gubitaka

$\delta$  - početni gubici u kabelima

$\sigma_{p0}$  dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,8 * f_{pk} = 0,8 * 186 = 148 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,9 * f_{p0,1k} = 0,9 * 0,86 * 186 = 144 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{p0} = 144 \text{ kN/cm}^2$$

$\sigma_{pm0}$  maksimalno naprezanje nakon otpuštanja preše

$$\sigma_{pm0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 * f_{pk} = 0,75 * 186 = 139,5 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,85 * f_{p0,1k} = 0,85 * 0,86 * 186 = 136 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

Procjena gubitaka u kabelima

- Početni gubici 10-20% → usvajamo 10% →  $\delta = 0,9$
- Vremenski gubici 10-20% → usvajamo 15% →  $m = 0,85$

$P_{m0} = P_0 * \delta$  - sila u kabelima nakon početnih gubitaka

$P_{m\infty} = P_{m0} * m$  - sila u kabelima nakon ukupnih gubitaka (u eksploataciji)

$$A_{pot} \geq \frac{P_{m\infty}}{m * \sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} = 0,9 * 144 = 129,6 \leq \sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_p = 129,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$$A_{pot} \geq \frac{4575}{0,85 * 129,6} = 41,53 \text{ cm}^2$$

- Odabrani sustav prednapinjanja je DYWIDAG
- Površina jednog užeta kabela iznosi 1,5 cm<sup>2</sup>

$$\text{Broj užadi} > \frac{\text{potrebna površina}}{\text{površina jednog užeta}} = \frac{41,53}{1,5} = 27,68$$

- Usvojeni broj užadi:  $n_z \geq 28$

Zaštitni sloj betona

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 + 10 = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

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

$$c_{min,b} = \emptyset = 10 \text{ mm}$$

- Za razred izloženosti XD3 te razred betona C45/55, razred konstrukcije je S3

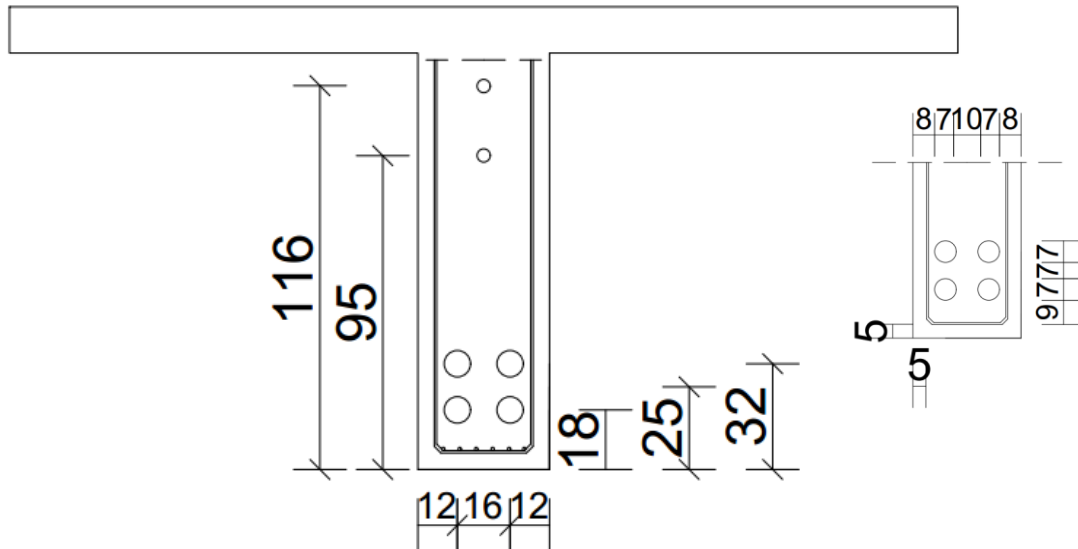
$$c_{min,dur} = 40 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \quad \Delta c_{dur,st} = 0 \quad \Delta c_{dur,add} = 0$$

$$c_{min} = \max\{10; 40; 10\} = 40 \text{ mm}$$

- Usidrenje kabela na krajevima greda postavlja se tako da je težište sile prednapinjanja ispod težišta poprečnog presjeka nosača, 1/3 sile prednapinjanja sidri se u donjoj trećini visine rebra

- Radi uvođenja sile prednapinjanja u nosač i prenošenja ležajne reakcije, nosač se mora produžiti preko osi ležaja  $h/3$  ( $140/3 = 60$  cm) ili 60 cm
- Usvajamo: 4 kabela s po 7 užadi = 28 kabela (iz kataloga kabel 6807) s težištem  $\xi = 25$  cm od donjeg ruba kao na slici 43
- Promjer cijevi za kabele je 70 cm



Slika 43. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

- Stvarna ukupna površina kabela:  $A_p = n * A_1 = 28 * 1,5 = 42 \text{ cm}^2$

Maksimalna ukupna sila koju možemo unijeti:

$$P_{0,max} = A_p * \sigma_{p0} = 42 * 144 = 6048 \text{ kN}$$

$$P_{m0,max} = P_{0,max} * \delta = 6048 * 0,9 = 5443,2 \text{ kN}$$

$$P_{m\infty,max} = P_{m0,max} * m = 5443,2 * 0,85 = 4626,72 \text{ kN}$$

- Izračunata potrebna sila:  $P_{m\infty} \geq 4575 \text{ kN}$

- Usvaja se sila:  $P_{m\infty} = 4600 \text{ kN}$

$$P_{m0} = 5412 \text{ kN}$$

$$P_0 = 6013 \text{ kN}$$

Stvarno dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} = \frac{P_0}{A_p} = \frac{6013}{42} = 143,17 \text{ kN/cm}^2$$

Uvjeti koji moraju biti ispunjeni u fazi gradnje:

- Presjek je ispunjen rupama od kabela za prednapinjanje koje u ovoj fazi nisu još injektirane pa računamo s neto presjekom (pretpostavljeno umanjenje geometrijskih karakteristika 5%)

$$A^n = A' * 0,95 = 0,9072 * 0,95 = 0,862 \text{ m}^2$$

$$W_d^n = W_d' * 0,95 = 0,186 * 0,95 = 0,177 \text{ m}^2$$

$$W_g^n = W_g' * 0,95 = 0,393 * 0,95 = 0,373 \text{ m}^2$$

- a) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena granica od  $0,45 * f_{ck}$  da bi puzanje bilo linearno:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje:

$$N_{Ed} = P_{m0} ; M_{Ed} = M_{g1}$$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

**Za  $x = L/4$  :**

$$y_{cp}' = y_d' - \xi = 95 - 36 = 54 \text{ cm}$$

$$P_{m0, donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1,2}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp}'}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 4,5 + \frac{1224,72 * 10^2}{0,177 * 10^6}}{\frac{1}{0,862 * 10^4} + \frac{0,54 * 10^2}{0,177 * 10^6}} = 6452,1 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,donje}^{II}$$

$$5412 \text{ kN} < 6452,1 \text{ kN}$$

- o Uvjet je zadovoljen

**Za  $x = L/2$  :**

$$y'_{cp} = y'_d - \xi = 95 - 25 = 70 \text{ cm}$$

$$P_{m0,donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1,3}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp}'}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 4,5 + \frac{1632,96 * 10^2}{0,177 * 10^6}}{\frac{1}{0,862 * 10^4} + \frac{0,70 * 10^2}{0,177 * 10^6}} = 5762,73 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,donje}^{II}$$

$$5412 \text{ kN} < 5762,73 \text{ kN}$$

- o Uvjet je zadovoljen

- b) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena srednje vlačno naprezanje u betonu:

$$f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2 \text{ za beton C45/50}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje:  $N_{Ed} = P_{m0}$  ;  $M_{Ed} = M_{g1}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

**Za  $x = L/4$  :**

$$P_{m0,gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1,2}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,38) + \frac{1224,72 * 10^2}{0,373 * 10^6}}{\frac{0,54 * 10^2}{0,373 * 10^6} - \frac{1}{0,862 * 10^4}} = 24627,03 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,gornje}^{II}$$

$$5412 \text{ kN} < 11412,37 \text{ kN}$$

- Uvjet je zadovoljen

**Za  $x = L/2$  :**

$$P_{m0,gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1,3}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,38) + \frac{1632,96 * 10^2}{0,373 * 10^6}}{\frac{0,70 * 10^2}{0,373 * 10^6} - \frac{1}{0,862 * 10^4}} = 11412,37 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,gornje}^{II}$$

$$5412 \text{ kN} < 11412,37 \text{ kN}$$

- Uvjet je zadovoljen

### 3.5. Određivanje zone vođenja težišta kabla

- Težište kabla određujemo na čelu nosača gdje je  $x = 0$

a) Za eksploataciju:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} + \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{M_{dek}}{P_{m\infty}} - k_g''$$

$$\text{Za } x = 0 \rightarrow M_{dek} = 0$$

$$y_{cp}'' \geq -k_g'' = -0,168 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}'' = 1,16 + 0,168 = 1,328 \text{ m}$$

- Uvjet da na gornjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_g''} + \frac{M_{dek}}{W_g''} < 0,45 * f_{ck}$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{-0,45 * f_{ck} * W_g''}{P_{m\infty}} + k_d'' = \frac{-0,45 * 4,5 * 10^4 * 0,657}{4600} + 0,443 = -2,449 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}'' = 1,16 + 2,449 = 3,609 \text{ m}$$

- b) Za stanje gradnje:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

$$y_{cp}' \leq \frac{0,45 * f_{ck} * W_d^n}{P_{m0}} - k_g^n = \frac{0,45 * 4,5 * 10^4 * 0,177}{5412} - 0,205 * 0,95 = 0,468 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 0,95 - 0,468 = 0,48 \text{ m}$$

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $f_{ctm}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm} \quad M_{g1} = 0$$

$$y_{cp}' \leq \frac{-f_{ctm} * W_g^n}{P_{m0}} + k_d^n = \frac{-(-0,38) * 10^4 * 0,373}{5412} + 0,433 * 0,95 = 0,67 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 0,95 - 0,67 = 0,28 \text{ m}$$

- Presjek uvjeta:

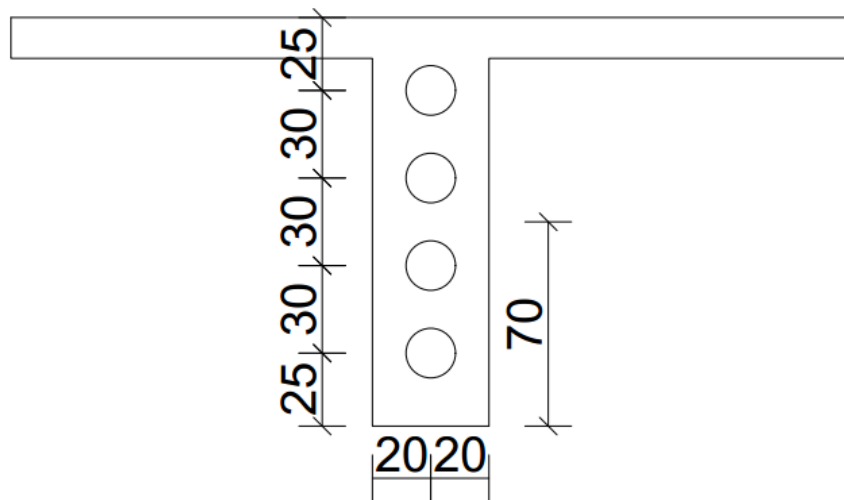
$$\xi_0 \geq 0,28 \text{ m}$$

$$\xi_0 \leq 1,33 \text{ m}$$

$$0,28 \text{ m} \leq \xi_0 \leq 1,33 \text{ m}$$

## Raspored kabela na čelu prema pravilima o minimalnim razmacima između kabela i do ruba nosača

- Podatci proizvođača za kabel 6807:
  - o Promjer kotve:  $\varnothing a = 170\text{mm}$
  - o Razmak osi kabela: 280 mm
  - o Razmak osi kabela od ruba nosača: 160 mm (uzeti veću vrijednost jer debljina sigurnosnog sloja nije 3 cm)
  - o Poželjno je da težište svih kabela bude niže od težišta nosača bez ploče



Slika 44. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

- Osi kabela na čelu nosača postavljena su na razmaku od 30 cm, a od rubova nosača za 25 cm u horizontalnom i vertikalnom smjeru
- Težište natega na čelu nosača nalazi se na 70 cm od donjeg ruba
- Usvajamo  $\xi_0 = 0,7\text{ m}$  (zadovoljava gornje uvijete + nalazi se ispod težišta nosača bez ploče)

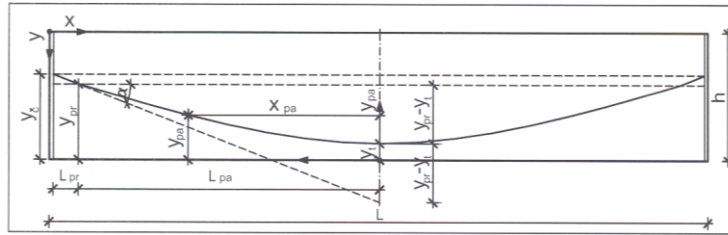


Linije vođenja kabela dobivene su pomoću Excela, stoga je priložen list iz navedenog programa.

### Linija vođenja kabela

$L_{pr} = 60$  cm  
 $L_{pa} = 1200$  cm

pr-pravac  
 pa-parabola



### Nagib tangente i visinski položaj kabela na prijelazu s pravca na parabolu

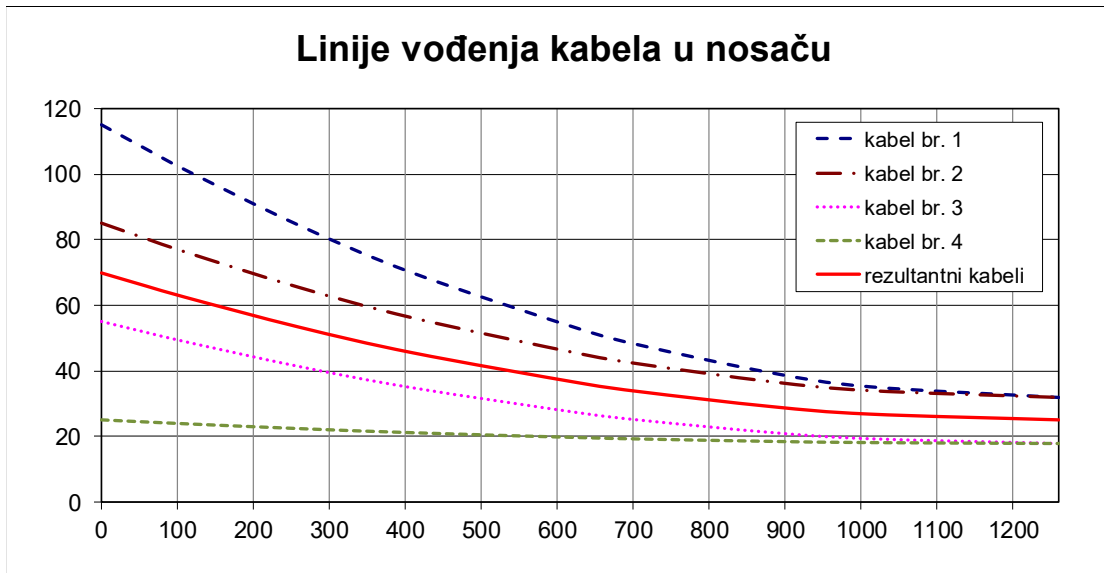
kabel br.	$y_e$ (cm)	$y_t$ (cm)	$\text{tg}\alpha = (y_e - y_t) / (L_{pr} + L_{pa} / 2)$	$y_{pr} = y_e - \text{tg}\alpha * L_{pr}$ (cm)
1	115,00	32,00	0,1258	107,45
2	85,00	32,00	0,0803	80,18
3	55,00	18,00	0,0561	51,64
4	25,00	18,00	0,0106	24,36
rezultantni	70,00	25,00	0,0682	65,91

### Izraz za proračun točaka na paraboli

$$y_{pa} = [(y_{pr} - y_t) * (L_{pa} + L_{pr} - x)^2] / L_{pa}^2 + y_t \text{ (cm)}$$

### Udaljenost osi kabela od donjeg ruba (cm)

kabel br.	x (cm)									
	0	60	110	260	410	630	710	880	1010	1260
1	115,00	107,45	101,30	84,40	69,86	52,80	47,85	39,57	35,27	32,00
2	85,00	80,18	76,25	65,46	56,17	45,28	42,12	36,83	34,09	32,00
3	55,00	51,64	48,89	41,36	34,88	27,27	25,07	21,37	19,46	18,00
4	25,00	24,36	23,84	22,42	21,19	19,75	19,34	18,64	18,28	18,00
rezultantni	70,00	65,91	62,57	53,41	45,53	36,28	33,59	29,10	26,78	25,00



### 3.6. Proračun gubitaka sile u kablovima

Sila u kabelu u vremenu t:

$$P_{mt} = P_0 - \Delta P_{el} - \Delta P_{c+s+r}(t) - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_{sl}$$

$P_{m0} \rightarrow t = 0$  sila umanjena za početne gubitke  $\Delta P_{\mu}(x)$ ,  $\Delta P_{sl}$  i  $\Delta P_{el}$

$P_{m\infty} \rightarrow t = \infty$

#### 3.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)})$$

- koeficijent trenja između kabela i zaštitne cijevi (tehničke specifikacije izvođača):  $\mu = 0,19 \text{ rad}^{-1}$
- $\theta = \frac{8 * f * x}{l_{tot} * l_{tot}}$  – zbroj kutova skretanja kabela na duljini x; f – strelica parabole
- nenamjerni kut skretanja kabela (tehničke specifikacije izvođača):  $k = 0,005 \text{ rad/m}$
- $P_0 = 6013 \text{ kN}$

**Za x = 0 m:**

$$\theta = 0$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6013 * (1 - e^{-0,19 * (0 + 0,005 * 0)}) = 0 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 6013 - 0 = 6013 \text{ kN}$$

**Za x =  $l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{3,6}{635} * 6,3 = 0,04$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6013 * (1 - e^{-0,19 * (0,04 + 0,005 * 6,3)}) = 81,1 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 6013 - 81,1 = 5931,9 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{\text{tot}}/2 = 12,6 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{3,6}{635} * 12,6 = 0,07$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6013 * (1 - e^{-0,19 * (0,07 + 0,005 * 12,6)}) = 150 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 6013 - 150 = 5863 \text{ kN}$$

**Za  $x = 3l_{\text{tot}}/4 = 18,9 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{3,6}{635} * 18,9 = 0,11$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6013 * (1 - e^{-0,19 * (0,11 + 0,005 * 18,9)}) = 229,2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 6013 - 229,2 = 5783,8 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{\text{tot}} = 25,2 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{3,6}{635} * 25,2 = 0,14$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6013 * (1 - e^{-0,19 * (0,14 + 0,005 * 25,2)}) = 296,3 \text{ kN}$$

$$P_{\text{max}} - \Delta P_{\mu}(x = 0) = 6013 - 296,3 = 5716,7 \text{ kN}$$

### 3.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

- Smanjenje na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * P_0 * l_e * \mu * \left( \frac{\theta}{x} + k \right)$$

- Iznos smanjenja u presjeku x:

$$\Delta P_{sl}(x) = \Delta P'_{sl} * \frac{l_e - x}{l_e}$$

- utjecaj prokliznuća klina najveći je na čelu nosača i smanjuje se sa duljinom kabela

- kada je zadovoljen uvjet  $x > l_e$  u presjeku x nema utjecaja prokliznuća klina
- duljina utjecaja prokliznuća klina:

$$l_e = \sqrt{\frac{\Delta L * E_p * A_p}{P_0 * \mu * \left(\frac{\theta}{x} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,001 * 19500 * 42}{6013 * 0,19 * \left(\frac{0,14}{25,2} + 0,005\right)}} = 8,24 \text{ m}$$

- o modul elastičnosti kabela:  $E_p = 195000 \text{ N/mm}^2$
- o duljina prokliznuća klina (4-6mm):  $\Delta L = 1 \text{ mm}$

Smanjenje sile na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * 6013 * 8,24 * 0,19 * \left(\frac{0,14}{25,2} + 0,005\right) = 198,74 \text{ kN} \approx 199 \text{ kN}$$

Iznos smanjenja sile u presjeku x

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\Delta P_{sl}(x) = 199 * \frac{8,24 - 6,3}{8,24} = 46,9 \text{ kN}$$

U ostalim presjecima ne postoji utjecaj prokliznuća klina.

### 3.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}$$

- Početno naprezanje u visini težišta kabela umanjeno za gubitke trenja i prokliznuća klina:  $\Delta \sigma_c = \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}^2\right)$
- Početna sila umanjena za gubitke trenja i prokliznuća klina:

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl}$$

- Modul elastičnosti betona:  $E_{cm} = 36000 \text{ N/mm}^2$
- $j = \frac{n-1}{2n} = \frac{4-1}{2*4} = 0,375$
- Ukupan broj kabela:  $n = 4$

**Za  $x = 0$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6013 - 0 - 199 = 5814 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{5814}{0,9072} * \left(1 + \frac{0,9072}{0,177} * 0,25^2\right) \\ &= 8461,7 \text{ kN/m}^2 = 0,85 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 42 * 19500 * \frac{0,375 * 0,85}{3600} = 72,52 \text{ kN} \approx 73 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 199 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 73 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 0 + 199 + 73 = 272 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6013 - 272 = 5741 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{5741}{6013} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = 6,3$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6013 - 81,1 - 46,9 = 5885 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{5885}{0,9072} * \left(1 + \frac{0,9072}{0,177} * 0,59^2\right) \\ &= 18060,83 \text{ kN/m}^2 = 1,81 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 42 * 19500 * \frac{0,375 * 1,81}{3600} = 154,42 \text{ kN} \approx 155 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_{\mu}(x) = 81,1 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 46,9 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 155 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 81,1 + 46,9 + 155 = 283 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6013 - 283 = 5730 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{5730}{6013} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za x = 12,6 m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_{\mu} - \Delta P_{sl} = 6013 - 150 - 0 = 5863 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{5863}{0,9072} * \left(1 + \frac{0,9072}{0,177} * 0,7^2\right) \\ &= 22693,65 \text{ kN/m}^2 = 2,27 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 42 * 19500 * \frac{0,375 * 2,27}{3600} = 193,66 \text{ kN} \approx 194 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_{\mu}(x) = 150 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 194 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 150 + 0 + 194 = 344 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6013 - 344 = 5669 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{5669}{6013} = 0,94$$

$\delta_{procijenjeno} = 0,9$  pretpostavka zadovoljava

**Za  $x = 18,9$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6013 - 229,2 - 0 = 5783,8 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{5783,8}{0,9072} * \left(1 + \frac{0,9072}{0,177} * 0,59^2\right) \\ &= 17750,25 \text{ kN/m}^2 = 1,78 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 42 * 19500 * \frac{0,375 * 1,78}{3600} = 151,86 \text{ kN} \approx 152 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 229,2 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 152 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 229,2 + 0 + 152 = 381,2 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6013 - 381,2 = 5632 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{5632}{6013} = 0,94$$

$\delta_{procijenjeno} = 0,9$  pretpostavka zadovoljava

**Za  $x = 25,2$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6013 - 296,3 - 0 = 5716,7 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{5716,7}{0,9072} * \left(1 + \frac{0,9072}{0,177} * 0,25^2\right) \\ &= 8320,09 \text{ kN/m}^2 = 0,83 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 42 * 19500 * \frac{0,375 * 0,83}{3600} = 70,81 \text{ kN} \approx 71 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_{\mu}(x) = 296,3 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 71 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 296,3 + 0 + 71 = 367,3 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6013 - 367,3 = 5646 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{5646}{6013} = 0,94$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

### 3.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu t

$$\Delta P_t(t) = A_p * \Delta \sigma_{c+s+r}$$

$$= A_p * \frac{\varepsilon_{cs} * E_p + 0,8 * \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} * \varphi(t, t_0) * \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} * \frac{A_p}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c''}{I_c} * y_{cp}''^2\right) * [1 + 0,8 * \varphi(t, t_0)]}$$

- Tlak uzimamo s pozitivnim predznakom
- Promatrano vrijeme:  $t = \infty$
- Trenutak unošenja sile prednapinjanja:  $t_0 = 7 \text{ dana}$

#### Skupljanje betona:

- Deformacija skupljanja:  $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$ 
  - o Deformacija skupljanja zbog sušenja:  $\varepsilon_{cd,\infty} = k_h * \varepsilon_{cd,0}$
  - o Deformacija autogenog skupljanja:  $\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (f_{ck} - 10) * 10^{-6}$



- Element se nalazi na otvorenom (vlažnost 80%)

$$\varepsilon_{cd,0} = \left[ 0,24 - \frac{45 - 40}{60 - 40} (0,24 - 0,19) \right] * 10^{-3} = 0,23 * 10^{-3}$$

- Srednji polumjer elementa:

$$h_0 = \frac{2 * A''_c}{u} = \frac{2 * 1,483}{8,96} = 0,331 = 331 \text{ mm}$$

- o Opseg poprečnog presjeka koji je izložen sušenju:

$$u = 2 * (2,88 + 1,26 + 0,34) = 8,96 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,75 * 0,23 * 10^{-3} = 0,17 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (45 - 10) * 10^{-6} = 0,0875 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cs} = (0,17 + 0,0875) * 10^{-3} = 0,26 * 10^{-3}$$

### **Puzanje betona:**

- Vlažna okolina RH=80%
- Cement razreda N

$$\varphi(t_\infty, 7) = 1,85$$

- Najveće vlačno naprezanje na kabel umanjeno za početne gubitke:

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = \frac{P_{m0}}{A_p}$$

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

### **Za x = 0 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{5741}{42} = 136,69 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{136,69}{186} = 0,73$$

**Za x = 6,3 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{5730}{42} = 136,43 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{136,43}{186} = 0,73$$

**Za x = 12,6 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{5669}{42} = 134,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{134,98}{186} = 0,73$$

**Za x = 18,9 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{5632}{42} = 134,1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{134,1}{186} = 0,72$$

**Za x = 25,2 m:**

$$\sigma_{pm0} = \frac{5646}{42} = 134,43 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{134,43}{186} = 0,72$$

- Vrijednost gubitaka zbog opuštanja 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temperaturi od 20°C (prema tehničkim karakteristikama proizvođača):  $\rho_{1000} = 2,5\%$
- Vrijeme nakon prednapinjanja (za konačno stanje 57 god):  $t = 500000$  sati
- Za čelik razreda 2 gubitak zbog opuštanje se računa prema formuli:

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

**Za x = 0 m, x = 6,3 m, x = 12,6 m**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,73} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,73)} * 10^{-5} = 0,045$$

**Za x = 18,9 m i x = 25,2 m**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,72} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,72)} * 10^{-5} = 0,043$$

Konačna relaksacija uslijed relaksacije čelika nakon 500000 sati

**Za x = 0 m, x = 6,3 m, x = 12,6 m**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,045 * \sigma_{pi} = 0,045 * 136,69 = 6,2 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 18,9 m i x = 25,2 m**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,043 * \sigma_{pi} = 0,043 * 134,43 = 5,8 \text{ kN/cm}^2$$

Naprezanje betona u visini natega od vlastite težine (uključujući početne gubitke) i početnog prednapinjanja te ostalih nazovistalnih djelovanja

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I_c''} + \left(\frac{P_{m0}}{A_c''} + \frac{P_{m0}}{I_c''} * y_{cp}''^2\right)$$

**Za x = 0 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 46}{0,289 * 10^8} + \left(\frac{5741}{1,483 * 10^4} + \frac{5741}{0,289 * 10^8} * 46^2\right) = 0,81 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 6,3 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{2812,32 * 10^2 * 80}{0,289 * 10^8} + \left( \frac{5730}{1,483 * 10^4} + \frac{5730}{0,289 * 10^8} * 80^2 \right) = 0,88 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 12,6 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{3749,76 * 10^2 * 91}{0,289 * 10^8} + \left( \frac{5669}{1,483 * 10^4} + \frac{5669}{0,289 * 10^8} * 91^2 \right) = 0,83 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 18,9 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{2812,32 * 10^2 * 80}{0,289 * 10^8} + \left( \frac{5632}{1,483 * 10^4} + \frac{5632}{0,289 * 10^8} * 80^2 \right) = 0,85 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 25,2 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 46}{0,289 * 10^8} + \left( \frac{5646}{1,483 * 10^4} + \frac{5646}{0,289 * 10^8} * 46^2 \right) = 0,79 \text{ kN/cm}^2$$

Gubitak sile prednapinjanja

**Za x = 0 m:**

$$\begin{aligned} \Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,2 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,81}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left( 1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,46^2 \right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{17,05}{1,0496} = 779,73 \text{ kN} \approx 780 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{5741 - 780}{5741} = \frac{4961}{5741} = 0,86$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,77$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{4961}{6013} = 0,82$

**Za x = 6,3 m:**

$$\Delta P_t(t) = 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,2 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,88}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,8^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]}$$

$$= 48 * \frac{17,657}{1,0496} = 723,15 \text{ kN} \approx 723 \text{ kN}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{5730 - 723}{5730} = \frac{5007}{5730} = 0,87$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,87 * 0,9 = 0,78$
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5007}{6013} = 0,83$

**Za x = 12,6 m:**

$$\Delta P_t(t) = 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,2 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,83}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,91^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]}$$

$$= 48 * \frac{17,223}{1,0496} = 787,64 \text{ kN} \approx 788 \text{ kN}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{5669 - 788}{5669} = \frac{4881}{5669} = 0,86$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,77$
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{4881}{6013} = 0,81$

**Za x = 18,9 m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 5,8 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,85}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,8^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{17,077}{1,0496} = 780,96 \text{ kN} \approx 781 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{5632 - 781}{5632} = \frac{4851}{5632} = 0,86$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,77$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{4851}{6013} = 0,81$

**Za x = 25,2 m:**

$$\begin{aligned}\Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 6,2 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,79}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,46^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{16,877}{1,0496} = 771,81 \text{ kN} \approx 772 \text{ kN}\end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{5646 - 772}{5646} = \frac{4874}{5646} = 0,86$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,77$

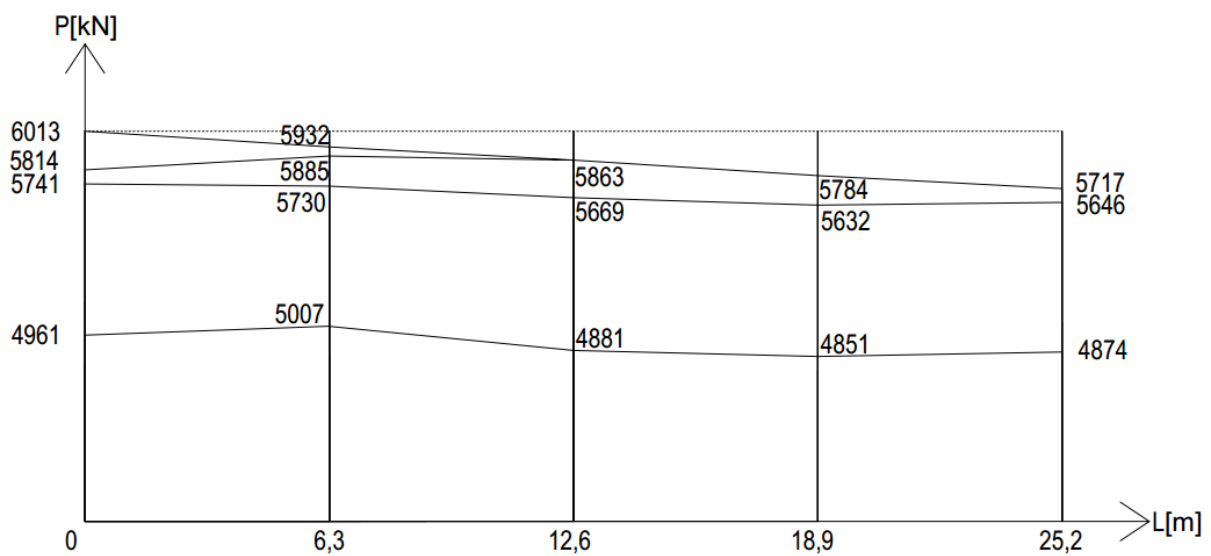
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{4874}{6013} = 0,81$

### 3.6.5. Stvarne sile u kabelima

Vrijednosti stvarnih sila u kabelima dane su tablici 11.

Tablica 11. Stvarne sile u kabelima

X [m]	$P_0$ [kN]	$P_{m0}$ [kN]	$P_{m\infty}$
0	6013	5741	4961
6,3	6013	5730	5007
12,6	6013	5669	4881
18,9	6013	5632	4851
25,2	6013	5646	4874



Slika 45. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

### 3.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču

#### Stalna i prolazna proračunska situacija:

(stalno opterećenje, promjenljivo opterećenje i prednapinjanje)

Proračunski moment savijanja za stalna i prolazna djelovanja:

$$M_{Ed} = \gamma_g * M_{g2} + \gamma_Q * M_Q$$

- Stalno djelovanje i promjenljivo opterećenje izazivaju nepovoljne učinke, a prednapinjanje pozitivne, stoga su parcijalni koeficijenti jednaki:

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ za prometna opterećenja}$$

- Utjecaj prednapinjanja uzimamo u obzir kod izračuna potrebne neprednapete armature

$$M_{g2} = 3749,76 \text{ kNm}$$

$$M_Q = M_{Q1k} + M_{Q2k} + M_{q1k} + M_{q2k} + M_{qfk} = 1604 + 356 + 913 + 84 +$$

$$141 = 3098 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 3749,76 + 1,35 * 3098 = 9244,48 \text{ kNm}$$

Proračunska poprečna sila za stalna i prolazna djelovanja:

$$V_{Ed} = \gamma_g * V_g + \gamma_Q * V_Q$$

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ kada se uzimaju sva djelovanja}$$

$$V_g = 625 \text{ kN}$$

$$V_Q = V_p = V_{Q1k} + V_{Q2k} + V_{q1k} + V_{q2k} + V_{qfk} = 274 + 61 + 152 + 14 + 24 \\ = 525 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1,35 * 625 + 1,35 * 525 = 1552,5 \text{ kN}$$

- Poprečnu silu na ležaju možemo reducirati:
  - a) Za utjecaj stalnog tereta koji se prenosi direktno u ležaj na udaljenosti  $d$  od lica ležaja  $V_{red,1}$ :



$$V_{red,1} = \left(\frac{a}{2} + d\right) * [\gamma_g * (g_2 + g_r)] = \left(\frac{0,30}{2} + 1,53\right) * [1,35 * (37,08 + 15)]$$

$$= 118,12 \text{ kN}$$

- Širina ležaja:  $a = 30 \text{ cm}$
- Statička visina:  $d = 153 \text{ cm}$

b) Za utjecaj skretne sile u kabelima  $V_{red,2}$ :

$$V_{red,2} = \gamma_p * P_{m\infty} * \sin\alpha$$

- Učinak sile prednapinjanja je pozitivan i stoga je parcijalni faktor jednak:

$$\gamma_p = 1,0$$

$$\operatorname{tg}\alpha = 0,085 \text{ rad} \rightarrow \alpha = 4,86^\circ$$

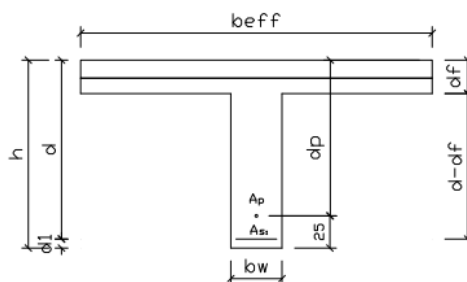
$$V_{red,2} = 1 * 4734 * \sin(4,86^\circ) = 401,07 \text{ kN}$$

- Reducirana poprečna sila:

$$V'_{Ed} = V_{Ed} - V_{red,1} - V_{red,2} = 1552,5 - 118,12 - 401,07 = 1033,31 \text{ kN}$$

### 3.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

#### Određivanje potrebne nosive armature



Slika 46. Općeniti poprečni presjek

- Proračun sudjelujuće širine T – presjeka

$$b_w = 40 \text{ cm}$$

$$d_f = 34 \text{ cm}$$

$$h = 160 \text{ cm}$$

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

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * b_i + 0,1 * l_0 \leq \min\{b_1; 0,2l_0\}$$

$$l_0 = l = 2400 \text{ cm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * 124 + 0,1 * 2400 = 264,8 \text{ cm}$$

$$\leq \min\{124; 0,2 * 2400 = 480\} = 124 \text{ cm}$$

$$b_{eff} = 2 * 124 + 40 = 288 \text{ cm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d_s = h - d_1 = 160 - 7 = 153 \text{ cm} - \text{statička visina nenapete armature}$$

$$d_p = h - 25 = 160 - 25 = 135 \text{ cm} - \text{statička visina prednapete armature}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 * \frac{45}{1,5} = 25,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_{cc} = 0,85 \quad \text{za mostove}$$

- Granica popuštanja čelika za prednapinjanje:

$$\sigma_{pd} = \frac{0,9 * f_{pk}}{\gamma_p} = \frac{0,9 * 186}{1,15} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{Eds} = M_{Ed} + F_p * (d_s - d_p) = 9244,48 + (42 * 145,6) * (1,53 - 1,35)$$

$$= 10345,22 \text{ kNm}$$

- Pretpostavka da neutralna os prolazi kroz ploču:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{1034522}{288 * 153^2 * 2,55} = 0,06$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,092 \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,966$$

$$x = d_s * \xi = 153 * 0,092 = 14,08 \text{ cm} < 34 \text{ cm}$$

- N.O. prolazi kroz ploču, presjek dimenzioniramo kao pravokutni dimenzija  $b_{eff}/h$

$$\begin{aligned} A_{s1} &= \frac{M_{Eds} - A_p * \sigma_{pd} * (z_s - (d_s - d_p))}{f_{yd} * z_s} \\ &= \frac{1034522 - 42 * 145,6 * (0,966 * 153 - (153 - 135))}{43,48 * (0,966 * 153)} \\ &= 37,47 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje za granično stanje loma (za  $t = \infty$ ):

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E_s} * \left[ \sigma_{pm,\infty} - \alpha_e * \left( \frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''^2}{I''} - \frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I''} \right) \right] + \Delta\varepsilon_p$$

- Deformacija  $\Delta\varepsilon_p$  dobiva se iz omjera sličnosti trokuta:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{d_p - x} = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{x}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{\xi * d_s} * (d_p - \xi * d_s) = \frac{3,5 * 10^{-3}}{0,092 * 153} * (135 - 0,092 * 153) = 0,0301 = 30,1\text{‰}$$

$$\sigma_{pm,\infty} = \frac{P_{m\infty}}{A_p} = \frac{4734}{42} = 112,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{(\infty,28)}} = \frac{36}{1 + 1,45} = 14,7 \text{ GPa}$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{195}{14,7} = 13,27$$

$$t_0 = 28 \text{ d}$$

$$\varphi_{(\infty,28)} = 1,45$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \frac{1}{19500} * \left[ 112,7 - 5,42 * \left( \frac{4737}{1,483 * 10^4} + \frac{4734 * 91^2}{0,289 * 10^8} - \frac{374976 * 91}{0,289 * 10^8} \right) \right] + 0,0301 \\ &= 0,0357 = 35,7\text{‰} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{pd} = \frac{\sigma_{pd}}{E_p} = \frac{145,6}{19500} = 7,47\text{‰}$$

$$\varepsilon_p > \varepsilon_{pd} \quad \rightarrow \quad \sigma_{pd} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

- Najmanja ploština uzdužne armature u gredama:

$$\begin{aligned} A_{s1,min} &= \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d; 0,0013 * b_t * d \right\} \\ &= \max \left\{ 0,26 * \frac{3,8}{500} * 40 * 153; 0,0013 * 40 * 153 \right\} \\ &= \max \{ 12,09; 7,96 \} = 12,09 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Najveća ploština uzdužne armature u gredama:

$$A_{s1} \leq 0,04 * A_c = 0,04 * 1,483 * 10^4 = 532 \text{ cm}^2$$

- Krhki slom:

- o Za prednapete konstrukcije dana je metoda kojom se može dokazati da neće doći do krhkog sloma (EN 1992-2:2005; poglavlje 6.1):

$$A_{s1} = \frac{M_{rep}}{f_{yk} * z_s} \quad z_s = 0,9 * d \quad f_{ctm} = 3,8 \text{ MPa} \quad \text{za C45/55}$$

$$M_{rep} = f_{ctm} * W_d'' = 0,38 * 0,249 * 10^6 = 94620 \text{ kNcm}$$

$$A_{s1} = \frac{94620}{50 * 0,9 * 153} = 13,74 \text{ cm}^2$$

- Usvojena je armatura 6Ø18  $A_{s1} = 15,26 \text{ cm}^2$

Provjera nenapete armature za pojavu kose pukotine:

- Koristimo vertikalne spone ( $\alpha = 90^\circ$ ), nagib tlačnih štapova  $\theta = 40^\circ$  ( $ctg\theta = 1,2$ )
- Armaturu iz polja vodimo do oslonca  $A_{sl,prov} = A_{s1} = 15,26 \text{ cm}^2$
- Armaturu provjeravamo na vlačnu silu  $T_{Ed}$  (sila u donjem vlačnom pojasu) koja se javlja nad ležajem (Mörschova rešetka)

$$T_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{1}{2} * V'_{Ed} * (ctg\theta - ctg\alpha)$$

$$M_{Ed} = 0 \quad \text{nad ležajem}$$

$$z \approx 0,9 * d$$

$$T_{Ed} = 0 + \frac{1}{2} * 1033,31 * (ctg40 - ctg90) = 615,73 \text{ kN}$$

$$A_{sl,req} = \frac{T_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{615,73}{43,48} = 14,16 \text{ cm}^2 < A_{sl,prov} = 15,26 \text{ cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

Stvarno zajedničko težište armature:

$$d_x = \frac{F_p * x_p + F_{s1} * d_1}{F_p * F_{s1}} = \frac{(A_p * \sigma_p) * x_p + (A_{s1} * f_{yd}) * d_1}{A_p * \sigma_p + A_{s1} * f_{yd}}$$

$$= \frac{(42 * 145,16) * 25 + (15,26 * 43,48) * 7}{42 * 145,16 + 15,26 * 43,48} = 23,23 \text{ cm}$$

$$d_t = 153 - 23,23 = 129,77 \text{ cm} \approx 130 \text{ cm}$$

### Sidrenje na osloncu

- Osnovna duljina sidrenja:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

- o Promatrane šipke se nalaze u dobrim uvjetima prionjivosti:  $f_{bd} = 4,05 \text{ MPa}$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{43,48}{0,405} = 26,84\emptyset$$

- Za  $\emptyset 18$   $l_{b,rqd} = 26,84 * 18 = 48,3 \text{ cm}$
- Potrebna duljina sidrenja:  $l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$
- Za slučaj sidrenja ravnim šipkama:  $\alpha_1 = 1,0$
- Ostale  $\alpha$  usvajamo kao 1,0

$$l_{bd} = l_{b,rqd} = 48,3 \approx 50 \text{ cm} \geq l_{b,min}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,3 * l_{b,rqd}; 10 * \emptyset; 10 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 50; 10 * 1,8; 10\}$$

$$= \max\{15; 18; 10\} = 18 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava

### Duljina nastavljanja preklapanjem:

- Potrebna duljina prijeklopa:  $l_0 = l_{b,rqd} * \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * \alpha_6 \geq l_{0,min}$

- Preklapamo više od 50% armature u jednom presjeku:  $\alpha_6 = 1,5$

$$l_0 = 50 * 1,5 = 75 \text{ cm} \geq l_{0,min}$$

$$l_{0,min} = \max\{0,3 * \alpha_6 * l_{b,rqd}; 15 * \emptyset; 20 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 1,5 * 50; 15 * 1,8; 20\} \\ = \max\{22,5; 27; 20\} = 27 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava

- Usvajamo duljinu prijeklopa  $l_0 = 75 \text{ cm}$

### 3.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

Ograničenje naprezanja u betonu i provjera rastlačenja u eksploataciji

- Provjere se vrše za karakterističnu, čestu i nazovistalnu kombinaciju djelovanja te idealni presjek

$$A_{c,id} = A_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p = 1,483 + (13,27 - 1) * 0,0042 = 1,53 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,id} = I_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}'' * y_p$$

$$y_p = y_{cp}'' - y_{ci} = y_{cp}'' - \frac{(\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}''}{A_{c,id}}$$

$$y_p(L=0) = y_p(L) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,46 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0042 * 0,46}{1,53} = 0,45 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{2}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,91 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0042 * 0,91}{1,53} = 0,9 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{4}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,80 - \frac{(5,42 - 1) * 0,0042 * 0,80}{1,53} = 0,8 \text{ m}$$

$$I_{c,id} = 0,289 + (5,42 - 1) * 0,0042 * 0,91 * 0,9 = 0,3 \text{ m}^4$$

$$W_{dc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_d''} = \frac{0,3}{1,16} = 0,26 \text{ m}^3$$

$$W_{gc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_g''} = \frac{0,3}{0,44} = 0,68 \text{ m}^3$$

a) Karakteristična kombinacija djelovanja

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{2}\right) = 4952,76 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{4}\right) = M_{Ed}\left(\frac{3L}{4}\right) = 3698,7 \text{ kNm}$$

- Kriterij rastlačenja – tlačno naprezanje ne smije preći  $0,6 * f_{ck}$ , a vlačno naprezanje se ne smije pojaviti
- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4961 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{4961}{1,53 * 10^4} + \frac{4961 * 0,45 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,26 * 10^6} \\ &= 1 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4881 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{4881}{1,53 * 10^4} + \frac{4881 * 0,9 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{4952,76 * 10^2}{0,26 * 10^6} \\ &= 0,104 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4:**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5007 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5007}{1,53 * 10^4} + \frac{5007 * 0,8 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{3698,7 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$

$$= 0,445 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4:**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4851 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{4851}{1,53 * 10^4} + \frac{4851 * 0,8 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{3698,7 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$

$$= 0,387 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L:**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4874 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{4874}{1,53 * 10^4} + \frac{4874 * 0,45 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$

$$= 1 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

**Za L=0:**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4961}{1,53 * 10^4} - \frac{4961 * 0,45 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$

$$= -0,405 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava



**Za L/2 :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4881}{1,53 * 10^4} - \frac{4881 * 0,9 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{4952,76 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= 0,401 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4:**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5007}{1,53 * 10^4} - \frac{5007 * 0,8 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{3698,7 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= 0,282 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4:**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4851}{1,53 * 10^4} - \frac{4851 * 0,8 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{3698,7 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= 0,29 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4874}{1,53 * 10^4} - \frac{4874 * 0,45 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= -0,398 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

b) Nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

**Za L=0 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4961 \text{ kN}$$

**Za L/2 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 3749,76 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4881 \text{ kN}$$

**Za L/4:**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 2812,32 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5007 \text{ kN}$$

**Za 3L/4:**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 2812,32 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4851 \text{ kN}$$

**Za L :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4874 \text{ kN}$$

- Tlačno naprezanje ne smije preći  $0,45 * f_{ck}$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

**Za L=0 :**

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{4961}{1,53 * 10^4} + \frac{4961 * 0,45 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,26 * 10^6} \\ &= 1,2 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4961}{1,53 * 10^4} - \frac{4961 * 0,45 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$

$$= -0,405 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L/2 :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{4881}{1,53 * 10^4} + \frac{4881 * 0,9 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{3749,76 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$

$$= 0,599 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4881}{1,53 * 10^4} - \frac{4881 * 0,9 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{3749,76 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$

$$= 0,219 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L/4:

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5007}{1,53 * 10^4} + \frac{5007 * 0,8 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{2812,32 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$

$$= 0,786 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5007}{1,53 * 10^4} - \frac{5007 * 0,8 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{2812,32 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$

$$= 0,152 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za 3L/4:

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{4851}{1,53 * 10^4} + \frac{4851 * 0,8 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{2812,32 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$
$$= 0,728 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4851}{1,53 * 10^4} - \frac{4851 * 0,8 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{2812,32 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= 0,16 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L :

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{4874}{1,53 * 10^4} + \frac{4874 * 0,45 * 10^2}{0,26 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,26 * 10^6}$$
$$= 1,2 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{4874}{1,53 * 10^4} - \frac{4874 * 0,45 * 10^2}{0,68 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,68 * 10^6}$$
$$= -0,398 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- naprezanje u nategama (kabelima) nakon svih gubitaka pri nazovistalnoj kombinaciji djelovanja ne treba premašiti  $0,65 * f_{pk}$

$$\sigma_{pm,\infty} = \frac{P_{m\infty}}{A_p} = \frac{4881}{42} = 116,21 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,65 * f_{pk} = 0,65 * 186$$
$$= 120,9 \text{ kN/cm}^2$$

- uvjet zadovoljava

### 3.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje)

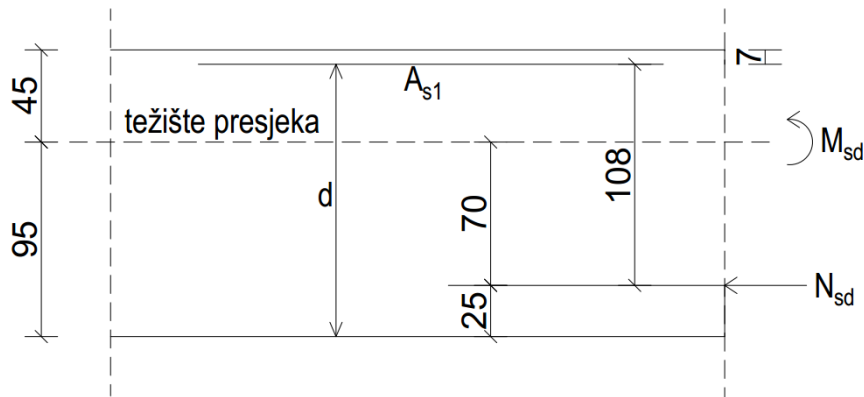
- Stalno opterećenje (povoljan učinak) i prednapinjanje (nepovoljan učinak)

$$M_{Ed} = \gamma_G * M_{g1} = 1,0 * 1632,96 = 1632,96 \text{ kNm}$$

- o za povoljni učinak  $\gamma_G = 1,0$

$$N_{Ed} = \gamma_p * P_{m0} = 1,0 * 5669 = 5669 \text{ kN}$$

- o za povoljni učinak za mostove  $\gamma_p = 1,0$



Slika 47. Postupak Wuczkowski

$$d_1 = 7 \text{ cm}$$

$$d = 140 - 7 = 133 \text{ cm}$$

- Postupak Wuczkowski:

$$M_{Eds} = -M_{Ed} + N_{Ed} * 1,08 = -1632,96 + 5669 * 1,08 = 5077,92 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_w * d^2 * f_{cd}} = \frac{5077,92}{40 * 133^2 * 2,55} = 0,28 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,438; \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,818$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds}}{\zeta * d * f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{507792}{0,818 * 133 * 43,48} - \frac{5400}{43,48} = -17,12 \text{ cm}^2$$

- Nije potrebna nosiva armatura

### 3.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje)

- Treba zadovoljiti uvjet da vlačno naprezanje u betonu ne bude veće od srednje vrijednosti vlačne čvrstoće betona  $f_{ctm}$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 5741 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} &= \frac{5741}{0,862 * 10^4} + \frac{5741 * 0,25 * 10^2}{0,177 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,177 * 10^6} \\ &= 1,477 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} &= \frac{5741}{0,862 * 10^4} - \frac{5741 * 0,25 * 10^2}{0,373 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,373 * 10^6} \\ &= -0,281 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$|0,281| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,38| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 5669 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1632,96 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} &= \frac{5669}{0,862 * 10^4} + \frac{5669 * 0,7 * 10^2}{0,177 * 10^6} - \frac{1632,96 * 10^2}{0,177 * 10^6} \\ &= 1,977 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} &= \frac{5669}{0,862 * 10^4} - \frac{5669 * 0,7 * 10^2}{0,373 * 10^6} + \frac{1632,96 * 10^2}{0,373 * 10^6} \\ &= -0,032 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$|0,032| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,38| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 5730 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1224,72 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} &= \frac{5730}{0,862 * 10^4} + \frac{5730 * 0,54 * 10^2}{0,177 * 10^6} - \frac{1224,72 * 10^2}{0,177 * 10^6} \\ &= 1,721 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{5730}{0,862 * 10^4} - \frac{5730 * 0,54 * 10^2}{0,373 * 10^6} + \frac{1224,72 * 10^2}{0,373 * 10^6}$$

$$= -0,164 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,164| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,38| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za 3L/4 :

$$N_{Ed} = P_{m0} = 5632 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1224,72 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{5632}{0,862 * 10^4} + \frac{5632 * 0,54 * 10^2}{0,177 * 10^6} - \frac{1224,72 * 10^2}{0,177 * 10^6}$$

$$= 1,68 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{5632}{0,862 * 10^4} - \frac{5632 * 0,54 * 10^2}{0,373 * 10^6} + \frac{1224,72 * 10^2}{0,373 * 10^6}$$

$$= -0,166 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,166| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,38| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L :

$$N_{Ed} = P_{m0} = 5646 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$



- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{5646}{0,862 * 10^4} + \frac{5646 * 0,25 * 10^2}{0,177 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,177 * 10^6}$$

$$= 1,452 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{5646}{0,862 * 10^4} - \frac{5646 * 0,25 * 10^2}{0,373 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,373 * 10^6}$$

$$= -0,276 \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2$$

$$|0,276| \text{ kN/cm}^2 < f_{ctm} = |0,38| \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

## Osiguranje područja uvođenja sile prednapinjanja

$\gamma_{p,unfav} = 1,2 \rightarrow$  za provjeru lokalnih učinaka (tlačnih naprezanja)

$$P_{d,uk} = P_0 = 6013 \text{ kN}$$

$$P_d = \frac{P_0}{n} = \frac{6013}{4} = 1503,25 \text{ kN}$$

$$c * c' = \frac{P_d}{0,6 * f_{ck}(t)} = \frac{1503,25 * 1000}{0,6 * 45} = 55675,93 \text{ mm}^2$$

- Za slučaj jednakih stranica  $c = c' = \sqrt{55676} = 235,96 \text{ mm}$  ;  $c = 240 \text{ mm}$
- Duljina na kojoj treba rasporediti armaturu za preuzimanje sila cijepanja:  $1,2 * 240 \approx 290 \text{ mm}$
- Najmanja ploština armature za preuzimanje sila cijepanja dobiva se po izrazu:

$$A_s = 0,15 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,15 * \frac{1503,25}{43,48} * 1,2 = 6,22 \text{ cm}^2$$

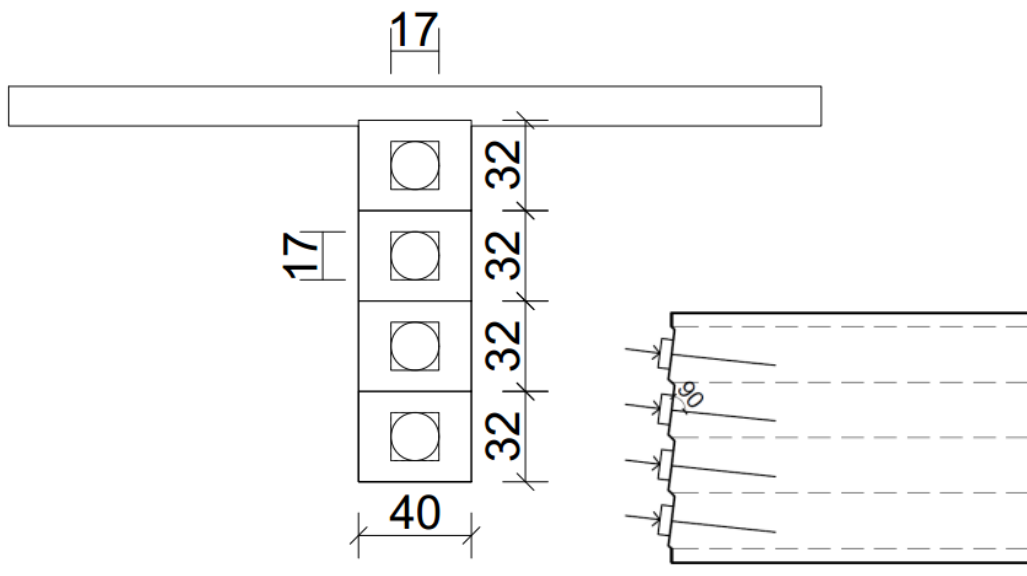
- Kako bi izbjegli proračun pukotina, naprezanje u armaturi potrebno je ograničiti na 250 MPa:

$$A_s = 0,15 * \frac{1503,25}{25/1,15} * 1,2 = 12,45 \text{ cm}^2$$

- za svaki kabel  $6\emptyset 12/29\text{cm}$   $A_s = 13,57\text{cm}^2$
- Dobivena armatura vrijedi i za horizontalni i vertikalni smjer
- Armatura na čelu nosača (ploština unošenja sile) ne smije biti manja od:

$$A_{sr} = 0,03 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,03 * \frac{1503,25}{25/1,15} * 1,2 = 2,49 \text{ cm}^2$$

- za oba smjera za svaki kabel  $2\emptyset 14$   $A_{sr} = 3,08 \text{ cm}^2$



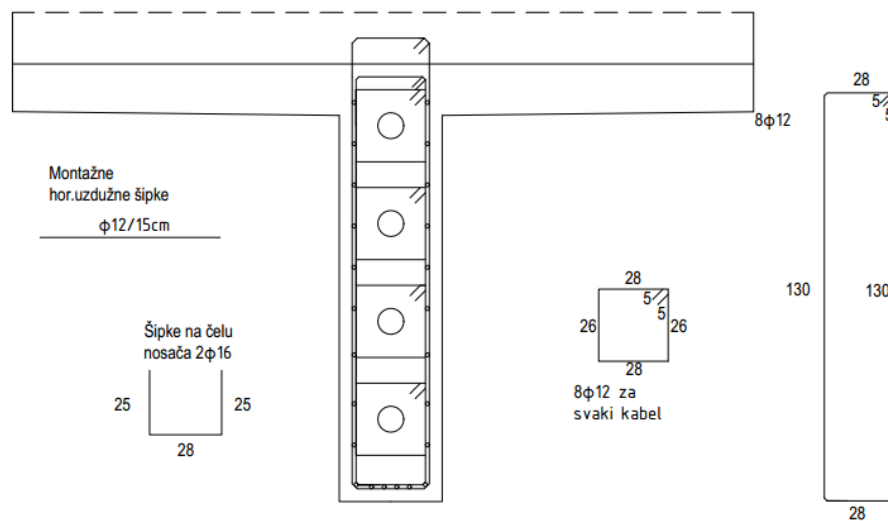
Slika 48. Područje uvođenja sile prednapinjanja

Tablica 12. Armatura za prihvaćanje sile cijepanja

Horizontalni smjer	Vertikalni smjer
$\frac{y_{p2}}{y_2} = \frac{17/2}{40/2} = 0,425 \rightarrow 0,19$	$\frac{y_{p1}}{y_1} = \frac{17/2}{32/2} = 0,531 \rightarrow 0,16$
$T = 0,18 * P_d * \gamma_{p,unfav} = 0,20 * 1503,25 * 1,2 = 360,78 \text{ kN}$	
$A_{sH} = \frac{360,78}{25/1,15} = 17 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_2 = 40 \text{ cm}$	$A_{sr} = \frac{360,78}{25/1,15} = 17 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_1 = 32 \text{ cm}$
Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sH} = 18,1 \text{ cm}^2$	Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sr} = 18,1 \text{ cm}^2$

- Odabire se veća duljina rasprostiranja u oba smjera  $8\emptyset 12/40\text{cm}$   $A_s = 18,1 \text{ cm}^2$

### Skica horizontalne i vertikalne armature za prihvaćanje sila cijepanja:



Slika 49. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

### 3.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija)

#### Provjera nosivosti tlačnih štapova:

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

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

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{4961 * 1000 \text{ N}}{1,483 \text{ m}^2} = 3,19 \text{ MPa} < 0,25 * f_{cd} = 0,25 * 25,5 = 6,375 \text{ MPa}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 4961 \text{ kN}$$

- za  $0 < \sigma_{cp} < 0,25 * f_{cd}$ :

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{3,19}{25,5} = 1,125$$

$$v_1 = v = 0,6 * \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 * \left[ 1 - \frac{45}{250} \right] = 0,49$$

- Za prednapete nosače s injektiranim metalnim cijevima najmanja širina presjeka u vlačnoj zoni  $b_{w,nom}$  računa se (samo za  $V_{Rd,max}$ ):

$$b_{w,nom} = \begin{cases} b_w - 0,5 * \sum \emptyset & \text{za } \emptyset > b_w/8 \\ b_w & \text{za } \emptyset \leq b_w/8 \end{cases}$$

- o gdje je  $\emptyset$  vanjski promjer cijevi a  $\sum \emptyset$  se određuje za najnepovoljniji presjek.

$$\emptyset = 6,5 \text{ cm} > \frac{b_w}{8} = \frac{40}{8} = 5 \text{ cm}$$

$$b_{w,nom} = 40 - 0,5 * (6,5 + 6,5) = 33,5 \text{ cm}$$

$$z = 0,9 * d = 0,9 * 153 = 137,7 \text{ cm} \quad \text{ctg } \theta = 1,2 \quad (\theta = 40^\circ)$$

$$V_{Rd,max} = 1,125 * 33,5 * 137,7 * 0,49 * \frac{2,55}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 3189,03 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1552,5 \text{ kN} \leq V_{Rd,max} = 3189,03 \text{ kN}$$

### Proračun minimalne armature

- Najveći uzdužni razmak poprečne armature iz uvjeta najmanje poprečne armature:

$$\rho_{w,min} = 0,15 * \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = 0,15 * \frac{0,38}{43,48} = 0,0013$$

- Pretpostavljeni promjer  $\emptyset 10$ :

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$S_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 * m}{b_w * \rho_{w,min}} = \frac{0,785 * 2}{40 * 0,0013} = 30,19 \text{ cm}$$

- Najveći uzdužni razmak  $S_{l,max}$  iz odnosa  $V_{Ed}/V_{Rd,max}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{1033,31}{3189,03} = 0,32$$

$$S_{l,max} = \min\{0,75 * d; 30\} = \min\{0,75 * 153; 30\} = \min\{115; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Odabire se minimalna armatura  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$

- Proračun poprečne sile koju nose spone na razmaku 25cm:

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}}{S_{l,max}} * z * f_{ywd} * \cot \theta = \frac{0,785 * 2}{25} * 137,7 * 43,48 * 1,2 = 451,2 \text{ kN}$$

### Proračun potrebne armature

$$s = \frac{A_{sw}^{1*m*z*f_{ywd}}}{V_{Ed}} * \cot \theta = \frac{0,785*2*137,7*43,48}{1033,31} * 1,2 = 10,92 \text{ cm}$$

- Usvajamo  $s = 9 \text{ cm}$
- Najveća djelotvorna površina presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi),  
 $\cot \theta = 1$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sw,max} * f_{ywd}}{b_w * s} &= \frac{0,785 * 2 * 43,48}{40 * 9} = 0,2 \leq \frac{1}{2} * \frac{\alpha_{cw} * v_1 * f_{cd}}{\sin \alpha} \\ &= \frac{1}{2} * \frac{1,125 * 0,49 * 2,55}{1} = 0,7 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

### Uzdužna armatura u hrptu za grede visoke 1m ili više

$$A_s = \frac{k * k_c * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5$$

$$\sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w * (d - 2,5 * (h - d)) = 40 * (153 - 2,5 * (160 - 153)) = 5420 \text{ cm}^2$$

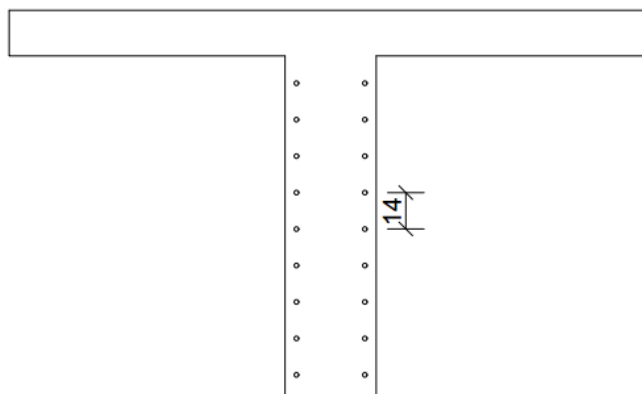
$$k_c = 1,0 \text{ za čisti vlak}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,38 \frac{kN}{cm^2}$$

- early thermal cracking:  $f_{ct,eff} = 0,3 \frac{kN}{cm^2}$

$$A_s = \frac{0,5 * 1 * 0,30 * 5420}{43,48} = 18,7 \text{ cm}^2$$

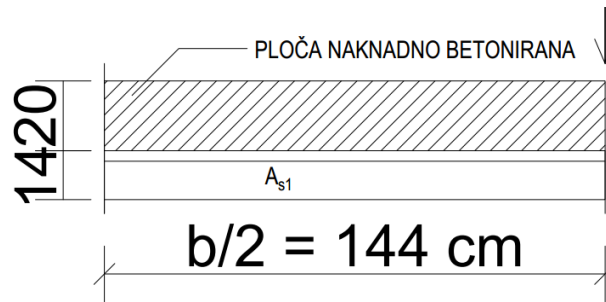
- Najveći razmak šipki je 200 mm
- Usvojeno 18Ø12 (20,34 cm<sup>2</sup>) na razmaku od 14 cm (u hrptu dva stupca po 9 šipki) kao na slici 50



Slika 50. Raspored armaturnih šipki u hrptu

### 3.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača

- Kritična faza – faza betoniranja ploče (ona još ne nosi)



Slika 51. Pojasnica glavnog nosača

$$d_1 = c + \frac{\emptyset}{2} = 2,5 + \frac{1}{2} = 3 \text{ cm}$$

$$d = h - d_1 = 14 - 3 = 11 \text{ cm}$$

#### Analiza opterećenja:

- Stalno:
  - o stalno od pojasnice  $0,14 * 25 = 3,5 \text{ kN/m'}$
  - o stalno od ploče  $0,2 * 25 = 5 \text{ kN/m'}$
  - o ukupno:  $g = 8,5 \text{ kN/m'}$
- Promjenjivo:  $F_q = 1,5 \text{ kN}$

$$M_g = 8,5 * \frac{1,44^2}{2} = 8,81 \text{ kNm/m'}$$

$$M_q = 1,5 * 1,44 = 2,16 \text{ kNm/m'}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 8,81 + 1,5 * 2,16 = 15,13 \text{ kNm/m'}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_p * d^2 * f_{cd}} = \frac{1513}{100 * 11^2 * 2,55} = 0,049 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,083 ; \zeta = \frac{z}{d} = 0,970$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{1513}{0,970 * 11 * 43,48} = 3,26 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

- Minimalna armatura:

$$A_{s1,min} = \max \left\{ 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t * d; 0,0013 * b_t * d \right\}$$

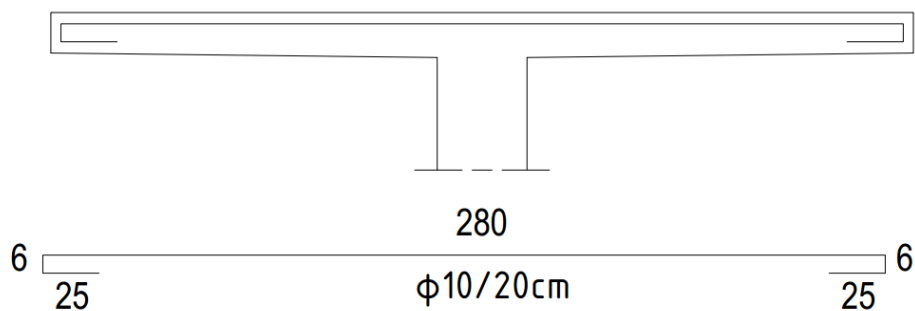
$$= \max \left\{ 0,26 \frac{3,8}{500} * 100 * 11; 0,0013 * 100 * 11 \right\} = \max \{2,17; 1,43\}$$

$$= 2,17 \text{ cm}^2$$

- Najveći razmaci glavne armature u ploči:

$$s_{max} = \min \{1,5h; 25\} = \min \{1,5 * 14; 25\} = \min \{21; 25\} = 21 \text{ cm}$$

- Usvajamo  $\emptyset 10/20 \text{ cm}$  ( $3,93 \text{ cm}^2/\text{m}'$ )

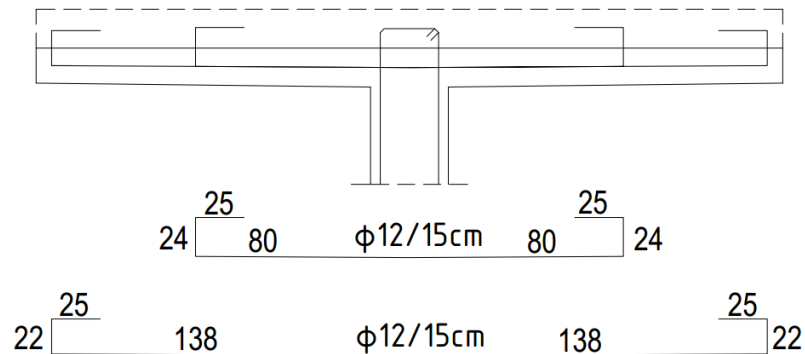


Slika 52. Armatura pojasnice glavnog nosača

- Na svim površinama konstrukcija betoniranih na mjestu treba iz konstrukcijskih razloga ugraditi armaturu od najmanje  $\emptyset 10/20 \text{ cm}$
- Uzdužna armatura u gornjoj zoni ploče na cijeloj širini mosta  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$
- Poprečna armatura u gornjoj zoni ploče  $\emptyset 12/15 \text{ cm}$
- Montažne uzdužne šipke u pojasnici  $\emptyset 12/20 \text{ cm}$



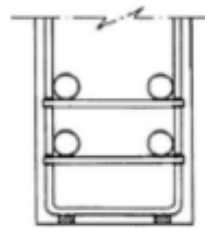
### Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom:



Slika 53. Armatura za sprezanje glavnog nosača s pločom

### Napomena:

- Kako ne bi došlo do pomicanja kabela (tj. zaštitnih cijevi) za vrijeme betoniranja zaštitnu cijev je potrebno vezati za podupirače ili postavljenu armaturu kao na slici 54
- Na taj način će se osigurati projektirana geometrija kabela



Slika 54. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje

### 3.8. Sile kočenja i ubrzanja

- $Q_{1k}$  treba primijeniti kao uzdužnu silu koja djeluje na površini kolnika

$$Q_{1k} = 0,6 * \alpha_{Q1} * (2 * Q_{1k}) + 0,10 * \alpha_{q1} * q_{1k} * w_1 * L$$

$$180\alpha_{Q1}(kN) \leq Q_{1k} \leq 900 (kN)$$

$$\alpha_{Q1} = 1, \alpha_{q1} = 1 \quad \text{faktori prilagodbe}$$

$$Q_{1k} = 300 kN$$

$$q_{1k} = 9 kN/m^2$$

$$w_1 = 3 \text{ m}$$

$$L = 25,2 \text{ m} \rightarrow \text{ukupna duljina rasponske konstrukcije}$$

$$Q_{1k} = 0,6 * 1 * (2 * 300) + 0,10 * 1 * 9 * 3 * 25,2 = 428,04 \text{ kN} \approx 428 \text{ kN}$$

### 3.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji

- Jednolika promjena temperature ovisi o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi koja može biti postignuta na mostu
- Kod konstrukcija koje imaju omogućen pomak rasponske konstrukcije ovakva promjena temperature uzrokuje promjenu duljine konstrukcije (elementa)
- Minimalna  $T_{min}$  i maksimalna  $T_{max}$  temperatura zraka u hladu se određuju u skladu s nacionalnim dodatkom za određeno poručje
- Za područje Rijeke:

$$T_{max} = 40^\circ\text{C}$$

$$T_{min} = -10^\circ\text{C}$$

- Vjerojatna (početna) proračunska temperatura mosta  $T_0$  je temperatura na kojoj je element ugrađen (ukoliko nema pravih podataka uzima se  $T_0 = 10^\circ\text{C}$ )
- Najveći raspon negativne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,neg} = T_0 - T_{e.min} = 10 - (-10) = 20^\circ\text{C}$$

- Najveći raspon pozitivne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,pos} = T_{e.max} - T_0 = 40 - 10 = 30^\circ\text{C}$$

- Ukupni raspon proračunskih temperatura mosta:

$$\Delta T_N = T_{e.max} - T_{e.min} = 40 - (-10) = 50^\circ\text{C}$$

- Kod proračuna pomaka za proračun ležaja i prijelaznih naprava najveći rasponi uzimaju se kao:

$$(\Delta T_{N,neg} + [20])^\circ\text{C} = 20 + 20 = 40^\circ\text{C}$$

$$(\Delta T_{N,pos} + [20])^\circ\text{C} = 30 + 20 = 50^\circ\text{C}$$

- Ako je temperatura ugradnje poznata onda je:  $(\Delta T_{N,neg} - [10])^\circ C$  i  $(\Delta T_{N,pos} + [10])^\circ C$

- Mjerodavno:  $\Delta T = 50^\circ C$

$$\Delta L = \alpha_T * \Delta T * L_0 = 1,10 * 10^{-5} * 50 * 24 = 0,0132 \text{ m} = 13,2 \text{ mm}$$

$$u_1 = \frac{\Delta L}{2} = \frac{13,2}{2} = 6,6 \text{ mm} \quad \text{pomak koji se ostvaruje na svakom od oslonaca}$$

- Pomak od kočne sile - silu dijelimo s brojem elastomernih ležajeva:

$$H_2 = \frac{Q_{1k}}{8} = \frac{428}{8} = 53,5 \text{ kN} \quad \text{po osloncu}$$

- Pretpostavljene dimenzije elastomernog ležaja su :  $a * b * t = 200 * 350 * 52 = 37 \text{ mm}$

$$u_2 = \frac{H_2 * T_e}{G * A} = \frac{53500 * 37}{1 * 200 * 350} = 28,28 \text{ mm}$$

$T_e = 37 \text{ mm}$  - nominalna visina elastomernih slojeva

$G = 1 \text{ N/mm}^2$  - modul posmika

$$A = a * b$$

- Ukupni pomak:  $u_{max} = u_1 + u_2 = 6,6 + 28,28 = 34,88 \text{ mm} \approx 35 \text{ mm}$

- Provjeravaju se tri uvjeta:

1. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,25 * u_{max}$

2. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,50 * u_{max}$

3. Uvjet:  $v_{xyd} = u_{max}$

- Minimalna sila koja se može javiti na osloncu:

$$N_{d,min} = \frac{g_1 * L_u}{2} = \frac{22,68 * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} = 285,77 \text{ kN}$$

$$N_d = \frac{(g_2 + \Delta g)L_u}{2} + V_p = \frac{(37,08 + 15) * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} + 525 = 1181,21 \text{ kN}$$

- Za svaki uvjet odabire se ležaj:

1. uvjet: za ležaj  $800 * 800 * 235$

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 13511 \text{ kN} > N_d = 1181,21 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 1794 \text{ kN} > N_{d,min} = 285,77 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet minimalne sile

2. uvjet: za ležaj 300 \* 400 \* 105

$$v_{xyd} = 38,5 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 1576 \text{ kN} > N_d = 1181,21 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 299 \text{ kN} > N_{d,min} = 285,77 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet minimalne sile

3. uvjet: za ležaj 200 \* 350 \* 52

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

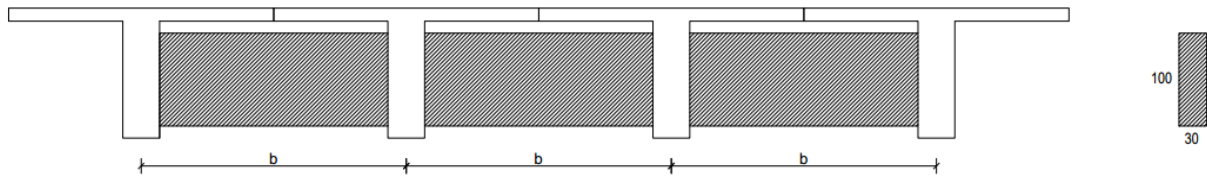
$$N_d = 1268 \text{ kN} > N_d = 1181,21 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 242 \text{ kN} < N_{d,min} = 285,77 \text{ kN}$$

- Odabran je ležaj dimenzija 200 \* 350 \* 52

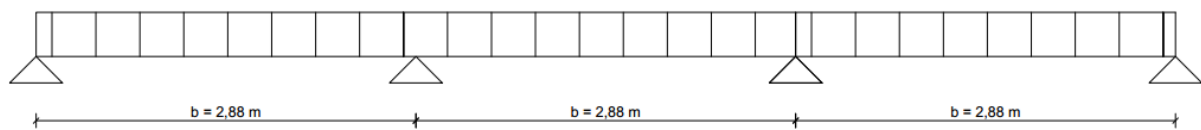
### 3.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača

- Poprečni nosač je oslonjen na hrptove glavnih nosača



Slika 55. Poprečni nosač

- za proračun reznih sila od vlastite težine koristimo pojednostavljenu shemu (kontinuirani nosač) prikazanu na slici 56



Slika 56. Kontinuirani nosač

#### Rezne sile od vlastite težine nosača:

##### Momenti savijanja:

- Iz tablica za proračun kontinuiranih nosača

$$M_g^{max} = 0,08 * g * b^2 = 0,08 * (0,30 * 1 * 25) * 2,88^2 = 4,98 \text{ kNm}$$

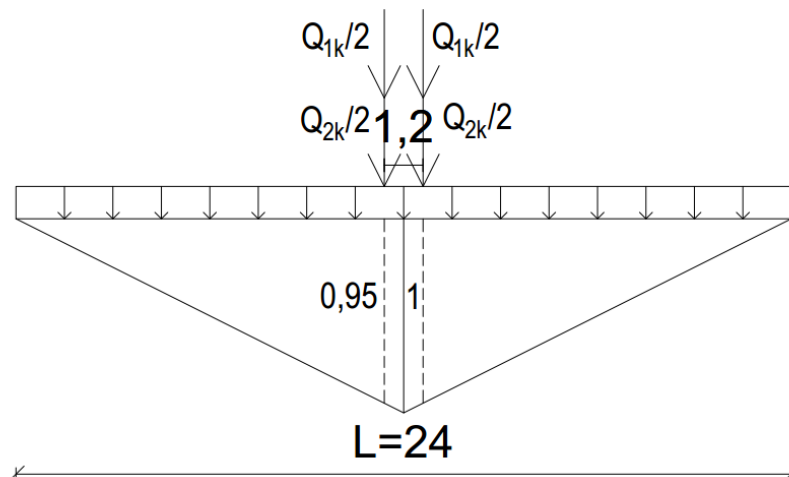
$$M_g^{min} = -0,1 * g * b^2 = -0,1 * (0,30 * 1 * 25) * 2,88^2 = -6,22 \text{ kNm}$$

##### Poprečna sila:

$$V_g = 1,1 * g * b = 1,1 * (0,30 * 1 * 25) * 2,88 = 23,76 \text{ kN}$$

### Rezne sile od pokretnog opterećenja:

- za poprečni nosač prvo razmatramo koliki dio opterećenja u uzdužnom smjeru prihvaća, to radimo uz pomoć utjecajne linije za poprečni nosač u uzdužnom smjeru vidljivu na slici 57



Slika 57. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru

$$\eta Q_{1k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{1k}}{2} = 2 * 0,95 * 150 = 285 \text{ kN}$$

$$\eta Q_{2k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{2k}}{2} = 2 * 0,95 * 100 = 190 \text{ kN}$$

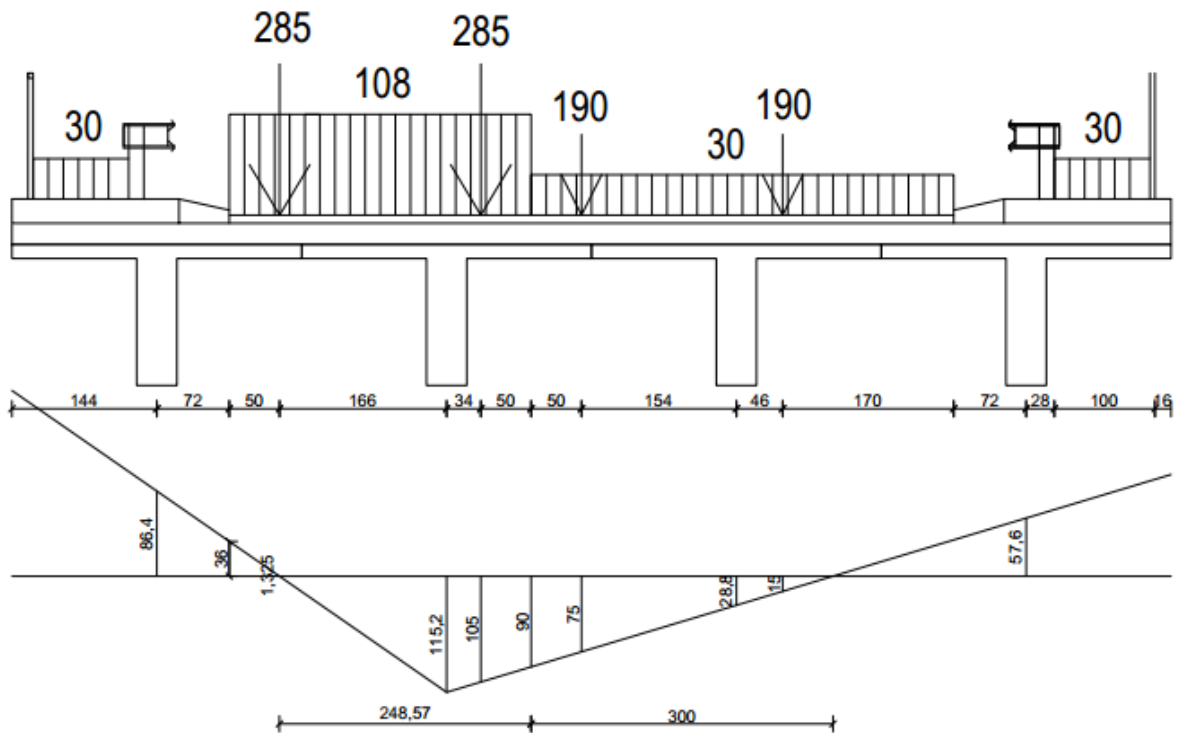
$$\eta q_{1k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{1k} = 12 * 9,0 = 108 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{2k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{2k} = 12 * 2,5 = 30 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{fk} = \eta q_{2k} = 30 \text{ kN/m'}$$

Rezne sile zatim računamo pomoću utjecajnih linija u poprečnom smjeru. Prometno opterećenje se postavlja u različite položaje kao na slikama 58, 59, 60 i 61 kako bi se dobila najveća vrijednost momenta savijanja na poprečnom nosaču.

## 1. Varijanta



Slika 58. Prva varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je postavljeno maksimalno lijevo
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za prvu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta_{Q1k} * (1,05 - 0,01) = 285 * 1,04 = 296,4 \text{ kNm}$$

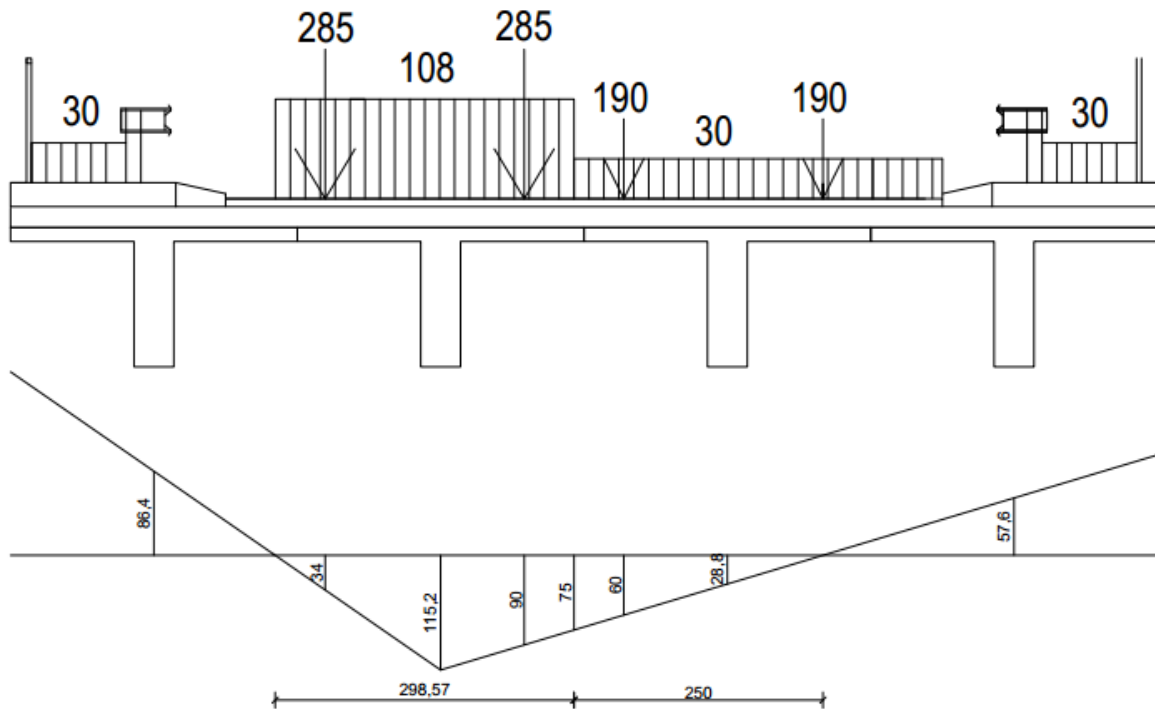
$$M_{Q2k}^{max} = \eta_{Q2k} * (0,75 + 0,15) = 190 * 0,9 = 171 \text{ kNm}$$

$$M_{q1k}^{max} = \eta_{q1k} * \left( \frac{0,9 + 1,152}{2} * 0,5 + \frac{1,152 * 1,9857}{2} \right) = 108 * 1,66 = 179,28 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta_{q2k} * \left( \frac{0,9}{2} * 3 \right) = 30 * 1,35 = 40,5 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 296,4 + 171 + 179,28 + 40,5 = 687,18 \text{ kNm}$$

## 2. Varijanta



Slika 59. Druga varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je pomaknuto u lijevo tako da niti jedna sila nije nad negativnom ordinatom
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za drugu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (0,9 + 0,34) = 285 * 1,24 = 353,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,75 + 1,152}{2} * 1,3 + \frac{1,152 * 1,7}{2} \right) = 108 * 2,22 = 239,76 \text{ kNm}$$

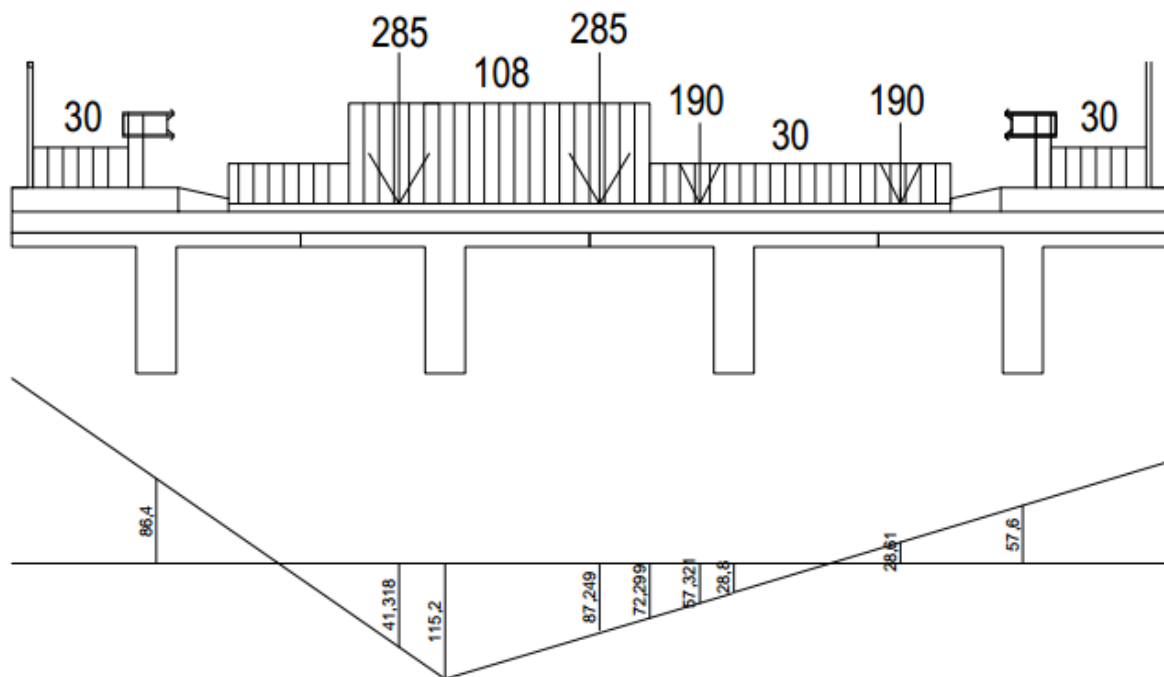
$$M_{Q2k}^{max} = \eta Q_{2k} * (0,6 + 0) = 190 * 0,6 = 114 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,75}{2} * 2,5 \right) = 30 * 0,94 = 28,2 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 353,4 + 239,76 + 114 + 28,2 \\ = 735,36 \text{ kNm}$$



### 3. Varijanta



Slika 60. Treća varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je pomaknuto u desno (2.trak uz desni rubnjak)
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za treću varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (0,87 + 0,41) = 285 * 1,28 = 364,8 \text{ kNm}$$

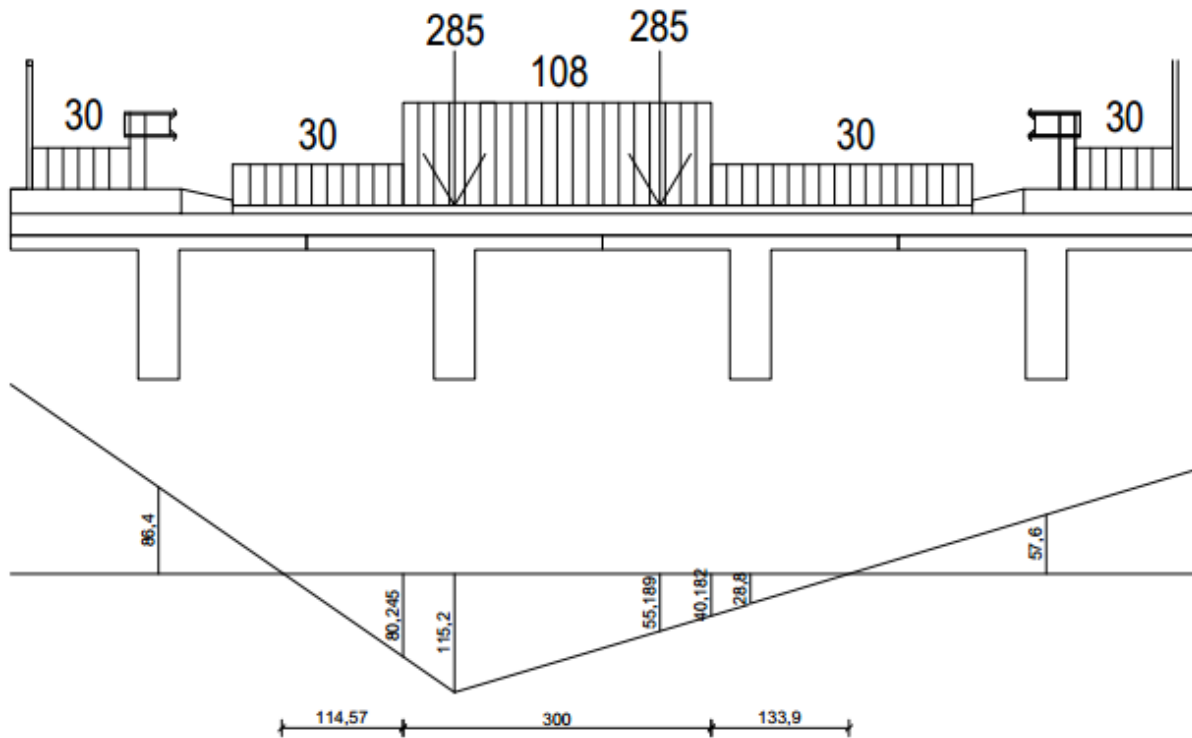
$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,72 + 1,152}{2} * 2,1 + \frac{1,152 * 0,9}{2} \right) = 108 * 2,48 = 267,84 \text{ kNm}$$

$$M_{Q2k}^{max} = \eta Q_{2k} * (0,57 - 0,286) = 190 * 0,28 = 53,2 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,72}{2} * 1,8 \right) = 30 * 0,65 = 19,5 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 364,8 + 267,84 + 53,2 + 19,5 \\ = 705,34 \text{ kNm}$$

#### 4. Varijanta



Slika 61. Četvrta varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje je smješteno u položaj da je jedan kotač opt. na 1. pt iznad maksimalne ordinate (2.pt nema)
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za četvrtu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (1,152 + 0,552) = 285 * 1,704 = 485,64 \text{ kNm}$$

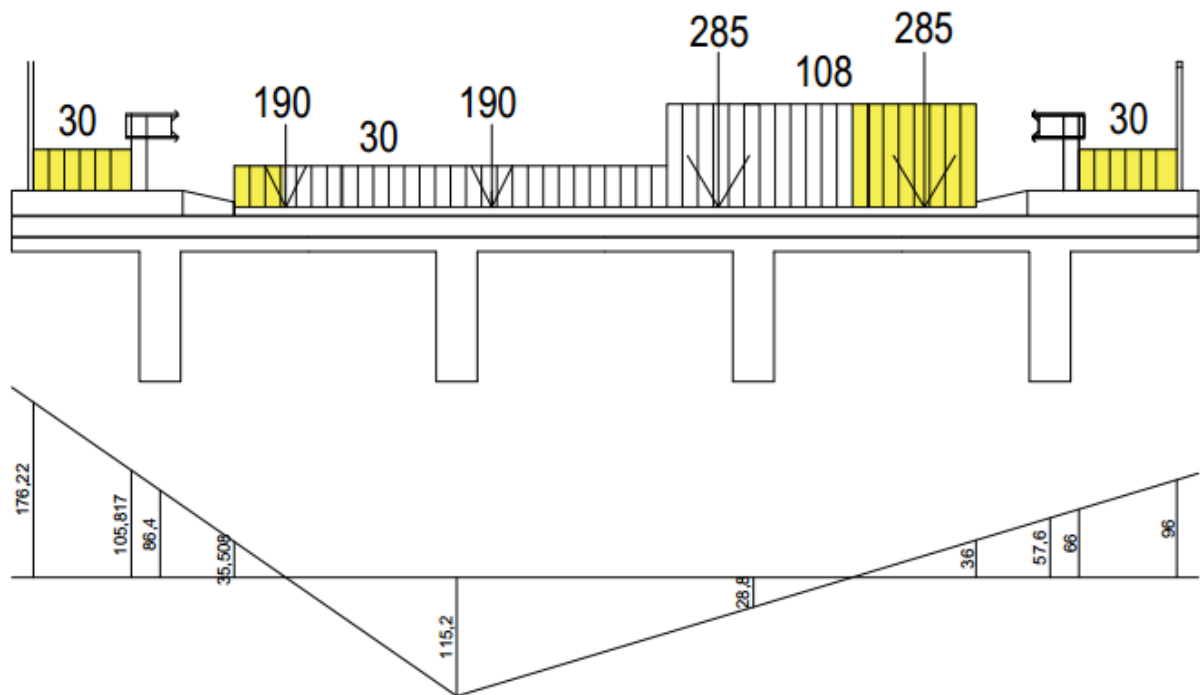
$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,802 + 1,152}{2} * 0,5 + \frac{1,152 + 0,402}{2} * 2,5 \right) = 108 * 2,43 = 262,44 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{1,1457}{2} * 0,802 + 0,402 * \frac{1,339}{2} \right) = 30 * 0,73 = 21,9 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 485,64 + 262,44 + 21,9 = 769,98 \approx 770 \text{ kNm}$$

- Mjerodavna je četvrta varijanta

## Određivanje minimalnih momenata



Slika 62. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment

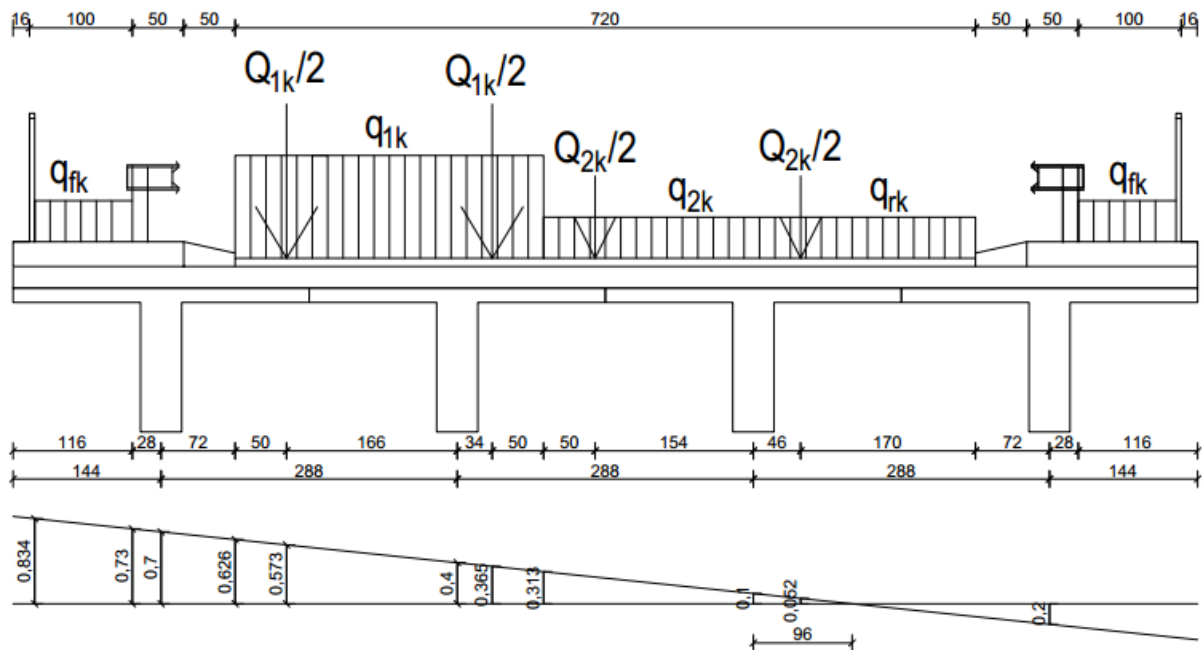
$$M_{q1k}^{\min} = \eta_{q1k} * \left( \frac{-0,36}{2} * 1,2 \right) = 108 * (-0,216) = -23,33 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{\min} = \eta_{q2k} * \left( \frac{-0,36}{2} * 0,51 \right) = 30 * (-0,0918) = -2,75 \text{ kNm}$$

$$M_{qfk}^{\min} = \eta_{qfk} * \left( \frac{-1,76 - 1,06}{2} * 1,0 + \frac{-0,66 - 0,96}{2} * 1,0 \right) = 30 * (-2,22) \\ = -66,6 \text{ kNm}$$

$$M_p^{\min} = M_{q1k}^{\min} + M_{q2k}^{\min} + M_{qfk}^{\min} = -23,33 - 2,75 - 66,6 = -92,68 \text{ kNm}$$

## Određivanje poprečne sile:



Slika 63. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (0,573 + 0,365) = 285 * 0,938 = 267,33 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (0,26 + 0,052) = 190 * 0,312 = 59,28 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,626 + 0,313}{2} * 3 \right) = 108 * 1,4085 = 152,12 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,313}{2} * (2,0375 + 0,9853) \right) = 30 * 0,469 = 14,07 \text{ kN}$$

$$V_p = V_{Q_{1k}} + V_{Q_{2k}} + V_{q_{1k}} + V_{q_{2k}} = 267,33 + 59,28 + 152,12 + 14,07 = 492,8 \text{ kN}$$

### Dimenzioniranje poprečnog nosača:

- Beton C40/50

$$f_{cd} = \frac{4,0}{1,5} = 2,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Čelik B500B

- Donja zona:

$$M_g = 4,98 \text{ kNm}$$

$$M_p = 770 \text{ kNm}$$

- Gornja zona:

$$M_g = -6,22 \text{ kNm}$$

$$M_p = -92,68 \text{ kNm}$$

- Predlaže se gornju zonu armirati s 1/3 armature iz donje zone

- Poprečne sile:

$$V_g = 23,76 \text{ kN}$$

$$V_p = 492,8 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 1,35 * M_g + 1,35 * M_p = 1,35 * 4,98 + 1,35 * 770 = 1046,22 \text{ kNm}$$

$$\approx 1046 \text{ kNm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d = 100 - 7 = 93 \text{ cm}$$

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{104600}{30 * 93^2 * 2,67} = 0,151 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,206; \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,914$$

$$A_{s1} = \frac{M_{sd}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{104600}{0,914 * 93 * 43,48} = 28,3 \text{ cm}^2$$

- Minimalna armatura:

$$A_{s1,min} = \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d; 0,0013 * b * d \right\}$$

$$= \max \left\{ 0,26 * \frac{3,5}{500} * 30 * 93; 0,0015 * 30 * 93 \right\} = \max\{5,08; 4,19\}$$

$$= 5,08 \text{ cm}^2$$

- Odabire se 8Ø22 (30,4 cm<sup>2</sup>)
- Gornju zonu armiramo s trećinom armature iz donje zone, odabire se 4Ø18 (10,17 cm<sup>2</sup>)

Osnovna duljina sidrenja:

- Gornja zona (loši uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{0,7 * f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{0,7 * 3,7} = 42 * \emptyset$$

- o Za Ø18:  $l_{b,rqd} = 42 * 18 = 75,6 \approx 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{3,7} = 29,38 * \emptyset$$

- o Za Ø22:  $l_{b,rqd} = 29,38 * 22 = 64,6 \approx 65 \text{ cm}$

Potrebna duljina sidrenja na osloncu:

- Za slučaj sidrenja ravnom šipkom  $\alpha_a = 1,0$
- Gornja zona:

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø18  $l_{b,net} = 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø22  $l_{b,net} = 65 \text{ cm}$

Duljina nastavljanja preklapanjem ( $\alpha_1 = 2$ ):

- Gornja zona:

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 18$   $l_s = 152 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 22$   $l_s = 130 \text{ cm}$

**Dimenzioniranje na poprečne sile:**

$$V_{sd} = 1,35 * V_g + 1,35 * V_p = 1,35 * 23,76 + 1,35 * 492,8 = 697,36 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd1} = (\tau_{Rd} * k * (1,2 + 40 * \rho_l) + 0,15 * \sigma_{cp}) * b_{w,nom} * d$$

$$\tau_{Rd} = 0,041 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,67 = 0,27 \geq 1$$

○ Uvjet ne zadovoljava:  $k = 1$

$$\rho_l = \frac{A_{s1}}{b * d} = \frac{28,3}{30 * 93} = 0,01 < 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd1} = (0,041 * 1 * (1,2 + 40 * 0,01)) * 30 * 93 = 183,02 \approx 183 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 697,36 \text{ kN} > V_{Rd1} = 183 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova:

$$V_{Rd2} = 0,5 * v * f_{cd} * b_w * z$$

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} = 0,7 - \frac{40}{200} = 0,5 \geq 0,5$$

○ Uvjet zadovoljava

$$z \approx 0,9 * d = 0,9 * 93 = 83,7 \text{ cm}$$

$$V_{Rd2} = 0,5 * 0,5 * 2,67 * 30 * 83,7 = 1676,09 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 697,36 \text{ kN} < V_{Rd2} = 1676,09 \text{ kN}$$

- Nosivost tlačnih štapova zadovoljava

Proračun spona:

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot f_{ywd} \cdot m \cdot z}{V_{sd} - V_{Rd1}} = \frac{0,785 \cdot 43,48 \cdot 2 \cdot 83,7}{697,36 - 183} = 11,11 \text{ cm}$$

- Proračun maksimalnog razmaka spona iz uvjeta najmanjeg postotka armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_{w,min}$ )

$$\rho_{w,min} = 0,0013 \quad \text{za } f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw,uk}}{s_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha}$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min} \cdot \sin \alpha} = \frac{0,785 \cdot 2}{30 \cdot 0,0013 \cdot 1} = 40,26 \text{ cm}$$

- Najveći dopušteni razmak spona:

$$\frac{V_{sd}}{V_{Rd2}} = \frac{697,36}{1676,09} = 0,42$$

$$s_{l,max} = \min\{0,6 \cdot d; 30\} = \min\{0,6 \cdot 93; 30\} = \min\{55,8; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Usvajamo minimalnu armaturu  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$  duž

Proračun poprečne sile  $V_{Rd,s}^{\min}$  koju nose minimalne spona  $s_{l,max} = 25 \text{ cm}$ :

$$V_{Rd,s}^{\min} = \frac{A_{sw}}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg } \theta = \frac{0,785 \cdot 2}{25} \cdot 83,7 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 274 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature:

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot \text{ctg } \theta$$



$$s = \frac{0,785 \cdot 2 \cdot 83,7 \cdot 43,48}{918,14} \cdot 1,2 = 8,47 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona  $s = 10 \text{ cm}$ .

Najveća djelotvorna ploština presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi) za  $\text{ctg}\theta = 1$ :

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\sin \alpha}$$

$$\frac{0,785 \cdot 2 \cdot 43,48}{30 \cdot 10} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1 \cdot 0,48 \cdot 2,55}{1}$$

$$0,228 < 0,612$$

Usvaja se  $\phi 10/10 \text{ cm}$  duž cijelog poprečnog nosača.

### Uzdužna armatura u hrptu:

(vlak od unutarnjih sila – skupljanje i puzanje, promjene temperature, early thermal cracking )

$$A_s = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5, \quad \sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w \cdot (d - 2,5(h - d)) = 30 \cdot (93 - 2,5(100 - 93)) = 3020 \text{ cm}^2$$

Ploštinu možemo smanjiti za djelotvornu ploštinu vlačne zone!

$$k_c = 1,0 \quad \text{za čisti vlak}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_s = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 0,41 \cdot 3020}{43,48} = 15,24 \text{ cm}^2$$

Najveći razmak šipki je 200 mm pa je usvojeno:

18 $\phi$ 10 (15,7 cm<sup>2</sup>) na razmaku 16 cm, složeno u dva reda po 9 šipki, vertikalno u hrptu.

## 4. DIMENZIONIRANJE GREDNOG REBRASTOG MOSTA SA 5 GLAVNIH NOSAČA

### 4.1. Osnovna geometrija

Širina konstrukcije:

$$\begin{aligned} s_k &= \text{širina kolnika} + \text{širina odbojnika} + \text{širina pješačkih staza} \\ &\quad + \text{širina od ograde do ruba konstrukcije} \\ &= 720 + 2 * 100 + 2 * 100 + 2 * 20 = 1160 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Broj glavnih nosača (prednapeti T-presjeci):  $n = 5$
- Širina glavnog nosača:

$$b = \frac{s_k}{n} = \frac{1160}{5} = 232 \text{ cm}$$

- Raspon konstrukcije:  $L = 24 \text{ m}$
- Visina glavnog nosača ( $\frac{L}{14} \leq h \leq \frac{L}{20}$ ):

$$h = \frac{L}{16} = \frac{24}{16} = 1,5 \text{ m} \quad ; \quad h = \frac{L}{20} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ m}$$

- o Usvojena visina nosača:  $h = 1,3 \text{ m}$
- Širina hrpta T-presjeka:  $b_w = 40 \text{ cm}$
- Debljina pojasnice T-presjeka:
  - o Određuje se iz uvjeta da je sudjelujuća širina jednaka stvarnoj širini:

$$b = b'$$

$$b' = b_w + 20 * h_2$$

$$h_2 = \frac{b' - b_w}{20} = \frac{232 - 40}{20} = 9,6 \text{ cm}$$

$$h_2 \geq 9,6 \text{ cm}$$

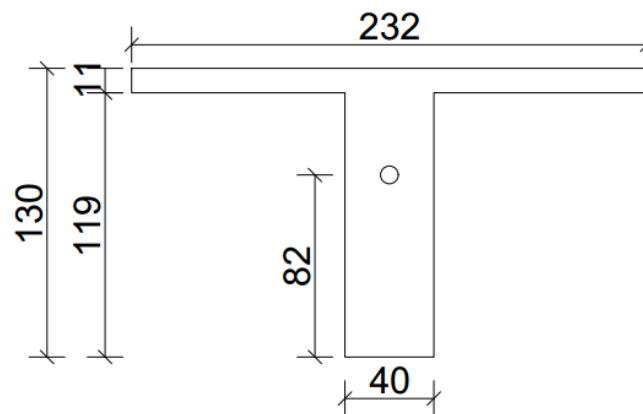
- o Usvajamo  $h_2 = 11 \text{ cm}$
- Visina hrpta:  $h_1 = h - h_2 = 130 - 11 = 119 \text{ cm}$

Usvojene dimenzije glavnog nosača bez ploče:

- Visina glavnog nosača,  $h = 130$  cm
- Širina glavnog nosača,  $b = 232$  cm
- Debljina hrpta,  $b_w = 40$  cm
- Debljina pojasnice T-presjeka,  $h_2 = 11$  cm
- Visina hrpta,  $h_1 = 119$  cm

#### 4.1.1. Geometrijske karakteristike presjeka

a) Presjek bez ploče

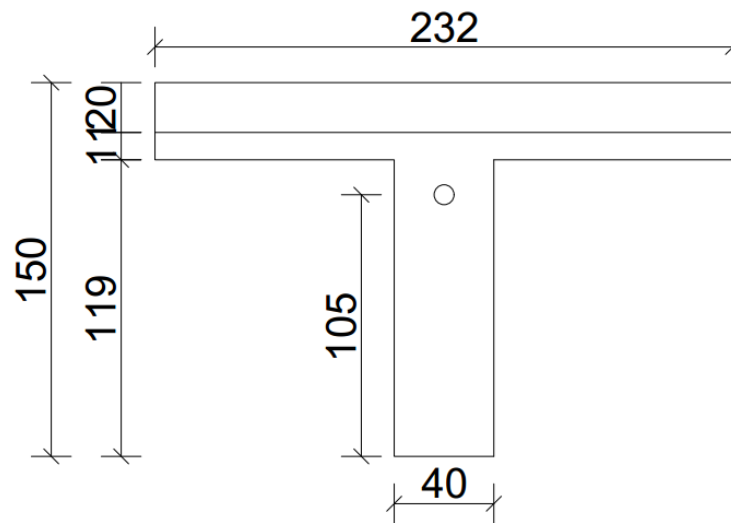


Slika 64. Poprečni presjek glavnog nosača bez ploče

Tablica 13. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka bez ploče

Presjek bez ploče		
$A'$	0,7312	m <sup>2</sup>
$I'$	0,203	m <sup>4</sup>
$y_T' = y_d'$	0,82	m
$y_g' = h - y_d'$	0,48	m
$W_d' = I' / y_d'$	0,248	m <sup>3</sup>
$W_g' = I' / y_g'$	0,423	m <sup>3</sup>
$k_d = W_g' / A'$	0,579	m
$k_g' = W_d' / A'$	0,339	m

b) Presjek s pločom

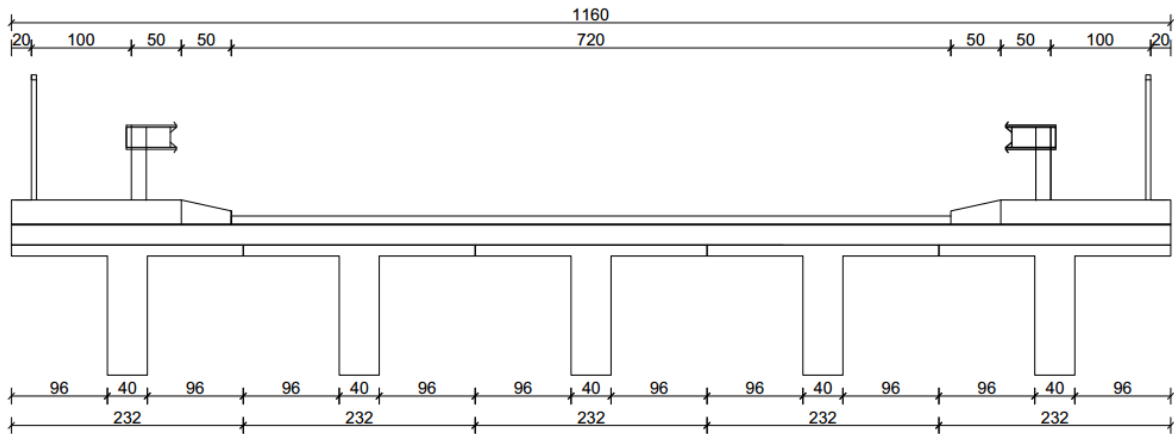


Slika 65. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom

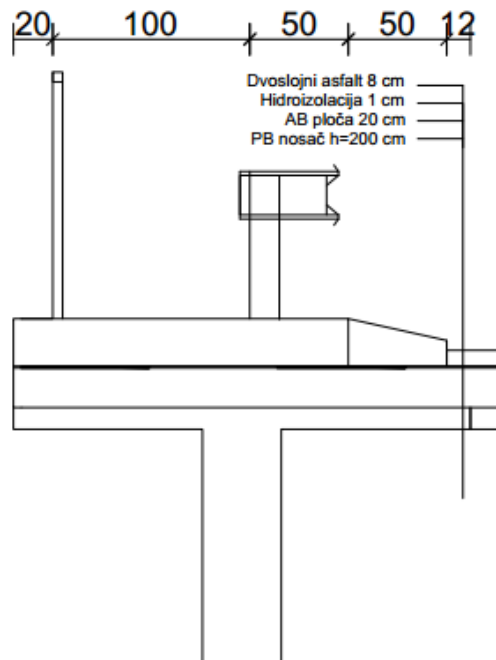
Tablica 14. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka s pločom

Presjek s pločom		
$A''$	1,1952	m <sup>2</sup>
$I''$	0,311	m <sup>4</sup>
$y_T''=y_d''$	1,05	m
$y_g''=h-y_d''$	0,45	m
$W_d''=I''/y_d''$	0,296	m <sup>3</sup>
$W_g''=I''/y_g''$	0,691	m <sup>3</sup>
$k_d''=W_g''/A''$	0,578	m
$k_g''=W_d''/A''$	0,248	m

## 4.2. Analiza opterećenja



Slika 66. Poprečni presjek mosta s 5 glavnih nosača



Slika 67. Poprečni presjek glavnog rubnog nosača

### 4.2.1. Stalno opterećenje

- a) Vlastita težina nosača bez ploče

$$g_1 = A' * \gamma_C = 0,7312 * 25 = 18,28 \text{ kN/m'}$$

- b) Vlastita težina nosača s pločom

$$g_2 = A'' * \gamma_C = 1,1952 * 25 = 29,88 \text{ kN/m'}$$

- c) Vlastita težina gornjih slojeva na srednjem nosaču

- Površina hidroizolacije i asfalta:  $A_{hidro+asf} = (0,01 + 0,08) * 2,875 = 0,26$

$$g_s = A_{hidro+asf} * \gamma_{as} = 0,26 * 18 = 4,7 \text{ kN/m'}$$

d) Vlastita težina gornjih slojeva na rubnom nosaču

- Hidroizolacija  $0,01 \cdot 2,32 \cdot 18 = 0,4 \text{ kN/m'}$
- Pješačka staza + rubnjak  $0,462 \cdot 24 = 11,1 \text{ kN/m'}$
- Asfalt  $0,08 \cdot 0,72 \cdot 18 = 1 \text{ kN/m'}$
- Odbojna ograda 0,4
- Vijenac 1,5 kN/m'
- Pješačka ograda 0,4 kN/m'

$g_r = 14,8 \text{ kN/m'}$

#### 4.2.2. Promjenjivo opterećenje

- Analiza utjecaja prometnog opterećenja izvodit će se prema modelu 1 sukladno normi EN na isti način kao u poglavlju 2.2.2.
- Određivanje broja prometnih trakova, njihove širine i preostale širine na kolniku izvodi se na isti način, te prema istoj tablici kao u poglavlju 2.2.2.
- Širina kolnika:  $w = 7,20 \text{ m}$
- Širina prometne trake:  $w/2 = 7,2/2 = 3 \text{ m}$
- Broj prometnih traka:  $n = 2$
- Preostala širina kolnika: 1,2 m

#### 4.3. Određivanje reznih sila

- Za stalno opterećenje sustav funkcionira kao jednostavne grede složene jedna do druge
- Za prometno opterećenje sustav funkcionira kao roštiljna konstrukcija

### 4.3.1. Moment savijanja

a) Moment savijanja za stalno opterećenje

$M_{g_1}$  – moment na nosaču bez ploče

$$M_{g_{1,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 987,12 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{1,3}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{g_1 * l^2}{8} = \frac{18,28 * 24^2}{8} = 1316,16 \text{ kNm}$$

$M_{g_2}$  – moment na nosaču s pločom i opremom

$$M_{g_{2,1}}(L) = 0 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{2,2}}\left(\frac{L}{4}\right) = 2412,72 \text{ kNm}$$

$$M_{g_{2,3}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{(g_2 + g_r) * l^2}{8} = \frac{(29,88 + 14,8) * 24^2}{8} = 3216,96 \text{ kNm}$$

b) Moment savijanja za promjenjivo opterećenje

- Poprečna razdioba prikazana na slici 68 napravljena je za nosač 1 (krajnji lijevi) koji je najopterećeniji, za ostale nosače nije
- Na taj je način određeno koliki dio ukupnog prometnog opterećenja u poprečnom smjeru prihvaća navedeni nosač
- Poprečni utjecaji  $\eta$  izračunati su za svako pojedino polje
- Prometna opterećenja:

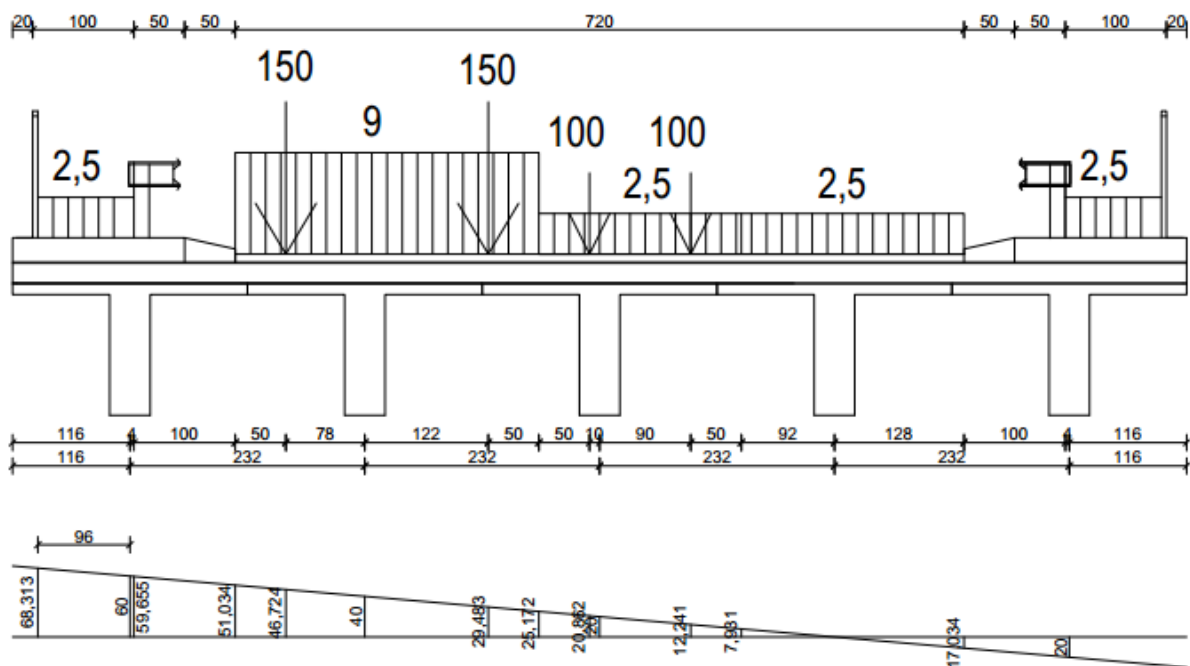
$$Q_{1k} = 300 \text{ kN (težina jedne osovine)}$$

$$Q_{2k} = 200 \text{ kN (težina jedne osovine)}$$

$$q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{fk} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$



Slika 68. Prometno opterećenje i poprečna razdioba rubnog nosača

- Sva kontinuirana opterećenja koja djeluju povoljno se zanemaruju
- U obzir se uzimaju samo cjelovita dvoosovinska opterećenja koja djeluju nepovoljno
- Poprečni utjecaji za nosač 1:

$$\eta Q_{1k} = (0,467 + 0,295) * \frac{Q_{1k}}{2} = 0,762 * 150 = 114,3 \text{ kN}$$

$$\eta Q_{2k} = (0,209 + 0,122) * \frac{Q_{2k}}{2} = 0,331 * 100 = 33,1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \eta Q_{3k} &= (0,036 - 0,136) * \frac{Q_{2k}}{2} = -0,1 * 50 \\ &= -0,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\eta q_{1k} = \left( \frac{0,510 + 0,252}{2} * 3 \right) * q_{1k} = 1,143 * 9,0 = 10,3 \text{ kN}$$

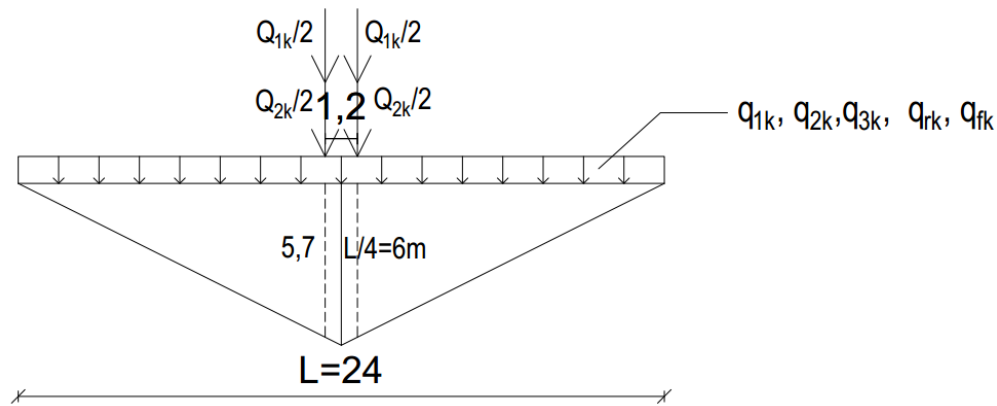
$$\eta q_{2k} = \left( \frac{0,252 + 0,079}{2} * 3 \right) * q_{2k} = 0,497 * 2,5 = 1,2 \text{ kN}$$

$$\eta q_{3k} = \left( \frac{0,079}{2} * 0,92 \right) * q_{2k} = 0,036 * 2,5 = 0,09 \text{ kN}$$

$$\eta q_{fk} = \left( \frac{0,683 + 0,597}{2} * 1 \right) * q_{fk} = 0,64 * 2,5 = 1,6 \text{ kN}$$



- Poprečni utjecaji kombinirani su s uzdužnim utjecajima za moment savijanja
- Opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji za slobodno oslonjenu gredu kao što je prikazano na slici 69 za polovicu raspona te na slici 70 za četvrtinu raspona



Slika 69. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za polovicu raspona

$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * 2 * 5,7 = 114,3 * 11,4 = 1303,02 \text{ kNm}$$

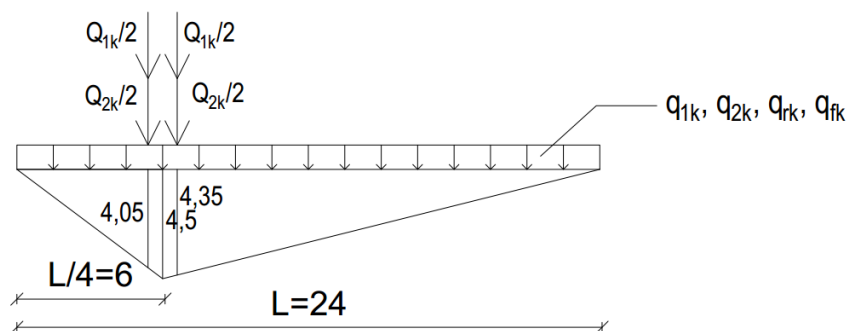
$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * 2 * 5,7 = 33,1 * 11,4 = 377,34 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 6 * \frac{24}{2} = 10,3 * 72 = 741,6 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 6 * \frac{24}{2} = 1,2 * 72 = 86,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{3k}} = \eta q_{3k} * 6 * \frac{24}{2} = 0,09 * 72 = 6,48 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 6 * \frac{24}{2} = 1,6 * 72 = 115,2 \text{ kNm}$$



Slika 70. Utjecajna linija za moment savijanja za slobodno oslonjenu gredu za četvrtinu raspona

$$M_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (4,05 + 4,35) = 114,3 * 8,4 = 960,1 \text{ kNm}$$

$$M_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (4,05 + 4,35) = 33,1 * 8,4 = 278,0 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 10,3 * 27 = 278,1 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 1,2 * 27 = 32,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{3k}} = \eta q_{3k} * 4,5 * \frac{24}{4} = 0,09 * 27 = 2,4 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 4,5 * \frac{24}{4} = 1,6 * 27 = 43,2 \text{ kNm}$$

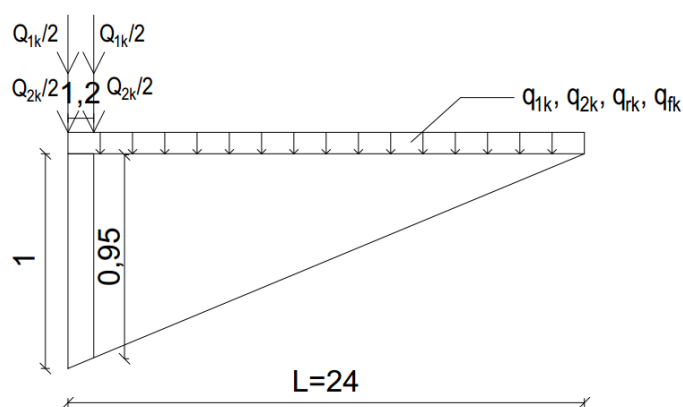
### 4.3.2. Poprečne sile

a) Stalno opterećenje

$$V_g = \frac{(g_2 + g_r) * l}{2} = \frac{(29,88 + 14,8) * 24}{2} = 536,16 \text{ kN}$$

b) Promjenjivo opterećenje

- Poprečni utjecaj isti je kao i za momente
- Za uzdužni utjecaj opterećenje je postavljeno u najnepovoljniji položaj na utjecajnoj liniji slobodno oslonjene grede
- Osovine su postavljene na kraj nosača dok je kontinuirano opterećenje raspoređeno po cijeloj dužini nosača kao što je prikazano na slici 71



Slika 71. Utjecajna linija za poprečnu silu na osloncu

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (1 + 0,95) = 114,3 * 1,95 = 222,89 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (1 + 0,95) = 33,1 * 1,95 = 64,55 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * 1 * \frac{24}{2} = 10,3 * 12 = 123,6 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * 1 * \frac{24}{2} = 1,2 * 12 = 14,4 \text{ kN}$$

$$V_{q_{3k}} = \eta q_{3k} * 1 * \frac{24}{2} = 0,09 * 12 = 1,08 \text{ kN}$$

$$V_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * 1 * \frac{24}{2} = 1,6 * 12 = 19,2 \text{ kN}$$

#### 4.4. Određivanje potrebnog broja i vrste kabela za prednapinjanje

- Razredi izloženosti prema EN 206-1:
  - Okolina s prisutnošću soli za odmrzavanje i zamrzavanja:
  - XD3 – korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora – min C35/45
  - XF4 – korozija betona uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem sa sredstvom za odmrzavanje ili morskom vodom – min C30/37
- Odabrana je klasa betona: C45/55
- Za razred izloženosti XD3 i konstrukcijske elemente od prednapetog betona s naknadnim prednapinjanjem:
  - $w_{max} = 0,2mm$  za karakteristične kombinacije djelovanja (iz Tablice 4. u poglavlju 2.4.)

Česta kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$M_{Ed} \left( \frac{L}{4} \right) = M_{g2} + 0,75 * M_{Q_{1k}} + 0 * M_{Q_{2k}} + 0 * M_{q_{1k}} + 0 * M_{q_{2k}} + 0 * M_{q_{3k}} + 0 * M_{q_{fk}} = 2412,72 + 0,75 * 960,1 = 3132,76 \approx 3133 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} \left( \frac{L}{2} \right) = M_{g2} + 0,75 * M_{Q_{1k}} + 0 * M_{Q_{2k}} + 0 * M_{q_{1k}} + 0 * M_{q_{2k}} + 0 * M_{q_{3k}} + 0 * M_{q_{fk}} = 3216,96 + 0,75 * 1303,02 = 4194,23 \approx 4194 \text{ kNm}$$

- Za razred izloženosti XD3 i prednapinjanje sa sprezanjem ostvareno naknadnim injektiranjem: razred širenja pukotina i rasterećenja C

Karakteristična kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\Psi_{0,i} * Q_{k,i}) \right]$$

$$\begin{aligned} M'_{Ed} \left( \frac{L}{4} \right) &= M_{g2} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{q3k} \\ &\quad + 0,4 * M_{qfk} \\ &= 2412,72 + 960,1 + 0,75 * 278 + 0,4 * 278,1 + 0,4 * 32,4 + 0,4 \\ &\quad * 2,4 + 0,4 * 43,2 = 3723,8 \text{ kNm} \end{aligned}$$

- Usvajamo:  $M_{dek} = 3724 \text{ kNm}$

$$\begin{aligned} M'_{Ed} \left( \frac{L}{2} \right) &= M_{g2} + M_{Q1k} + 0,75 * M_{Q2k} + 0,4 * M_{q1k} + 0,4 * M_{q2k} + 0,4 * M_{q3k} \\ &\quad + 0,4 * M_{qfk} \\ &= 3216,96 + 1303,02 + 0,75 * 377,34 + 0,4 * 741,6 + 0,4 * 86,4 \\ &\quad + 0,4 * 6,48 + 0,4 * 115,2 = 5182,86 \text{ kNm} \end{aligned}$$

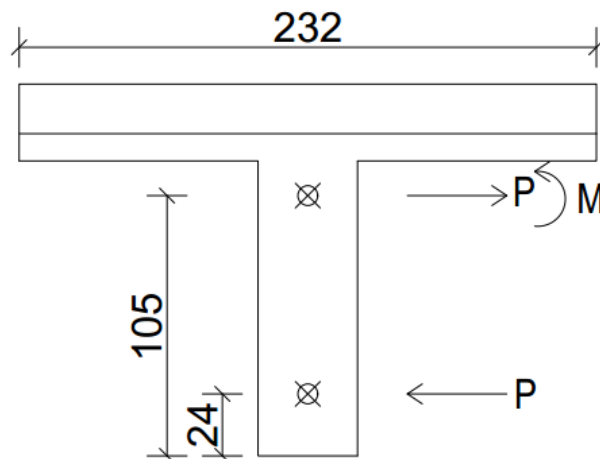
- Usvajamo:  $M_{dek} = 5183 \text{ kNm}$

Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno:

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} - \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

- Predznak + → tlak
- Predznak - → vlak

- U proračun se uzima sila prednapinjanja u kablovima za vrijeme eksploatacije  $P_{m\infty}$  i karakteristike T-presjeka s pločom kao što je prikazano na slici 72



Slika 72. Poprečni presjek glavnog nosača s pločom i težištima

- Pretpostavljamo  $\xi = 24 \text{ cm}$

$$y_{cp}'' = y_d'' - \xi = 105 - 24 = 81 \text{ cm}$$

$$P_{m\infty} > \frac{M_{dek}}{y_{cp}'' + k_g''} = \frac{5183}{0,81 + 0,248} = 4898,87 \text{ kN}$$

- Potrebna sila u kabelima za trajno stanje – u eksploataciji (nakon svih gubitaka) mora biti:  $P_{m\infty} > 4899 \text{ kN}$

#### 4.4.1. Određivanje potrebne ploštine kabela za prednapinjanje

- Kabeli za prednapinjanje koji se koriste su EN 10138-3-Y1860S
- Nazivna vlačna čvrstoća im iznosi  $f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$

Potrebna količina kabela za prednapinjanje:

$$A_{pot} = \frac{P_{m0}}{\sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} \text{ uz uvjet } \sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$\sigma_p$  – naprezanje u kabelu nakon početnih gubitaka

$\delta$  – početni gubici u kabelima

$\sigma_{p0}$  dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,8 * f_{pk} = 0,8 * 186 = 148 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,9 * f_{p0,1k} = 0,9 * 0,86 * 186 = 144 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{p0} = 144 \text{ kN/cm}^2$$

$\sigma_{pm0}$  maksimalno naprezanje nakon otpuštanja preše

$$\sigma_{pm0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 * f_{pk} = 0,75 * 186 = 139,5 \text{ kN/cm}^2 \\ 0,85 * f_{p0,1k} = 0,85 * 0,86 * 186 = 136 \text{ kN/cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

Procjena gubitaka u kabelima

- Početni gubitci 10-20% → usvajamo 10% →  $\delta = 0,9$
- Vremenski gubitci 10-20% → usvajamo 15% →  $m = 0,85$

$P_{m0} = P_0 * \delta$  - sila u kabelima nakon početnih gubitaka

$P_{m\infty} = P_{m0} * m$  - sila u kabelima nakon ukupnih gubitaka (u eksploataciji)

$$A_{pot} \geq \frac{P_{m\infty}}{m * \sigma_p}$$

$$\sigma_p = \delta * \sigma_{p0} = 0,9 * 144 = 129,6 \leq \sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_p = 129,6 \text{ kN/cm}$$

$$\sigma_{pm0} = 136 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_p \leq \sigma_{pm0}$$

$$A_{pot} \geq \frac{4899}{0,85 * 129,6} = 44,46 \text{ cm}^2$$

- Odabrani sustav prednapinjanja je DYWIDAG
- Površina jednog užeta kabela (za kabele 68XX):  $1,5 \text{ cm}^2$

$$\text{Broj užadi} > \frac{\text{potrebna površina}}{\text{površina jednog užeta}} = \frac{44,46}{1,5} = 29,64$$

- Usvojeni broj užadi:  $n_z > 30$

## Zaštitni sloj betona

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 + 10 = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

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

$$c_{min,b} = \emptyset = 10 \text{ mm}$$

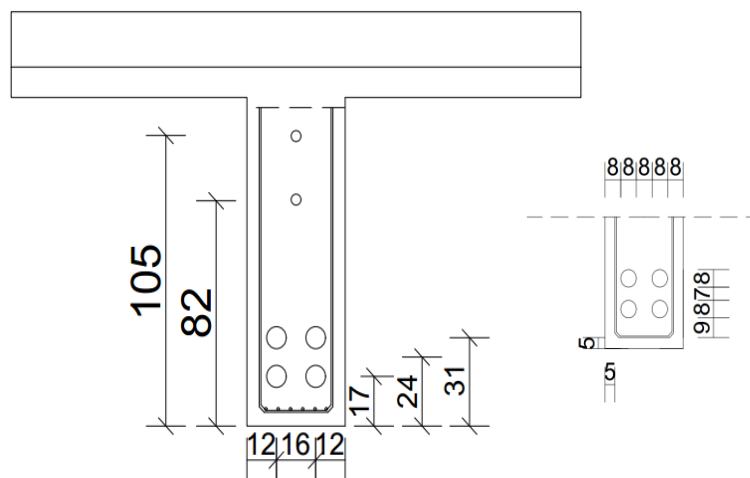
- Za razred izloženosti XD3 + razred betona C45/55, razred konstrukcije je S3

$$c_{min,dur} = 40 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \quad \Delta c_{dur,st} = 0 \quad \Delta c_{dur,add} = 0$$

$$c_{min} = \max\{10; 40; 10\} = 40 \text{ mm}$$

- Usidrenje kabela na krajevima greda postavlja se tako da je težište sile prednapinjanja ispod težišta poprečnog presjeka nosača, 1/3 sile prednapinjanja sidri se u donjoj trećini visine rebra
- Radi uvođenja sile prednapinjanja u nosač i prenošenja ležajne reakcije, nosač se mora produžiti preko osi ležaja  $h/3$  ( $130/3 = 45 \text{ cm}$ ) ili  $60 \text{ cm}$
- Usvajamo: 4 kabela s po 8 užadi = 32 kabela (iz kataloga kabela 6809) s težištem  $\xi = 24 \text{ cm}$  od donjeg ruba kao na slici 73
- Promjer cijevi za kabele je  $75 \approx 80 \text{ cm}$



Slika 73. Poprečni presjek nosača s težištima kabela za prednapinjanje

- Stvarna ukupna površina kabela:  $A_p = n * A_1 = 32 * 1,5 = 48 \text{ cm}^2$

Maksimalna ukupna sila koju možemo unijeti:

$$P_{0,max} = A_p * \sigma_{p0} = 48 * 144 = 6912 \text{ kN}$$

$$P_{m0,max} = P_{0,max} * \delta = 6912 * 0,9 = 6220,8 \text{ N}$$

$$P_{m\infty,max} = P_{m0,max} * m = 6220,8 * 0,85 = 5287,68 \text{ kN}$$

- Izračunata potrebna sila:  $P_{m\infty} \geq 4899 \text{ kN}$

- Usvaja se sila:  $P_{m\infty} = 5000 \text{ kN}$

$$P_{m0} = 5882,4 \text{ kN}$$

$$P_0 = 6536 \text{ kN}$$

Stvarno dopušteno naprezanje na preši:

$$\sigma_{p0} = \frac{P_0}{A_p} = \frac{6536}{48} = 136,17 \text{ kN/cm}^2$$

Uvjeti koji moraju biti ispunjeni u fazi gradnje:

- Presjek je ispunjen rupama od kabela za prednapinjanje koje u ovoj fazi nisu još injektirane pa računamo s neto presjekom (pretpostavljeno umanjeње geometrijskih karakteristika 5%)

$$A^n = A' * 0,95 = 0,7312 * 0,95 = 0,6946 \text{ m}^2$$

$$W_d^n = W_d' * 0,95 = 0,248 * 0,95 = 0,236 \text{ m}^2$$

$$W_g^n = W_g' * 0,95 = 0,423 * 0,95 = 0,402 \text{ m}^2$$



- a) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena granica od  $0,45 * f_{ck}$  da bi puzanje bilo linearno

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp'}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje:

$$N_{Ed} = P_{m0}; M_{Ed} = M_{g1}$$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp'}}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck}$$

**Za  $x = L/4$ :**

$$y_{cp'} = y_d' - \xi = 82 - 34 = 48 \text{ cm}$$

$$P_{m0, donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp'}}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 4,5 + \frac{987,12 * 10^2}{0,236 * 10^6}}{\frac{1}{0,6946 * 10^4} + \frac{0,48 * 10^2}{0,236 * 10^6}} = 7033,88 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0, donje}^{II}$$

$$5882,4 \text{ kN} < 7033,88 \text{ kN}$$

- Uvjet je zadovoljen

**Za  $x = L/2$ :**

$$y_{cp'} = y_d' - \xi = 82 - 24 = 58 \text{ cm}$$

$$P_{m0, donje}^{II} \leq \frac{0,45 * f_{ck} + \frac{M_{g1}}{W_d^n}}{\frac{1}{A^n} + \frac{y_{cp'}}{W_d^n}} = \frac{0,45 * 4,5 + \frac{1316,16 * 10^2}{0,236 * 10^6}}{\frac{1}{0,6946 * 10^4} + \frac{0,58 * 10^2}{0,236 * 10^6}} = 6626,87 \text{ kN}$$

- Uvjet za donji rub:

$$P_{m0} < P_{m0, donje}^{II}$$

$$5882,4 \text{ kN} < 6626,87 \text{ kN}$$

- Uvjet je zadovoljen

- b) Provjera u fazi gradnje, kada se prednapinje nosač bez ploče na donjem rubu ne smije biti prekoračena srednje vlačno naprezanje u betonu:

$$f_{ctm} = -0,38 \text{ kN/cm}^2 \text{ za beton C45/50}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

- Za granično stanje uporabljivosti u fazi izgradnje:  $N_{Ed} = P_{m0}$ ;  $M_{Ed} = M_{g1}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm}$$

**Za  $x = L/4$ :**

$$P_{m0, gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,38) + \frac{987,12 * 10^2}{0,402 * 10^6}}{\frac{0,48 * 10^2}{0,402 * 10^6} - \frac{1}{0,6946 * 10^4}} = 25465 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0, gornje}^{II}$$

$$5882,4 \text{ kN} < 25465 \text{ kN}$$

- Uvjet je zadovoljen

Za  $x = L/2$ :

$$P_{m0,gornje}^{II} \leq \frac{-f_{ctm} + \frac{M_{g1}}{W_g^n}}{\frac{y_{cp}'}{W_g^n} - \frac{1}{A^n}} = \frac{-(-0,38) + \frac{1316,16 * 10^2}{0,402 * 10^6}}{\frac{0,58 * 10^2}{0,402 * 10^6} - \frac{1}{0,6946 * 10^4}} = 2257663 \text{ kN}$$

- Uvjet za gornji rub:

$$P_{m0} < P_{m0,gornje}^{II}$$

$$5882,4 \text{ kN} < 2257663 \text{ kN}$$

o Uvjet je zadovoljen

#### 4.5. Određivanje zone vođenja težišta kabela

- Težište kabela određujemo na čelu nosača gdje je  $x = 0$

a) Za eksploataciju:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje ne bude vlačno

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_d''} + \frac{M_{dek}}{W_d''} > 0$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{M_{dek}}{P_{m\infty}} - k_g''$$

$$\text{Za } x = 0 \rightarrow M_{dek} = 0$$

$$y_{cp}'' \geq -k_g'' = -0,248 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}'' = 1,05 + 0,248 = 1,298 \approx 1,3 \text{ m}$$

- Uvjet da na gornjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m\infty}}{A''} - \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''}{W_g''} + \frac{M_{dek}}{W_g''} < 0,45 * f_{ck}$$

$$y_{cp}'' \geq \frac{-0,45 * f_{ck} * W_g''}{P_{m\infty}} + k_d'' = \frac{-0,45 * 4,5 * 10^4 * 0,691}{5000} + 0,578 = -2,221 \text{ m}$$

$$\xi_0 < y_d'' - y_{cp}'' = 1,05 + 2,221 = 3,271 \text{ m}$$

b) Za stanje gradnje:

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $0,45 * f_{ck}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} + \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_d^n} - \frac{M_{g1}}{W_d^n} \leq 0,45 * f_{ck} \quad M_{g1} = 0$$

$$y_{cp}' \leq \frac{0,45 * f_{ck} * W_d^n}{P_{m0}} - k_g^n = \frac{0,45 * 4,5 * 10^4 * 0,236}{5882,4} - 0,339 * 0,95 = 0,49 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 0,82 - 0,49 = 0,33 \text{ m}$$

- Uvjet da na donjem rubu naprezanje bude manje od  $f_{ctm}$

$$\frac{P_{m0}}{A^n} - \frac{P_{m0} * y_{cp}'}{W_g^n} + \frac{M_{g1}}{W_g^n} > f_{ctm} \quad M_{g1} = 0$$

$$y_{cp}' \leq \frac{-f_{ctm} * W_g^n}{P_{m0}} + k_d^n = \frac{-(-0,38) * 10^4 * 0,402}{5882,4} + 0,579 * 0,95 = 0,81 \text{ m}$$

$$\xi_0 > y_d' - y_{cp}' = 0,82 - 0,81 = 0,01 \text{ m}$$

- Presjek uvjeta:

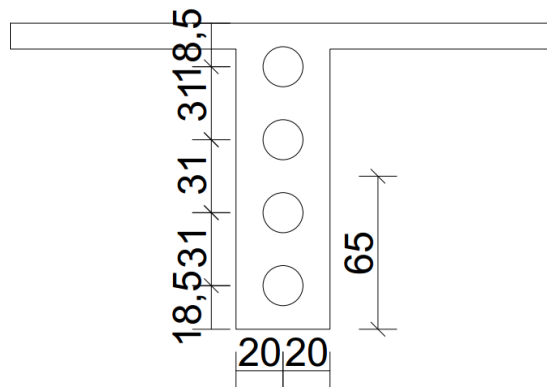
$$\xi_0 \geq 0,01 \text{ m}$$

$$\xi_0 \leq 1,3 \text{ m}$$

$$0,01 \text{ m} \leq \xi_0 \leq 1,3 \text{ m}$$

## Raspored kabela na čelu prema pravilima o minimalnim razmacima između kabela i do ruba nosača

- Podatci proizvođača za kabel 6809:
  - o Promjer kotve:  $\varnothing a = 170\text{mm}$
  - o Razmak osi kabela: 305 mm
  - o Razmak osi kabela od ruba nosača: 175 mm (uzeti veću vrijednost jer debljina sigurnosnog sloja nije 3 cm)
  - o Poželjno je da težište svih kabela bude niže od težišta nosača bez ploče



Slika 74. Raspored kabela za prednapinjanje na čelu nosača

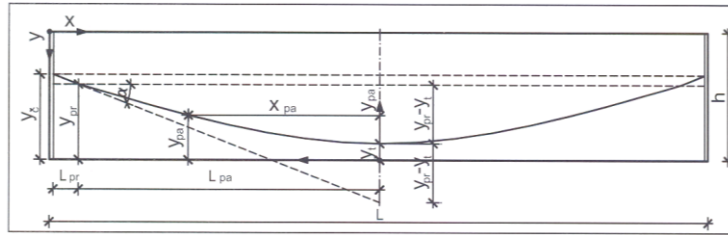
- Osi kabela na čelu nosača postavljena su na razmaku od 31 cm, a od rubova nosača za 18,5 cm u horizontalnom i vertikalnom smjeru
- Težište natega na čelu nosača nalazi se na 65 cm od donjeg ruba
- Usvajamo  $\xi_0 = 0,65\text{ m}$  (zadovoljava gornje uvijete + nalazi se ispod težišta nosača bez ploče)

Linije vođenja kabela dobivene su pomoću Excela, stoga je priložen list iz navedenog programa.

### Linija vođenja kabela

$L_{pr} = 60$  cm  
 $L_{pa} = 1200$  cm

pr-pravac  
 pa-parabola



### Nagib tangente i visinski položaj kabela na prijelazu s pravca na parabolu

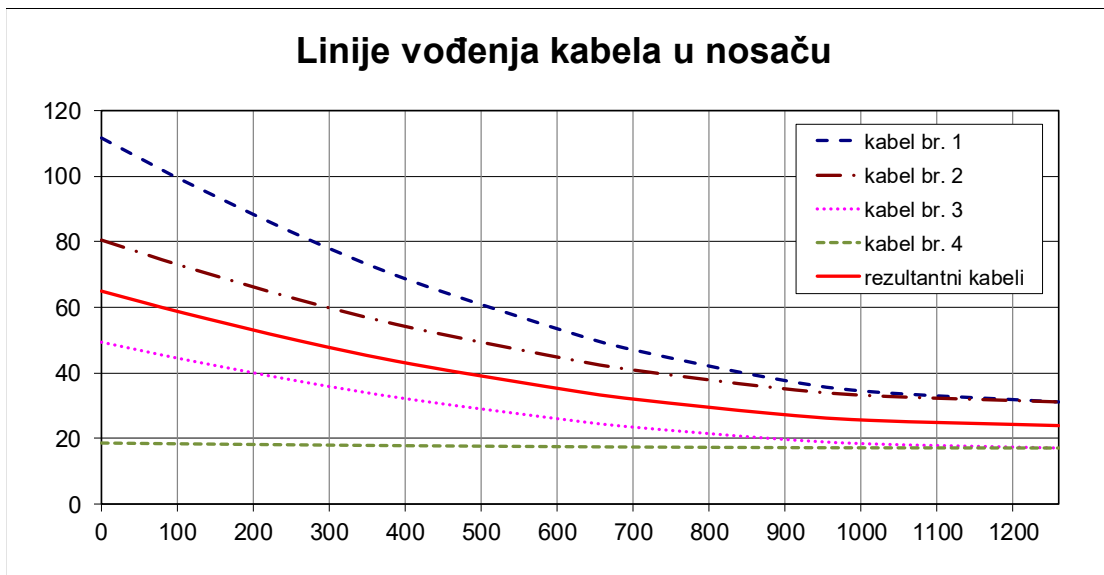
kabel br.	$y_e$ (cm)	$y_t$ (cm)	$\text{tg}\alpha = (y_e - y_t) / (L_{pr} + L_{pa}/2)$	$y_{pr} = y_e - \text{tg}\alpha * L_{pr}$ (cm)
1	111,50	31,00	0,1220	104,18
2	80,50	31,00	0,0750	76,00
3	49,50	17,00	0,0492	46,55
4	18,50	17,00	0,0023	18,36
rezultantni	65,00	24,00	0,0621	61,27

### Izraz za proračun točaka na paraboli

$$y_{pa} = [(y_{pr} - y_t) * (L_{pa} + L_{pr} - x)^2] / L_{pa}^2 + y_t \text{ (cm)}$$

### Udaljenost osi kabela od donjeg ruba (cm)

kabel br.	x (cm)									
	0	60	110	260	410	630	710	880	1010	1260
1	111,50	104,18	98,21	81,82	67,72	51,17	46,37	38,34	34,18	31,00
2	80,50	76,00	72,33	62,25	53,58	43,40	40,45	35,51	32,95	31,00
3	49,50	46,55	44,13	37,52	31,82	25,14	23,21	19,96	18,28	17,00
4	18,50	18,36	18,25	17,95	17,68	17,38	17,29	17,14	17,06	17,00
rezultantni	65,00	61,27	58,23	49,88	42,70	34,27	31,83	27,74	25,62	24,00



#### 4.6. Proračun gubitaka sile u kablovima

Sila u kabelu u vremenu  $t$ :

$$P_{mt} = P_0 - \Delta P_{el} - \Delta P_{c+s+r}(t) - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_{sl}$$

$P_{m0} \rightarrow t = 0$  sila umanjena za početne gubitke  $\Delta P_{\mu}(x)$ ,  $\Delta P_{sl}$  i  $\Delta P_{el}$

$P_{m\infty} \rightarrow t = \infty$

##### 4.6.1. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenja

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0,07 + 0,005 * 12,6)}) = 163,1 \text{ kN}$$
$$\approx 163 \text{ kN}$$

- koeficijent trenja između kabela i zaštitne cijevi (tehničke specifikacije izvođača):  $\mu = 0,19 \text{ rad}^{-1}$
- $\theta = \frac{8 * f * x}{l_{tot} * l_{tot}}$  – zbroj kutova skretanja kabela na duljini  $x$ ;  $f$  – strelica parabole
- nenamjerni kut skretanja kabela (tehničke specifikacije izvođača):  $k = 0,005 \text{ rad/m}$

**Za  $x = 0 \text{ m}$ :**

$$\theta = 0$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0 + 0,005 * 0)}) = 0$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x) = 6536 - 0 = 6536 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\theta = \frac{3,3}{635} * 6,3 = 0,03$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0,03 + 0,005 * 6,3)}) = 75,9 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x) = 6536 - 75,9 = 6460,1 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{tot}/2 = 12,6$  m:**

$$\theta = \frac{3,3}{635} * 12,6 = 0,07$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0,07 + 0,005 * 12,6)}) = 163,1 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x) = 6536 - 163,1 = 6372,9 \text{ kN}$$

**Za  $x = 3l_{tot}/4 = 18,9$  m:**

$$\theta = \frac{3,3}{635} * 18,9 = 0,1$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0,1 + 0,005 * 18,9)}) = 237,1 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x) = 6536 - 237,1 = 6298,9 \text{ kN}$$

**Za  $x = l_{tot} = 25,2$  m:**

$$\theta = \frac{3,3}{635} * 25,2 = 0,13$$

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 * (1 - e^{-\mu * (\theta + k * x)}) = 6536 * (1 - e^{-0,19 * (0,13 + 0,005 * 25,2)}) = 310,3 \text{ kN}$$

$$P_{max} - \Delta P_{\mu}(x) = 6536 - 310,3 = 6225,7 \text{ kN}$$

#### 4.6.2. Gubitak sile prednapinjanja zbog prokliznuća klina

- Smanjenje na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * P_0 * l_e * \mu * \left( \frac{\theta}{x} + k \right)$$

- Iznos smanjenja u presjeku x:

$$\Delta P_{sl}(x) = \Delta P'_{sl} * \frac{l_e - x}{l_e}$$

- utjecaj prokliznuća klina najveći je na čelu nosača i smanjuje se sa duljinom kabela



- kada je zadovoljen uvjet  $x > l_e$  u presjeku x nema utjecaja prokliznuća klina
- duljina utjecaja prokliznuća klina:

$$l_e = \sqrt{\frac{\Delta L * E_p * A_p}{P_0 * \mu * \left(\frac{\theta}{x} + k\right)}} = \sqrt{\frac{0,001 * 19500 * 48}{6536 * 0,19 * \left(\frac{0,13}{25,2} + 0,005\right)}} = 8,6 \text{ m}$$

- o modul elastičnosti kabela:  $E_p = 195000 \text{ N/mm}^2$
- o duljina prokliznuća klina (4-6mm):  $\Delta L = 6 \text{ mm}$

Smanjenje sile na čelu nosača:

$$\Delta P'_{sl} = 2 * 6536 * 8,6 * 0,19 * \left(\frac{0,13}{25,2} + 0,005\right) = 216,99 \text{ kN} \approx 217 \text{ kN}$$

Iznos smanjenja sile u presjeku x

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3 \text{ m}$ :**

$$\Delta P'_{sl}(x = 12,6) = 217 * \frac{8,6 - 6,3}{8,6} = 58,03 \text{ kN} \approx 58 \text{ kN}$$

U ostalim presjecima ne postoji utjecaj prokliznuća klina.

#### 4.6.3. Gubitak sile prednapinjanja zbog trenutnih elastičnih deformacija betona

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}$$

- Početno naprezanje u visini težišta kabela umanjeno za gubitke trenja i prokliznuća klina:  $\Delta \sigma_c = \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}^2\right)$

- Početna sila umanjena za gubitke trenja i prokliznuća klina:

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl}$$

- Modul elastičnosti betona:  $E_{cm} = 36000 \text{ N/mm}^2$

$$j = \frac{n-1}{2n} = \frac{4-1}{2*4} = 0,375$$

- Ukupan broj kabela:  $n = 4$

**Za  $x = 0$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6536 - 0 - 217 = 6319 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{6319}{0,7312} * \left(1 + \frac{0,7312}{0,203} * 0,17^2\right) \\ &= 9541,56 \text{ kN/m}^2 = 0,95 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 48 * 19500 * \frac{0,375 * 0,95}{3600} = 92,63 \text{ kN} \approx 93 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 217 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 93 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 0 + 217 + 93 = 310 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6536 - 310 = 6226 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{6226}{6536} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3$  m:**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6536 - 75,9 - 58 = 6402,1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{6402,1}{0,7312} * \left(1 + \frac{0,7312}{0,203} * 0,48^2\right) \\ &= 16021,83 \text{ kN/m}^2 = 1,6 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 48 * 19500 * \frac{0,375 * 1,6}{3600} = 156 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_{\mu}(x) = 75,9 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 58 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 156 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 75,9 + 58 + 156 = 289,9 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6536 - 289,9 = 6246,1 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{6246,1}{6536} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = l_{tot}/2 = 12,6 \text{ m}$ :**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_{\mu} - \Delta P_{sl} = 6536 - 163,1 - 0 = 6372,9 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}^{\prime 2}\right) = \frac{6372,9}{0,7312} * \left(1 + \frac{0,7312}{0,203} * 0,58^2\right) \\ &= 19276,48 \text{ kN/m}^2 = 1,93 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 48 * 19500 * \frac{0,375 * 1,93}{3600} = 188,18 \text{ kN} \approx 188 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_{\mu}(x) = 163,1 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 188 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\mu}(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 163,1 + 0 + 188 = 351,1 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6536 - 351,1 = 6184,9 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{6184,9}{6536} = 0,95$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = 3l_{tot}/4 = 18,9 \text{ m}$ :**

$$P'_o = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6536 - 237,1 - 0 = 6298,9 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_o}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_o}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{6298,9}{0,7312} * \left(1 + \frac{0,7312}{0,203} * 0,48^2\right) \\ &= 15763,57 \text{ kN/m}^2 = 1,58 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 48 * 19500 * \frac{0,375 * 1,58}{3600} = 154,05 \text{ kN} \approx 154 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 237,1 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 154 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 237,1 + 0 + 154 = 391,1 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6536 - 391,1 = 6144,9 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{6144,9}{6536} = 0,94$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

**Za  $x = l_{tot} = 25,2 \text{ m}$ :**

$$P'_0 = P_0 - \Delta P_\mu - \Delta P_{sl} = 6536 - 310,3 - 0 = 6225,7 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= \frac{P'_0}{A_c} * \left(1 + \frac{A_c}{I_c} * y_{cp}^2\right) = \frac{P'_0}{A'} * \left(1 + \frac{A'}{I'} * y_{cp}'^2\right) = \frac{6225,7}{0,7312} * \left(1 + \frac{0,7312}{0,203} * 0,17^2\right) \\ &= 9400,68 \text{ kN/m}^2 = 0,94 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{el} = A_p * E_p * \sum \frac{j * \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} = 48 * 19500 * \frac{0,375 * 0,94}{3600} = 91,65 \text{ kN} \approx 92 \text{ kN}$$

Početni gubitci:

$$\Delta P_\mu(x) = 310,3 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{sl}(x) = 0 \text{ kN}$$

$$\Delta P_{el} = 92 \text{ kN}$$

- Ukupni početni gubitci:

$$\Delta P_i = \Delta P_\mu(x) + \Delta P_{sl}(x) + \Delta P_{el} = 310,3 + 0 + 92 = 402,3 \text{ kN}$$

- Sila u kabelu nakon početnih gubitaka:

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_i = 6536 - 402,3 = 6133,7 \text{ kN}$$

- Faktor trenutnih gubitaka

$$\delta = \frac{P_{m0}}{P_0} = \frac{6133,7}{6536} = 0,94$$

$$\delta_{procijenjeno} = 0,9 \quad \text{pretpostavka zadovoljava}$$

#### 4.6.4. Gubitak sile prednapinjanja zbog skupljanja i puzanja betona i relaksacije čelika u vremenu $t$

$$\Delta P_t(t) = A_p * \Delta \sigma_{c+s+r}$$

$$\begin{aligned} &= A_p * \frac{\varepsilon_{cs} * E_p + 0,8 * \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} * \varphi(t, t_0) * \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} * \frac{A_p}{A_c''} * \left(1 + \frac{A_c''}{I_c''} * y_{cp}''^2\right) * [1 + 0,8 * \varphi(t, t_0)]} \end{aligned}$$

- Tlak uzimamo s pozitivnim predznakom
- Promatrano vrijeme:  $t = \infty$
- Trenutak unošenja sile prednapinjanja:  $t_0 = 7 \text{ dana}$

### Skupljanje betona:

- Deformacija skupljanja:  $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$ 
  - o Deformacija skupljanja zbog sušenja:  $\varepsilon_{cd,\infty} = k_h * \varepsilon_{cd,0}$
  - o Deformacija autogenog skupljanja:  $\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (f_{ck} - 10) * 10^{-6}$
- Element se nalazi na otvorenom (vlažnost 80%)

$$\varepsilon_{cd,0} = \left[ 0,24 - \frac{45 - 40}{60 - 40} (0,24 - 0,19) \right] * 10^{-3} = 0,23 * 10^{-3}$$

- Srednji polumjer elementa:

$$h_0 = \frac{2 * A''_c}{u} = \frac{2 * 1,1952}{7,64} = 0,313 = 313 \text{ mm}$$

- o Opseg poprečnog presjeka koji je izložen sušenju:

$$u = 2 * (2,32 + 1,19 + 0,31) = 7,64 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,76 * 0,23 * 10^{-3} = 0,17 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 * (45 - 10) * 10^{-6} = 0,0875 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cs} = (0,17 + 0,0875) * 10^{-3} = 0,26 * 10^{-3}$$

### Puzanje betona:

- Vlažna okolina RH=80%
- Cement razreda N

$$\varphi(t_{\infty}, 7) = 1,6$$

- Najveće vlačno naprežanje na kabel umanjimo za početne gubitke:

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = \frac{P_{m0}}{A_p}$$

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

**Za  $x = 0$  m:**

$$\sigma_{pi} = \frac{6226}{42} = 148,24 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{148,24}{186} = 0,8$$

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3$  m:**

$$\sigma_{pi} = \frac{6246,1}{42} = 148,72 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{148,72}{186} = 0,8$$

**Za  $x = l_{tot}/2 = 12,6$  m:**

$$\sigma_{pi} = \frac{6184,9}{42} = 147,23 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{147,23}{186} = 0,79$$

**Za  $x = 3l_{tot}/4 = 18,9$  m:**

$$\sigma_{pi} = \frac{6144,9}{42} = 146,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{146,31}{186} = 0,79$$

**Za  $x = l_{tot} = 25,2$  m:**

$$\sigma_{pi} = \frac{6133,7}{42} = 146,04 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{146,04}{186} = 0,79$$

- Vrijednost gubitaka zbog opuštanja 1000 sati nakon prednapinjanja pri srednjoj temperaturi od 20°C (prema tehničkim karakteristikama proizvođača):  $\rho_{1000} = 2,5\%$
- Vrijeme nakon prednapinjanja (za konačno stanje 57 god):  $t = 500000$  sati
- Za čelik razreda 2:

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

**Za x = 0 m, x = 6,3 m**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,8} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,8)} * 10^{-5} = 0,061$$

**Za x = 12,6 m, x = 18,9 m, x = 25,2 m**

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,79} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} * 10^{-5} = 0,058$$

Konačna relaksacija uslijed relaksacije čelika nakon 500000 sati

**Za x = 0 m, x = 6,3 m**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,061 * \sigma_{pi} = 0,061 * 148,72 = 9,1 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 12,6 m, x = 18,9 m, x = 25,2 m**

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,058 * \sigma_{pi} = 0,058 * 147,23 = 8,5 \text{ kN/cm}^2$$

Naprezanje betona u visini natega od vlastite težine (uključujući početne gubitke) i početnog prednapinjanja te ostalih nazovistalnih djelovanja

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I_c''} + \left(\frac{P_{m0}}{A_c''} + \frac{P_{m0}}{I_c''} * y_{cp}''^2\right)$$



**Za x = 0 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 40}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{6226}{1,1952 * 10^4} + \frac{6226}{0,311 * 10^8} * 40^2 \right) = 0,84 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = l<sub>tot</sub>/4 = 6,3 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{2412,72 * 10^2 * 71}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{6246,1}{1,1952 * 10^4} + \frac{6246,1}{0,311 * 10^8} * 71^2 \right) = 0,98 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = l<sub>tot</sub>/2 = 12,6 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{3216,96 * 10^2 * 81}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{6184,9}{1,1952 * 10^4} + \frac{6184,9}{0,311 * 10^8} * 81^2 \right) = 0,98 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = 3l<sub>tot</sub>/4 = 18,9 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{2412,72 * 10^2 * 71}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{6144,9}{1,1952 * 10^4} + \frac{6144,9}{0,311 * 10^8} * 71^2 \right) = 0,96 \text{ kN/cm}^2$$

**Za x = l<sub>tot</sub> = 25,2 m:**

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{0 * 10^2 * 71}{0,311 * 10^8} + \left( \frac{6133,7}{1,1952 * 10^4} + \frac{6133,7}{0,311 * 10^8} * 40^2 \right) = 0,83 \text{ kN/cm}^2$$

Gubitak sile prednapinjanja

**Za x = 0 m:**

$$\begin{aligned} \Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 9,1 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,84}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left( 1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,4^2 \right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{19,63}{1,05} = 897,37 \text{ kN} \approx 897 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{6226 - 897}{6226} = \frac{5329}{6226} = 0,86$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,77$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5329}{6536} = 0,82$

**Za  $x = l_{tot}/4 = 6,3$  m:**

$$\begin{aligned} \Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 9,1 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,98}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,71^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{20,84}{1,05} = 952,69 \text{ kN} \approx 953 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{6246,1 - 953}{6246,1} = \frac{5293,1}{6246,1} = 0,85$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,85 * 0,9 = 0,77$

- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5293,1}{6536} = 0,81$

**Za  $x = l_{tot}/2 = 12,6$  m:**

$$\begin{aligned} \Delta P_t(t) &= 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 8,5 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,98}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,81^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]} \\ &= 48 * \frac{20,36}{1,05} = 930,74 \text{ kN} \approx 931 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{6184,9 - 931}{6184,9} = \frac{5253,9}{6184,9} = 0,85$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,85 * 0,9 = 0,77$
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5253,9}{6536} = 0,8$

**Za  $x = 3l_{tot}/4 = 18,9$  m:**

$$\Delta P_t(t) = 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 8,5 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,96}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,71^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]}$$

$$= 48 * \frac{20,19}{1,05} = 922,97 \text{ kN} \approx 923 \text{ kN}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{6144,9 - 923}{6144,9} = \frac{5221,9}{6144,9} = 0,85$$

- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,85 * 0,9 = 0,77$
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5221,9}{6536} = 0,8$

**Za  $x = l_{tot} = 25,2$  m:**

$$\Delta P_t(t) = 48 * \frac{0,26 * 10^{-3} * 19500 + 0,8 * 8,5 + \frac{19500}{3600} * 1,6 * 0,83}{1 + \frac{19500}{3600} * \frac{48}{1,1952 * 10^4} * \left(1 + \frac{1,1952 * 10^4}{0,311 * 10^8} * 0,4^2\right) * [1 + 0,8 * 1,6]}$$

$$= 48 * \frac{19,06}{1,05} = 871,31 \text{ kN} \approx 871 \text{ kN}$$

- Koeficijent vremenskih gubitaka:

$$m = \frac{P_{m0} - \Delta P_t(t)}{P_{m0}} = \frac{6133,7 - 871}{6133,7} = \frac{5262,7}{6133,7} = 0,86$$

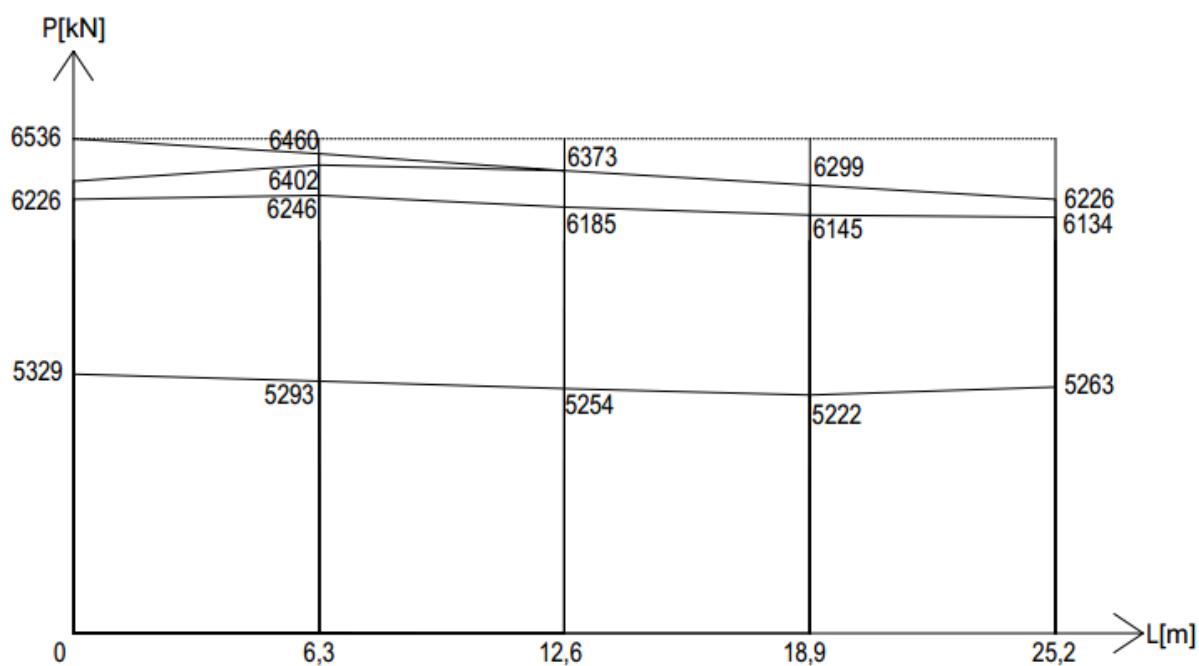
- Koeficijent procijenjenih gubitaka:  $m * \delta = 0,86 * 0,9 = 0,78$
- Koeficijent stvarnih gubitaka:  $\frac{P_{m\infty}}{P_0} = \frac{5262,7}{6536} = 0,81$

#### 4.6.5. Stvarne sile u kabelima

Vrijednosti stvarnih sila u kabelima dane su u tablici 15.

Tablica 15. Stvarne sile u kabelima

X [m]	$P_0$ [kN]	$P_{m0}$ [kN]	$P_{m\infty}$
0	6536	6226	5329
6,3	6536	6246,1	5293,1
12,6	6536	6184,9	5253,9
18,9	6536	6144,9	5221,9
25,2	6536	6133,7	5262,7



Slika 75. Prikaz početnih i vremenskih gubitaka glavnog nosača

#### 4.7. Provjera graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti na glavnom nosaču

##### Stalna i prolazna proračunska situacija:

(stalno opterećenje, promjenljivo opterećenje i prednapinjanje)

Proračunski moment savijanja za stalna i prolazna djelovanja:

$$M_{Ed} = \gamma_g * M_{g2} + \gamma_Q * M_Q$$

- Stalno djelovanje i promjenljivo opterećenje izazivaju nepovoljne učinke, a prednapinjanje pozitivne, stoga su parcijalni koeficijenti jednaki:

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ za prometna opterećenja}$$

- Utjecaj prednapinjanja uzimamo u obzir kod izračuna potrebne neprednapete armature

$$M_{g2} = 3216,96 \text{ kNm}$$

$$M_Q = M_{Q1k} + M_{Q2k} + M_{q1k} + M_{q2k} + M_{q3k} + M_{qfk} = 1303,02 + 377,34 + 741,6 + 86,4 + 6,48 + 115,2 = 2630,04 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 3216,96 + 1,35 * 2630,04 = 7893,45 \text{ kNm}$$

Proračunska poprečna sila za stalna i prolazna djelovanja:

$$V_{Ed} = \gamma_g * V_g + \gamma_Q * V_Q$$

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,35 \text{ kada se uzimaju sva djelovanja}$$

$$V_g = 536,16 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_Q &= V_p = V_{Q1k} + V_{Q2k} + V_{q1k} + V_{q2k} + V_{q3k} + V_{qfk} \\ &= 222,89 + 64,55 + 123,6 + 14,4 + 1,08 + 19,2 \\ &= 445,72 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_{Ed} = 1,35 * 536,16 + 1,35 * 445,72 = 1325,54 \text{ kN}$$

- Poprečnu silu na ležaju možemo reducirati:

a) Za utjecaj stalnog tereta koji se prenosi direktno u ležaj na udaljenosti  $d$  od lica ležaja  $V_{red,1}$ :

$$V_{red,1} = \left(\frac{a}{2} + d\right) * [\gamma_g * (g_2 + g_r)] = \left(\frac{0,30}{2} + 1,43\right) * [1,35 * (29,88 + 14,8)] \\ = 95,3 \text{ kN}$$

- Širina ležaja:  $a = 30 \text{ cm}$
- Statička visina:  $d = 143 \text{ cm}$

b) Za utjecaj skretne sile u kabelima  $V_{red,2}$ :

$$V_{red,2} = \gamma_p * P_{m\infty} * \sin\alpha$$

- Učinak sile prednapinjanja je pozitivan i stoga je parcijalni faktor jednak:

$$\gamma_p = 1,0$$

$$\operatorname{tg}\alpha = 0,085 \text{ rad} \rightarrow \alpha = 4,86^\circ$$

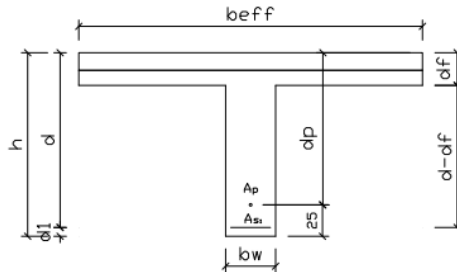
$$V_{red,2} = 1 * 5280 * \sin(4,86^\circ) = 447,33 \text{ kN}$$

- Reducirana poprečna sila:

$$V'_{Ed} = V_{Ed} - V_{red,1} - V_{red,2} = 1325,54 - 95,3 - 447,33 = 782,91 \text{ kN}$$

#### 4.7.1. Provjera graničnih stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

##### Određivanje potrebne nosive armature



Slika 76. Općeniti poprečni presjek

- Proračun sudjelujuće širine T - presjeka

$$b_w = 40 \text{ cm}$$

$$d_f = 31 \text{ cm}$$

$$h = 150 \text{ cm}$$

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

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * b_i + 0,1 * l_0 \leq \min\{b_i; 0,2l_0\}$$

$$l_0 = l = 2400 \text{ cm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,2 * 96 + 0,1 * 2400 = 259,2 \text{ cm} \leq \min\{96; 0,2 * 2400 = 480\} \\ = 96 \text{ cm}$$

$$b_{eff} = 2 * 96 + 40 = 232 \text{ cm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d_s = h - d_1 = 150 - 7 = 143 \text{ cm} - \text{statička visina nenapete armature}$$

$$d_p = h - 24 = 150 - 24 = 126 \text{ cm} - \text{statička visina prednapete armature}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 * \frac{45}{1,5} = 25,5 \text{ N/mm}^2$$

$\alpha_{cc} = 0,85$  za mostove

- Granica popuštanja čelika za prednapinjanje:

$$\sigma_{pd} = \frac{0,9 * f_{pk}}{\gamma_p} = \frac{0,9 * 186}{1,15} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{Eds} = M_{Ed} + F_p * (d_s - d_p) = 7893,45 + (48 * 145,6) * (1,43 - 1,26) \\ = 9081,55 \text{ kNm}$$

- Pretpostavka da neutralna os prolazi kroz ploču:

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_{eff} * d_s^2 * f_{cd}} = \frac{9081,55}{232 * 143^2 * 2,55} = 0,075$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,111 \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,957$$

$$x = d_s * \xi = 143 * 0,111 = 15,87 \text{ cm} < 31 \text{ cm}$$

- N.O. prolazi kroz ploču, presjek dimenzioniramo kao pravokutni dimenzija  $b_{eff}/h$

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds} - A_p * \sigma_{pd} * (z_s - (d_s - d_p))}{f_{yd} * z_s} \\ = \frac{908155 - 48 * 145,6 * (0,957 * 143 - (143 - 126))}{43,48 * (0,957 * 143)} \\ = 11,85 \text{ cm}^2$$

- Ukupna deformacija u čeliku za prednapinjanje za granično stanje loma (za  $t = \infty$ ):

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E_s} * \left[ \sigma_{pm,\infty} - \alpha_e * \left( \frac{P_{m\infty}}{A''} + \frac{P_{m\infty} * y_{cp}''^2}{I''} - \frac{M_{g2} * y_{cp}''}{I''} \right) \right] + \Delta\varepsilon_p$$

- Deformacija  $\Delta\varepsilon_p$  dobiva se iz omjera sličnosti trokuta:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{d_p - x} = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{x}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{|\varepsilon_{c,ed2}|}{\xi * d_s} * (d_p - \xi * d_s) = \frac{3,5 * 10^{-3}}{0,111 * 143} * (126 - 0,111 * 143) = 0,0243 = 24,3\text{‰}$$



$$\varepsilon_p = \frac{1}{19500} * \left[ 110 - 5,27 * \left( \frac{5280}{1,1952 * 10^4} + \frac{5280 * 80^2}{0,311 * 10^8} - \frac{321696 * 80}{0,311 * 10^8} \right) \right] + 0,0243$$

$$= 0,0298 = 29,8\text{‰}$$

$$\varepsilon_{pd} = \frac{\sigma_{pd}}{E_p} = \frac{145,6}{19500} = 7,47\text{‰}$$

$$\varepsilon_p > \varepsilon_{pd} \quad \rightarrow \quad \sigma_{pd} = 145,6 \text{ kN/cm}^2$$

- Najmanja ploština uzdužne armature u gredama:

$$A_{s1,min} = \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d; 0,0013 * b_t * d \right\}$$

$$= \max \left\{ 0,26 * \frac{3,8}{500} * 40 * 143; 0,0013 * 40 * 143 \right\}$$

$$= \max \{ 11,3; 7,44 \} = 11,3 \text{ cm}^2$$

- Najveća ploština uzdužne armature u gredama:

$$A_{s1} \leq 0,04 * A_c = 0,04 * 1,1952 * 10^4 = 478 \text{ cm}^2$$

- Krhki slom:

- o Za prednapete konstrukcije dana je metoda kojom se može dokazati da neće doći do krhkog sloma (EN 1992-2:2005; poglavlje 6.1):

$$A_{s1} = \frac{M_{rep}}{f_{yk} * z_s} \quad z_s = 0,9 * d \quad f_{ctm} = 3,8 \text{ MPa} \quad \text{za C45/55}$$

$$M_{rep} = f_{ctm} * W_d'' = 0,38 * 0,296 * 10^6 = 112480 \text{ kNcm}$$

$$A_{s1} = \frac{112480}{50 * 0,9 * 143} = 17,48 \text{ cm}^2$$

- Usvojena je armatura 7Ø18  $A_{s1} = 17,81 \text{ cm}^2$

Provjera nenapete armature za pojavu kose pukotine:

- Koristimo vertikalne spone ( $\alpha = 90^\circ$ ), nagib tlačnih štapova  $\theta = 40^\circ$  ( $ctg\theta = 1,2$ )
- Armaturu iz polja vodimo do oslonca  $A_{sl,prov} = A_{s1} = 17,81 \text{ cm}^2$
- Armaturu provjeravamo na vlačnu silu  $T_{Ed}$  (sila u donjem vlačnom pojasu) koja se javlja nad ležajem (Mörschova rešetka)

$$T_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z} + \frac{1}{2} * V'_{Ed} * (ctg\theta - ctg\alpha)$$

$$M_{Ed} = 0 \quad \text{nad ležajem}$$

$$z \approx 0,9 * d$$

$$T_{Ed} = 0 + \frac{1}{2} * 782,91 * (ctg40 - ctg90) = 466,52 \text{ kN}$$

$$A_{sl,req} = \frac{T_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{466,52}{43,48} = 10,73 \text{ cm}^2 < A_{sl,prov} = 17,81 \text{ cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

Stvarno zajedničko težište armature:

$$d_x = \frac{F_p * x_p + F_{s1} * d_1}{F_p * F_{s1}} = \frac{(A_p * \sigma_p) * x_p + (A_{s1} * f_{yd}) * d_1}{A_p * \sigma_p + A_{s1} * f_{yd}}$$

$$= \frac{(48 * 145,6) * 24 + (17,81 * 43,48) * 7}{48 * 145,6 + 17,81 * 43,48} = 22,3 \text{ cm}$$

$$d_t = 143 - 22,3 = 120,7 \text{ cm} \approx 120 \text{ cm}$$

### Sidrenje na osloncu

- Osnovna duljina sidrenja:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

- o Promatrane šipke se nalaze u dobrim uvjetima prionjivosti:  $f_{bd} = 4,05 \text{ MPa}$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{43,48}{0,405} = 26,84\emptyset$$

- Za  $\emptyset 18$   $l_{b,rqd} = 26,84 * 18 = 48,3 \text{ cm}$
- Potrebna duljina sidrenja:  $l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$
- Za slučaj sidrenja ravnim šipkama:  $\alpha_1 = 1,0$
- Ostale  $\alpha$  usvajamo kao 1,0

$$l_{bd} = l_{b,rqd} = 48,3 \approx 50 \text{ cm} \geq l_{b,min}$$

$$l_{b,min} = \max\{0,3 * l_{b,rqd}; 10 * \emptyset; 10 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 50; 10 * 1,8; 10\}$$

$$= \max\{15; 18; 10\} = 18 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava

#### Duljina nastavljanja preklapanjem:

- Potrebna duljina prijeklopa:  $l_0 = l_{b,rqd} * \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * \alpha_6 \geq l_{0,min}$
- Preklapamo više od 50% armature u jednom presjeku:  $\alpha_6 = 1,5$

$$l_0 = 50 * 1,5 = 75 \text{ cm} \geq l_{0,min}$$

$$l_{0,min} = \max\{0,3 * \alpha_6 * l_{b,rqd}; 15 * \emptyset; 20 \text{ cm}\} = \max\{0,3 * 1,5 * 50; 15 * 1,8; 20\}$$

$$= \max\{22,5; 27; 20\} = 27 \text{ cm}$$

- Uvjet zadovoljava
- Usvajamo duljinu prijeklopa  $l_0 = 75 \text{ cm}$

#### 4.7.2. Granična stanja uporabljivosti pri savijanju s uzdužnom silom (eksploatacija)

Ograničenje naprezanja u betonu o provjera rastlačenja u eksploataciji

- Provjere se vrše za karakterističnu, čestu i nazovistalnu kombinaciju djelovanja te za idealni presjek

$$A_{c,id} = A_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p = 1,1952 + (5,42 - 1) * 0,0048 = 1,22 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,id} = I_c'' + (\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}'' * y_p$$

$$y_p = y_{cp}'' - y_{ci} = y_{cp}'' - \frac{(\alpha_e - 1) * A_p * y_{cp}''}{A_{c,id}}$$

$$y_p(L = 0) = y_p(L) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,4 - \frac{(5,27 - 1) * 0,0048 * 0,4}{1,22} = 0,39 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{2}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,81 - \frac{(5,27 - 1) * 0,0048 * 0,81}{1,22} = 0,8 \text{ m}$$

$$y_p\left(\frac{L}{4}\right) = y_{cp}'' - y_{ci} = 0,71 - \frac{(5,27 - 1) * 0,0048 * 0,71}{1,22} = 0,7 \text{ m}$$

$$I_{c,id} = 0,311 + (5,42 - 1) * 0,0048 * 0,81 * 0,8 = 0,324 \text{ m}^4$$

$$W_{dc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_d''} = \frac{0,324}{1,05} = 0,31 \text{ m}^3$$

$$W_{gc,id} = \frac{I_{c,id}}{y_g''} = \frac{0,324}{0,45} = 0,72 \text{ m}^3$$

a) Karakteristična kombinacija djelovanja

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{2}\right) = 4194 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}\left(\frac{L}{4}\right) = M_{Ed}\left(\frac{3L}{4}\right) = 3133 \text{ kNm}$$

- Kriterij rastlačenja – tlačno naprezanje ne smije preći  $0,6 * f_{ck}$ , a vlačno naprezanje se ne smije pojaviti
- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5329 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5329}{1,22 * 10^4} + \frac{5329 * 0,39 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,31 * 10^6} \\ &= 1,11 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5254 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5254}{1,22 * 10^4} + \frac{5254 * 0,8 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{4194 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 0,43 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5293 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5293}{1,22 * 10^4} + \frac{5293 * 0,7 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{3133 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 0,62 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5222 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5222}{1,22 * 10^4} + \frac{5222 * 0,7 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{3133 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 0,6 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5263 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5263}{1,22 * 10^4} + \frac{5263 * 0,39 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 1,09 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,6 * 4,5 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

**Za L=0 :**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5329}{1,22 * 10^4} - \frac{5329 * 0,39 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,148 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5254}{1,22 * 10^4} - \frac{5254 * 0,8 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{4194 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,43 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5293}{1,22 * 10^4} - \frac{5293 * 0,7 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{3133 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,35 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5222}{1,22 * 10^4} - \frac{5222 * 0,7 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{3133 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,36 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5263}{1,22 * 10^4} - \frac{5263 * 0,39 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,146 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 2,7 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

b) Nazovistalna kombinacija djelovanja

$$E_d = E_d \left[ \sum G_{k,j} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} * Q_{k,i}) \right]$$

**Za L=0 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5329 \text{ kN}$$

**Za L/2 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 3216,96 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5254 \text{ kN}$$

**Za L/4 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 2412,72 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5293 \text{ kN}$$

**Za 3L/4 :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 2412,72 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5222 \text{ kN}$$

**Za L :**

$$M_{Ed} = M_{g2} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5263 \text{ kN}$$

- Tlačno naprezanje ne smije preći  $0,45 * f_{ck}$
- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}}$$

### Za L=0 :

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5329}{1,22 * 10^4} + \frac{5329 * 0,39 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,31 * 10^6} \\ &= 1,11 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5329}{1,22 * 10^4} - \frac{5329 * 0,39 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,148 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

### Za L/2 :

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} &= \frac{5254}{1,22 * 10^4} + \frac{5254 * 0,8 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{3216,92 * 10^2}{0,31 * 10^6} \\ &= 0,749 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} &= \frac{5254}{1,22 * 10^4} - \frac{5254 * 0,8 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{3216,92 * 10^2}{0,72 * 10^6} \\ &= 0,3 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava



**Za L/4 :**

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5293}{1,22 * 10^4} + \frac{5293 * 0,7 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{2412,72 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 0,851 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5293}{1,22 * 10^4} - \frac{5293 * 0,7 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{2412,72 * 10^2}{0,72 * 10^6}$$

$$= 0,254 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5222}{1,22 * 10^4} + \frac{5222 * 0,7 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{2412,72 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 0,829 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5222}{1,22 * 10^4} - \frac{5222 * 0,7 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{2412,72 * 10^2}{0,72 * 10^6}$$

$$= 0,255 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} + \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{dc,id}} - \frac{M_{Ed}}{W_{dc,id}} = \frac{5263}{1,22 * 10^4} + \frac{5263 * 0,39 * 10^2}{0,31 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,31 * 10^6}$$

$$= 1,09 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{c,id}} - \frac{N_{Ed} * y_p}{W_{gc,id}} + \frac{M_{Ed}}{W_{gc,id}} = \frac{5263}{1,22 * 10^4} - \frac{5263 * 0,39 * 10^2}{0,72 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,72 * 10^6}$$

$$= 0,146 \text{ kN/cm}^2 < 0,45 * f_{ck} = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- naprezanje u nategama (kabelima) nakon svih gubitaka pri nazovistalnoj kombinaciji djelovanja ne treba premašiti  $0,65 * f_{pk}$

$$\sigma_{pm,\infty} = \frac{P_{m,\infty}}{A_p} = \frac{5254}{48} = 110 \text{ kN/cm}^2 \leq 0,65 * f_{pk} = 0,65 * 186 = 120,9 \text{ kN/cm}^2$$

- uvjet zadovoljava

#### 4.7.3. Granična stanja nosivosti pri savijanju s uzdužnom silom (faza gradnje)

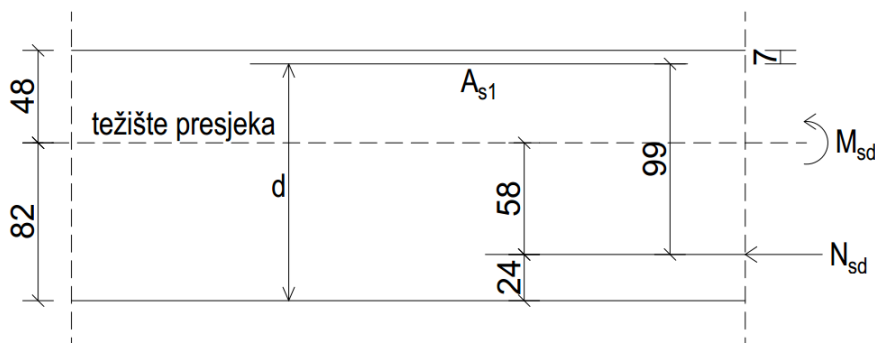
- Stalno opterećenje (povoljan učinak) i prednapinjanje (nepovoljan učinak)

$$M_{Ed} = \gamma_G * M_{g1} = 1,0 * 1316,16 = 1316,16 \text{ kNm}$$

- o za povoljni učinak  $\gamma_G = 1,0$

$$N_{Ed} = \gamma_p * P_{m0} = 1,0 * 5980 = 5980 \text{ kN}$$

- o za povoljni učinak za mostove  $\gamma_p = 1,0$



Slika 77. Postupak Wuczkowski

$$d_1 = 7 \text{ cm}$$

$$d = 130 - 7 = 123 \text{ cm}$$

- Postupak Wuczkowski:

$$M_{Eds} = -M_{Ed} + N_{Ed} * 0,99 = -1316,16 + 5980 * 0,99 = 4604,04 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b_w * d^2 * f_{cd}} = \frac{4604,04}{40 * 123^2 * 2,55} = 0,298 > \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,467; \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,806$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds}}{\zeta * d * f_{yd}} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{460404}{0,806 * 123 * 43,48} - \frac{5980}{43,48} = -30,73 \text{ cm}^2$$

- Nije potrebna nosiva armatura

#### 4.7.4. Provjera graničnih stanja uporabivosti (faza izgradnje)

- Treba zadovoljiti uvjet da vlačno naprezanje u betonu ne bude veće od srednje vrijednosti vlačne čvrstoće betona  $f_{ctm}$
- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n}$$

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n}$$

**Za L=0 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 6226 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} &= \frac{6226}{0,6946 * 10^4} + \frac{6226 * 0,17 * 10^2}{0,236 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,236 * 10^6} \\ &= 1,345 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{6226}{0,6946 * 10^4} - \frac{6226 * 0,17 * 10^2}{0,402 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,402 * 10^6}$$
$$= 0,633 \text{ kN/cm}^2 < 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/2 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 6185 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 1316,16 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{6185}{0,6946 * 10^4} + \frac{6185 * 0,58 * 10^2}{0,236 * 10^6} - \frac{1316,16 * 10^2}{0,236 * 10^6}$$
$$= 1,853 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{6185}{0,6946 * 10^4} - \frac{6185 * 0,58 * 10^2}{0,402 * 10^6} + \frac{1316,16 * 10^2}{0,402 * 10^6}$$
$$= 0,325 \text{ kN/cm}^2 < 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 6246 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 987,12 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{6246}{0,6946 * 10^4} + \frac{6246 * 0,48 * 10^2}{0,236 * 10^6} - \frac{987,12 * 10^2}{0,236 * 10^6}$$
$$= 1,751 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{6246}{0,6946 * 10^4} - \frac{6246 * 0,48 * 10^2}{0,402 * 10^6} + \frac{987,12 * 10^2}{0,402 * 10^6}$$
$$= 0,399 \text{ kN/cm}^2 < 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za 3L/4 :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 6145 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 987,12 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{6145}{0,6946 * 10^4} + \frac{6145 * 0,48 * 10^2}{0,236 * 10^6} - \frac{987,12 * 10^2}{0,236 * 10^6}$$
$$= 1,716 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{6145}{0,6946 * 10^4} - \frac{6145 * 0,48 * 10^2}{0,402 * 10^6} + \frac{987,12 * 10^2}{0,402 * 10^6}$$
$$= 0,397 \text{ kN/cm}^2 < 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

**Za L :**

$$N_{Ed} = P_{m0} = 6134 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = M_{g1} = 0 \text{ kNm}$$

- Donji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} + \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_d^n} - \frac{M_{Ed}}{W_d^n} = \frac{6134}{0,6946 * 10^4} + \frac{6134 * 0,17 * 10^2}{0,236 * 10^6} - \frac{0 * 10^2}{0,236 * 10^6}$$

$$= 1,325 \text{ kN/cm}^2 < 0,6 * f_{ck} = 0,45 * 4,5 = 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

- Gornji rub:

$$\frac{N_{Ed}}{A^n} - \frac{N_{Ed} * y_{cp}}{W_g^n} + \frac{M_{Ed}}{W_g^n} = \frac{6134}{0,6946 * 10^4} - \frac{6134 * 0,17 * 10^2}{0,402 * 10^6} + \frac{0 * 10^2}{0,402 * 10^6}$$

$$= 0,624 \text{ kN/cm}^2 < 2,025 \text{ kN/cm}^2$$

- Uvjet zadovoljava

### Osiguranje područja uvođenja sile prednapinjanja

$$\gamma_{p,unfav} = 1,2 \rightarrow \text{za provjeru lokalnih učinaka (tlačnih naprezanja)}$$

$$P_{d,uk} = P_0 = 6536 \text{ kN}$$

$$P_d = \frac{P_0}{n} = \frac{6536}{4} = 1634 \text{ kN}$$

$$c * c' = \frac{P_d}{0,6 * f_{ck}(t)} = \frac{1634 * 1000}{0,6 * 45} = 60519 \text{ mm}^2$$

- Za slučaj jednakih stranica  $c = c' = \sqrt{60519} = 246,01 \text{ mm}$  ;  $c = 250 \text{ mm}$
- Duljina na kojoj treba rasporediti armaturu za preuzimanje sila cijepanja:  $1,2 * 250 \approx 300 \text{ mm}$
- Najmanja ploština armature za preuzimanje sila cijepanja dobiva se po izrazu:

$$A_s = 0,15 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,15 * \frac{1634}{43,48} * 1,2 = 6,76 \text{ cm}^2$$

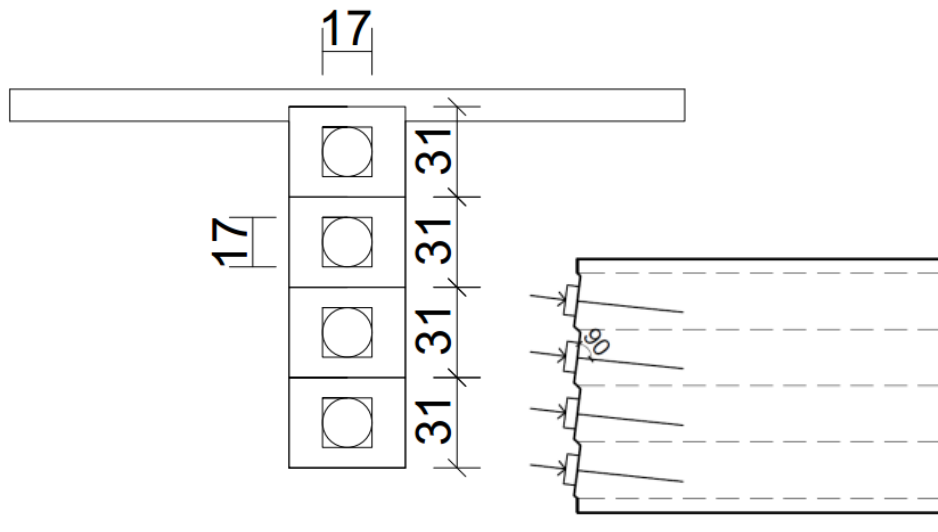
- Kako bi izbjegli proračun pukotina, naprezanje u armaturi potrebno je ograničiti na 250 MPa:

$$A_s = 0,15 * \frac{1634}{25/1,15} * 1,2 = 13,53 \text{ cm}^2$$

- za svaki kabel  $6\emptyset 12/30\text{cm}$   $A_s = 13,57\text{cm}^2$
- Dobivena armatura vrijedi i za horizontalni i vertikalni smjer
- Armatura na čelu nosača (ploština unošenja sile) ne smije biti manja od:

$$A_{sr} = 0,03 * \frac{P_d}{f_{yd}} * \gamma_{p,unfav} = 0,03 * \frac{1634}{25/1,15} * 1,2 = 2,71 \text{ cm}^2$$

- za oba smjera za svaki kabel  $2\emptyset 14$   $A_{sr} = 3,08 \text{ cm}^2$



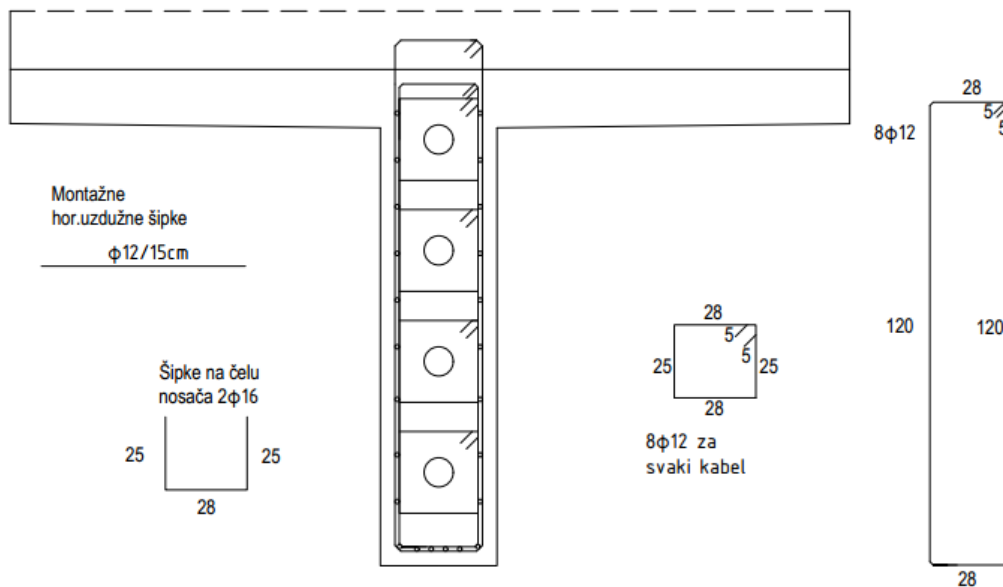
Slika 78. Područja uvođenja sile prednapinjanja

Tablica 16. Armatura za prihvaćanje sile cijepanja

Horizontalni smjer	Vertikalni smjer
$\frac{y_{p2}}{y_2} = \frac{17/2}{40/2} = 0,425 \rightarrow 0,19$	$\frac{y_{p1}}{y_1} = \frac{17/2}{31/2} = 0,548 \rightarrow 0,16$
$T = 0,18 * P_d * \gamma_{p,unfav} = 0,18 * 1634 * 1,2 = 352,94 \text{ kN}$	
$A_{sH} = \frac{352,94}{25/1,15} = 16,24 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_2 = 40 \text{ cm}$	$A_{sr} = \frac{352,94}{25/1,15} = 16,24 \text{ cm}^2$ na duljini $2y_1 = 31 \text{ cm}$
Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sH} = 18,1 \text{ cm}^2$	Odabire se $8\emptyset 12$ $A_{sr} = 18,1 \text{ cm}^2$

- Odabire se veća duljina rasprostiranja u oba smjera  $8\emptyset 12/40\text{cm}$   $A_s = 18,1 \text{ cm}^2$

### Skica horizontalne i vertikalne armature za prihvaćanje sila cijepanja:



Slika 79. Skica armature za prihvaćanje sile cijepanja

#### 4.7.5. Dimenzioniranje na poprečnu silu (eksploatacija)

##### Provjera nosivosti tlačnih štapova:

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

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

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{5329 * 1000 \text{ N}}{1,1952 \text{ m}^2} = 4,42 \text{ MPa} < 0,25 * f_{cd} = 0,25 * 25,5 = 6,375 \text{ MPa}$$

$$N_{Ed} = P_{m\infty} = 5329 \text{ kN}$$

- za  $0 < \sigma_{cp} < 0,25 * f_{cd}$ :

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{4,42}{25,5} = 1,173$$

$$v_1 = v = 0,6 * \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 * \left[ 1 - \frac{45}{250} \right] = 0,49$$

- Za prednapete nosače s injektiranim metalnim cijevima najmanja širina presjeka u vlačnoj zoni  $b_{w,nom}$  računa se (samo za  $V_{Rd,max}$ ):



$$b_{w,nom} = \begin{cases} b_w - 0,5 * \sum \emptyset & \text{za } \emptyset > b_w/8 \\ b_w & \text{za } \emptyset \leq b_w/8 \end{cases}$$

- o gdje je  $\emptyset$  vanjski promjer cijevi a  $\sum \emptyset$  se određuje za najnepovoljniji presjek.

$$\emptyset = 6,5 \text{ cm} > \frac{b_w}{8} = \frac{40}{8} = 5 \text{ cm} \quad b_{w,nom} = 40 - 0,5 * (6,5 + 6,5) \\ = 33,5 \text{ cm}$$

$$z = 0,9 * d = 0,9 * 143 = 128,7 \text{ cm} \quad \text{ctg } \theta = 1,2 \quad (\theta = 40^\circ)$$

$$V_{Rd,max} = 1,173 * 33,5 * 128,7 * 0,49 * \frac{2,55}{1,2 + \frac{1}{1,2}} = 3107,77 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1325,54 \text{ kN} \leq V_{Rd,max} = 3107,77 \text{ kN}$$

### Proračun minimalne armature

- Najveći uzdužni razmak poprečne armature iz uvjeta najmanje poprečne armature:

$$\rho_{w,min} = 0,15 * \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} = 0,15 * \frac{0,38}{43,48} = 0,0013$$

- Pretpostavljeni promjer  $\emptyset$  10:

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$S_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 * m}{b_w * \rho_{w,min}} = \frac{0,785 * 2}{40 * 0,0013} = 30,19 \text{ cm}$$

- Najveći uzdužni razmak  $S_{l,max}$  iz odnosa  $V_{Ed}/V_{Rd,max}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{782,91}{3107,77} = 0,25$$

$$S_{l,max} = \min\{0,75 * d; 30\} = \min\{0,75 * 143; 30\} = \min\{107; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Odabire se minimalna armatura  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$

- Proračun poprečne sile koju nose spone na razmaku 25cm:

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}}{S_{l,max}} * z * f_{ywd} * \cot \theta = \frac{0,785 * 2}{25} * 128,7 * 43,48 * 1,2 = 421,71 \text{ kN}$$

### Proračun potrebne armature

$$s = \frac{A_{sw}^{1*m*z*f_{ywd}}}{V_{Ed}} * \cot \theta = \frac{0,785*2*128,7*43,48}{782,91} * 1,2 = 13,47 \text{ cm}$$

- Usvajamo  $s = 10 \text{ cm}$
- Najveća djelotvorna površina presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi),  $\cot \theta = 1$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sw,max} * f_{ywd}}{b_w * s} &= \frac{0,785 * 2 * 43,48}{40 * 7} = 0,2 \leq \frac{1}{2} * \frac{\alpha_{cw} * v_1 * f_{cd}}{\sin \alpha} \\ &= \frac{1}{2} * \frac{1,173 * 0,49 * 2,55}{1} = 0,7 \end{aligned}$$

- Uvjet zadovoljava

### Uzdužna armatura u hrptu za grede visoke 1m ili više

$$A_s = \frac{k * k_c * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5$$

$$\sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w * (d - 2,5 * (h - d)) = 40 * (143 - 2,5 * (150 - 143)) = 5020 \text{ cm}^2$$

$$k_c = 1,0 \text{ za čisti vlak}$$

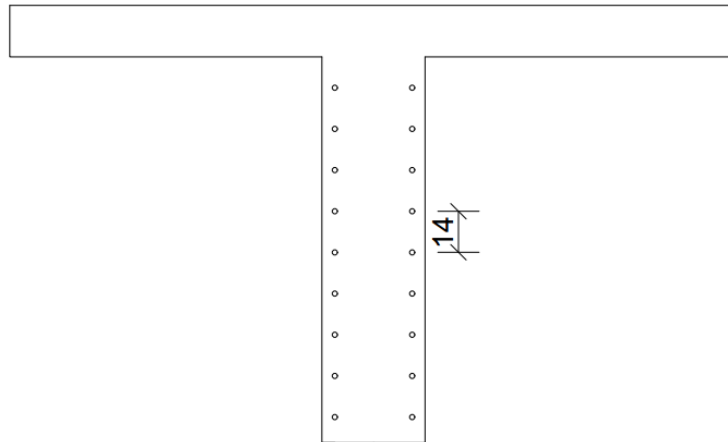
$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,38 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- o early thermal cracking:  $f_{ct,eff} = 0,3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$$A_s = \frac{0,5 * 1 * 0,30 * 5020}{43,48} = 17,3 \text{ cm}^2$$

- Najveći razmak šipki je 200 mm

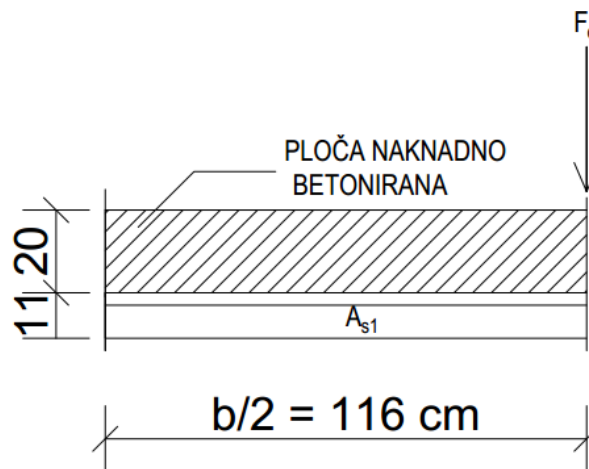
- Usvojeno  $18\emptyset 12$  ( $20,34 \text{ cm}^2$ ) na razmaku od 14 cm (u hrptu dva stupca po 9 šipki) kao na slici 80



Slika 80. Raspored armaturnih šipki u hrptu

#### 4.7.6. Dimenzioniranje pojasnice glavnog nosača

- Kritična faza – faza betoniranja ploče (ona još ne nosi)



Slika 81. Pojasnica glavnog nosača

$$d_1 = c + \frac{\emptyset}{2} = 2,5 + \frac{1}{2} = 3 \text{ cm}$$

$$d = h - d_1 = 11 - 3 = 8 \text{ cm}$$

## Analiza opterećenja:

- Stalno:
  - o stalno od pojasnice  $0,11 * 25 = 2,75 \text{ kN/m'}$
  - o stalno od ploče  $0,2 * 25 = 5 \text{ kN/m'}$
  - o ukupno:  $g = 7,75 \approx 8 \text{ kN/m'}$
- Promjenljivo:  $F_q = 1,5 \text{ kN}$

$$M_g = 8 * \frac{1,16^2}{2} = 5,38 \text{ kNm/m'}$$

$$M_q = 1,5 * 1,16 = 1,74 \text{ kNm/m'}$$

$$M_{Ed} = 1,35 * 5,38 + 1,5 * 1,74 = 9,87 \text{ kNm/m'}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_p * d^2 * f_{cd}} = \frac{987}{100 * 8^2 * 2,55} = 0,06 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,103; \zeta = \frac{z}{d} = 0,960$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{987}{0,960 * 8 * 43,48} = 2,96 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

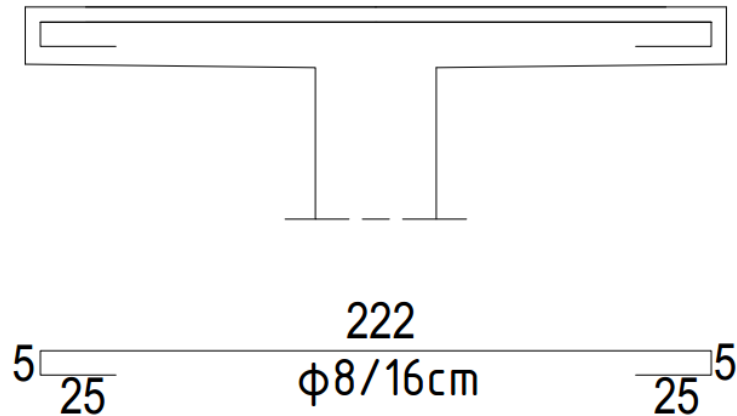
- Minimalna armatura:

$$\begin{aligned} A_{s1,min} &= \max \left\{ 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t * d; 0,0013 * b_t * d \right\} \\ &= \max \left\{ 0,26 \frac{3,8}{500} * 100 * 8; 0,0013 * 100 * 8 \right\} = \max\{1,58; 1,04\} \\ &= 1,58 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Najveći razmaci glavne armature u ploči:

$$s_{max} = \min\{1,5h; 25\} = \min\{1,5 * 11; 25\} = \min\{16,5; 25\} = 16,5 \text{ cm}$$

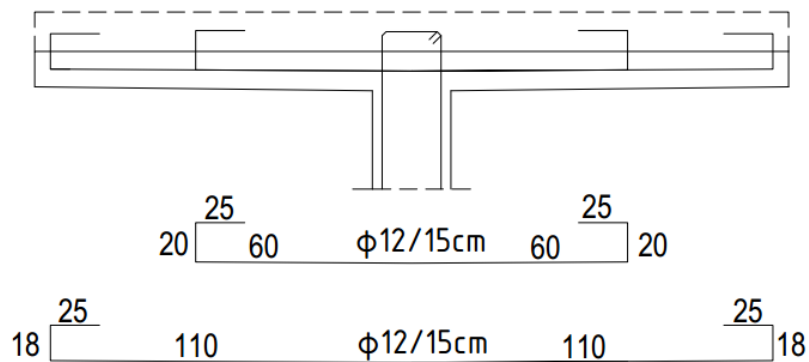
- Usvajamo  $\emptyset 8/16\text{cm}$  ( $3,14\text{cm}^2/\text{m}'$ )



Slika 82. Armatura pojasnice glavnog nosača

- Na svim površinama konstrukcija betoniranih na mjestu treba iz konstrukcijskih razloga ugraditi armaturu od najmanje  $\emptyset 8/16 = 20\text{ cm}$
- Uzdužna armatura u gornjoj zoni ploče na cijeloj širini mosta  $\emptyset 10/25\text{ cm}$
- Poprečna armatura u gornjoj zoni ploče  $\emptyset 12/15\text{ cm}$
- Montažne armaturne šipke u pojasnici  $\emptyset 12/20\text{ cm}$

#### Armatura za sprežanje glavnog nosača s pločom:

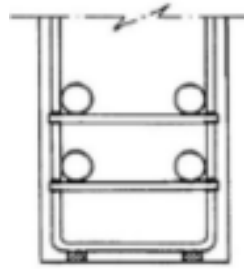


Slika 83. Armatura za sprežanje glavnog nosača s pločom

#### Napomena:

- Kako ne bi došlo do pomicanja kabela (tj. zaštitnih cijevi) za vrijeme betoniranja zaštitnu cijev je potrebno vezati za podupirače ili postavljenu armaturu kao na slici

- Na taj način će se osigurati projektirana geometrija kabela



Slika 84. Prikaz podupiranja kabela za prednapinjanje

#### 4.8. Sile kočenja i ubrzanja

- $Q_{1k}$  treba primijeniti kao uzdužnu silu koja djeluje na površini kolnika

$$Q_{1k} = 0,6 * \alpha_{Q1} * (2 * Q_{1k}) + 0,10 * \alpha_{q1} * q_{1k} * w_1 * L$$

$$180\alpha_{Q1}(kN) \leq Q_{1k} \leq 900 (kN)$$

$$\alpha_{Q1} = 1, \alpha_{q1} = 1 \quad \text{faktori prilagodbe}$$

$$Q_{1k} = 300 \text{ kN}$$

$$q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$$

$$w_1 = 3 \text{ m}$$

$$L = 25,2 \text{ m} \quad \text{ukupna duljina rasponske konstrukcije}$$

$$Q_{1k} = 0,6 * 1 * (2 * 300) + 0,10 * 1 * 9 * 3 * 25,2 = 428,04 \text{ kN} \approx 428 \text{ kN}$$

#### 4.8.1. Temperaturne promijene na rasponskoj konstrukciji

- Jednolika promjena temperature ovisi o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi koja može biti postignuta na mostu
- Kod konstrukcija koje imaju omogućen pomak rasponske konstrukcije ovakva promjena temperature uzrokuje promjenu duljine konstrukcije (elementa)
- Minimalna  $T_{min}$  i maksimalna  $T_{max}$  temperatura zraka u hladu se određuju u skladu s nacionalnim dodatkom za određeno poručje
- Za područje Rijeke:

$$T_{max} = 40^{\circ}C$$

$$T_{min} = -10^{\circ}C$$

- Vjerojatna (početna) proračunska temperatura mosta  $T_0$  je temperatura na kojoj je element ugrađen (ikoliko nema pravih podataka uzima se  $T_0 = 10^{\circ}C$ )
- Najveći raspon negativne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,neg} = T_0 - T_{e.min} = 10 - (-10) = 20^{\circ}C$$

- Najveći raspon pozitivne proračunske temperature mosta:

$$\Delta T_{N,pos} = T_{e.max} - T_0 = 40 - 10 = 30^{\circ}C$$

- Ukupni raspon proračunskih temperatura mosta:

$$\Delta T_N = T_{e.max} - T_{e.min} = 40 - (-10) = 50^{\circ}C$$

- Kod proračuna pomaka za proračun ležaja i prijelaznih naprava najveći rasponi uzimaju se kao:

$$(\Delta T_{N,neg} + [20])^{\circ}C = 20 + 20 = 40^{\circ}C$$

$$(\Delta T_{N,pos} + [20])^{\circ}C = 30 + 20 = 50^{\circ}C$$

- Ako je temperatura ugradnje poznata onda je:  $(\Delta T_{N,neg} - [10])^{\circ}C$  i  $(\Delta T_{N,pos} + [10])^{\circ}C$
- Mjerodavno:  $\Delta T = 50^{\circ}C$

$$\Delta L = \alpha_T * \Delta T * L_0 = 1,10 * 10^{-5} * 50 * 24 = 0,0132 m = 13,2 mm$$

$$u_1 = \frac{\Delta L}{2} = \frac{13,2}{2} = 6,6 mm \quad \text{pomak koji se ostvaruje na svakom od oslonaca}$$

- Pomak od kočne sile - silu dijelimo s brojem elastomernih ležajeva:

$$H_2 = \frac{Q_{1k}}{8} = \frac{428}{8} = 53,5 \text{ kN} \quad \text{po osloncu}$$

- Pretpostavljene dimenzije elastomernog ležaja su :  $a * b * t = 200 * 350 * 52 = 37$  mm

$$u_2 = \frac{H_2 * T_e}{G * A} = \frac{53500 * 37}{1 * 200 * 350} = 28,28 \text{ mm}$$

$$T_e = 37 \text{ mm} - \text{nominalna visina elastomernih slojeva}$$

$$G = 1 \text{ N/mm}^2 - \text{modul posmika}$$

$$A = a * b$$

- Ukupni pomak:  $u_{max} = u_1 + u_2 = 6,6 + 28,28 = 34,88 \text{ mm} \approx 35 \text{ mm}$
- Provjeravaju se tri uvjeta:

1. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,25 * u_{max}$
2. Uvjet:  $v_{xyd} = 0,50 * u_{max}$
3. Uvjet:  $v_{xyd} = u_{max}$

- Minimalna sila koja se može javiti na osloncu:

$$N_{d,min} = \frac{g_1 * L_u}{2} = \frac{18,28 * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} = 230,33 \text{ kN}$$

$$N_d = \frac{(g_2 + \Delta g)L_u}{2} + V_p = \frac{(29,88 + 14,8) * (24 + 0,6 + 0,6)}{2} + 445,72$$

$$= 1008,69 \text{ kN}$$

- Za svaki uvjet odabire se ležaj:

1. uvjet: za ležaj  $800 * 800 * 235$

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

$$N_d = 13511 \text{ kN} > N_d = 1008,69 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 1794 \text{ kN} > N_{d,min} = 230,33 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet minimalne sile

2. uvjet: za ležaj  $300 * 400 * 105$

$$v_{xyd} = 38,5 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$



$$N_d = 1576 \text{ kN} > N_d = 1008,69 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 299 \text{ kN} > N_{d,min} = 230,33 \text{ kN}$$

- nije zadovoljen uvjet minimalne sile

- uvjet: za ležaj 200 \* 350 \* 52

$$v_{xyd} = 37 \text{ mm} > u_{max} = 35 \text{ mm}$$

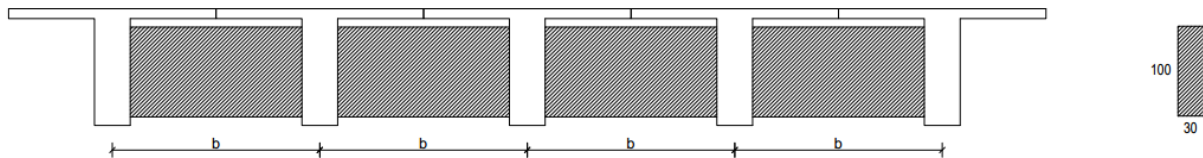
$$N_d = 1268 \text{ kN} > N_d = 1181,21 \text{ kN}$$

$$N_{d,min} = 160 \text{ kN} < N_{d,min} = 230,33 \text{ kN}$$

- Odabran je ležaj dimenzija 200 \* 350 \* 52

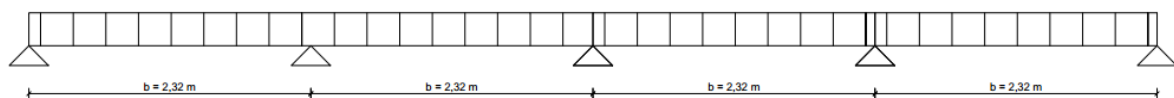
#### 4.9. Dimenzioniranje poprečnog nosača

- Poprečni nosač je oslonjen na hrptove glavnih nosača



Slika 85. Poprečni nosač

- za proračun reznih sila od vlastite težine koristimo pojednostavljenu shemu (kontinuirani nosač) prikazanu na slici 86



Slika 86. Kontinuirani nosač

#### Rezne sile od vlastite težine nosača:

Momenti savijanja:

- Iz tablica za proračun kontinuiranih nosača

$$M_g^{max} = 0,077 * g * b^2 = 0,077 * (0,30 * 1 * 25) * 2,32^2 = 3,11 \text{ kNm}$$

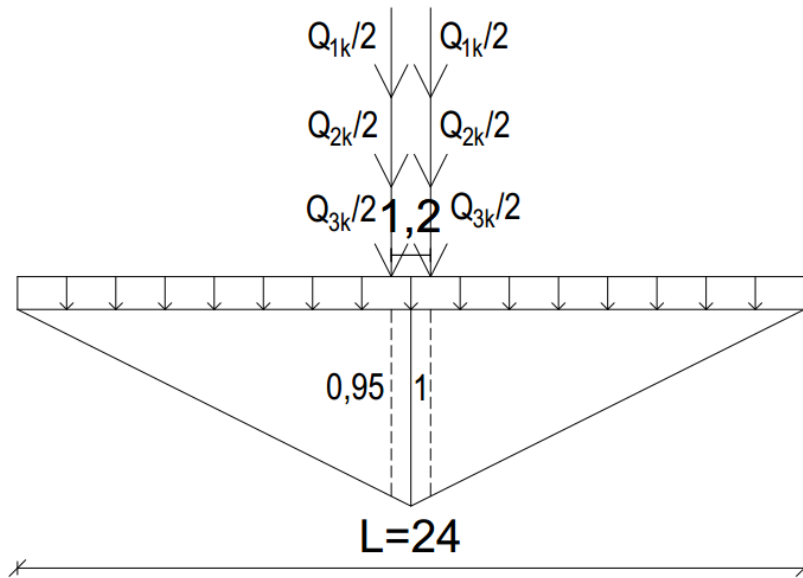
$$M_g^{min} = -0,107 * g * b^2 = -0,107 * (0,30 * 1 * 25) * 2,32^2 = -4,32 \text{ kNm}$$

Poprečna sila:

$$V_g = 1,143 * g * b = 1,143 * (0,30 * 1 * 25) * 2,32 = 19,89 \text{ kN}$$

**Rezne sile od pokretnog opterećenja:**

- za poprečni nosač prvo razmatramo koliki dio opterećenja u uzdužnom smjeru prihvaća, to radimo uz pomoć utjecajne linije za poprečni nosač u uzdužnom smjeru vidljivu na slici 87



Slika 87. Utjecajna linija za poprečni nosač u uzdužnom smjeru

$$\eta Q_{1k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{1k}}{2} = 2 * 0,95 * 150 = 285 \text{ kN}$$

$$\eta Q_{2k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{2k}}{2} = 2 * 0,95 * 100 = 190 \text{ kN}$$

$$\eta Q_{3k} = 2 * 0,95 * \frac{Q_{3k}}{2} = 2 * 0,95 * 50 = 95 \text{ kN}$$

$$\eta q_{1k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{1k} = 12 * 9,0 = 108 \text{ kN/m'}$$

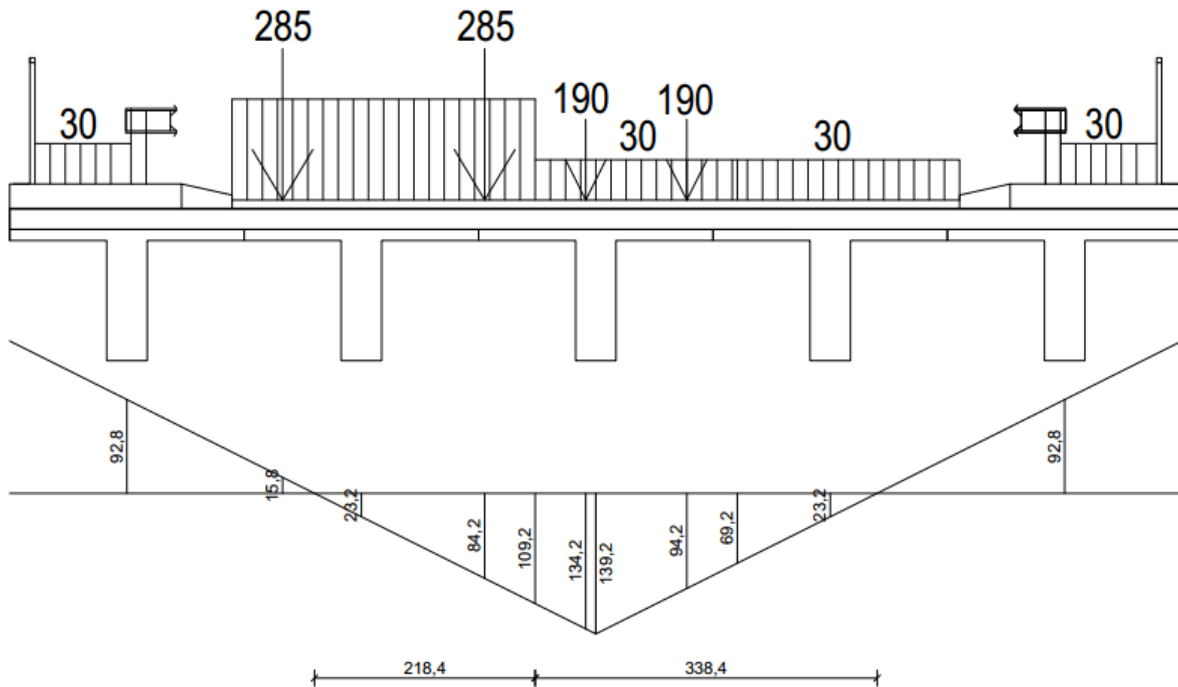
$$\eta q_{2k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{2k} = 12 * 2,5 = 30 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{3k} = 24 * 1 * \frac{1}{2} * q_{2k} = 12 * 2,5 = 30 \text{ kN/m'}$$

$$\eta q_{rk} = \eta q_{fk} = \eta q_{2k} = 30 \text{ kN/m'}$$

Rezne sile zatim računamo pomoću utjecajnih linija u poprečnom smjeru. Prometno opterećenje se postavlja u različite položaje kao na slikama 88 i 89 kako bi se dobila najveća vrijednost momenta savijanja na poprečnom nosaču.

### 1. Varijanta



Slika 88. Prva varijanta prometnog opterećenja

- Položaj 1.prometnog traka maksimalno lijevo, jedna sila osovinskog opterećenja na 1.prometnom traku je nad negativnom ordinatom
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za prvu varijantu

$$M_{Q1k}^{max} = \eta Q_{1k} * (0,842 - 0,158) = 285 * 0,684 = 195 \text{ kNm}$$

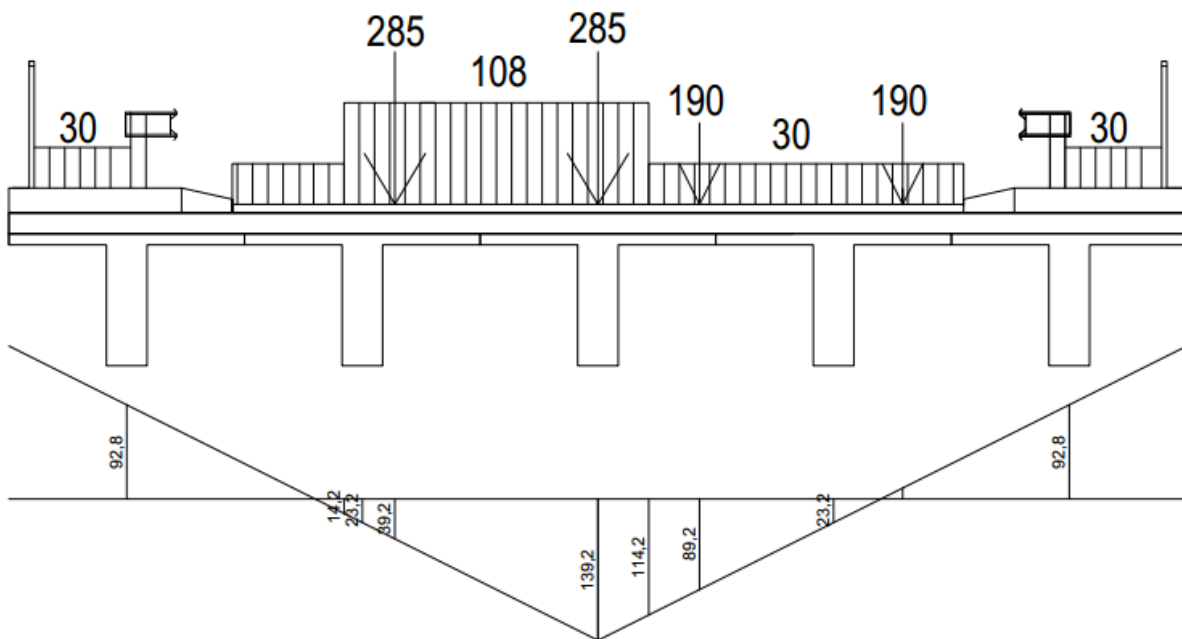
$$M_{Q2k}^{max} = \eta Q_{2k} * (1,342 + 0,942) = 190 * 2,284 = 434 \text{ kNm}$$

$$M_{q1k}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{1,092 + 0,232}{2} * 1,72 + \frac{0,232}{2} \right) = 108 * 1,25 = 135 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{1,092}{2} * 3,384 \right) = 30 * 1,85 = 55,5 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q1k}^{max} + M_{Q2k}^{max} + M_{q1k}^{max} + M_{q2k}^{max} = 195 + 434 + 135 + 55,5 = 819,5 \text{ kNm}$$

## 2. Varijanta



Slika 89. Druga varijanta prometnog opterećenja

- Opterećenje smješteno u položaj da je jedan kotač opterećenja na 1.prometnom traku iznad maksimalne ordinate, 2. i 3.prometnog traka nema (sve je preostala površina)
- Određivanje maksimalnih momenata  $M_p^{max}$  za drugu varijantu

$$M_{Q_{1k}}^{max} = \eta Q_{1k} * (0,392 + 1,392) = 285 * 1,78 = 507,3 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{1k}}^{max} = \eta q_{1k} * \left( \frac{1,142 + 1,392}{2} * 0,5 + \frac{1,392 + 0,142}{2} * 2,5 \right) = 108 * 2,55 = 275,4 \text{ kNm}$$

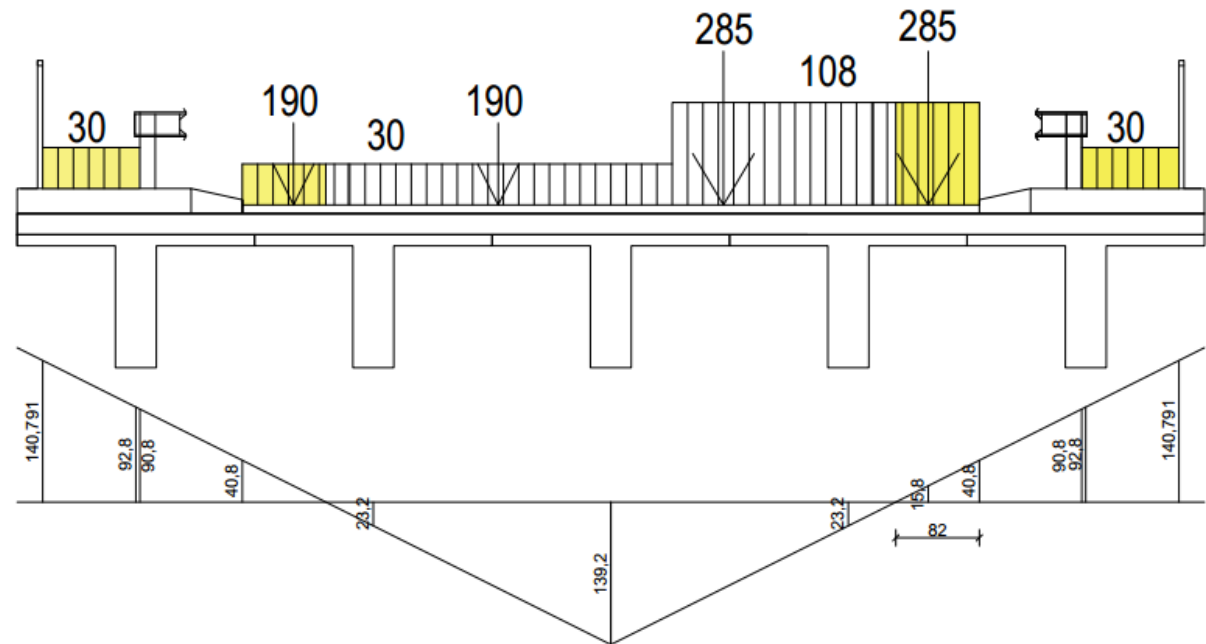
$$M_{Q_{2k}}^{max} = \eta Q_{2k} * (0,892 - 0,108) = 190 * 0,78 = 148,2 \text{ kNm}$$

$$M_{q_{2k}}^{max} = \eta q_{2k} * \left( \frac{1,142}{2} * 2,28 \right) = 30 * 1,3 = 39 \text{ kNm}$$

$$M_p^{max} = M_{Q_{1k}}^{max} + M_{q_{1k}}^{max} + M_{Q_{2k}}^{max} + M_{q_{2k}}^{max} = 507,3 + 275,4 + 148,2 + 39 = 970 \text{ kNm}$$

- Mjerodavna je druga varijanta

## Određivanje minimalnih momenata



Slika 90. Položaj prometnog opterećenja za minimalni moment

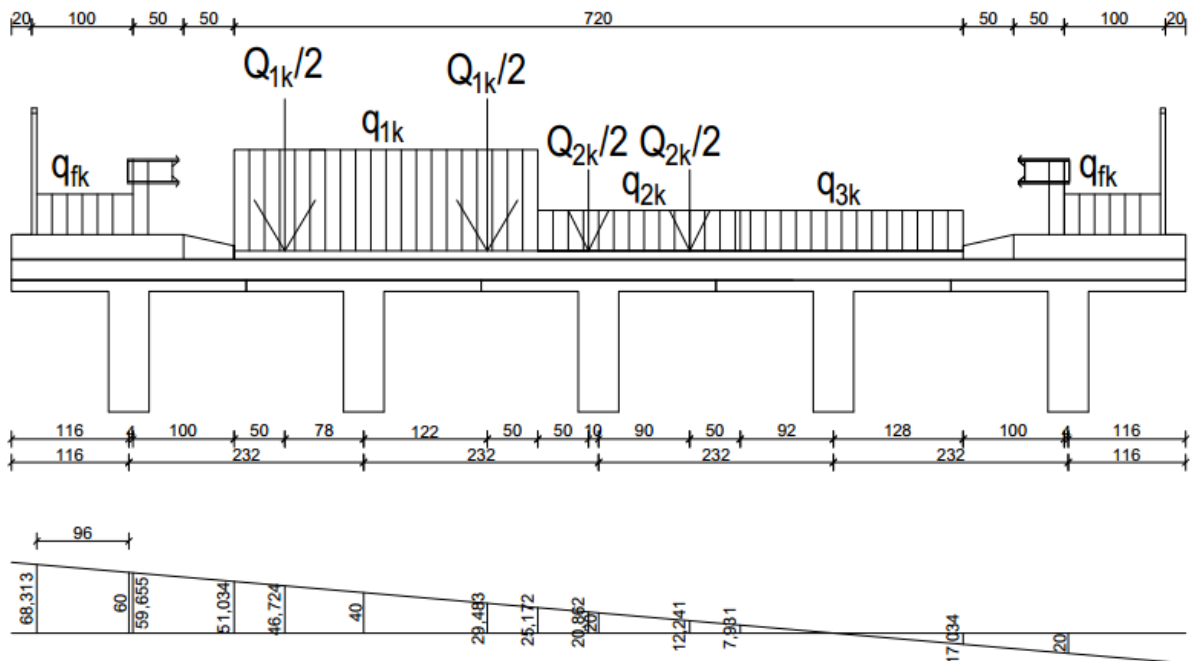
$$M_{q1k}^{\min} = \eta q_{1k} * \left( \frac{-0,408}{2} * 0,82 \right) = 108 * (-0,167) = -18 \text{ kNm}$$

$$M_{q2k}^{\min} = \eta q_{2k} * \left( \frac{-0,408}{2} * 0,82 \right) = 30 * (-0,167) = -5 \text{ kNm}$$

$$M_{qfk}^{\min} = \eta q_{fk} * \left( \left( \frac{-1,408 - 0,908}{2} * 1,0 \right) * 2 \right) = 30 * (-2,316) = -69,5 \text{ kNm}$$

$$M_p^{\min} = M_{q1k}^{\min} + M_{q2k}^{\min} + M_{qfk}^{\min} = -18 - 5 - 69,5 = -92,5 \text{ kNm}$$

## Određivanje poprečne sile:



Slika 91. Položaj prometnog opterećenja za maksimalnu poprečnu silu na poprečnom nosaču

$$V_{Q_{1k}} = \eta Q_{1k} * (0,467 + 0,295) = 285 * 0,762 = 217,17 \text{ kN}$$

$$V_{Q_{2k}} = \eta Q_{2k} * (0,209 + 0,122) = 190 * 0,331 = 62,89 \text{ kN}$$

$$V_{q_{1k}} = \eta q_{1k} * \left( \frac{0,510 + 0,252}{2} * 3 \right) = 108 * 1,143 = 123,44 \text{ kN}$$

$$V_{q_{2k}} = \eta q_{2k} * \left( \frac{0,252 + 0,079}{2} * 3 \right) = 30 * 0,497 = 14,91 \text{ kN}$$

$$V_{q_{3k}} = \eta q_{3k} * \left( \frac{0,079}{2} * 0,92 \right) = 30 * 0,036 = 1,08 \text{ kN}$$

$$V_{q_{fk}} = \eta q_{fk} * \left( \frac{0,683 + 0,597}{2} * 1 \right) = 30 * 0,64 = 19,2 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_p &= V_{Q_{1k}} + V_{Q_{2k}} + V_{q_{1k}} + V_{q_{2k}} + V_{q_{3k}} + V_{q_{fk}} \\ &= 217,17 + 62,89 + 123,44 + 14,91 + 1,08 + 19,2 = 438,69 \text{ kN} \end{aligned}$$

### Dimenzioniranje poprečnog nosača:

- Beton C40/50

$$f_{cd} = \frac{4,0}{1,5} = 2,67 \text{ kN/cm}^2$$

- Čelik B500B

- Donja zona:

$$M_g = 3,11 \text{ kNm}$$

$$M_p = 970 \text{ kNm}$$

- Gornja zona:

$$M_g = -4,32 \text{ kNm}$$

$$M_p = -92,5 \text{ kNm}$$

- Predlaže se gornju zonu armirati s 1/3 armature iz donje zone

- Poprečne sile:

$$V_g = 19,89 \text{ kN}$$

$$V_p = 438,69 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 1,35 * M_g + 1,35 * M_p = 1,35 * 3,11 + 1,35 * 970 = 1313,7 \text{ kNm} \\ \approx 1314 \text{ kNm}$$

$$d_1 = c + \emptyset_v + \frac{\emptyset_1}{2} = 5 + 1 + \frac{2}{2} = 7 \text{ cm}$$

$$d = 100 - 7 = 93 \text{ cm}$$

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{131400}{30 * 93^2 * 2,67} = 0,19 < \mu_{Rds,lim} = 0,296$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,269; \quad \zeta = \frac{z}{d} = 0,888$$

$$A_{s1} = \frac{M_{sd}}{\zeta * d * f_{yd}} = \frac{131400}{0,888 * 93 * 43,48} = 36,6 \text{ cm}^2$$

- Minimalna armatura:

$$A_{s1,min} = \max \left\{ 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d; 0,0013 * b * d \right\}$$

$$= \max \left\{ 0,26 * \frac{3,5}{500} * 30 * 93; 0,0015 * 30 * 93 \right\} = \max\{5,08; 4,19\}$$

$$= 5,08 \text{ cm}^2$$

- Odabire se 10Ø22 (38,01 cm<sup>2</sup>)
- Gornju zonu armiramo s trećinom armature iz donje zone, odabire se 5Ø18 (12,72 cm<sup>2</sup>)

Osnovna duljina sidrenja:

- Gornja zona (loši uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{0,7 * f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{0,7 * 3,7} = 42 * \emptyset$$

- o Za Ø18:  $l_{b,rqd} = 42 * 18 = 75,6 \approx 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{\emptyset}{4} * \frac{434,8}{3,7} = 29,38 * \emptyset$$

- o Za Ø22:  $l_{b,rqd} = 29,38 * 22 = 64,6 \approx 65 \text{ cm}$

Potrebna duljina sidrenja na osloncu:

- Za slučaj sidrenja ravnom šipkom  $\alpha_a = 1,0$
- Gornja zona:

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø18  $l_{b,net} = 76 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} = 1,0 * l_b * 1 = l_b$$

- o Za Ø22  $l_{b,net} = 65 \text{ cm}$



Duljina nastavljanja preklapanjem ( $\alpha_1 = 2$ ):

- Gornja zona:

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 18$   $l_s = 152 \text{ cm}$

- Donja zona (dobri uvjeti prionjivosti):

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 = l_{b,net} * 2$$

○ Za  $\emptyset 22$   $l_s = 130 \text{ cm}$

**Dimenzioniranje na poprečne sile:**

$$V_{sd} = 1,35 * V_g + 1,35 * V_p = 1,35 * 19,89 + 1,35 * 438,69 = 619,08 \text{ kNm}$$
$$\approx 619 \text{ kNm}$$

$$V_{Rd1} = (\tau_{Rd} * k * (1,2 + 40 * \rho_l) + 0,15 * \sigma_{cp}) * b_{w,nom} * d$$

$$\tau_{Rd} = 0,041 \text{ kN/cm}^2$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,81 = 0,79 \geq 1$$

○ Uvjet ne zadovoljava:  $k = 1$

$$\rho_l = \frac{A_{s1}}{b * d} = \frac{36,6}{30 * 93} = 0,01 < 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$V_{Rd1} = (0,041 * 1 * (1,2 + 40 * 0,01)) * 30 * 93 = 183,02 \approx 183 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 619 \text{ kN} > V_{Rd1} = 183 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti tlačnih štapova:

$$V_{Rd2} = 0,5 * v * f_{cd} * b_w * z$$

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} = 0,7 - \frac{40}{200} = 0,5 \geq 0,5$$

○ Uvjet zadovoljava

$$z \approx 0,9 * d = 0,9 * 93 = 83,7 \text{ cm}$$

$$V_{Rd2} = 0,5 * 0,5 * 2,67 * 30 * 83,7 = 1676,09 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 619 \text{ kN} < V_{Rd2} = 1676,09 \text{ kN}$$

- Nosivost tlačnih štapova zadovoljava

Proračun spona:

$$A_{sw}^1 = 0,785 \text{ cm}^2 \quad m = 2$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 * f_{ywd} * m * z}{V_{sd} - V_{Rd1}} = \frac{0,785 * 43,48 * 2 * 83,7}{619 - 183} = 13,1 \text{ cm}$$

- Proračun maksimalnog razmaka spona iz uvjeta najmanjeg postotka armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_{w,min}$ )

$$\rho_{w,min} = 0,0013 \quad \text{za } f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw,uk}}{s_w * b_w * \sin \alpha}$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 * m}{b_w * \rho_{w,min} * \sin \alpha} = \frac{0,785 * 2}{30 * 0,0013 * 1} = 40,26 \text{ cm}$$

- Najveći dopušteni razmak spona:

$$\frac{V_{sd}}{V_{Rd2}} = \frac{619}{1676,09} = 0,37$$

$$s_{l,max} = \min\{0,6 * d; 30\} = \min\{0,6 * 93; 30\} = \min\{55,8; 30\} = 30 \text{ cm}$$

- Usvajamo minimalnu armaturu  $\emptyset 10/25 \text{ cm}$

Proračun poprečne sile  $V_{Rd,s}^{min}$  koju nose minimalne spona  $s_{l,max} = 25 \text{ cm}$ :

$$V_{Rd,s}^{min} = \frac{A_{sw}}{s_{l,max}} * z * f_{ywd} * \text{ctg } \theta = \frac{0,785 * 2}{25} * 83,7 * 43,48 * 1,2 = 274 \text{ kN}$$

Proračun potrebne poprečne armature:

$$s = \frac{A_{sw}^1 * m * z * f_{ywd}}{V_{Ed}} * \text{ctg } \theta$$

$$s = \frac{0,785 \cdot 2 \cdot 83,7 \cdot 43,48}{918,14} \cdot 1,2 = 8,47 \text{ cm}$$

Usvojeni razmak spona  $s = 10 \text{ cm}$ .

Najveća djelotvorna ploština presjeka poprečne armature (koja se smije ugraditi) za  $\text{ctg}\theta = 1$ :

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\sin \alpha}$$

$$\frac{0,785 \cdot 2 \cdot 43,48}{30 \cdot 10} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1 \cdot 0,48 \cdot 2,55}{1}$$

$$0,228 < 0,612$$

Usvaja se  $\phi 10/10 \text{ cm}$  duž cijelog poprečnog nosača.

### Uzdužna armatura u hrptu:

(vlak od unutarnjih sila – skupljanje i puzanje, promjene temperature, early thermal cracking )

$$A_s = \frac{k \cdot k_c \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$k = 0,5, \quad \sigma_s = f_{yd}$$

$$A_{ct} = b_w \cdot (d - 2,5(h - d)) = 30 \cdot (93 - 2,5(100 - 93)) = 3020 \text{ cm}^2$$

Ploštinu možemo smanjiti za djelotvornu ploštinu vlačne zone!

$$k_c = 1,0 \quad \text{za čisti vlak}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0,41 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_s = \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 0,41 \cdot 3020}{43,48} = 15,24 \text{ cm}^2$$

Najveći razmak šipki je  $200 \text{ mm}$  pa je usvojeno:

$18\phi 10$  ( $15,7 \text{ cm}^2$ ) na razmaku  $16 \text{ cm}$ , složeno u dva reda po 9 šipki, vertikalno u hrptu.

## 5. ISKAZ MATERIJALA

U narednim tablicama prikazane su količine betona, uzdužne armature, prednapetih kabela te zaštitnih cijevi za sve verzije dimenzioniranih rasponskih sklopova radi usporedbe i odabira najracionalnijeg rješenja.

Tablica 17. Količina betona za glavne i poprečne nosače

	Glavni nosači		Poprečni nosači		Ukupna količina betona [m <sup>2</sup> /m']
	Površina poprečnog presjeka jednog nosača [m <sup>2</sup> ]	Količina betona za ukupan broj nosača [m <sup>2</sup> /m']	Površina poprečnog presjeka jednog nosača [m <sup>2</sup> ]	Količina betona za ukupan broj nosača [m <sup>2</sup> /m']	
Most s tri glavna nosača	1,3	3,9	0,3	0,9	4,8
Most sa četiri glavna nosača	0,91	3,6	0,3	0,9	4,5
Most s pet glavnih nosača	0,73	3,7	0,3	0,9	4,6

Što se tiče količine betona za glavne nosače ona je najveća za most sa tri glavna nosača radi velike visine glavnog nosača. Zbrojem betona za glavne i poprečne nosače i dalje je potrebno najveću količinu utrošiti na varijantu mosta sa tri glavna nosača jer su poprečni nosači jednaki za sve tri varijante dimenzioniranih rasponskih sklopova.

U niže navedenoj tablici 18 prikazane su količine uzdužne armature u glavnim i poprečnim nosačima dok je poprečna armatura izostavljena iz tablice zbog pojednostavljenja prikaza rezultata.

*Tablica 18. Količina uzdužne armature u glavnim i poprečnim nosačima*

	Armatura u glavnim nosačima	Masa jedne šipke [kg/m']	Armatura u poprečnim nosačima	Masa jedne šipke [kg/m']	Ukupna količina armature [kg/m']
Most s tri glavna nosača	3 x 8 $\phi$ 18	2,170	3 x 4 $\phi$ 18	2,170	359,4
	3 x 18 $\phi$ 14	1,242	3 x 8 $\phi$ 22	3,058	
	3 x 39 $\phi$ 12	0,911	3 x 18 $\phi$ 10	0,634	
Most sa četiri glavna nosača	4 x 6 $\phi$ 18	2,170	3 x 4 $\phi$ 18	2,170	367,1
	4 x 18 $\phi$ 12	0,911	3 x 8 $\phi$ 22	3,058	
	4 x 29 $\phi$ 12	0,911	3 x 18 $\phi$ 10	0,634	
Most s pet glavnih nosača	5 x 7 $\phi$ 18	2,170	3 x 5 $\phi$ 18	2,170	412,12
	5 x 18 $\phi$ 12	0,911	3 x 10 $\phi$ 22	3,058	
	5 x 21 $\phi$ 12	0,911	3 x 18 $\phi$ 10	0,634	

Količina armature po metru dužnom očekivano je najveća za varijantu mosta sa pet glavnih nosača dok je ona najmanja za varijantu mosta sa tri glavna nosača.

Tablica 19. Količina prednapetih kabela

	Dužina [m]	Masa [kg/m']	Ukupna količina kabela [kg]
Most s tri glavna nosača	36 x 101,014	1,102	12022
Most sa četiri glavna nosača	28 x 100,916	1,102	12455
Most s pet glavnih nosača	32 x 100,906	1,102	17792

Ukupna količina prednapetih kabela dobivena je umnoškom ukupnog broja kabela sa njihovom masom. Najveća ukupna količina je kod varijante mosta sa pet glavnih nosača i ona iznosi oko 17,8 tona.

Tablica 20. Količina zaštitnih cijevi

	Dužina [m]	Broj zaštitnih cijevi [kom]	Ukupna dužina zaštitnih cijevi [m]
Most s tri glavna nosača	101,014	12	1212,2
Most sa četiri glavna nosača	100,916	16	1614,7
Most s pet glavnih nosača	100,906	20	2018,1

Dužina cijevi za sve tri varijante dimenzioniranih mostova se ne razlikuje puno radi toga što je u svim varijantama premošćen jednak raspon. Mala razlika koja se primijeti nastala je zbog visine glavnih nosača koja je najveća kod mosta sa najmanjim brojem glavnih nosača kao što je već nekoliko puta spomenuto u ovom radu. Međutim kada tu dužinu svake pojedine cijevi pomnožimo s ukupnim brojem cijevi za svaku varijantu tada je ukupna dužina cijevi očekivano najveća za varijantu s najvećim brojem glavnim nosača a time i najvećim brojem zaštitnih cijevi.

## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog diplomskog rada bila je dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača. Broj poprečnih nosača bio je jednak za sve varijante. U radu su se dimenzionirale i proračunavale varijante sa tri, četiri i pet glavnih nosača. Za sve navedene varijante određen je broj i vrsta kabela za prednapinjanje, proračunati su gubici sile u kabelima te su izvršene provjere graničnih stanja nosivosti i uporabivosti. Također dimenzionirani su poprečni nosači koji su radi pojednostavljenja proračuna imali jednak poprečni presjek za sve tri varijante mostova.

Prilikom dimenzioniranja bilo je potrebno povećati visinu glavnog nosača kod varijante s tri nosača dok je kod ostalih varijanti visina se smanjivala s povećanjem broja glavnih nosača. Upravo iz tog razloga količina betona potrebna za glavne nosače najveća je kod varijante s najvećom površinom poprečnog presjeka glavnog nosača odnosno kod varijante sa tri nosača. Zbrojem količine betona za glavne i poprečne nosače, most sa tri glavna nosača i dalje ima najveći utrošak betona dok most sa četiri nosača ima najmanji utrošak betona. Isto tako radi zadovoljavanja graničnog stanja uporabivosti u fazi gradnje bilo je potrebno povećati klasu betona za slučaj sa tri glavna nosača. Osim spomenute količine betona na kraju rada prikazane su i količine uzdužne armature u glavnim i poprečnim nosačima zatim količine prednapetih kabela te na kraju ukupne dužine zaštitnih cijevi. Količina uzdužne armature najveća je kod mosta sa pet glavnih nosača dok je kod mosta sa tri glavna nosača ona najmanja. Isti je slučaj i sa količinom prednapetih kabela kao i ukupnom dužinom zaštitnih cijevi.

Prema navedenim iskazima materijala odnosno prema količini betona optimalni izbor bila bi varijanta s četiri glavna nosača dok bi prema ostalim količinama materijala uvjerljivo racionalniji izbor bio most sa tri glavna nosača. Obzirom na navedene rezultate priloženi su nacrti varijante mosta koja se prikazala kao najbolje rješenje a to je most sa tri glavna nosača. Međutim prilikom donošenja konačne odluke u obzir bi se trebao uzeti detaljniji troškovnik s prikazanim cijenama materijala.

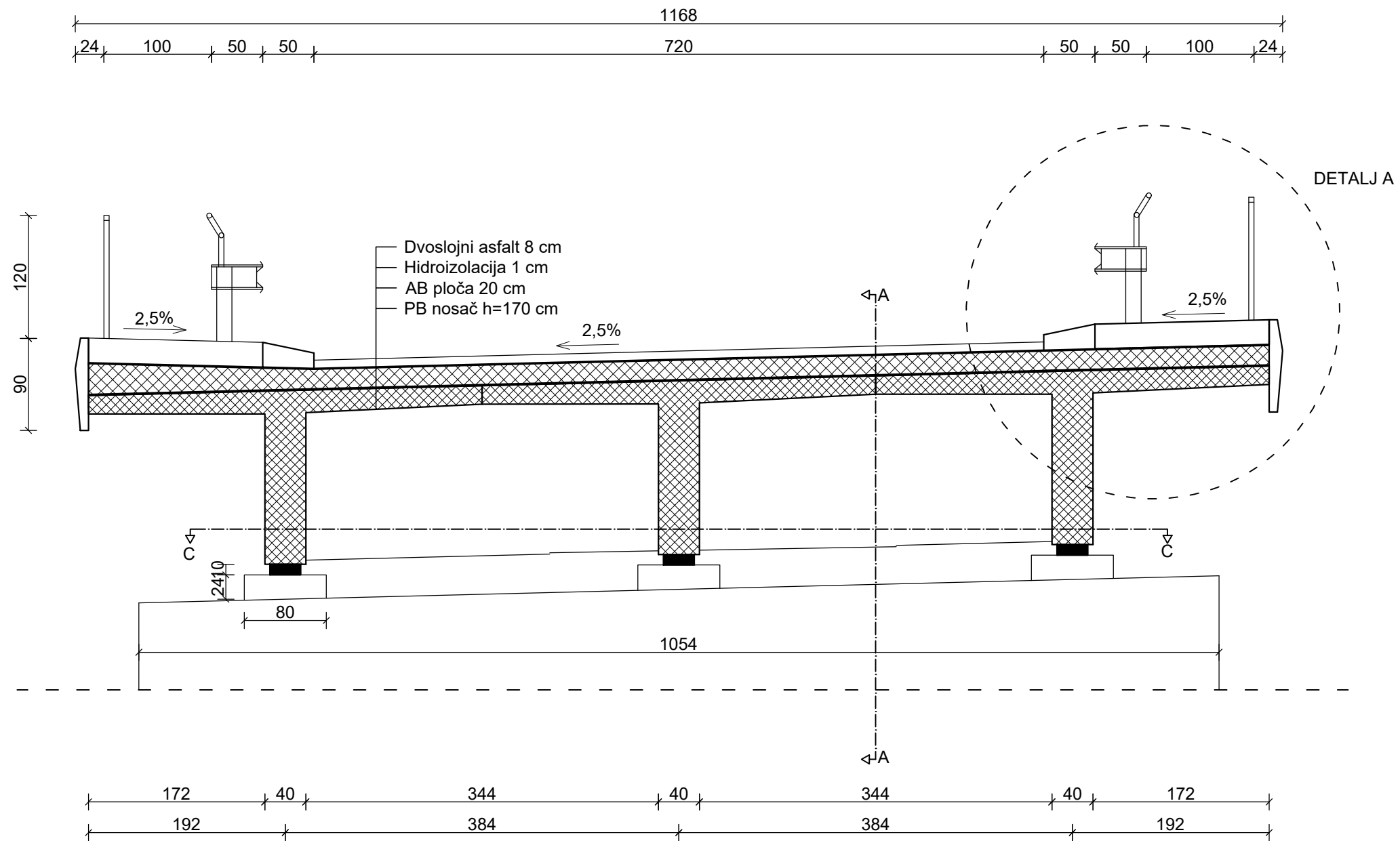
## 7. LITERATURA

- [1] Štimac Grandić, I., Masivni mostovi, *bilješke s predavanja*, 2022.
- [2] *Tehnička enciklopedija 1-13*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963.-1997.
- [3] Sesar, P., *Optimizing of Continuous Bridge Connections*, Doctoral Thesis, Faculty of Civil Engineering, J.J. Strossmayer University of Osijek, Osijek, 2005.
- [4] <http://www.viadukt.hr/vijadukti>, pristup 3.9.2022.
- [5] EN 1991-2:2003 *Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges*, Brussels, 2003.
- [6] HRN EN 206:2021 *Beton – Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost* (EN 206:2013+A2:2021), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2021.
- [7] HRN EN 1992-2:2013/NA:2013 *Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – 2.dio: Betonski mostovi – Proračun i pravila razrade detalja*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013.
- [8] *Prestressing steels – Part 3: Strand*, Brussels, 2005.
- [9] *DYWIDAG Bonded Post – Tensioning Systems using Strands*, Germany, 2021.
- [10] EN 1992-1-1:2004 *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1. General rules and rules for buildings*, Brussels, 2004.
- [11] EN 1922-2:2005 *Eurocode 2: Design of concrete structures – Concrete bridges – Design and detailing rules*, Brussels, 2005.
- [12] EN 1911-1-5:2003 *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-5: General actions – Thermal actions*, Brussels, 2003.
- [13] HRN EN 1991-1-5:2008 *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-5: Opća djelovanja – Toplinska djelovanja*, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2008.
- [14] *Lasto Block – Mageba*, Švicarska, 2022.



# POPREČNI PRESJEK B-B

## M 1:50



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

Diplomski rad  
Dimenzioniranje i proračun tri varijante  
rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta  
s različitim brojem glavnih nosača

Sadržaj nacrti:  
Poprečni presjek B-B

Mjerilo:  
1:50

Akadska godina:  
2021./2022.

Student:  
Matea Jerković

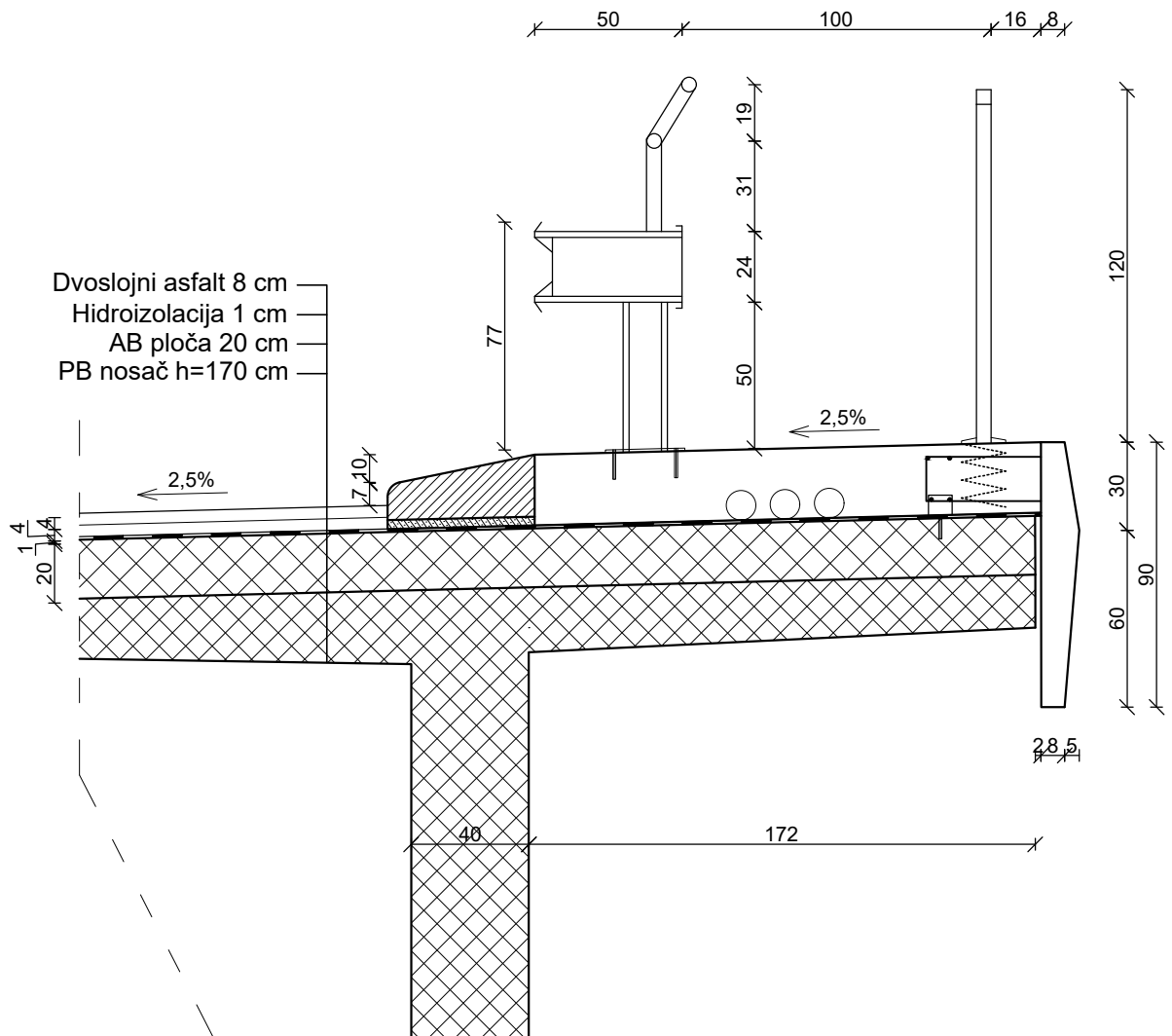
Datum:  
15.09.2022.

Mentor:  
dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad

List:  
1

# DETALJ A

## M 1:25



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

*Diplomski rad*  
**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

*Sadržaj nacrt:*  
**Detalj A**

*Mjerilo:*  
**1:25**

*Akademska godina:*  
**2021./2022.**

*Student:*  
**Matea Jerković**

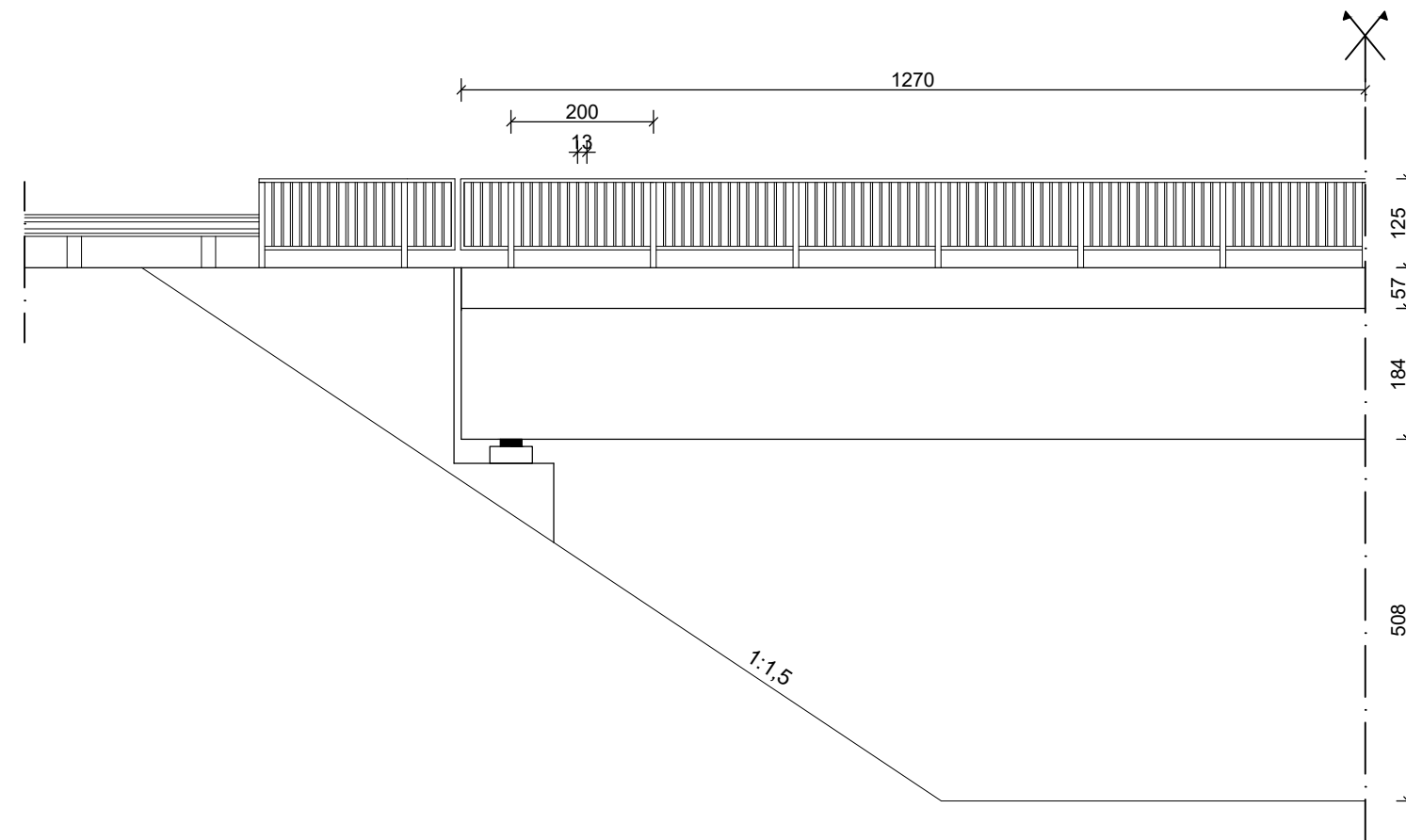
*Datum:*  
**15.09.2022.**

*Mentor:*  
**dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad**

*List:*  
**2**



POGLED NA MOST U UZDUŽNOM SMJERU  
M 1:100



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

*Diplomski rad*  
**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

*Sadržaj nacrt:*  
**Pogled na most u uzdužnom smjeru**

*Mjerilo:*  
**1:100**

*Akadska godina:*  
**2021./2022.**

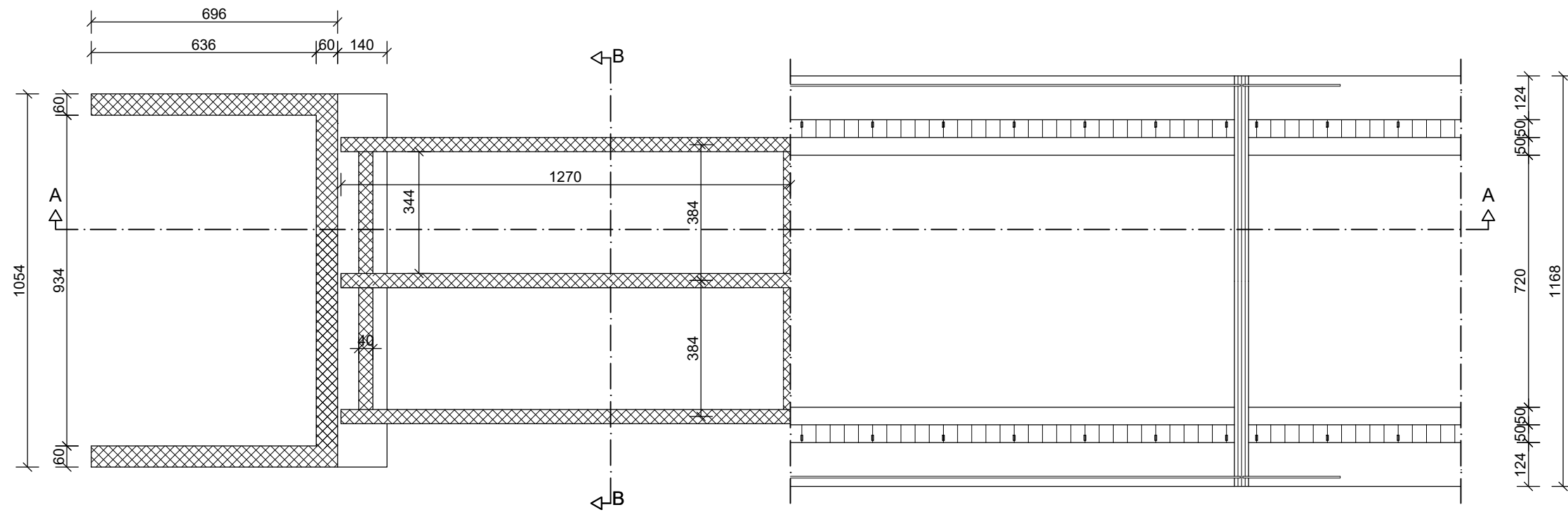
*Student:*  
**Matea Jerković**

*Datum:*  
**15.09.2022.**

*Mentor:*  
**dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad**

*List:*  
**4**

# TLOCRT MOSTA I PRESJEK KROZ REBRA C-C M 1:150



**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

*Diplomski rad*  
**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

*Sadržaj nacrt:*  
**Tlocrt mosta i presjek kroz rebra C-C**

*Mjerilo:*  
**1:150**

*Akadska godina:*  
**2021./2022.**

*Student:*  
**Matea Jerković**

*Datum:*  
**15.09.2022.**

*Mentor:*  
**dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad**

*List:*  
**5**

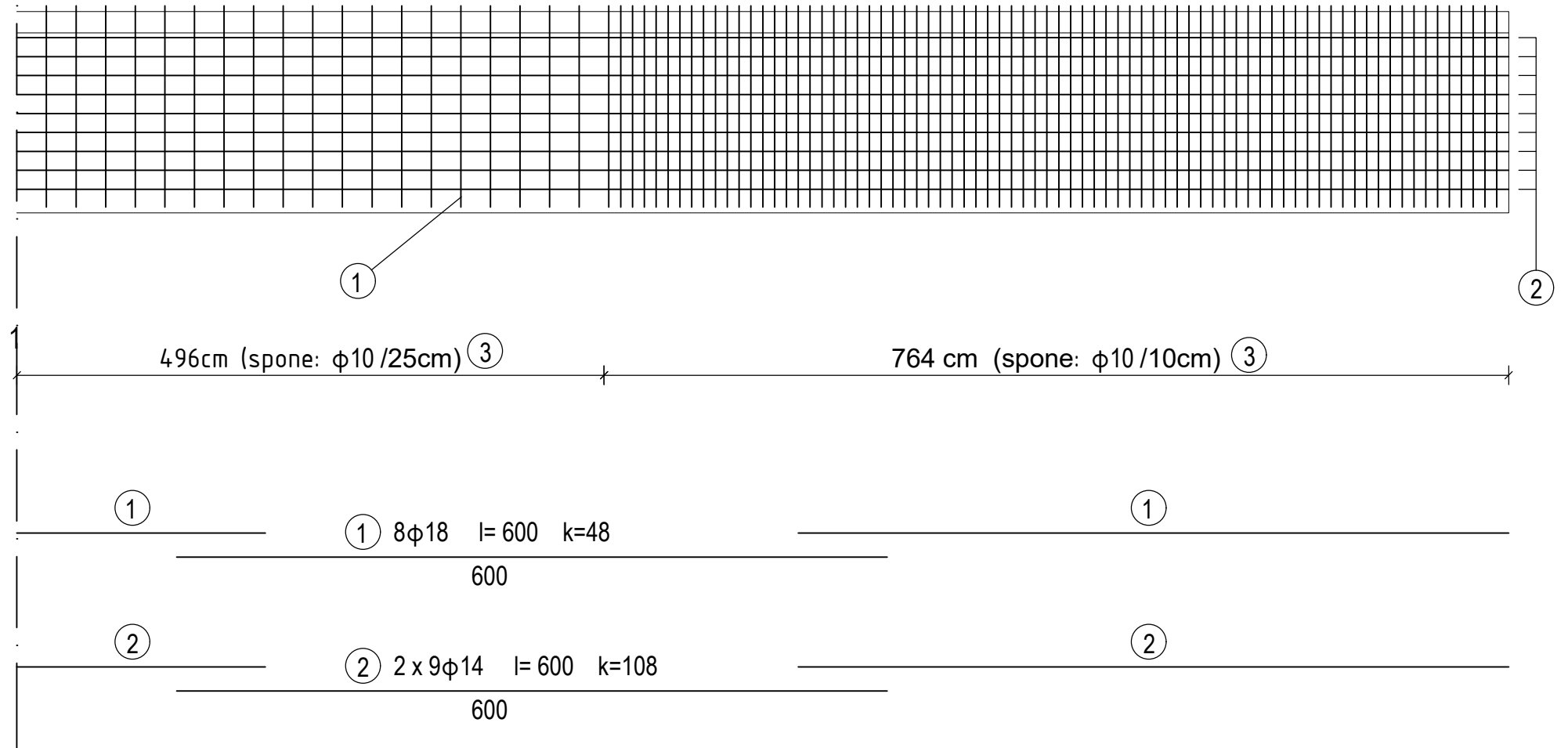
# NACRT ARMATURE GLAVNOG NOSAČA

## M 1:50

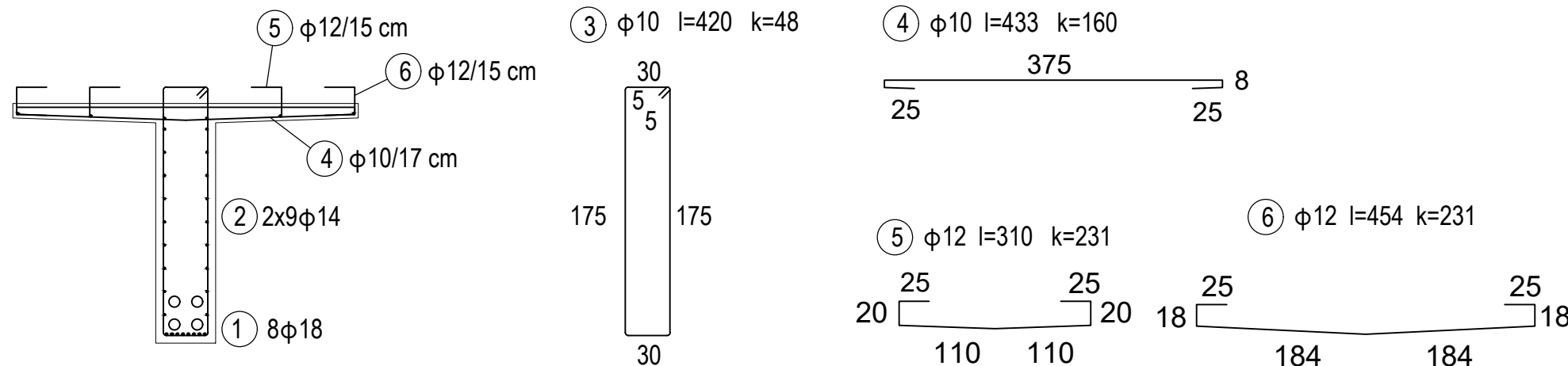


ISKAZ ARMATURE

POZ	DULJINA	φ	KOM.	UKUPNA DULJINA			
				φ 10	φ 12	φ 14	φ 18
1	6,00	18	48				288,00
2	6,00	14	108			648,00	
3	4,20	10	48	201,6			
4	4,33	10	160	692,8			
5	3,10	12	231		716,1		
6	4,54	12	231		1048,70		
Ukupno (m)				894,40	1764,80	648,00	288,00
Masa (kg/m):				0,63	0,911	1,242	2,170
Ukupno po promjerima (kg):				567,05	1607,73	804,82	624,96
Sveukupno (kg):							3604,56



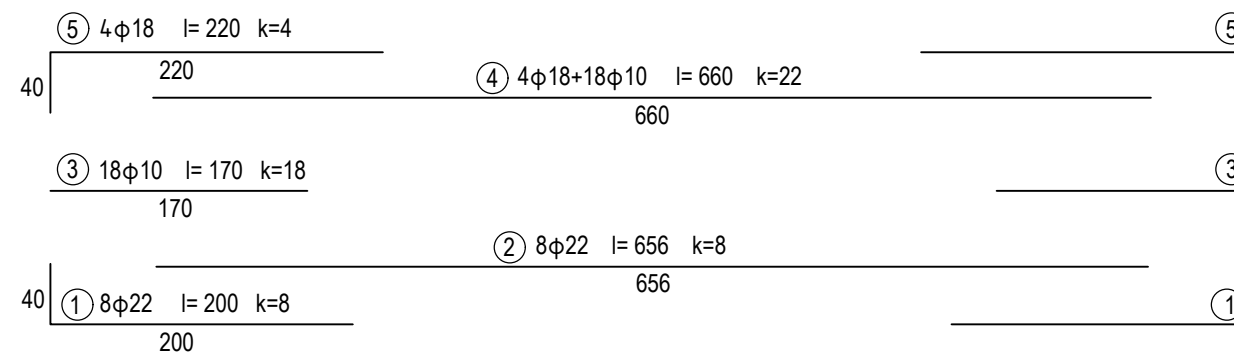
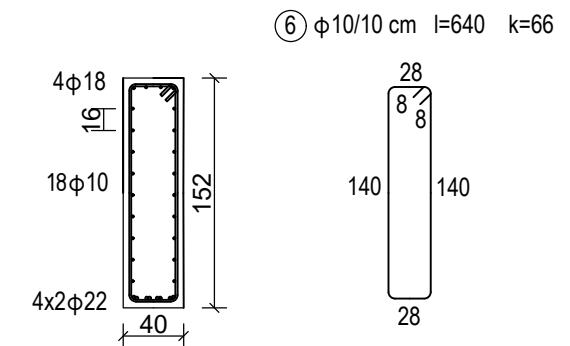
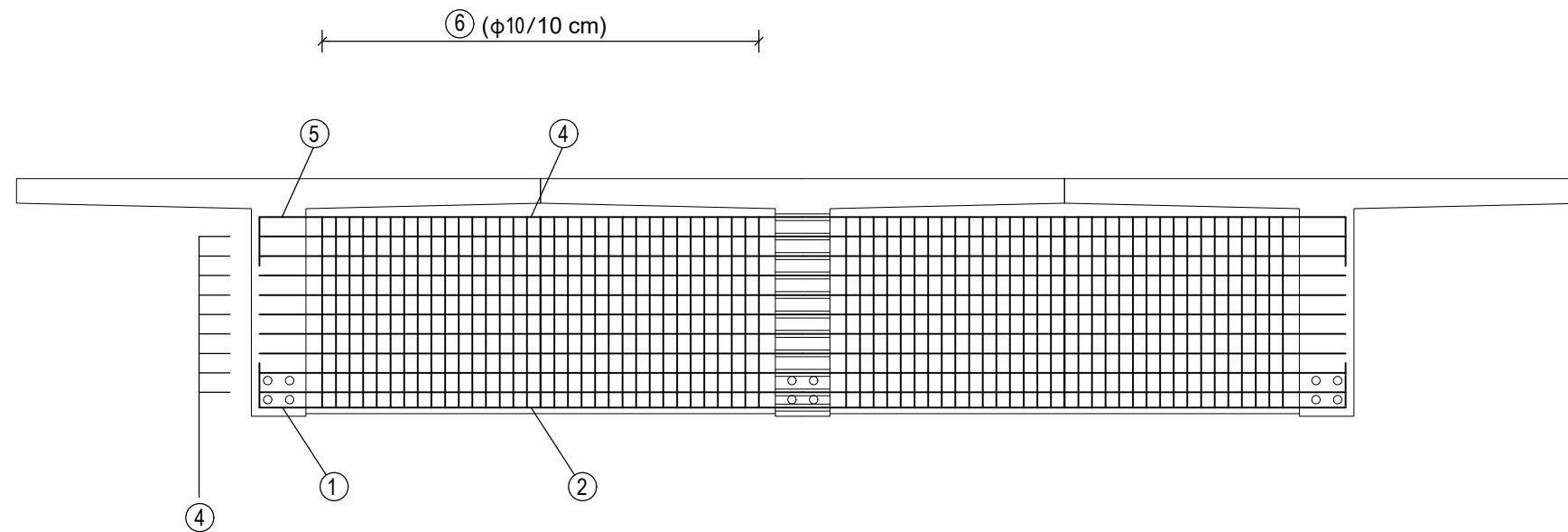
PRESJEK 1-1



<b>GF</b> GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI	
Diplomski rad Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača	Sadržaj nacrt: Nacrt armature glavnog nosača
Mjerilo: 1:50	Akadska godina: 2021./2022.
Student: Matea Jerković	Datum: 15.09.2022.
Mentor: dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad	List: 6

# NACRT ARMATURE U POPREČNOM NOSAČU

## M 1:50



### ISKAZ ARMATURE

POZ	DULJINA	φ	KOM.	UKUPNA DULJINA		
				φ 10	φ 18	φ 22
1	4,00	22	16			64,00
2	6,56	22	8			52,48
3	3,40	10	36	122,4		
4	6,60	10,18	22	118,8	26,40	
5	4,40	18	8		35,20	
6	6,40	10	66	422,40		
Ukupno (m)				663,60	61,60	116,48
Masa (kg/m):				0,634	2,170	3,058
Ukupno po promjerima (kg):				420,72	133,67	356,20
Sveukupno (kg):						910,59

### GF GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

Diplomski rad  
**Dimenzioniranje i proračun tri varijante rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta s različitim brojem glavnih nosača**

Sadržaj nacrt:  
**Nacrt armature u poprečnom nosaču**

Mjerilo:  
**1:50**

Akadska godina:  
**2021./2022.**

Student:  
**Matea Jerković**

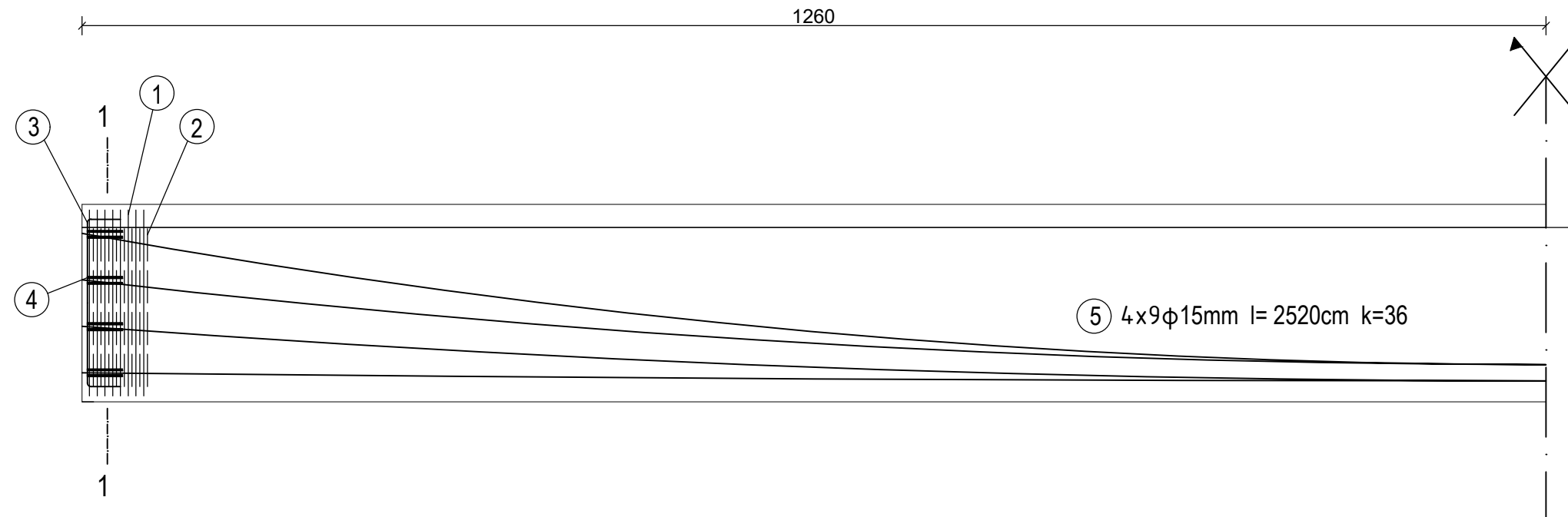
Datum:  
**15.09.2022.**

Mentor:  
**dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad**

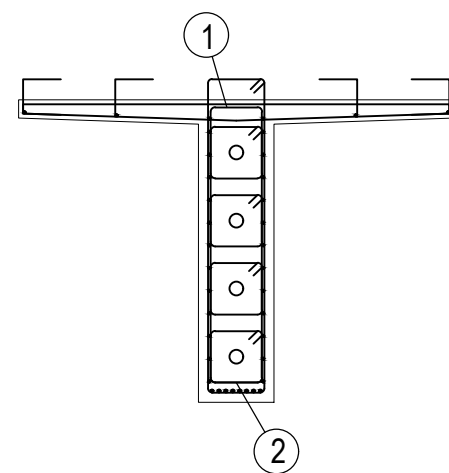
List:  
**7**

# NACRT KABELA ZA PREDNAPINJANJE

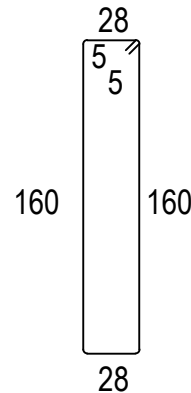
M 1:50



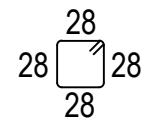
PRESJEK 1-1



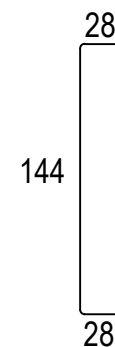
①  $\phi 12$  l=386 k=16



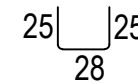
②  $\phi 12$  l=122 k=64



③  $\phi 16$  l=200 k=4



④  $\phi 16$  l=78 k=16



ISKAZ ARMATURE

POZ	DULJINA	$\phi$	KOM.	UKUPNA DULJINA		
				$\phi 12$	$\phi 15$	$\phi 16$
1	3,86	12	16	67,76		
2	1,22	12	8	9,76		
3	2,00	16	12			24,00
4	0,78	16	10			7,80
5	25,20	15	36		655,20	
Ukupno (m)				77,52	655,20	31,80
Masa (kg/m):				0,911	1,102	1,621
Ukupno po promjerima (kg):				70,62	722,03	51,55
Sveukupno (kg):						844,20

**GF** GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

Diplomski rad  
 Dimenzioniranje i proračun tri varijante  
 rasponskog sklopa grednog rebrastog mosta  
 s različitim brojem glavnih nosača

Sadržaj nacrt:  
 Nacrt kabela za prednapinjanje

Mjerilo:  
 1:50

Akadska godina:  
 2021./2022.

Student:  
 Matea Jerković

Datum:  
 15.09.2022.

Mentor:  
 dr.sc. Ivana Štimac Grandić, dipl.ing.grad

List:  
 8