

3. STATIČKI PRORAČUN

3.1. Materijali:

Tablica 3.1 : Maksimalno dopuštena naprezanja u čeliku ovisno o namjeni mosta i debljini limova

KVALITETA ČELIKA	$t \leq 40$ mm		40 mm < $t \leq 100$ mm		max t [mm] Cestovni mostovi za - 30 °C	max t [mm] Željeznički mostovi za - 30 °C
	f_y	f_u	f_y	f_u		
S235 J2	235	360	215	340	85	60
S355 J2	355	510	335	490	65	35
S355 K2					80	
S355 N					80	60
S460 N	460	570	430	550	60	
S460 NL					90	

3.1.1. Čelik:

Kvaliteta materijala:

S355J2G3

Karakteristična vrijednost granice razvlačenja:

$t \leq 40$ mm

$f_{yk} = 35,5 \text{ kN/cm}^2$

40 mm < $t \leq 100$ mm

$f_{yk} = 33,5 \text{ kN/cm}^2$

Modul elastičnosti:

$E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2$

3.1.2. Beton:

Kvaliteta materijala:

C 35/45

Karakteristična vrijednosti:

Tlačna čvrstoća:

$f_{ck} = 3,5 \text{ kN/cm}^2$

Vlačna čvrstoća:

$f_{ctm} = 0,32 \text{ kN/cm}^2$

$f_{ctm, 0,95} = 0,42 \text{ kN/cm}^2$

Modul elastičnosti:

$E_{cm} = 3300 \text{ kN/cm}^2$

3.1.3. Armatura:

Kvaliteta materijala:

B 500 B

Karakteristična vrijednost granice razvlačenja:

$f_{sk} = 50,0 \text{ kN/cm}^2$

Modul elastičnosti:

$E_s = 21000 \text{ kN/cm}^2$

3.1.4. Moždanici:

Kvaliteta materijala:

S355J2G3+C450

Karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće:

$f_{uk} = 45,0 \text{ kN/cm}^2$

3.2. Statički sustav i poprečni presjeci

3.2.1. Određivanje sudjelujuće širine betonskog dijela presjeka

Kod širokopojasnih nosača sa posmično mekanom pojasnicom koji su opterećeni na savijanje nije ispunjena pretpostavka o ravnim poprečnim presjecima uslijed posmične deformacije pojasnica.

Ovaj utjecaj se uvodi u proračun preko sudjelujuće širine pojasnica b_e koja se izračunava iz ravnoteže sila u pojasnici.

Kod spregnutih nosača sudjelujuća širina pojasnice ovisi o geometriji poprečnog presjeka nosača, posmične krutosti pojasnice, plastičnog ponašanja materijala, a u području negativnih momenata savijanja i o nastanku pukotina u betonskoj pojasnici.

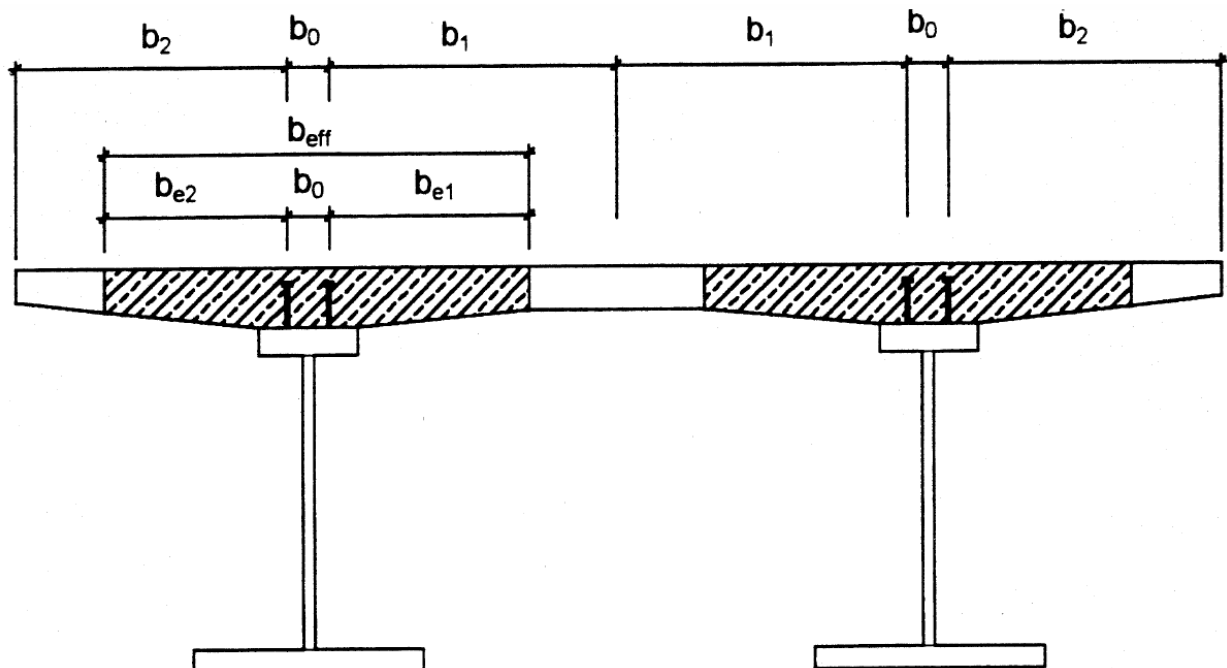
Tome pridonose i efektivni raspon nosača L_e i djelovanja na nosač.

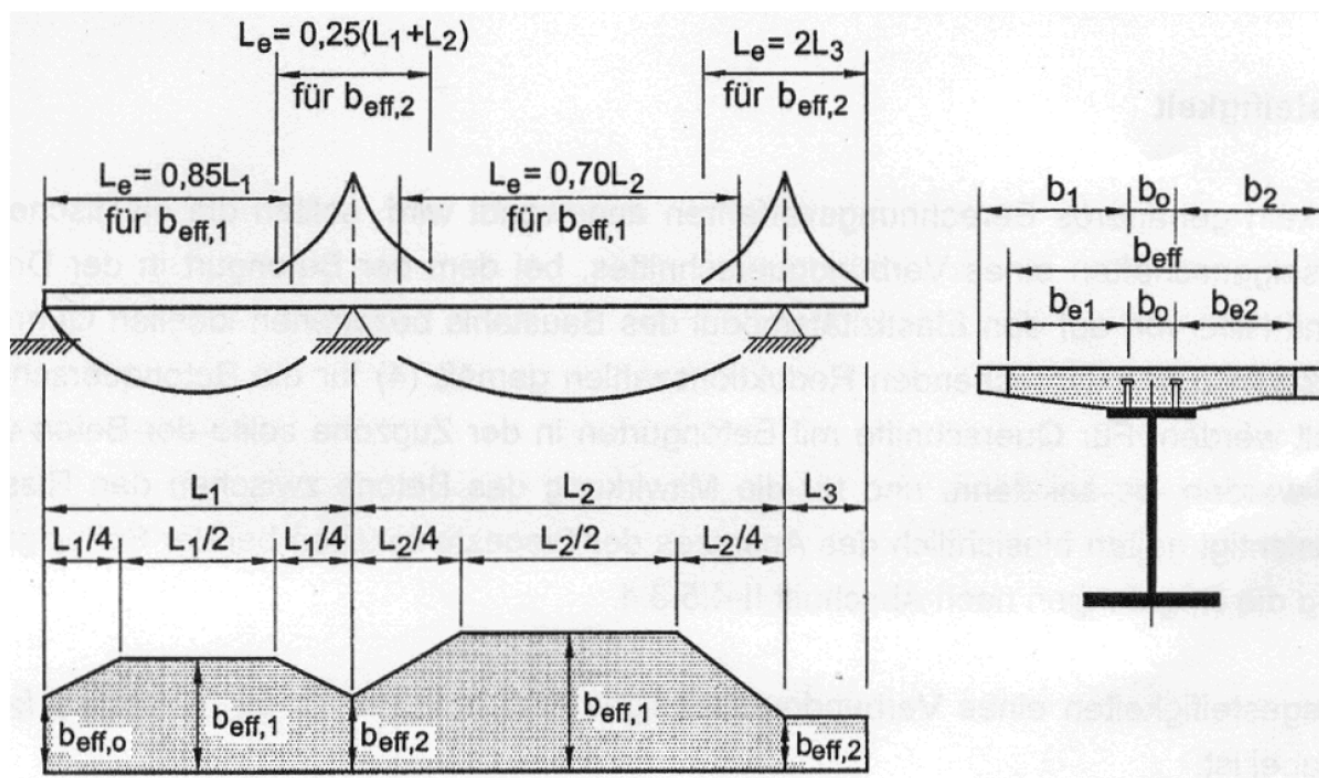
$$b_{\text{eff}} = b_0 + \sum b_{ei}$$

b_0 - razmak vanjskih moždanika

$b_{ei} = L_e/8 \leq b_i$ - sudjelujuća širina sa svake strane hrpta

L_e - približni razmak nul-točaka momenata savijanja

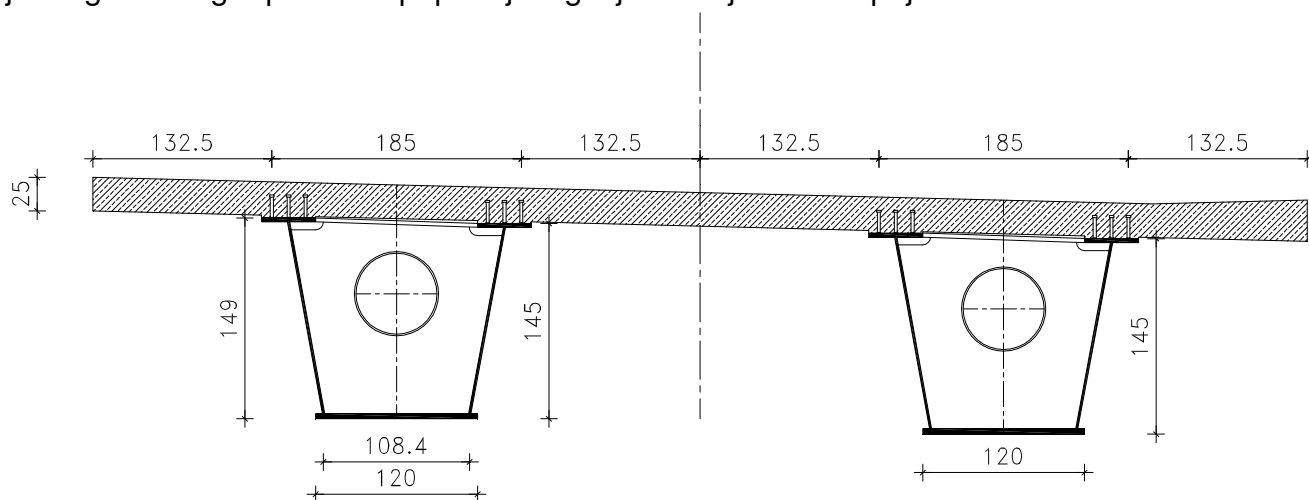




Slika 3.1. Prikaz određivanja razmaka nul-točki momentnog dijagrama

STATIČKI SUSTAV KOLNIKA U POPREČNOM SMJERU:

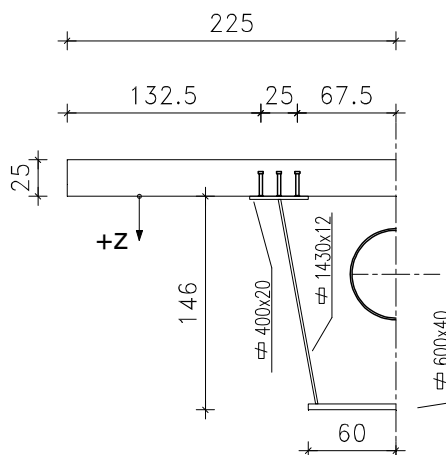
Poprečni presjek kolnika rastavlja se u **4 spregnuta nosača** koji se sastoje od pripadajućeg dijela kolničke armiranobetonske ploče, gornje čelične pojasnice, jednog čeličnog hrpta te od pripadajućeg dijela donje čelične pojasnice.



Rastavljanjem presjeka na 4 nosača dobivamo 4 spregnuta I nosača sa jednakim širinama gornjeg betonskog pojasa te istim geometrijskim karakteristikama čeličnog dijela nosača.

Provodi se dimenzioniranje jednog sandučastog spregnutog nosača.

Statički sustav je prosta greda: $L_e = L = 40$ m



Sudjelujuća širina na krajinim osloncima:

$$b_{\text{eff},0} = b_0 + \sum \beta_i \cdot b_{ei} \quad \text{pri čemu je } \beta_i = (0,55 + 0,025 \cdot \frac{L_e}{b_i}) \leq 1$$

$$L_e = L = 40 \text{ m}$$

Kolnička ploča između nosača:

$$b_{e2} = \frac{L_e}{8} = \frac{40}{8} = 5$$

$$b_2 = 1,85 / 2 = 0,675 \text{ m}$$

$$\beta_2 = (0,55 + 0,025 \cdot \frac{L_e}{b_2}) = (0,55 + 0,025 \cdot \frac{40}{1,325}) = 1,30 \leq 1,00$$

$$\beta_2 \cdot b_{e2} = 1,00 \cdot 5,00 = 5,00 \text{ m} > 0,675 \text{ m}$$

Cijeli dio pojasa sudjeluje u prenošenju opterećenja

Kolnička ploča – konzolni dio:

$$b_{e1} = \frac{L_e}{8} = \frac{40}{8} = 5$$

$$b_2 = 1,325 \text{ m}$$

$$\beta_1 = (0,55 + 0,025 \cdot \frac{L_e}{b_1}) = (0,55 + 0,025 \cdot \frac{40}{1,325}) = 1,30 \leq 1,00$$

$$\beta_1 \cdot b_{e1} = 1,00 \cdot 5,00 = 5,00 \text{ m} > 1,325 \text{ m}$$

Cijeli dio pojasa sudjeluje u prenošenju opterećenja

$$b_{\text{eff},0} = b_0 + \sum \beta_i \cdot b_{ei} = 0,25 + 0,675 + 1,325 = 2,250 \text{ m}$$

Polje:

$$b_{e1} = \frac{L_e}{8} = \frac{40}{8} = 5 > 0,675 \text{ m}$$

Cijeli dio pojasa sudjeluje u prenošenju opterećenja

$$b_{e2} = \frac{L_e}{8} = \frac{40}{8} = 5 > 1,325 \text{ m}$$

Cijeli dio pojasa sudjeluje u prenošenju opterećenja

Određivanje sudjelujuće širine čeličnog dijela presjeka

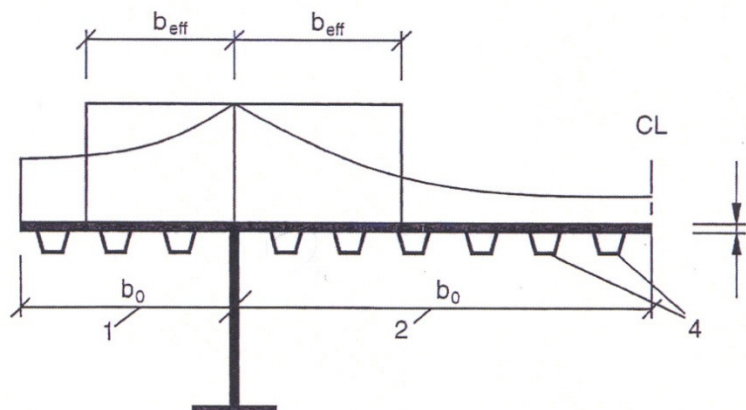
Kod širokopojasnih nosača (sa posmično mekim pojasevima) opterećenih savijanjem ne vrijedi Bernoullijeva hipoteza o ravnim poprečnim presjecima.

Naprezanja u pojascima smanjuju se s udaljavanjem od spoja sa hrptom.

Stoga se definira sudjelujuća širina pojasnice prema izrazu:

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0$$

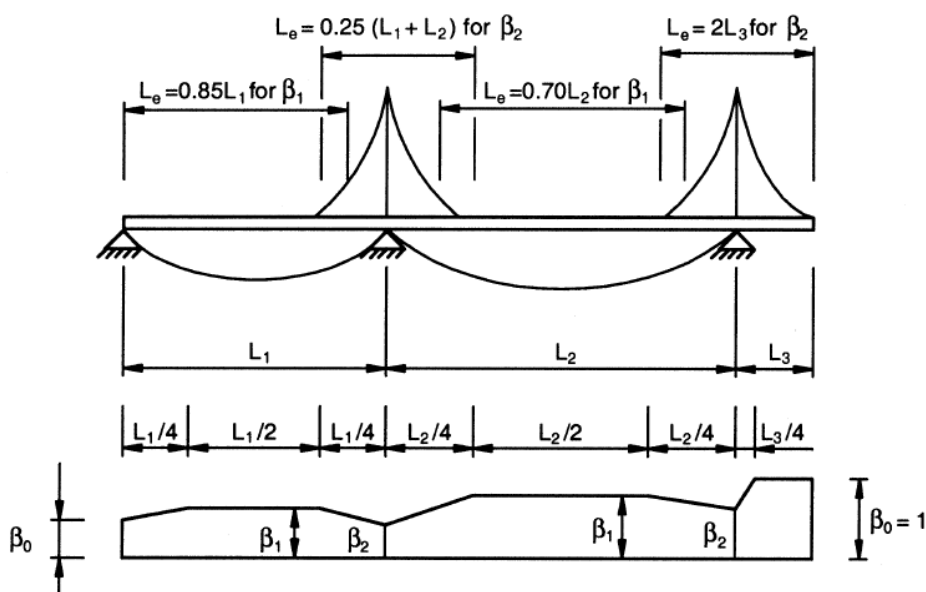
Na zamjenjujućem poprečnom presjeku koji se sastoji od hrpta i pojasnice sa sudjelujućom širinom, određuju se naprezanja uslijed savijanja nosača.



Slika 5.7: Definicije i oznake za sudjelujuću širinu

- 1 za jednostrano pridržane pojaseve
- 2 za dvostrano pridržane pojaseve
- 3 debljina hrpta t
- 4 ukrate s $A_{sl} = \sum A_{sli}$

Faktor β ovisi o statičkom sustavu i toku momentnog dijagrama. Prije svega ovisi o efektivnoj duljini L_e



ODREĐIVANJE SUDJELUJEĆE ŠIRINE ČELIČNOG DIJELA PRESJEKA

Sudjelujuća širina određena je izrazom:

$$b_{\text{eff}} = \beta \cdot b_0$$

Koeficijent redukcije β definiran je tablicom sa sljedećim ulaznim vrijednostima za κ :

$$\kappa = \alpha_0 \cdot b_0 / L_0, \text{ gdje je } \alpha_0 = \sqrt{(1 + A_{s1} / b_0 \cdot t)}$$

A_{s1} - površina svih ukruta na širini b_0

κ	Mjesto dokaza		Vrijednosti β	
≤ 0.02	1		$\beta = 1$	1.0
0.02 - 0.70	2	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6.4 \cdot \kappa^2}$	0.9988
	3	Moment na ležaju	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6.0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \cdot \kappa} \right) + 1.6 \cdot \kappa^2}$	1.1068
> 0.7	4	Moment u polju	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5.9 \cdot \kappa}$	12.5549
	5	Moment na ležaju	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8.6 \cdot \kappa}$	8.6133
svi κ	6	Krajnji ležaj	$\beta = (0.55 + 0.025 / \kappa) \cdot \beta_1, \text{ ali } \beta_0 < \beta_1$	1
svi κ	7	Konzola	$\beta = \beta_2 \text{ naležaju, } \beta_2 \text{ nakraju}$	1.1068

Polje - donji pojas

$L_1 =$ 4000
 $L_2 =$ 0

$L_e =$ 4000

$b_0 =$ 54

$t =$ 4

UKRUTA 6

$n =$ 0

$A =$ 0

Raspon prvog polja (proste grede)

Raspon drugog polja

Efektivni raspon

Širina pojasa [cm]

Debljina pojasa [cm]

Vrsta ukrute

Broj ukruta na širini b_0

Površina jedne ukrute [cm²]

VRSTA UKRUTE	POVRŠINA [cm ²]	
300/200×27 5×8	1	58,63
400/250/30 0/8	2	84,17
T 354/200	3	106,8
	4	
Proizvoljna ukruta	5	0
Nema ukrute	6	0

$A_{s1} [\text{cm}^2]$ 0 $A_{s1} = A_{xn}$ Površina ukruta na širini $b_0 [\text{cm}^2]$
 $\alpha_0 =$ 1
 $\kappa =$ 0,0135
MJESTO DOKAZA **1**
 $b_{\text{eff}} =$ 54 Sudjelujuća širina

Položaj pop. Pr	4	
Prvo polje	1	3400
Drugo polje	2	0
Drugi ležaj	3	1000
Prosta greda	4	4000

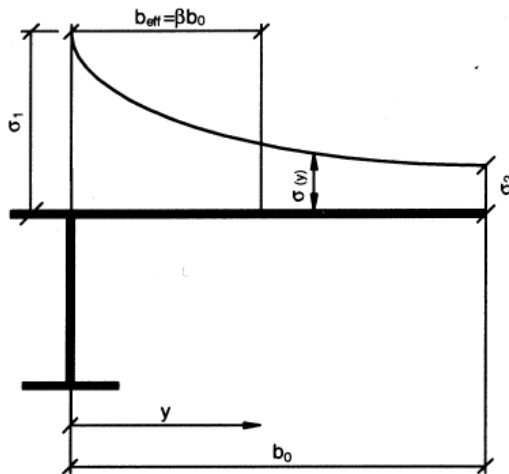
Krajnji ležaj - donji pojas

$$\beta = (0.55 + 0.025/\kappa) \cdot \beta_1 = (0.55 + 0.025/0.0135) \cdot 1 = 1.9; \beta = 1$$

Efektivna širina donjeg pojasa b_{eff} se za 1 % razlikuje od stvarne širine donje pojasnice.

Stoga se u proračun uzima čitava širine čelične pojasnice.

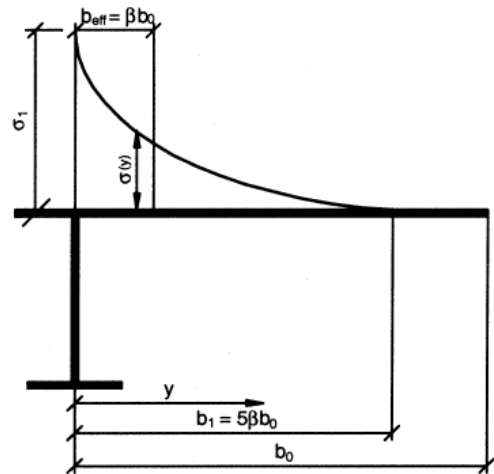
Tok normalnih naprezanja na pojasnici određuje se prema slijedećem izrazu:



$$\beta > 0,20$$

$$\sigma_2 = 1,25(\beta - 0,20)\sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2)(1 - y/b_0)^4$$



$$\beta < 0,20$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma(y) = \sigma_1(1 - y/b_1)^4$$

3.2.3. Krutost na savijanje spregnutog nosača

Proračun konstrukcije provodi se metodom čitavog poprečnog presjeka koja reducira površinu i moment tromosti betonskog dijela poprečnog presjeka koeficijentom n_L

$$n_L = n_0 \cdot (1 + \Psi_L \cdot \varphi_t)$$

gdje je :

$n_0 = E_a / E_{cm}$ - faktor redukcije za kratkotrajna djelovanja

φ_t koeficijent puzanja $\varphi(t, t_0)$ prema propisu za betonske konstrukcije

Ψ_L popravni koeficijent puzanja ovisan o koeficijentu puzanja, koeficijentu relaksacije i značajkama presjeka konstrukcijskog čelika i spregnutog presjeka.

Za spregnute mostove mogu se koristiti konstantne vrijednosti kako slijedi:

- stalna djelovanja, uključivo prednapinjanje nakon uspostavljanja sprežanja: **$\Psi_L = 1,10$**
- primarna i sekundarna naprezanja od skupljanja i vremenski ovisna sekundarna naprezanja: **$\Psi_L = 0,55$**
- planski unesene deformacije: **$\Psi_L = 1,50$**

Dokazi naprezanja betonskog pojasa provode se na idealnoj debljini betonske ploče.

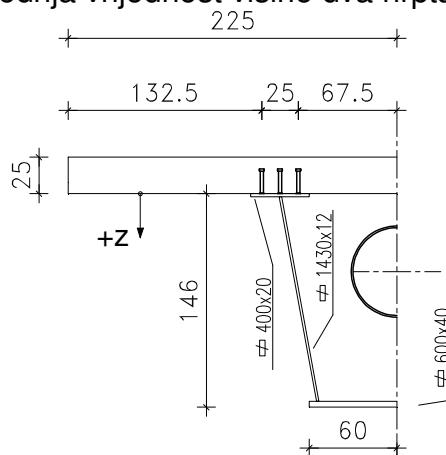
Za proračun te idealne debljine ploče mjerodavan je odnos faktora redukcije n_L^F / n_L^I , pri čemu se n_L^I za stalna djelovanja približno proračunava s **$\Psi_B^I = 1,7$** , a za naprezanja od skupljanja s **$\Psi_S^I = 0,7$** .

Karakteristike poprečnih presjeka

Konstrukciju je potrebno proračunati po fazama gradnje:

Redni broj	Faza gradnje	Aktivan poprečni presjek
1.	Montaža čeličnih sandučastih nosača	Čelični sanduk
2.	Betoniranje kolničke ploče na nepoduprtim čeličnim nosačima	Čelični sanduk
3.	Skidanje oplata i nanošenje dodatnog stalnog opterećenja	Spregnuti presjek
4.	Prometno opterećenje	Spregnuti presjek
5.	Skupljanje i pužanje betona	Spregnuti presjek
6.	Temperaturno djelovanje	Spregnuti presjek
7.	Vjetar	Spregnuti presjek
8.	Potres	Spregnuti presjek

Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka određuju se na zamjenjujućem poprečnom presjeku sa horizontalno položenom kolničkom pločom. Visina hrptova sanduka određena je kao srednja vrijednost visine dva hrpta.



3.2.4.1. Čelični dio nosača

Površina poprečnog presjeka:

$$A_a = 60 \cdot 4 + 143 \cdot 1,2 + 40 \cdot 2 = 240 + 171,6 + 80 = 491,6 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 \sum A_{a,i} \cdot z_{a,i} &= (40 \cdot 2 \cdot 2/2) + (143 \cdot 1,2 \cdot (2 + 140 / 2)) + 60 \cdot 4 \cdot (146 - 4/2) = \\
 &= (80 \cdot 1) + (171,6 \cdot 72) + 240 \cdot 144 = \\
 &= 80 + 12355,2 + 34560 = 46995 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Položaj težišta:

$$z_a = \sum A_{a,i} \cdot z_{a,i} / A_a = 46995 / 491,6 = 95,60 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \sum A_{a,i} \cdot (z_a - z_{a,i})^2 &= 80 \cdot (95,60 - 1)^2 + 171,6 \cdot (95,60 - 72)^2 + 240 \cdot (95,60 - 144)^2 = \\ &= 715932,8 + 95574,3 + 562214,4 = 1373721,5 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

Moment tromosti:

$$\begin{aligned} \sum I_{a,i} &= b \cdot t^3 / 12 = 60 \cdot 4^3 / 12 + (1,2 / (\sin 80^\circ)) \cdot 140^3 / 12 + 40 \cdot 2^3 / 12 = \\ &= 320 + 278633 + 26,67 = 278979,67 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$I_a = \sum I_{a,i} + \sum A_{a,i} \cdot (z_a - z_{a,i})^2 = 278979,67 + 1373721,5 = 1652701,2 \text{ cm}^4$$

3.2.4.2. Spregnuti presjek

3.2.4.2.1. Općenito

Betonska ploča:

$$A = b \cdot t = 225 \cdot 25 = 5625 \text{ cm}^2$$

$$z_c = -12,5 \text{ cm}$$

$$I_c = b \cdot t^3 / 12 = 225 \cdot 25^3 / 12 = 292968,75 \text{ cm}^4$$

Čelik:

$$A_a = 491,6 \text{ cm}^2$$

$$z_a = 95,60 \text{ cm}$$

$$I_a = 1652701,2 \text{ cm}^4$$

Armatura:

U uzdužnom smjeru ugrađuje se $\emptyset 16/15 \text{ cm} = 13,40 \text{ cm}^2$ u gornju i donju zonu ploče:

$$A_s = 2 \cdot 2,25 \cdot 13,40 = 60,3 \text{ cm}^2$$

Ukupni doprinos čelik + armatura:

$$A_{st} = A_a + A_s = 491,6 + 60,3 = 551,9 \text{ cm}^2$$

$$A_{st,i} \cdot z_{st,i} = A_{a,i} \cdot z_{a,i} + A_s \cdot z_s = 46995 + 60,3 \cdot (-12,5) = 46995 - 753,75 = 46241,25 \text{ cm}^3$$

Položaj težišta:

$$z_{st} = \sum A_{st,i} \cdot z_{st,i} / A_{st} = 46241,25 / 551,9 = 83,78 \text{ cm}$$

Statički moment u spojnoj fugi:

$$S_{2,s} = A_s \cdot (z_{st} - (-12,5)) = 60,3 \cdot (83,78 + 12,5) = 5805,7 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} \sum A_{st,i} \cdot (z_{st} - z_{st,i})^2 &= (A_{a,i} \cdot (z_{st} - z_{a,i})^2 + A_s \cdot (z_{st} - z_{a,i})^2 = \\ &= 80 \cdot (83,78 - 1)^2 + 171,6 \cdot (83,78 - 72)^2 + 240 \cdot (83,78 - 146)^2 + 60,3 \cdot (83,78 - (-12,5))^2 = \\ &= 548202 + 23812,7 + 929118,8 + 558971 = 2060104,5 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$I_2 = I_{st} = \sum I_{a,i} + \sum A_{st,i} \cdot (z_{st} - z_{st,i})^2 = 278979,67 + 2060104,5 = 2339084,2 \text{ cm}^4$$

Transformirane vrijednosti čitavog spregnutog poprečnog presjeka:

Oznake:

Beton: A_c, I_c, E_c
Čelik: A_a, I_a, E_a
Armatura: A_s, I_s, E_s
Čelik + armatura: A_{st}, I_{st}, E_a

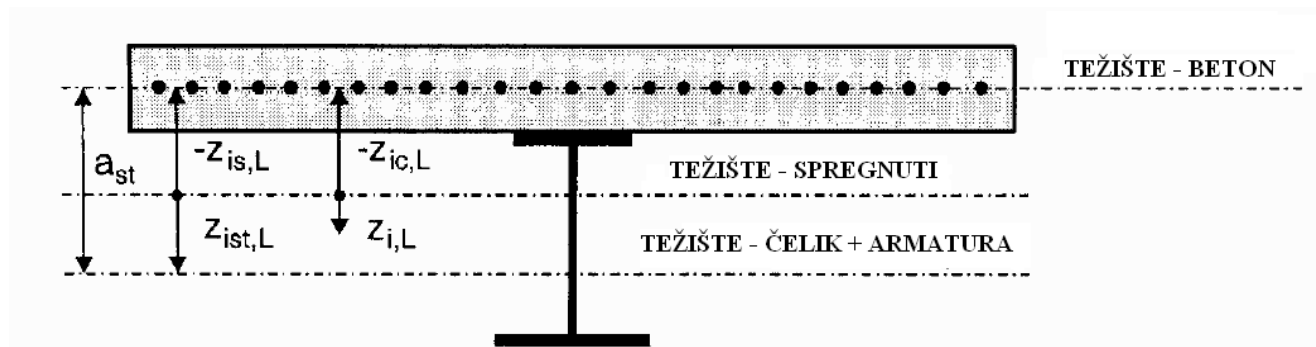
Faktor redukcije za kratkotrajno opterećenje: $n_0 = n_L = \frac{E_a}{E_{cm}}$

Transformirane vrijednosti betonske pojasnice:

$$A_{c,L} = \frac{A_c}{n_L} \qquad I_{c,L} = \frac{I_c}{n_L}$$

Položaj težišta u spregnutom poprečnom presjeku: $z_{ic,L} = -\frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,L}}$

a_{st} – udaljenost težišta betonske pojasnice i težišta čelika+armatura



Transformirane vrijednosti čitavog spregnutog presjeka:

$$A_{i,L} = A_{a,L} + A_{st}$$

$$I_L = I_{c,L} + I_{st} + \frac{A_{st} \cdot A_{c,L}}{A_{i,L}} \cdot a_{st}^2$$

Statički moment u spojnoj fugi:

$$S_{i,c+s,L} = (A_{c,L} + A_s) \cdot |z_{ic,L}|$$

Indeks «L» označava, da je faktor redukcije i vrijednosti puzanja ovise o opterećenju tijekom vremena.

Kratkotrajna opterećenja imaju indeks «0».

Indeks «P» označava vremenski konstantna opterećenja.

Indeks «PT» označava vremenski promjenjiva opterećenja.

Indeks «S» označava skupljanje betona koje se također svrstava u vremenski promjenjiva opterećenja.

3.2.4.2.2. Spregnuti presjek u trenutku $t = 0$:

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} = \frac{21000}{3330} = 6,3$$

Transformirane vrijednosti betonskog dijela poprečnog presjeka:

$$A_{c,0} = \frac{A_c}{n_0} = \frac{5625}{6,3} = 892,86 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,0} = \frac{I_c}{n_0} = \frac{292968,75}{6,3} = 46502,98 \text{ cm}^4$$

Transformirana vrijednost čitavog spregnutog poprečnog presjeka:

$$A_{i,0} = A_{c,0} + A_{st} = 892,86 + 551,9 = 1444,76 \text{ cm}^2$$

$$z_{ic,0} = -\frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,0}} = -\frac{551,9 \cdot (83,78 - (-12,5))}{1444,76} = -36,78 \text{ cm}$$

$$S_{i,c+s,0} = (A_{c,0} + A_s) \cdot |z_{ic,0}| = (892,86 + 60,3) \cdot |-36,78| = 35057 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} I_{i,0} &= I_{c,0} + I_{st} + \frac{A_{st} \cdot A_{c,0}}{A_{i,0}} \cdot a_{st}^2 = I_{c,0} + I_{st} + S_{i,L} \cdot a_{st} = \\ &= 46502,98 + 2339084,2 + \frac{551,9 \cdot 892,86}{1444,76} \cdot (83,78 - (-12,5))^2 = \\ &= 46502,98 + 2339084,2 + 341,07 \cdot 9269,84 = \\ &= 46502,98 + 2339084,2 + 3161697 = 5547284,18 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

3.2.4.2.3. Skupljanje betona $t = 1$ dan

a) Vremenski promjenjiva djelovanja:

$$n_{s,t_0=1d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_s \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 0,55 \cdot 2,80) = 16,0$$

Transformirane vrijednosti betonskog dijela poprečnog presjeka:

$$A_{c,s} = \frac{A_c}{n_s} = \frac{5625}{16,0} = 351,56 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,s} = \frac{I_c}{n_s} = \frac{292968,75}{16,0} = 18311 \text{ cm}^2$$

Transformirana vrijednost čitavog spregnutog poprečnog presjeka:

$$A_{i,s} = A_{c,s} + A_{st} = 351,56 + 551,9 = 903,46 \text{ cm}^2$$

$$z_{ic,s} = -\frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,s}} = -\frac{551,9 \cdot (83,78 - (-12,5))}{903,46} = -58,81 \text{ cm}$$

$$S_{i,c+s,s} = (A_{c,s} + A_s) \cdot |z_{ic,s}| = (351,56 + 60,3) \cdot |-58,81| = 24221,5 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} I_{i,s} &= I_{c,s} + I_{st} + \frac{A_{st} \cdot A_{c,s}}{A_{i,s}} \cdot a_{st}^2 = I_{c,p} + I_{st} + S_{i,s} \cdot a_{st} = \\ &= 18311 + 2339084,2 + \frac{551,9 \cdot 351,56}{903,46} \cdot (83,78 - (-12,5))^2 = \\ &= 18311 + 2339084,2 + 214,76 \cdot 9269,84 = \\ &= 18311 + 2339084,2 + 1990791 = 4348186,2 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

3.2.4.2.4. Otpuštanje skele i nanošenje dodatnog stalnog opterećenja $t = 28$ dan

a) Vremenski konstantna djelovanja:

$$n_{P,t_0=28d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_P \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 1,10 \cdot 1,50) = 16,7$$

Transformirane vrijednosti betonskog dijela poprečnog presjeka:

$$A_{c,P} = \frac{A_c}{n_P} = \frac{5625}{16,7} = 336,83 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,P} = \frac{I_c}{n_P} = \frac{292968,75}{16,7} = 17543 \text{ cm}^2$$

Transformirana vrijednost čitavog spregnutog poprečnog presjeka:

$$A_{i,P} = A_{c,P} + A_{st} = 336,83 + 551,9 = 888,76 \text{ cm}^2$$

$$z_{ic,P} = -\frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,P}} = -\frac{551,9 \cdot (83,78 - (-12,5))}{888,76} = -59,79 \text{ cm}$$

$$S_{i,c+s,P} = (A_{c,P} + A_s) \cdot |z_{ic,P}| = (336,83 + 60,3) \cdot |-59,79| = 23744 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} I_{i,P} &= I_{c,P} + I_{st} + \frac{A_{st} \cdot A_{c,P}}{A_{i,P}} \cdot a_{st}^2 = I_{c,P} + I_{st} + S_{i,P} \cdot a_{st} = \\ &= 17543 + 2339084,2 + \frac{551,9 \cdot 336,83}{888,76} \cdot (83,78 - (-12,5))^2 = \\ &= 17543 + 2339084,2 + 209,16 \cdot 9269,84 = \\ &= 17543 + 2339084,2 + 1938880 = 4295507,2 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

b) Vremenski promjenjiva djelovanja

$$n_{PT,t_0=28d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_{PT} \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 0,55 \cdot 1,50) = 11,5$$

Transformirane vrijednosti betonskog dijela poprečnog presjeka:

$$A_{c,PT} = \frac{A_c}{n_{PT}} = \frac{5625}{11,5} = 489,13 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,PT} = \frac{I_c}{n_{PT}} = \frac{292968,75}{11,5} = 25475,5 \text{ cm}^2$$

Transformirana vrijednost čitavog spregnutog poprečnog presjeka:

$$A_{i,PT} = A_{c,PT} + A_{st} = 489,13 + 551,9 = 1041,03 \text{ cm}^2$$

$$z_{ic,PT} = -\frac{A_{st} \cdot a_{st}}{A_{i,P}} = -\frac{551,9 \cdot (83,78 - (-12,5))}{1041,03} = -51,04 \text{ cm}$$

$$S_{i,c+s,PT} = (A_{c,PT} + A_s) \cdot |z_{ic,PT}| = (489,13 + 60,3) \cdot |-51,04| = 28042,91 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} I_{i,PT} &= I_{c,PT} + I_{st} + \frac{A_{st} \cdot A_{c,PT}}{A_{i,PT}} \cdot a_{st}^2 = I_{c,PT} + I_{st} + S_{i,PT} \cdot a_{st} = \\ &= 25475,5 + 2339084,2 + \frac{551,9 \cdot 489,13}{1041,03} \cdot (83,78 - (-12,5))^2 = \\ &= 25475,5 + 2339084,2 + 259,31 \cdot 9269,84 = \\ &= 25475,5 + 2339084,2 + 2403762 = 4768321,7 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

3.2.4.2.5. Spregnuti presjek u trenutku $t = \infty$:

Popravni koeficijent puzanja:

Vremenski konstantna djelovanja:

$$\Psi_P = 1,10$$

Vremenski promjenjiva djelovanja i skupljanje:

$$\Psi_{PT} = \Psi_S = 0,55$$

Faktori redukcije:

Vremenski konstantna djelovanja:

$$n_P = n_0 \cdot (1 + \Psi_P \cdot \varphi_t)$$

Vremenski promjenjiva djelovanja:

$$n_{PT} = n_0 \cdot (1 + \Psi_{PT} \cdot \varphi_t)$$

Skupljanje:

$$n_S = n_0 \cdot (1 + \Psi_S \cdot \varphi_t)$$

Faktori redukcije za vremenski stalna i vremenski promjenjiva djelovanja:

Otpuštanje skele i oplata te nanošenje dodatnog stalnog opterećenja $t_0 = 28 \text{ d}$:

$$n_{P,t_0=28d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_P \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 1,10 \cdot 1,50) = 16,7$$

$$n_{PT,t_0=28d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_{PT} \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 0,55 \cdot 1,50) = 11,5$$

Skupljanje betona $t_0 = 1 \text{ d}$:

$$n_{S,t_0=1d} = n_0 \cdot (1 + \Psi_S \cdot \varphi_t) = 6,3 \cdot (1 + 0,55 \cdot 2,80) = 16,0$$

Statički proračun

Statički sustav: prosta greda $L = 40,00$ m.

Promatrana opterećenja:

- Vlastita težina nosača i kolničke ploče,
- Dodatno stalno opterećenje,
- Skupljanje betona,
- Puzanje betona,
- Prometno opterećenje.

Statički sustav je statički određen – stoga promjena temperature uzrokuje samo deformacije, a ne i dodatne sile.

Potres i vjetar djeluju horizontalno na konstrukciju te se stoga ne razmatraju u dimenzioniranju spregnutog poprečnog presjeka.

Promatra se polovica jednog čeličnog sanduka te se stoga opterećenje dijeli na pola.

3.3.1. Vlastita težina čeličnog nosača + svježi beton kolničke ploče + oplata

Maksimalna poprečna sila na ležaju:

$$V_{G1} = 0,5 \cdot \frac{g \cdot L}{2} = 0,50 \cdot (8.47 + 28.125 + 4.5) \cdot 40 / 2 = 410,95 \text{ kN}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja:

$$M_{G1} = 0,50 \cdot \frac{g \cdot L^2}{8} = 0,50 \cdot (8.47 + 28.125 + 4.5) \cdot 40 \cdot 40 / 8 = 4109,5 \text{ kNm}$$

3.3.2. Skidanje oplata + dodatno stalno

NAPOMENA: Dodatno stalno opterećenje se nanosi na spregnuti kolnik te se raspodjeljuje na pojedine nosače prema poprečnoj razdiobi. U ovom primjeru je uvedeno pojednostavljenje te se smatra da na svaki nosač otpada 1/4 dodatno stalnog opterećenja.

Maksimalna poprečna sila na ležaju:

$$V_{\Delta G} = 0,50 \cdot \frac{\Delta g \cdot L}{2} = 0,50 \cdot (-4.5 + 24,13) \cdot 40 / 2 = 196,3 \text{ kN}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja:

$$M_{\Delta G} = 0,50 \cdot \frac{\Delta g \cdot L^2}{8} = 0,50 \cdot (-4.5 + 24,13) \cdot 40 \cdot 40 / 8 = 1963 \text{ kNm}$$

3.3.3. Skupljanje betona

Uzdužna sila od skupljanja:

$$N_{Sh} = -\epsilon_{cs\infty} \cdot \frac{E_a}{n_s} \cdot A_c = -(-0,000376) \cdot (21000 / 16) \cdot 5625 = 2776 \text{ kN}$$

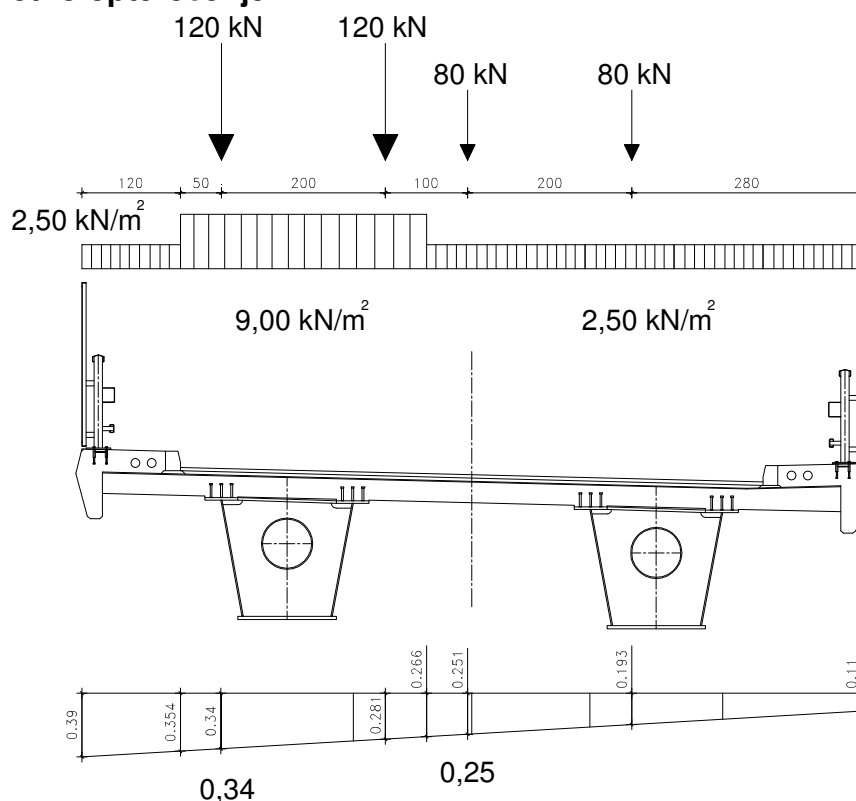
Moment savijanja od skupljanja:

$$M_{Sh} = -N_{Sh} \cdot z_{ic,S} = -2776 \cdot (-0,5881) = 1633 \text{ kNm}$$

3.3.4. Puzanje betona

Puzanje betona na statički određenim nosačima uzrokuje samo preraspodjelu sila između čelika i betona unutar poprečnog presjeka – u obzir je uzeto sa popravnim koeficijentom unutar faktora redukcije poprečnog presjeka.

3.3.5. Prometno opterećenje

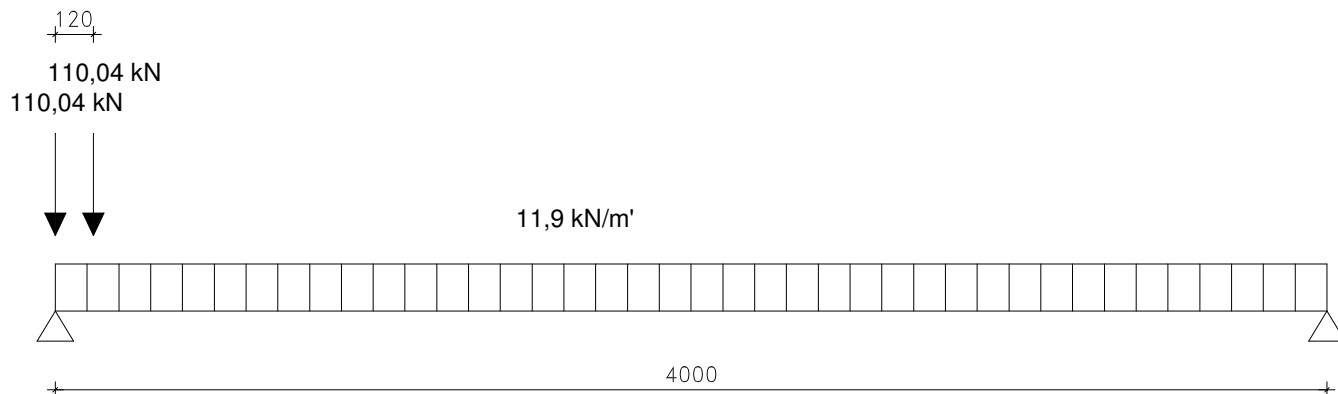


Kontinuirano opterećenje na jedan nosač:

$$q = 2,50 \times (0,50 \times (0,39+0,354) \times 1,20 + 0,50 \times (0,266+0,11) \times 5,30) + 9,00 \times (0,50 \times (0,354 + 0,266) \times 3,00) = 2,50 \times (0,446 + 0,996) + 9,00 \times (0,93) = 11,9 \text{ kN/m'}$$

Koncentrirano opterećenje na jedan nosač:

$$P = 120 \times (0,34 + 0,281) + 80 \times (0,251 + 0,193) = 120 \times 0,621 + 80 \times 0,444 = 110,04 \text{ kN}$$



Rezne sile od kontinuiranog prometnog opterećenja:

Maksimalna poprečna sila na ležaju:

$$V_{\text{kont}} = \frac{q \cdot L}{2} = 11,9 \cdot 40 / 2 = 238 \text{ kN}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja:

$$M_{\text{kont}} = \frac{q \cdot L^2}{8} = 11,9 \cdot 40 \cdot 40 / 8 = 2380 \text{ kNm}$$

Rezne sile od koncentriranog prometnog opterećenja:

Maksimalna poprečna sila na ležaju:

$$V_{\text{osov}} = Q + Q \cdot (L - 1,20) / L = 110,04 + 110,04 \cdot (40 - 1,20) / 40 = 216,78 \text{ kN}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja (jedna osovina u sredini polja):

$$M_{\text{osov}} = (Q \cdot (0,50 + (0,50 \cdot L - 1,20) / L) \cdot L / 2 = 110,04 \cdot 0,97 \cdot 20 = 2134,78 \text{ kNm}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja (vozilo na polovici raspona):

$$M_{\text{osov}} = Q \cdot (L / 2 - 1,2 / 2) = 110,04 \cdot (40 / 2 - 1,2 / 2) = 2134,78 \text{ kNm}$$

Momenti torzije uzrokovani prometnim opterećenjem:

Moment torzije oko težišta poprečnog presjeka uslijed plošnog prometnog opterećenja.

Uslijed plošnog opterećenja djeluje linijski jednoliki moment torzije duž čitavog raspona:

$$M_{\text{kont}} = (9,00 - 2,50) \cdot 3,00 \cdot 2,05 = 39,98 \text{ kNm/m'}$$

Moment torzije oko težišta poprečnog presjeka uslijed koncentriranog prometnog opterećenja.

Opterećenje u sredini raspona za koje je određena i roštiljna komponenta opterećenja.

$$M_{\text{osov}} = 120 \cdot (3,05 + 1,05) + 80 \cdot (0,05 - 1,95) = 492 - 152 = 340 \text{ kNm}$$

Dio momenta (20 %) je preneseno na nosače roštiljnom komponentom, a drugi dio (80 %) se prenosi torzijom.

$$M_{\text{t-kont}} = K_T \cdot M_{\text{kont}} = 0,80 \cdot 39,98 = 31,98 \text{ kNm/m}$$

$$M_{\text{t-osov}} = K_T \cdot M_{\text{konc}} = 0,80 \cdot 340 = 272 \text{ kNm}$$

Moment torzije se u poprečnom presjeku raspodjeljuje na pojedine elemente poprečnog presjeka ovisno o njihovoj torzijskoj krutosti kako bi se zadovoljio uvjet jednakog kuta zaokreta poprečnog presjeka uslijed torzije.

Poprečni presjek se sastoji od 2 jednaka čelična sanduka koji su puno krući od kolničke ploče te je stoga njena torzijska krutost zanemarena u proračunu.

Moment torzije se dijeli u odnosu 1:1 na svaki sanduk.

$$M_{\text{t-kont}} (1 \text{ nosač}) = 0,50 \cdot 31,98 = 15,99 \text{ kNm/m}$$

$$M_{\text{t-osov}} (1 \text{ nosač}) = 0,50 \cdot 272 = 136 \text{ kNm}$$

RASPODJELA MOMENTA TORZIJE DUŽ NOSAČA:

Moment torzije se raspodjeljuje duž nosača analogno raspodjeli poprečne sile.

KONTINUIRANO OPTEREĆENJE:

Ležaj:

$$M_{\text{t-kont}} (L=0) = 15,99 \cdot L/2 = 15,99 \cdot 20 = 319,8 \text{ kNm}$$

Sredina raspona:

$$M_{\text{t-kont}} (L/2 = 20 \text{ m}) = 0 \text{ kNm}$$

KONCENTRIRANO OPTEREĆENJE:

a) Vozilo se nalazi u sredini raspona (jedna osovina je na polovici raspona).

Ležaj:

$$M_{t-osov} (L=0) = 136 \cdot (0.50 + (0.50 \cdot L - 1,20) / L) = 136 \cdot 0,97 = 131,92 \text{ kNm}$$

$$M_{t-osov} (L=40) = 2 \cdot 136 - 131,92 = 140,08 \text{ kNm}$$

Sredina raspona:

$$M_{t-osov} (L/2 = 20 \text{ m}) = 131,92 \text{ kNm}$$

b) Vozilo se nalazi uz ležaj.

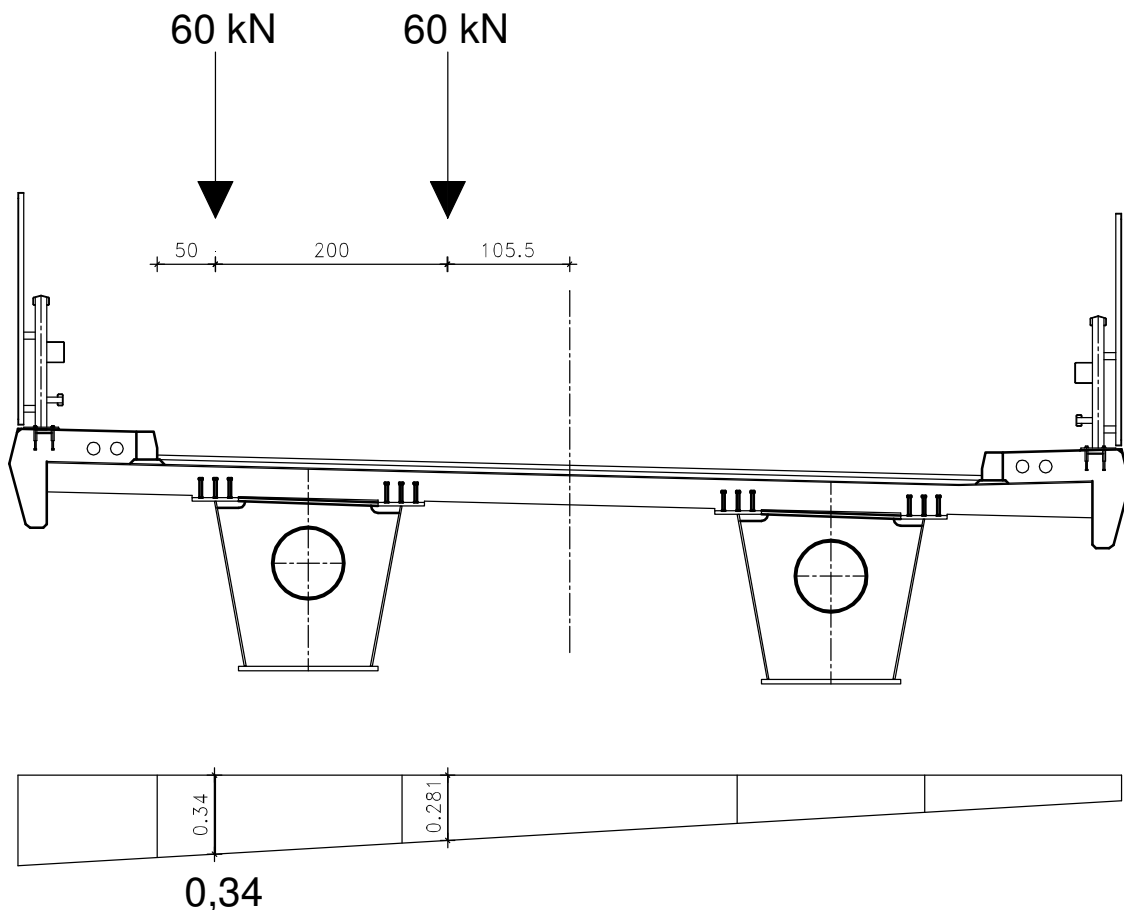
Ležaj:

$$M_{t-osov} (L=0) = 136 \cdot (1 + (40 - 1,20) / 40) = 267,92 \text{ kNm}$$

Djelovanje	Tip	Rezne sile			
		Poprečna sila – ležaj [kN]	Moment savijanja – sredina polja [kNm]	Moment torzije na 1 čelični sandučasti nosač [kNm]	
Vlastita težina + Svježi beton + Oplata	G ₁	410,95	4109,5	-	
Skidanje oplata + Dodatno stalno	G ₂	196,3	1963	-	
Skupljanje	Cs	0	1633	-	
Prometno kontinuirano opterećenje	Q _{kont}	238	2380	Polje: 0	Ležaj: 319,8
Prometno osovinsko opterećenje	Q _{osov}	216,78	2134,78	Polje: 140,08	Ležaj: 267,92

3.3.6. Umornost

Zamor na spregnutim cestovnim mostovima određuje se prema Modelu 3:
 Djeluju 4 osovine, svaka osovinu sa silom od 120 kN



Koncentrirano opterećenje na zamjenski rubni I nosač:

$$P = 60 \times (0,34 + 0,281) = 60 \times 0,621 = 37,26 \text{ kN}$$

Momenti torzije uzrokovani prometnim opterećenjem:

Moment torzije oko težišta poprečnog presjeka uslijed koncentriranog prometnog opterećenja.

Opterećenje u sredini raspona za koje je određena i roštiljna komponenta opterećenja.

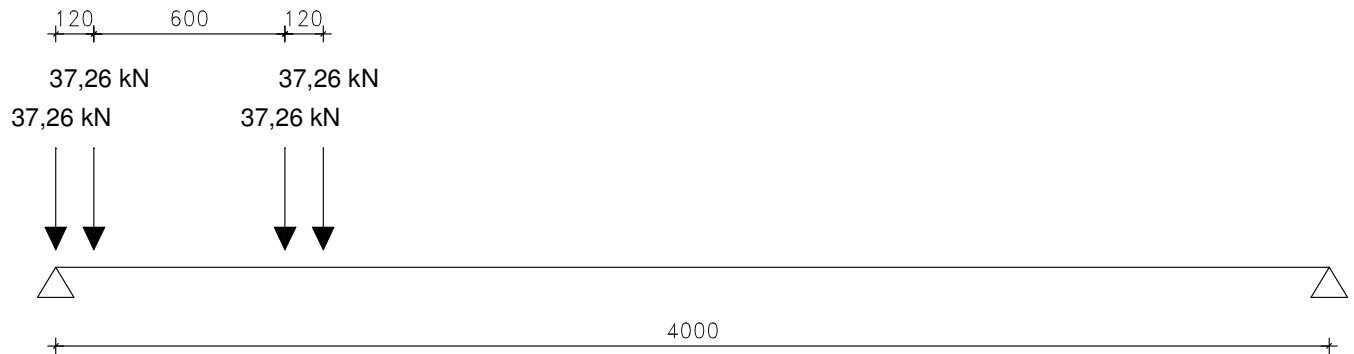
$$M_{\text{umor}} = 60 \cdot (3,05 + 1,05) = 246 \text{ kNm}$$

Dio momenta (20 %) je preneseno na nosače roštiljnom komponentom, a drugi dio (80 %) se prenosi torzijom.

$$M_{\text{t-umor}} = K_T \cdot M_{\text{umor}} = 0,80 \cdot 246 = 196,8 \text{ kNm}$$

Moment torzije se dijeli u odnosu 1:1 na svaki sanduk.

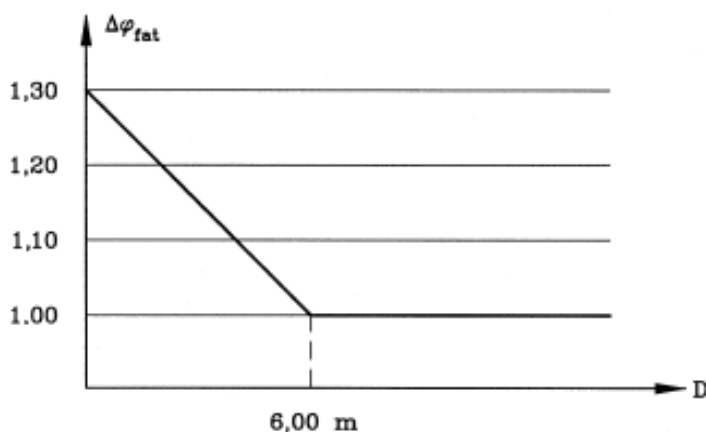
$$M_{t-umor} (1 \text{ nosač}) = 0,50 \cdot 196,8 = 98,4 \text{ kNm/m}$$



Na mjestu djelovanja koncentriranih sila istodobno djeluju i koncentrirani momenti torzije od 98,4 kNm.

Sile koje djeluju na nosač na udaljenosti 6 m od prijelaznih naprava treba pomnožiti sa dodatnim faktorom koji uzima u obzir udar vozila.

Preporuka je da se sve rezne sile pomnože sa 1,3 na udaljenosti 6,00 m od prijelaznih naprava kako bi se pojednostavio proračun.



Maksimalna poprečna sila na ležaju:

$$\begin{aligned}
 V_{osov} &= 1,3 \cdot Q \cdot (1 + (L - 1,20) / L + (L - 7,20) / L + (L - 8,40) / L) = \\
 &= 1,3 \cdot 37,26 \cdot (1 + 0,97 + 0,82 + 0,79) = 1,3 \cdot 133,39 = 173,41 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Maksimalni moment savijanja u sredini polja (jedna osovina u sredini polja):

$$\begin{aligned}
 M_{osov} &= (Q \cdot (0,50 + (0,50 \cdot L - 1,20) / L + (0,50 \cdot L - 7,20) / L + (0,50 \cdot L - 8,40) / L) \cdot L / 2 = \\
 &= (37,36 \cdot (0,50 + (0,50 \cdot 40 - 1,20) / 40 + (0,50 \cdot 40 - 7,20) / 40 + (0,50 \cdot 40 - 8,40) / 40) \cdot 40 / 2 = \\
 &= (37,36 \cdot (0,50 + 0,47 + 0,32 + 0,29)) \cdot 20 = 1180,58 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Maksimalni moment torzije na ležaju:

$$V_{osov} = 1,3 \cdot M_{t-umor} \cdot (1 + (L - 1,20) / L + (L - 7,20) / L + (L - 8,40) / L) =$$

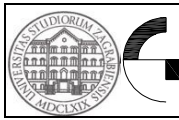
$$= 1,3 \cdot 98,4 \cdot (1 + 0,97 + 0,82 + 0,79) = 1,3 \cdot 98,4 \cdot 3,58 = 457,96 \text{ kN}$$

Maksimalni moment torzije u sredini polja (jedna osovina u sredini polja):

$$M_{osov} = (M_{t-umor} \cdot (0,50 + (0,50 \cdot L - 1,20) / L + (0,50 \cdot L - 7,20) / L + (0,50 \cdot L - 8,40) / L) =$$

$$= (98,4 \cdot (0,50 + (0,50 \cdot 40 - 1,20) / 40 + (0,50 \cdot 40 - 7,20) / 40 + (0,50 \cdot 40 - 8,40) / 40) =$$

$$= (98,4 \cdot (0,50 + 0,47 + 0,32 + 0,29)) = 155,47 \text{ kNm}$$



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
ZAVOD ZA KONSTRUKCIJE
KATEDRA ZA MOSTOVE
Kačićeva 26, Zagreb