

GREĐNI MOSTA - DVA REBRA

5. Statički proračun rasponskog sklopa

5.1 Pristup statičkom proračunu

Statički proračun započinje kada je koncepcija sklopa odabrana i kada je građevina iscrtana u osnovnim crtežima. Kod uobičajenih sklopova crteži će se dorađivati, ali ne i bitno mijenjati nakon proračuna.

Prije proračuna potrebno je načiniti statički model (inženjerski model) kojim će se približno opisati sklop i opterećenja na njega. Inženjersko modeliranje podrazumijeva znatna pojednostavljenja i kod modeliranja sklopa i kod modeliranja različitih djelovanja. Različite pretpostavke uvode se u svakoj fazi proračuna i uvijek se postavlja pitanje da li pružaju dobru aproksimaciju stvarnog stanja. Uz to, bitno je ocijeniti razinu pojednostavljenja koja će rezultirati dostatnom točnošću proračuna za odabranu razinu projektiranja. Za idejni projekt preporučljivo je odabrati jasan i jednostavan model, po mogućnosti takav da su moguće i ručne provjere kako bi se otklonila mogućnost grube greške. Pri tome je vrlo bitno uočiti i obrazložiti uvedena pojednostavljenja i napomenuti zanemarena (sekundarna) djelovanja, nastojeći biti na strani sigurnosti. Ono što nije uzeto u obzir u idejnom, razraditi će se u glavnom projektu, a uspješnost preliminarog modela dokazujemo usporedbom troškovnika: glavne stavke u idejnom i glavnom projektu ne bi se smjele razlikovati za više od 5 do 10%.

U prikazanim primjerima proveden je proračun po linearnoj teoriji i po graničnom stanju sloma.

5.1.1 Modeliranje opterećenja

Europske norme o određivanju veličine opterećenja mostova daju čitav niz osnovnih, dopunskih i iznimnih djelovanja koja pri proračunu treba uzeti u obzir u prikladnim kombinacijama. Budući da su ona detaljno objašnjena na predavanjima, ovdje će biti načinjen pregled samo onih djelovanja koja će biti razmatrana u primjerima danim u ovoj skripti: to su opterećenja od vlastite težine, stalnog tereta i prometnog opterećenja. Kod sklopova od armiranog betona dokazi utjecaja od temperature, skupljanja i pužanja betona te od nejednolikog slijeganja mogu se izostaviti iz preliminarog proračuna po graničnom stanju sloma (detaljnije u skripti prof. Čandrića). Proračun na horizontalne sile (za masivne građevine obično je mjerodavan potres) zahtijevao bi dodatne modele i načinio postupak složenijim, pa bi ga bilo teško uklopiti u okvire programskog zadatka.

Činjenice da smo zanemarili veći broj proračunskih opterećenja, kao i proračun po graničnom stanju uporabe (progibi, pukotine) sjetiti ćemo se kod odabira konstruktivne armature. Uz pretpostavku da su za preliminarni proračun odabrani mjerodavni utjecaji i dostatne izmjere presjeka, zbroj statički potrebne i konstruktivne armature trebao bi pokriti i ona djelovanja koja su zanemarena.

Statički proračun započinje Analizom opterećenja, gdje su prikazane i obrazložene veličine proračunskih opterećenja za pojedine dijelove mosta.

Pored pravilne ocjene mjerodavnih djelovanja kod nekih sklopova potrebno je u proračunu predvidjeti i vrijeme njihovog nastupanja, odnosno pretpostaviti način izvedbe sklopa.

Stalno opterećenje

Sastoji se od vlastite težine nosača i težine ostalih konstruktivnih i nekonstruktivnih dijelova mosta (opreme).

Prometno (korisno) opterećenje

Na mostu se predviđaju maksimalno tri prometna traka širine 3,0 m specifično opterećena i preostala ploha do pune širine mosta.

Karakteristična opterećenja koja predstavljaju suvremena cestovna prometala na europskim cestama statički su određena i sažeta u 4 modela.

Glavni sustav opterećenja od kontinuiranog i koncentriranog opterećenja koje pokriva utjecaj od teških vozila i osobnih vozila je dan **Modelom 1**. Svaki prometni trak opterećuje se s dva osovinska tereta Q_{ik} na razmaku od 1,2 m s razmakom kotača od 2,0 m i kontinuiranim opterećenjem q_{ik} . Površina naližeganja kotača je 40×40 cm. Preostala površina opterećuje se kontinuiranim opterećenjem q_{rk} . Mjerodavna cestovna uprava pojedine države može propisati djelotvorno proračunsko opterećenje tako da se normalna opterećenja množe s faktorom prilagođavanja za osnovni teret α_{Qi} , odnosno kontinuirano opterećenje α_{qi} . Ovdje napominjemo da se prema njemačkom stručnom izvještaju DIN Fachbericht 101, koji se temelji na europskim normama, preporučuje koristiti korekcijski faktor u iznosu 0,8 za koncentrirano opterećenje u prvom i drugom traku. Prema ovom izvještaju na prometnu površinu postavljaju se samo dva prometna traka. U prvom traku

osovinsko opterećenje iznosi 240 kN, a u drugom 160 kN. Kontinuirano opterećenje množi se sa korekcijskim faktorm u iznosu 1,0, odnosno ostaje nepromjenjeno. U rješavanju programskog zadatka koriste se vrijednosti opterećenja dane njemačkim propisima.

Kolnik mosta kod proračuna ne mora se poklapati sa kolnikom u prometnom smislu. (Podjela prometne plohe ne odgovara cestarskoj!).

Glavni trak se opterećuje kontinuiranim opterećenjem 9 kN/m^2 . Površina kolnika izvan glavnog traka opterećuje se kontinuiranim opterećenjem od 2.5 kN/m^2 . Za opterećenja cestovnih mostova dinamički faktor je uključen u zadane veličine za sve sheme opterećenja.

Pri proračunu pojedinih dijelova koristi se opterećenje dano **Modelom 2**. Opterećenje jednom osovinom pokriva prometne učinke na vrlo kratkim rasponima, a služi lokalnim provjerama. Osovinsko opterećenje iznosi $\alpha_{Q1} \times Q_{ak}$ ($Q_{ak}=400 \text{ kN}$). Ako je potrebno može se u proračun uzeti i samo jedan kotač s 200 kN. Prema spomenutom njemačkom stručnom izvještaju DIN Fachbericht 101 preporučuje se koristiti osovinsko opterećenje $\alpha_{Q1} \times Q_{ak}$ gdje je $Q_{ak}=240 \text{ kN}$. Površina nalijeganja kotača uzima se $40 \times 40 \text{ cm}$.

Korisno opterećenje pješačkog mosta uzima se kao jednoliko rasprostrto u iznosu od $q_{fk}=5 \text{ kN/m}^2$, a smanjuje se za mostove pojedinačnog raspona većeg od 10,0 m prema zakonitosti: $2,5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} = 2,0 + 120 / (L_{sj} + 30) \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$ gdje je L_{sj} pojedinačni raspon u metrima. Osim toga treba izvršiti provjeru na pojedinačna opterećenja koncentriranom silom Q_{fwk} veličine 10 kN, koja ima kvadratičnu plohu nalijeganja veličine $10 \times 10 \text{ cm}$.

Poprečna raspodjela prometnog opterećenja

Nosivi sklop u uzdužnom smislu vrlo je često sačinjen od više uzdužnih nosača, koji su povezani elementima koji nose u poprečnom smjeru (poprečni nosači, ili npr. kolnička ploča). Budući da prometno opterećenje može mijenjati svoj položaj na prometnoj plohi, nosači mogu biti više ili manje opterećeni. Pored toga, kada se glavina opterećenja nađe nad jednim nosačem, poprečni elementi ga preraspodjeljuju na ostale nosače, tako da i oni u nekoj mjeri sudjeluju u prijenosu opterećenja. Javlja se problem poprečne razdiobe opterećenja, odnosno određivanja opterećenja mjerodavnih za proračun uzdužnih elemenata (koja se ne moraju podudarati s propisanim opterećenjima).

5.1.2 Modeliranje konstrukcije

Prvi zadatak pred modeliranje sklopa je prepoznati mjerodavne unutarnje sile za proračun sklopa ili dijela sklopa. U primjerima se proračunavaju glavni nosači grednih mostova, za koje je mjerodavan moment savijanja i poprečna sila, te lukovi, za koje je mjerodavna uzdužna tlačna sila i moment savijanja.

U uvodu je rečeno da za početak treba odabrati jednostavniji model: u prikazanim primjerima prvo je načinjen proračun glavnih nosača pomoću štapnih ravninskih modela sa svega nekoliko elemenata. Prostorno djelovanje sklopa isprva zanemarujemo, a svo opterećenje raspoređeno po širini konstrukcije prebacujemo u linijsko. Oslonce tretiramo kao zglobne, horizontalno pomične ili nepomične, ovisno o odabranoj vrsti ležaja, ali kao vertikalno nepopustljive, što u slučaju elastomernih ležaja nije točno. Nakon proračuna glavnih uzdužnih nosača slijedi proračun sekundarnih, poprečnih elemenata: konzola i kolničke ploče. I ovdje koristimo jednostavne modele (konzola, elastično upeta greda).

Rasponski sklop grednog mosta rebrastog presjeka ima jasno izražene uzdužne nosače (rebra), pa modeliranjem poprečne razdiobe na pregledan način brzo dolazimo do opterećenja mjerodavnih za kasniji proračun. Nasuprot tome, unutarnje sile u pločama trebalo bi odrediti na osnovi teorije ploča, koja počiva na slijedećim pretpostavkama:

- debljina ploče obzirom na raspon je malena
- materijal je izotropan i elastičan
- omjer progiba i debljine ploče je malen.

Momenti savijanja u uzdužnom i poprečnom smjeru, kao i poprečne sile izračunavaju se pomoću utjecajnih ploha ili tablica za tipska opterećenja (Rusch) ili na računalu, korištenjem posebnih konačnih elemenata. No, momenti u uzdužnom smjeru mogu se dovoljno točno izračunati i po teoriji greda ako je odnos raspona i širine ploče $l/b \geq 2$, te ako se poštuje propisani način poprečne razdiobe opterećenja. Ovaj način korišten je u odgovarajućem primjeru (5.3).

Bitno je uočiti da će se za proračun jednog sklopa koristiti više statičkih modela, za različite konstruktivne elemente, a isto tako bi trebalo razraditi različite modele za različita djelovanja. Cjelovito modeliranje građevine i proračunskih opterećenja na računalu je moguće, ali predstavlja znatan iskorak u odnosu na osnovna znanja koja savladavamo kroz nastavni program.

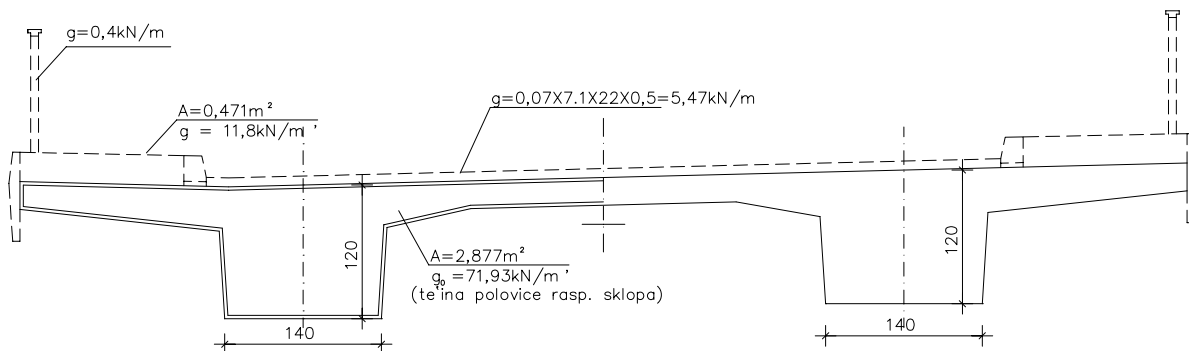
5.2 PRORAČUN RASPONSKOG SKLOPA GREDNOG MOSTA

armiranobetonski most s dva rebra u presjeku

Proračunava se rasponski sklop statičkog sustava kontinuiranog nosača preko četiri polja (sl.5.2.1.). U poprečnom presjeku su dva rebra, od kojih proračunavamo jedno, kao zasebni gredni nosač. Stalni teret se zbog simetrije dijeli na oba rebra jednako, dok kod nesimetričnog prometnog opterećenja i neopterećeno rebro sudjeluje u nošenju, što će se u proračunu modelirati pomoću utjecajne linije za poprečnu razdiobu. Proračunski model je štapni kontinuirani nosač preko četiri polja, sa statičkim karakteristikama T - presjeka koji se sastoji od grede i dijela ploče na sudjelujućoj širini.

Kod proračuna pješačkog mosta s dva rebra u presjeku postupak je isti, samo što otpada opterećenje tipskim vozilom. Za proračun pješačkog mosta s jednim rebrom u poprečnom presjeku otpada i proračun poprečne preraspodjele, ali je obavezna provjera na torziju uslijed nesimetričnog prometnog opterećenja.

5.2.1. ANALIZA OPTEREĆENJA (sl.5.2.2.)



Slika 5.2.1. Pojednostavljeni presjek za proračun



vlastita težina:

površina poprečnog presjeka
rasponskog sklopa

$$\begin{aligned} A &= 5.754 \text{ m}^2 \\ A/2 &= 2.877 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

masa jednog metra
rasponskog sklopa

$$\begin{aligned} g &= 25 \times A = 143.9 \text{ kn/m} \\ g/2 &= 25 \times A/2 = 71.93 \text{ kn/m} \end{aligned}$$

stalni teret:

slojevi asfalt - betona:

$$22 \text{ kN/m}^3$$

izolacija:

$$0,5 \text{ kn/m}^2$$

armirani beton:

$$25 \text{ kN/m}^3$$

ograda:

$$0.4 \text{ kN/m}$$

vjenac, rubnjak, pješačka staza

$$25 \text{ kN/m}^3$$

U konkretnom slučaju:

(promatramo polovicu širine - stalni teret jednog rebra)

zastor

$$22 \times 0,07 \times 3.55 =$$

$$5.47 \text{ kN/m}$$

izolacija:

$$0.5 \times 1 \times 5.215 =$$

$$2.61 \text{ kN/m}$$

ograda:

$$0.40 \text{ kN/m}$$

vijenac, rubnjak, pješačka staza

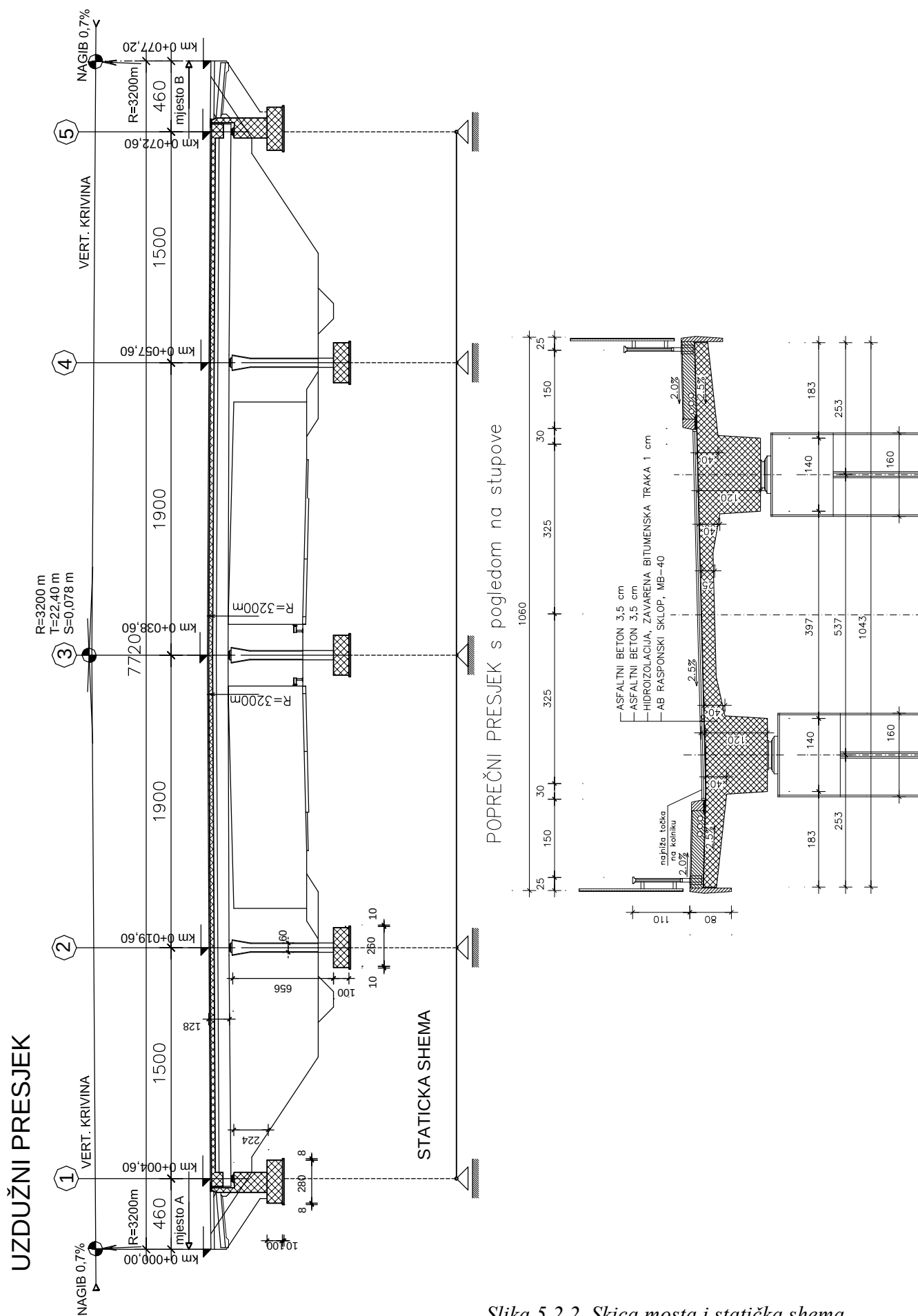
$$A = 0.471 \text{ m}^2,$$

$$0.471 \times 25 =$$

$$11.8 \text{ kN/m}$$

UKUPNO:

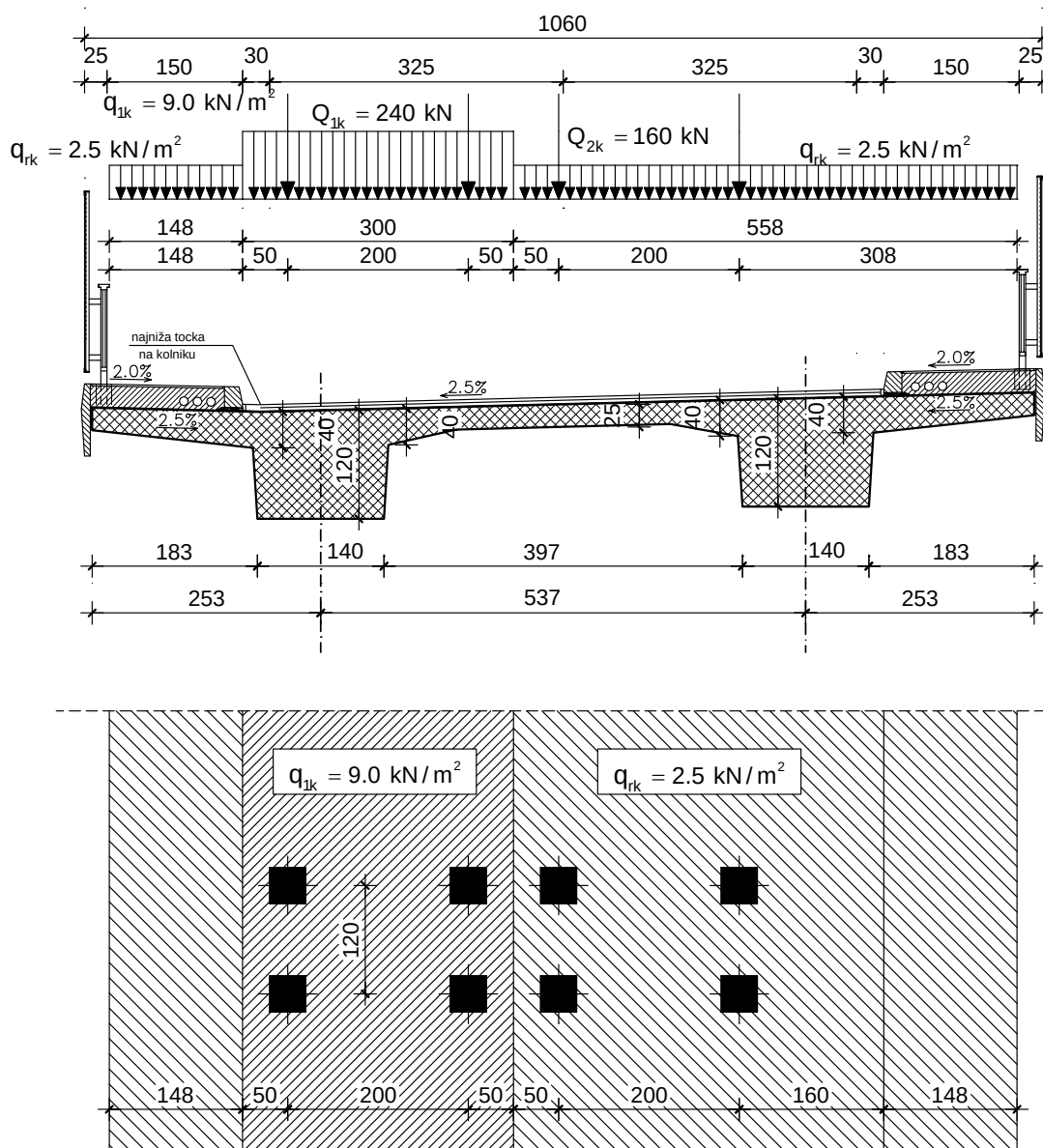
$$20.30 \text{ kN/m}$$



Slika 5.2.2. Skica mosta i statička shema

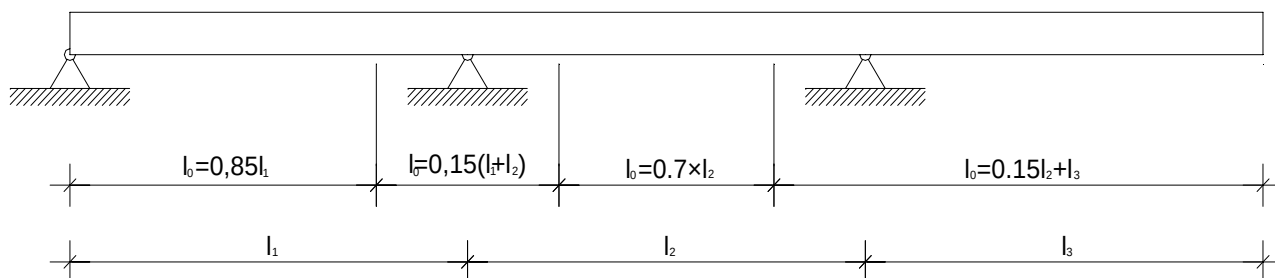
pokretno opterečenje (sl.5.2.3.):

POPRECNI PRESJEK:
rasponska konstrukcija i raspored oslonaca



Slika 5.2.3. Shema pokretnog opterećenja u srednjem polju

5.2.2. SUDJELUJUĆA ŠIRINA PLOČE



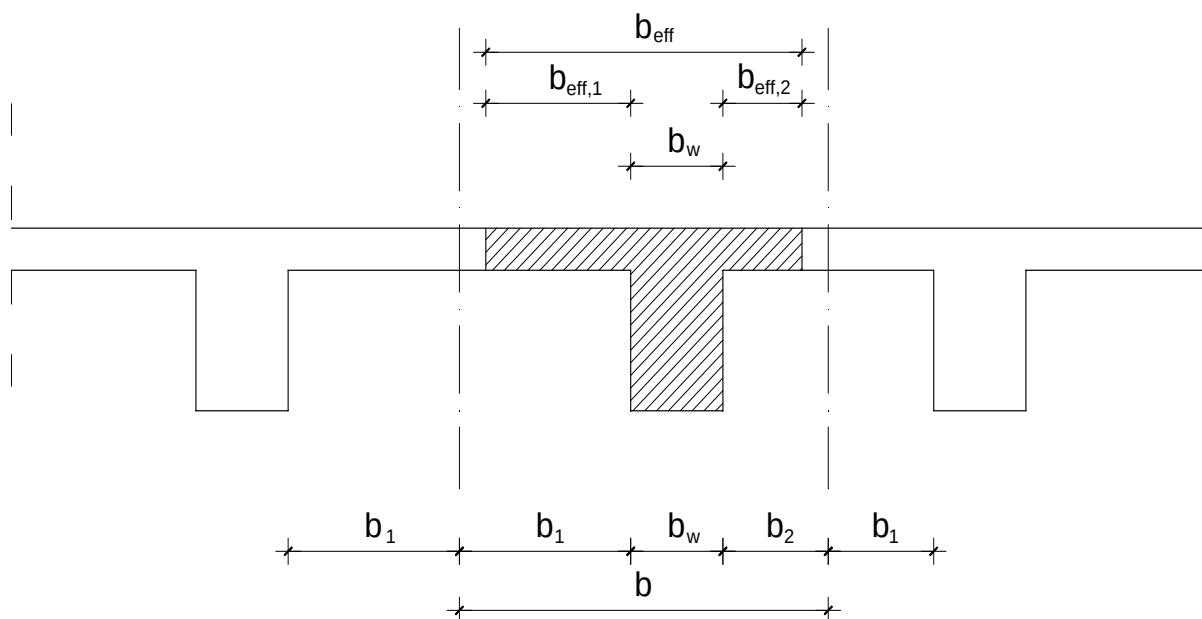
$$b_{\text{eff}} = \sum b_{\text{eff},i} + b_w \leq b$$

gdje je

$$b_{\text{eff},i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0$$

i

$$b_{\text{eff},i} \leq b_i$$



Kontinuirani nosač

vanjsko polje:

$$l_0 = 0,85 \times l_1 = 0,85 \times 15 = 12,75 \text{ m}$$

srednje polje:

$$l_0 = 0,7 \times l_2 = 0,7 \times 19 = 13,3 \text{ m}$$

ležaj:

$$l_0 = 0,15 \times (l_1 + l_2) = 0,15 \times (15,0 + 19,0) = 5,1 \text{ m}$$

Stvarna širina pojasa: $b_1 = 1,805 \text{ m}$, $b_2 = 1,96 \text{ m}$

Sudjelujuća širina ploče, moment u prvom polju:

$$b_{\text{eff},1} = 0,2 \times 1,805 + 0,1 \times 12,75 = 1,636 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff},2} = 0,2 \times 1,96 + 0,1 \times 12,75 = 1,667 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff}} = 1,636 + 1,667 + 1,45 = 4,753 \text{ m} < b = 5,215 \text{ m}$$

Sudjelujuća širina ploče, moment u srednjem polju

$$b_{\text{eff},1} = 0,2 \times 1,805 + 0,1 \times 13,3 = 1,691 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff},2} = 0,2 \times 1,96 + 0,1 \times 13,3 = 1,722 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff}} = 1,691 + 1,722 + 1,45 = 4,863 \text{ m} < b = 5,215 \text{ m}$$

Sudjelujuća širina ploče , moment na ležaju

$$b_{\text{eff},1} = 0,2 \times 1.805 + 0,1 \times 5.1 = 0.871 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff},2} = 0,2 \times 1.96 + 0,1 \times 5.1 = 0.902 \text{ m}$$

$$b_{\text{eff}} = 0.871 + 0.902 + 1,45 = 3.223 \text{ m} < b = 5.215 \text{ m}$$

5.2.3. RAZDIOBA OPTEREĆENJA NA GLAVNE NOSAČE

5.2.3.1 Stalno opterećenje

Na jedan glavni nosač (rebro) prenosi se polovica stalnog opterećenja, odnosno za stalni teret nema preraspodjele opterećenja između nosača.

5.2.3.2 Pokretno opterećenje

Pokretno opterećenje na mostu koje je neravnomjerno raspodjeljeno u poprečnom smislu preraspodjeljuje se zbog utjecaja torzijske krutosti nosača. Izravno opterećen nosač preuzima veći dio opterećenja, a neizravno opterećen manji. Udio preraspodjele određujemo približnim postupkom, crtajući utjecajnu liniju poprečne preraspodjele. Postupak je zasnovan na usporedbi kuteva zaokreta nosača uslijed opterećenja jediničnom silom za dva ekstremna slučaja: u prvom pretpostavljamo da je torzijska krutost presjeka jednaka 0, a u drugom da je krutost na savijanje jednaka 0.

a) *Pretpostavka: Torzijska krutost nosača = 0*

Progib uslijed jedinične sile u sredini raspona:

$$GI_t = 0 \Rightarrow f_1 = \frac{1 \times l^3}{48 \times EI_y}$$

kut zaokreta:

$$\phi_b = \frac{f_1}{2e}$$

U konkretnom slučaju (sl.5.2.4.):

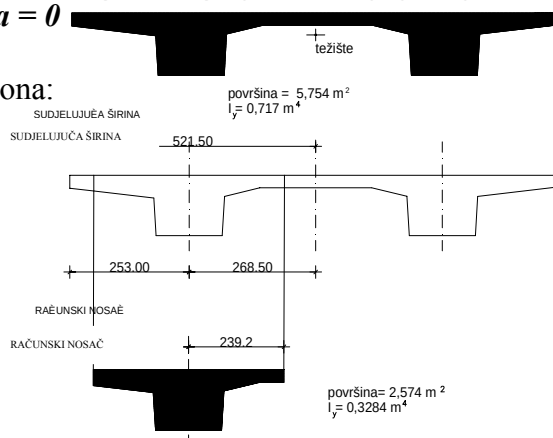
$$I_y = 0,3526 \text{ m}^4$$

$$E_{\text{betona}} \approx 3,2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$l = 19 \text{ m}$$

$$f_1 = 1,359 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\phi_b = 2,382 \times 10^{-6}$$



Slika 5.2.4. Geometrijske značajke (ACAD-mass properties)

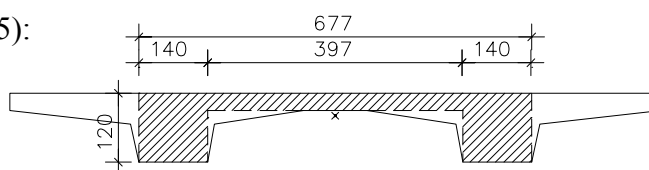
b) *Pretpostavka: Krutost nosača na savijanje = 0*

Kut zaokreta uslijed jediničnog momenta torzije u sredini raspona:

$$(G=0,4 \times E_b)$$

$$EI_y = 0 \Rightarrow \phi_t = \frac{M_t l}{GI_t} = \frac{M_t l}{1,6EI_t}$$

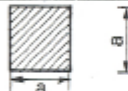
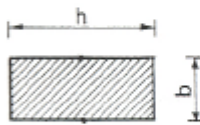
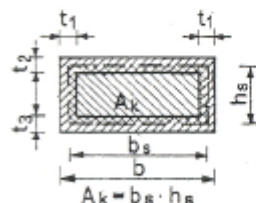
u konkretnom slučaju (sl.5.2.5):



$$I_T = (0,159 \times 1,2^3 \times 1,4) \times 2 + 0,333 \times 0,25^3 \times 3,97 = 0,79 \text{ m}^4$$

Slika 5.2.5. Pojednostavljeni presjek za proračun torzijske krutosti presjeka

Tablica 5.2.1. Proračun torzijske krutosti presjeka

Poprečni presjek	$\tau_{t,max} = \frac{T}{W_t}$	I_t							
	$\frac{16}{\pi} \frac{T}{d^3}$	$\frac{\pi \cdot d^4}{32}$							
	$\frac{16}{\pi} \frac{d}{d^4 - d_i^4} \cdot T$	$\frac{\pi}{32} (d^4 - d_i^4)$							
	$\approx \frac{2}{\pi} \frac{T}{t \cdot d_s^2}$	$\approx \frac{\pi \cdot t \cdot d_s^3}{4}$							
	$\frac{16}{\pi} \frac{T}{a \cdot b^2}$	$\frac{\pi}{16} \frac{a^3 \cdot b^3}{a^2 + b^2}$							
	$4.81 \frac{T}{a^3}$	$0.141 a^4$							
	$\beta \frac{T}{h \cdot b^2}$							$\alpha \cdot b^3 \cdot h$	
	h/b	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	∞
	α	0.196	0.229	0.263	0.281	0.299	0.307	0.313	0.333
	β	4.33	4.07	3.74	3.55	3.35	3.26	3.20	3.00
	Šuplji presjeci Proizvoljan $\frac{T}{2 A_k \cdot t_{min}}$							$\frac{4 A_k^2}{\sum \frac{u_{ik}}{t_i}}$	
	Pravokutni $\frac{T}{2 b_s \cdot h_s \cdot t_{min}}$							$\frac{4 b_s h_s}{\frac{2}{b_s \cdot t_1} + \frac{1}{h_s \cdot t_2} + \frac{1}{h_s \cdot t_3}}$	
	$\approx 5.32 \frac{T}{d^3}$	$0.133 d^4$							
	$\approx 5.41 \frac{T}{d^3}$	$0.130 d^4$							

$$I_t = (0,159 \times 1,2^3 \times 1,4) \times 2 + 0,333 \times 0,25^3 \times 3,97 = 0,79 \text{ m}^4$$

(vidi: Ivan Tomičić, Betonske konstrukcije, treće izdanje, Zagreb 1996., str. 281.)

$$M_t = 1 \times e = 1 \times 2,685 = 2,685 \text{ kNm}$$

$$\phi_t = 1.261 \times 10^{-6}$$

c) Utjecajna linija

Utjecajnu liniju crtamo spajanjem izračunatih ordinata za izravno i neizravno opterećen nosač. Neka je X vrijednost utjecaja koji se prenosi savijanjem izravno opterećenog nosača, a Y dio utjecaja koji se preraspodjeljuje na oba nosača zbog torzijske krutosti presjeka. Tada vrijedi:

$$1. \quad X + Y = 1$$

$$2. \quad X \phi_b - Y \phi_t = 0$$

Rješenje sustava jednažbi daje:

$$X = \frac{\phi_t}{\phi_b + \phi_t}, \quad Y = 1 - X$$

U konkretnom slučaju:

$$x = \frac{1.261}{2.382 + 1.261} = 0.346, \quad y = 1 - 0.346 = 0.654$$

$$\eta_{izr} = x + y/2 = 0.346 + 0.654/2 = 0.673$$

$$\eta_{neizr} = y/2 = 0.327$$

Ordinata utjecajne linije dobiva se zbrajanjem utjecaja X i Y, tako da je njezina vrijednost ispod izravno opterećenog nosača:

$$\eta_{izravno} = X + Y/2$$

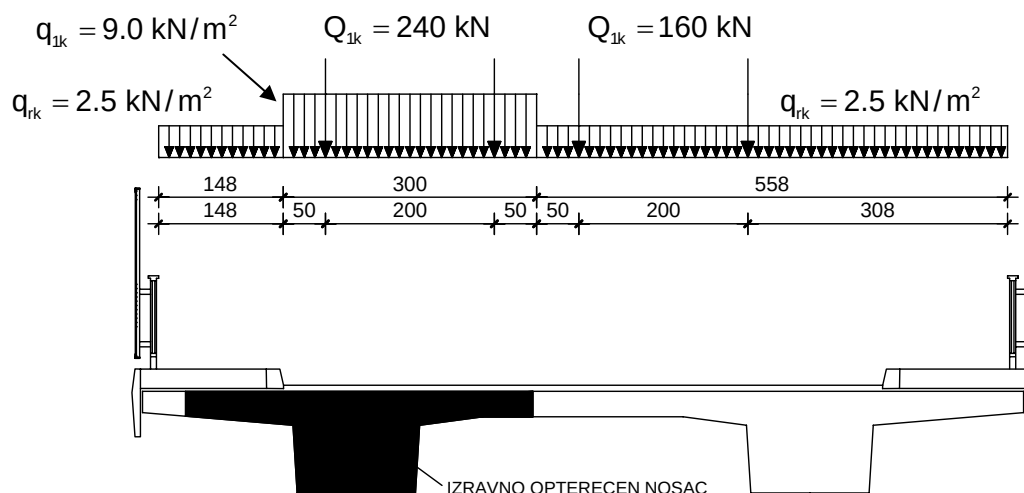
te ispod neizravno opterećenog nosača:

$$\eta_{neizravno} = Y/2$$

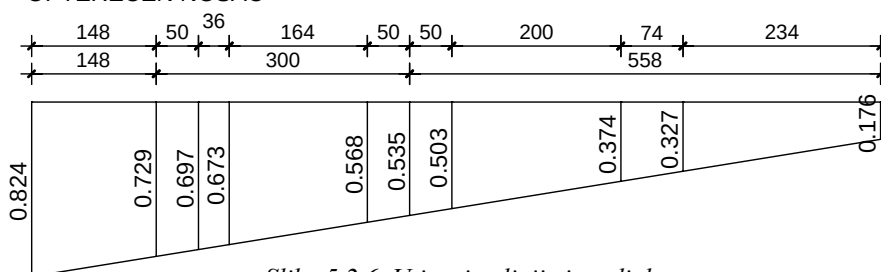
Konkretno, (Sl.5.2.6)

$$\eta_{izravno} = 0.346 + 0.654/2 = 0.673$$

$$\eta_{neizravno} = 0.654/2 = 0.327$$



UTJECAJNA LINIJA ZA POPREČNU PRERASPODJELU NA IZRAVNO OPTEREĆEN NOSAC



Slika 5.2.6. Utjecajne linije i rezdioba opterećenja u poprečnom presjeku

d) Razdioba opterećenja (Sl.5.2.7.)

Sva kontinuirana opterećenja množimo s površinom ispod utjecajne linije.

$$q = 1.48 \times 2.5 \times (0.825 + 0.729) / 2 + 3.0 \times 9 \times (0.729 + 0.535) / 2 + 5.58 \times 2.5 \times (0.535 + 0.176) / 2$$

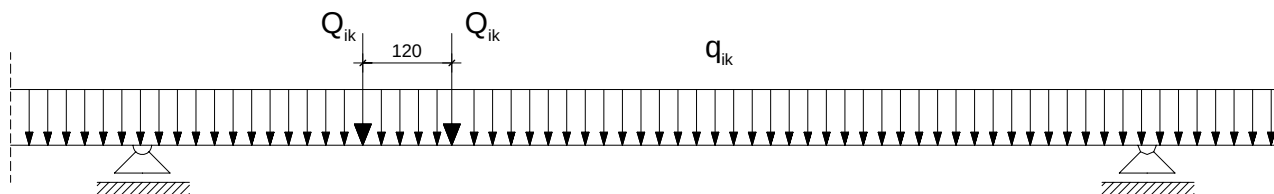
$$q = 24.898 \text{ kN/m'}$$

Koncentrirane sile množimo s pripadajućom ordinatom i zbrajamo.

$$120 \times (0.697 + 0.568) + 80 \times (0.503 + 0.374) =$$

$$= 221.96 \text{ kN}$$

$$Q = 221.96 \text{ kN}$$



Slika 5.2.7. Linijski proračunski model (nosač reduciran sudjelućom širinom, opterećenja modificirana poprečnom preraspodjelom)