"T" PRESECI

Nosač **T** preseka čini armiranobetonska greda (rebro) koja je u svom pritisnutom delu MONOLITNO vezana sa pločom. Time se u pritisnutoj zoni preseka koncentriše velika masa betona, što rezultira optimalnim iskorišćenjem betona kao materijala.

Normalne napone pritiska prihvataju rebro i sadejstvujući deo ploče na izvesnoj širini, koja se naziva *računska aktivna širina ploče* **B**. Monolitnost veze obezbeđuje do izvesnog nivoa naprezanja smicanje na spoju ploče i rebra, a zatim se ova veza održava potrebnim armiranjem ploče upravno na pravac rebra.

Aktivna širina ploče koja se koristi za dimenzionisanje je Pravilnikom BAB 87 određena kao minimalna od sledećih vrednosti:

$$B = \min.\begin{Bmatrix} b + 0.25 \times l_0 \\ b + 20 \times d_p \\ e \end{Bmatrix} \quad , \quad \text{odnosno} \quad B = \min.\begin{Bmatrix} b_1 + b + \dfrac{0.25}{3} \times l_0 \\ b_1 + b + 8 \times d_p \\ e/2 \end{Bmatrix}$$

za simetrične, odnosno nesimetrične (**T** odnosno **Γ** preseke). Pritom je:

- ***b*** - širina rebra
- d_p - debljina ploče
- l_0 - rastojanje nultih tačaka dijagrama momenata savijanja na delu na kome je ploča pritisnuta
- ***e*** - osovinsko rastojanje rebara, odnosno fizički raspoloživa širina ploče koja se može dodeliti jednom rebru (rožnjače, korube, sedišta tribina i slični nosači kod kojih je ovaj uslov najčešće merodavan).

Bez obzira na geometrijski oblik, presek se proračunava kao **T** presek samo ukoliko je ploča pritisnuta, a neutralna linija linija se nalazi u rebru, drugim rečima ukoliko je PRITISNUTA ZONA preseka **T** oblika. Ukoliko je ploča u zategnutoj zoni preseka, sprovodi se proračun za pravougaoni presek širine ***b***, a ukoliko se je ploča pritisnuta, ali se neutralna linija nalazi u njoj, presek se proračunava kao pravougaoni širine ***B***.

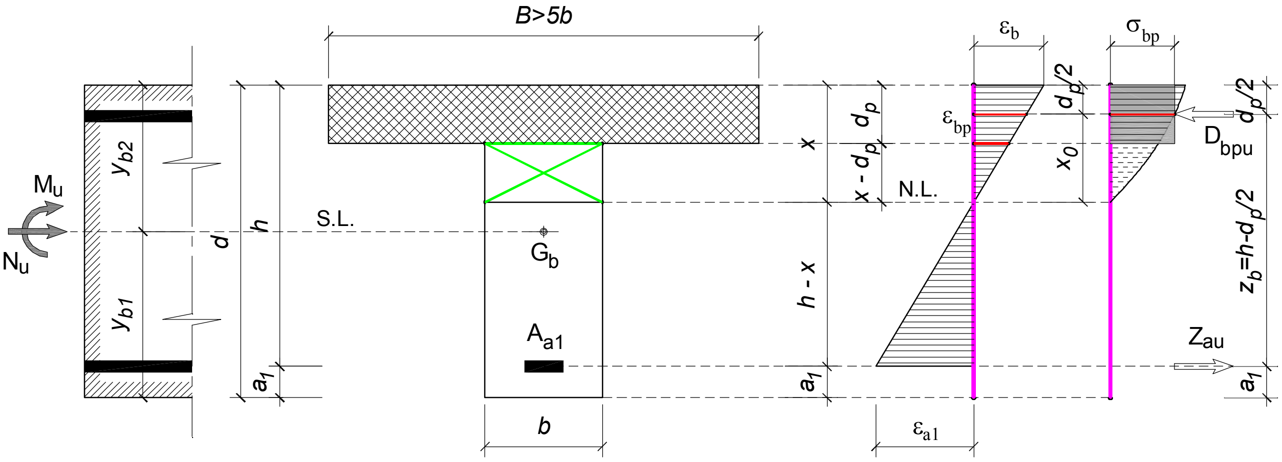
Ukoliko presek treba proračunati kao **T** presek, zavisno od odnosa aktivne širine ***B*** i širine rebra ***b***, mogu nastupiti dva slučaja:

- ukoliko je odnos širina **B/b > 5**, sprovodi se uprošćeni postupak kojim se zanemaruje nosivost rebra. U ovom slučaju, sila pritiska koju prihvata rebro je vrlo mala u odnosu na silu pritiska koju prihvata ploča (daleko manja površina betona, znatno manji naponi pritiska, manji krak unutrašnjih sila). Dalje pojednostavljenje proračuna se sastoji u uprosečavanju napona pritiska - usvaja se da je napon pritiska po čitavoj visini ploče konstantan i jednak naponu u njenoj srednjoj ravni; to ujedno znači da unutrašnja sila pritiska deluje u srednjoj ravni ploče, odnosno da je krak unutrašnjih sila $\mathbf{z_b = h - d_p/2}$.
- ukoliko je odnos širina **B/b ≤ 5**, mora se sprovesti tačniji proračun, koji obuhvata i nosivost pritisnutog dela rebra. Ovaj slučaj može nastati kod istovremenog delovanja momenata savijanja i relativno velikih sila pritiska.

PRORAČUN "T" PRESEKA SA ZANEMARENJEM NOSIVOSTI REBRA

U slučaju da se nosivost rebra može zanemariti (slučaj **B/b > 5**), uslov ravnoteže momenata savijanja u odnosu na težište zategnute armature može se napisati u obliku:

$$\Sigma M_{a1} = 0: \;\Rightarrow\; D_{bu} \times z_b + D_{au} \times (h - a_2) = M_{au} = M_u + N_u \times (y_{b1} - a_1)$$



Zbog velike površine (nosivosti) pritisnutog dela betonskog preseka, kod ovakvog oblika poprečnog preseka prisustvo armature u pritisnutoj zoni je nepotrebno (barem u računskom smislu), pa je stoga $\mathbf{D_{au} \equiv 0}$. S druge strane, zanemarenjem nosivosti rebra i uprosečavanjem napona pritiska u ploči, može se napisati:

$$D_{bu} = D_{bpu} = B \times d_p \times \sigma_{bp}$$

$$z_b = h - d_p/2$$

gde je σ_{bp} napon u srednjoj ravni ploče. Tako se uslov ravnoteže momenata savijanja može napisati u obliku:

$$\Sigma M_{a1} = 0: \;\Rightarrow B \times d_p \times \sigma_{bp} \times (h - d_p/2) = M_{au} = M_u + N_u \times (y_{b1} - a_1)$$

U ovom uslovu ravnoteže nepoznate veličine mogu biti:

- statička visina **h** (slobodno dimenzionisanje, usvajanje σ_{bp})
- napon u betonu $\boldsymbol{\sigma_{bp}}$ (vezano dimenzionisanje, pp. $a_1 \Rightarrow h$)

Ostale veličine (B, d_p, y_{b1}, M_u, N_u) su sračunate ili poznate (usvojene).

SLOBODNO DIMENZIONISANJE

Biće ilustrovano na primeru nosača napregnutog na čisto savijanje. Za slučaj složenog savijanja postupak je principijelno isti, ali se sprovodi iterativno (nepoznata visina preseka **d**, a samim tim i $\mathbf{M_{au}}$) na način opisan kod dimenzionisanja pravougaonih preseka.

Poznato:

- statički uticaji za pojedina opterećenja (M_i) - sračunato
- kvalitet materijala (f_B , σ_v) - usvojeno
- širina rebra (b), aktivna širina ploče (B), debljina ploče (d_p)

Nepoznato:

- visina poprečnog preseka (d)
- površina armature (A_a)

1. korak: Sračunavaju se granični računski statički uticaji:

$$M_u = \sum_i \gamma_{u,i} \times M_i \quad (i{=}g, p, \Delta)$$

Pri tome se usvajaju MINIMALNE vrednosti koeficijenata sigurnosti, jer presek dostiže granično stanje otkazom armature (ε_{a1} = 10‰).

2. korak: Usvaja se napon u betonu u nivou srednje ravni ploče σ_{bp}. S obzirom na uvedeno uprošćenje dijagrama napona u betonu, usvajanje dilatacija ε_b/ ε_a ne bi imalo nikakvog praktičnog smisla. Veće usvojene vrednosti napona daju preseke manje visine, armirane većom količinom armature.

3. korak: Za usvojenu vrednost σ_{bp} iz uslova ravnoteže momenata savijanja sračunava se odgovarajuća statička visina:

$$h = \frac{M_u}{B \times d_p \times \sigma_{bp}} + \frac{d_p}{2}$$

Napon σ_{bp} se najčešće usvaja u granicama (0.20…0.50)×f_{bk} , gde je f_{bk} karakteristična vrednost čvrstoće betona pri jednoaksijalnom pritisku (*marka betona*). Ove granice treba shvatiti uslovno i po potrebi (preseci izrazito male ili izrazito velike visine) korigovati pretpostavljenu vrednost napona. Takođe, redovno se usvaja $\sigma_{bp} < f_B$, gde je f_B – računska čvrstoća betona.

4. korak: Iz poznate veze napon–dilatacija, definisane Pravilnikom (parabolični deo dijagrama), sračunava se dilatacija betona u nivou srednje ravni ploče:

$$\varepsilon_{bp} = 2 \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{bp}}{f_B}}\right) (‰) \quad ; \quad \varepsilon_a = 10‰$$

5. korak: Određuje se položaj neutralne linije u odnosu na srednju ravan ploče:

$$x_0 = \frac{\varepsilon_{bp}}{\varepsilon_{bp} + \varepsilon_a} \times \left(h - \frac{d_p}{2} \right)$$

i upoređuje sa **POLOVINOM DEBLJINE** ploče.

6a korak: Ukoliko je konstatovano da se neutralna linija nalazi u rebru ($x_0 > d_p/2$), određuje se površina armature iz uslova ravnoteže normalnih sila:

$$A_a = \frac{M_u}{\left(h - \frac{d_p}{2} \right) \times \sigma_v}$$

6b korak: Ukoliko je konstatovano da se neutralna linija nalazi u ploči ($x_0 \le d_p/2$), presek treba dimenzionisati kao pravougaoni širine B. Za sračunatu statičku visinu određuje se bezdimenzioni koeficijent k:

$$k = \frac{h}{\sqrt{\frac{M_u}{B \times f_B}}}$$

i iz tabela za dimenzionisanje pravougaonih preseka očita vrednost mehaničkog koeficijenta armiranja $\bar{\mu}$. Potrebna površina armature se sračunava iz izraza:

$$A_a = \bar{\mu} \times \frac{B \times h}{100} \times \frac{f_B}{\sigma_v}$$

7. korak: Usvaja se broj i prečnik šipki armature. Usvojena armatura se raspoređuje u poprečnom preseku, vodeći računa o zahtevima propisanih Pravilnikom (debljina zaštitnog sloja, čisto rastojanje između šipki).

8. korak: Sračunava se položaj težišta a_1 usvojene armature u odnosu na zategnutu ivicu preseka i potrebna ukupna visina preseka d:

$$d = h + a_1$$

koja se zaokružuje na prvi veći ceo broj (ceo broj deljiv sa pet).

9. korak: Konačno se konstruiše poprečni presek usvojenih dimenzija, armiran usvojenom količinom armature, i prikazuje u odgovarajućoj razmeri (1:10) sa svim potrebnim kotama i oznakama.

Primer 13. Odrediti visinu i potrebnu površinu armature za T presek zadatih geometrijskih karakteristika, opterećen momentima savijanja usled stalnog (M_g) i povremenog (M_p) opterećenja. Podaci za proračun:

M_g = 200 kNm	B = 180 cm	d_p = 10 cm	MB 30
M_p = 250 kNm	b = 30 cm		RA 400/500

$M_u = 1.6 \times 200 + 1.8 \times 250 = 770$ kNm

MB 30 $\Rightarrow$ $f_B = 2.05$ kN/cm^2 ; $f_{bk} = 3.0$ kN/cm^2

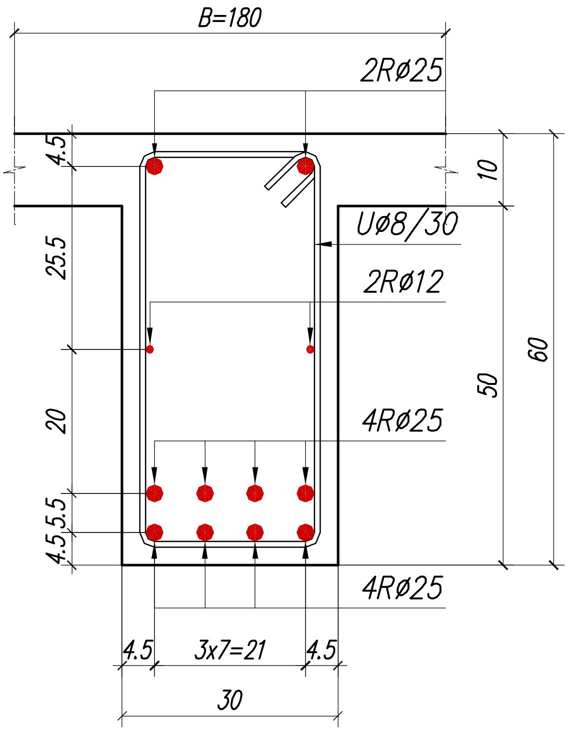
usvojeno: $\sigma_{bp} = 9$ MPa $= 0.9$ kN/cm^2

$$h = \frac{770 \times 10^2}{180 \times 10 \times 0.9} + \frac{10}{2} = 52.53 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{bp} = 2 \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0.9}{2.05}}\right) = 0.502‰ \; ; \; \varepsilon_a = 10‰$$

$$x_0 = \frac{0.502}{0.502 + 10} \times \left(52.53 - \frac{10}{2}\right) = 2.27 \text{ cm} < d_p/2 = 5 \text{ cm}$$

Neutralna linija se nalazi u ploči, pa se presek dimenzioniše kao pravougaoni, širine B.



$$k = \frac{52.53}{\sqrt{\frac{770 \times 10^2}{180 \times 2.05}}} = 3.636$$

$\varepsilon_b/\varepsilon_a = 1.575/10‰$; $\bar{\mu} = 7.903\%$; s = 0.136[1]

$$A_a = 7.903 \times \frac{180 \times 52.53}{100} \times \frac{2.05}{40} = 38.30 \text{ cm}^2$$

usvojeno: **8RØ25** (39.27 cm^2)

$$a_1 = \frac{4 \times (4.5 + 10)}{8} = 7.25 \text{ cm}$$

$d = 52.53 + 7.25 = 59.78$ cm

usvojeno: **d=60 cm**

---

[1] Mada nije neophodno, sprovodi se kontrola položaja neutralne linije:

$x = 0.136 \times 52.53 = 7.14 \text{ cm} < d_p = 10 \text{ cm}$

Naime, ovo je tačan položaj neutralne linije, jer je sračunat iz stvarnog radnog dijagrama betona a ne iz osrednjenog. Može se konstatovati da je neutralna linija bliže pritisnutoj ivici preseka nego što daje proračun T preseka ($x = x_0 + d_p/2$ = 5+2.27 = 7.27 cm > 7.14 cm).

VEZANO DIMENZIONISANJE

Biće ilustrovano na primeru nosača napregnutog na složeno savijanje.

Poznato:

- statički uticaji za pojedina opterećenja (M_i) - sračunato
- kvalitet materijala (f_B , σ_v) - usvojeno
- širina rebra, aktivna širina ploče, debljina ploče, visina preseka (b,B,d_p,d)

Nepoznato:

- površina armature (A_a)

1. korak: Sračunavaju se granični računski statički uticaji:

$$M_u = \sum_i \gamma_{u,i} \times M_i \;\; (i = g, p, \Delta)$$
$$N_u = \sum_i \gamma_{u,i} \times N_i$$

Pri tome se usvajaju MINIMALNE vrednosti koeficijenata sigurnosti.

2. korak: Pretpostavlja se položaj težišta zategnute armature u preseku i sračunava statička visina h. Iz uslova ravnoteže momenata savijanja sračunava se napon u betonu u nivou srednje ravni ploče σ_{bp}.

$$h = d - a_1 \;\; \Rightarrow \;\; M_{au} = M_u + N_u \times \left(\frac{d}{2} - a_1 \right)$$

$$\sigma_{bp} = \frac{M_{au}}{B \times d_p \times \left(h - \frac{d_p}{2} \right)}$$

U slučaju da se računski dobije $\sigma_{bp} > f_B$, postupak se prekida i sprovodi tačan proračun (u proračun se uvodi i nosivost rebra, npr. ispisivanjem uslova ravnoteže - određivanje položaja neutralne linije iz $\Sigma M_{a1} = 0$).

3. korak: Iz poznate veze napon–dilatacija, definisane Pravilnikom (parabolični deo dijagrama), sračunava se dilatacija betona u nivou srednje ravni ploče:

$$\varepsilon_{bp} = 2 \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{bp}}{f_B}} \right) (‰) \;\; ; \;\; \varepsilon_a = 10‰$$

4. korak: Određuje se položaj neutralne linije u odnosu na srednju ravan ploče:

$$x_0 = \frac{\varepsilon_{bp}}{\varepsilon_{bp} + \varepsilon_a} \times \left(h - \frac{d_p}{2} \right)$$

i upoređuje sa **POLOVINOM DEBLJINE** ploče.

5a korak: Ukoliko je konstatovano da se neutralna linija nalazi u rebru ($x_0 > d_p/2$), određuje se površina armature iz uslova ravnoteže normalnih sila:

$$A_a = \frac{M_{au}}{\left(h - \frac{d_p}{2}\right) \times \sigma_v} - \frac{N_u}{\sigma_v}$$

5b korak: Ukoliko se utvrdi da se neutralna linija nalazi u ploči ($x_0 \leq d_p/2$), presek treba dimenzionisati kao pravougaoni širine B. Za sračunatu statičku visinu određuje se bezdimenzioni koeficijent k:

$$k = \frac{h}{\sqrt{\frac{M_{au}}{B \times f_B}}}$$

i iz tabele za dimenzionisanje pravougaonih preseka očita vrednost mehaničkog koeficijenta armiranja $\bar{\mu}$. Potrebna površina armature se sračunava iz izraza:

$$A_a = \bar{\mu} \times \frac{B \times h}{100} \times \frac{f_B}{\sigma_v} - \frac{N_u}{\sigma_v}$$

6. korak: Usvaja se broj i prečnik šipki armature. Usvojena armatura se raspoređuje u poprečnom preseku, vodeći računa o zahtevima propisanih Pravilnikom (debljina zaštitnog sloja, čisto rastojanje između šipki).

7. korak: Sračunava se položaj težišta a_1 usvojene armature u odnosu na zategnutu ivicu preseka i stvarna statička visina h, koja se upoređuje sa računskom. Po potrebi se koriguje pretpostavljeno a_1 i proračun u potpunosti ponavlja.

8. korak: Konačno se konstruiše poprečni presek usvojenih dimenzija, armiran usvojenom količinom armature, i prikazuje u odgovarajućoj razmeri (1:10) sa svim potrebnim kotama i oznakama.

Primer 14. Odrediti potrebnu površinu armature za T presek zadatih geometrijskih karakteristika, opterećen uticajima usled stalnog (M_g , N_g) i povremenog (M_p , N_p) opterećenja. Podaci za proračun:

M_g = 300 kNm N_g = 500 kN   B = 180 cm d_p = 10 cm   MB 25

M_p = 250 kNm N_p = 400 kN   b = 30 cm   d = 60 cm   RA 400/500

$M_u = 1.6 \times 300 + 1.8 \times 250 = 930$ kNm

$N_u = 1.6 \times 500 + 1.8 \times 400 = 1520$ kN

MB 25 $\Rightarrow$ $f_B = 1.725$ kN/cm^2

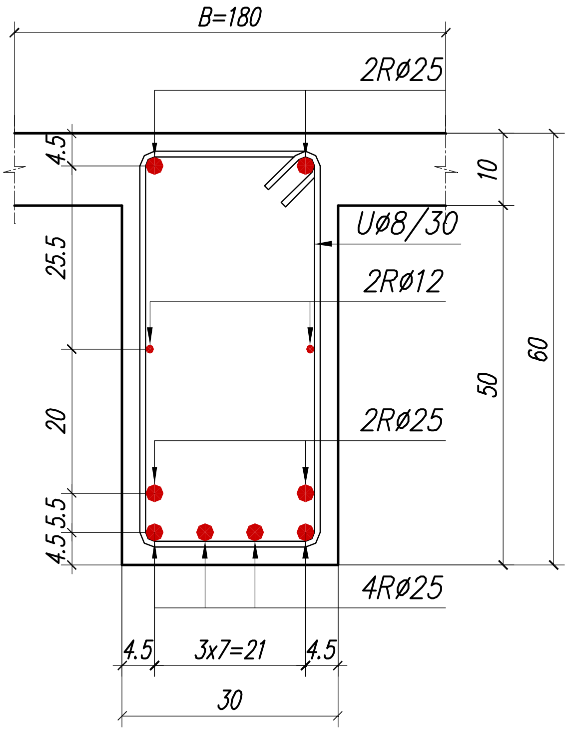
pretpostavljeno: $a_1 = 7$ cm $\Rightarrow$ $h = 60 - 7 = 53$ cm

$$M_{au} = 930 + 1520 \times \left(\frac{60}{2} - 7 \right) \times 10^{-2} = 1279.6 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{bp} = \frac{1279.6 \times 10^2}{180 \times 10 \times \left(53 - \frac{10}{2} \right)} = 1.67 \text{ kN/cm}^2 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{bp} = 2 \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1.67}{1.725}} \right) = 1.631‰$$

$$\varepsilon_a = 10‰ \quad \Rightarrow \quad x_0 = \frac{1.631}{1.631 + 10} \times \left(53 - \frac{10}{2} \right) = 6.73 \text{ cm} > d_p/2 = 5 \text{ cm}$$

Kako se neutralna linija nalazi u rebru, potrebna površina armature se određuje iz izraza koji odgovaraju "T" preseku. Kako je B/b = 180/30 = 6 > 5, može se primeniti uprošćen postupak (zanemarenje nosivosti rebra), pa se potrebna površina armature određuje iz izraza:



$$A_a = \frac{1279.6 \times 10^2}{\left(53 - \frac{10}{2} \right) \times 40} - \frac{1520}{40} = 28.65 \text{ cm}^2$$

usvojeno: **6RØ25** (29.45 cm^2)

$$a_1 = \frac{4 \times 4.5 + 2 \times 10}{6} = 6.33 \text{ cm}$$

$h_{stv.}$= 60 - 6.33 = 53.67 cm > $h_{rač.}$= 53 cm

PRORAČUN "T" PRESEKA
SA UZIMANJEM U OBZIR NOSIVOSTI REBRA

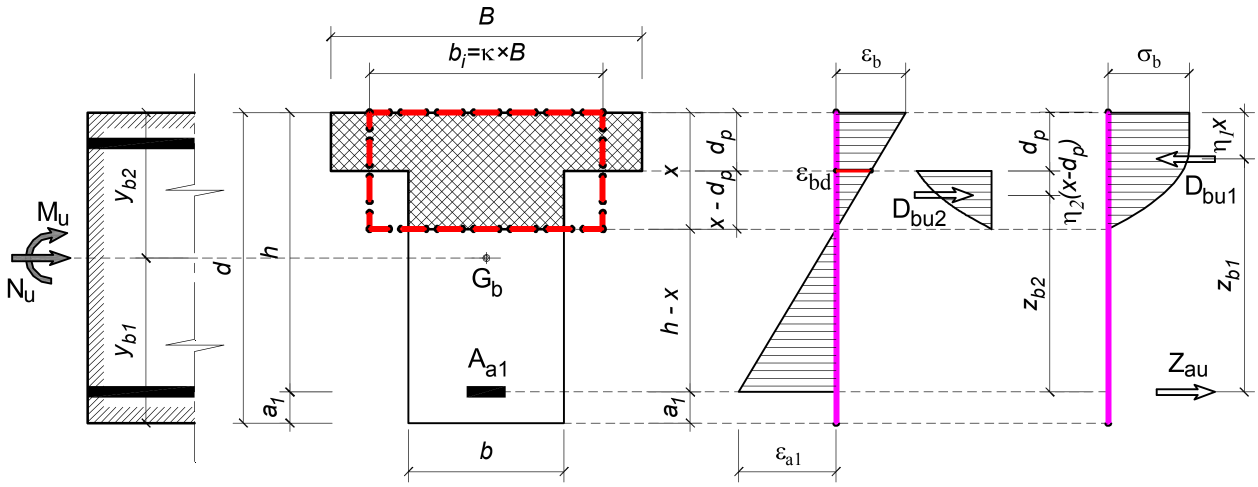
Ukoliko se neutralna linija nalazi u rebru, a pritom nije zadovoljen uslov **B/b>5**, pristupa se tačnijem proračunu, odnosno nosivost rebra se uzima u obzir. Potreba za ovim se javlja uglavnom kod preseka ograničene širine B (rožnjače i sl.), koja nije znatno veća od širine rebra, kao i kod preseka koji su, pored momenata savijanja, napregnuti i znatnim aksijalnim silama pritiska. Dva su moguća načina da se tačniji postupak dimenzionisanja ovakvih preseka sprovede:

- postupak zasnovan na iznalaženju ekvivalentnog pravougaonog preseka širine b_i ; širina b_i se određuje iz uslova da se pri jednakim položajima neutralne linije dobiju jednake sile pritiska u ekvivalentnom pravougaonom preseku i u stvarnom T preseku (približan postupak - krakovi unutrašnjih sila se razlikuju - postupak je na strani sigurnosti za B>b)
- položaj neutralne linije u preseku se određuje iz uslova ravnoteže momenata savijanja u odnosu na težište zategnute armature, a sila pritiska u betonu se određuje dekompozicijom T preseka na dva pravougaona (tačno rešenje).

PRIBLIŽAN POSTUPAK - SVOĐENJE NA EKVIVALENTNI PRAVOUGAONI PRESEK

Sila pritiska u betonu se, korišćenjem oznaka sa skice, može napisati u obliku:

$$D_{bu} = D_{bu1} - D_{bu2}$$



pri čemu su sile D_{bu1} i D_{bu2} sile koje odgovaraju pravougaonim presecima dimenzija B×x, sa maksimalnom dilatacijom ε_b (na gornjoj ivici ploče), odnosno dimenzija (B-b)×(x-d_p), sa dilatacijom ε_{bd} (na donjoj ivici ploče). Sile D_{bu1} i D_{bu2} se mogu sračunati kao:

$$\mathbf{D_{bu1} = \alpha_{b1} \times B \times x \times f_B} = \alpha_{b1} \times s \times B \times h \times f_B \quad ; \quad s = x/h$$

$$\mathbf{D_{bu2} = \alpha_{b2} \times (B-b) \times (x-d_p) \times f_B} = \alpha_{b2} \times (B/b-1) \times (s-\delta) \times b \times h \times f_B \quad ; \quad \delta = d_p/h$$

pri čemu koeficijenti punoće naponskog dijagrama betona α_{b1} i α_{b2} odgovaraju dilatacijama ε_b i ε_{bd} respektivno.

Postupak se sastoji u određivanju ekvivaletnog pravougaonog preseka, širine b_i = k×B, kome pri istom položaju neutralne linije odgovara sila:

$$\mathbf{D_{bu,i} = \alpha_{b1} \times b_i \times x \times f_B} = \alpha_{b1} \times s \times \kappa \times B \times h \times f_B = D_{bu} \mathbf{= D_{bu1} - D_{bu2}}$$

Izjednačavanjem ovih izraza, koeficijent κ se može sračunati kao:

$$\kappa = 1 - \frac{\alpha_{b2}}{\alpha_{b1}} \times \left(1 - \frac{\delta}{s}\right) \times \left(1 - \frac{b}{B}\right)$$

U tabeli u prilogu (PBAB 1, str. 187, tabela 84/1) date su vrednosti bezdimenzionog koeficijenta **κ** za različite odnose **B/b** i **δ/s**, a u zavisnosti od položaja neutralne linije. Praktičan postupak dimenzionisanja prikazan je u Primeru 15.

Ovaj postupak je ITERATIVAN, pa se postavlja pitanje opravdanosti njegove primene s obzirom na: **(a)** činjenicu da se iz tablica dobija ista vrednost κ za npr. δ/s=0.05 i s=0.05 kao i za δ/s=0.35 i s=0.35 što nikako nije tačno (različite vrednosti, a time i odnosi α_{b1} i α_{b2}); **(b)** mala tačnost (broj decimala) tabulisanih vrednosti; **(c)** nemogućnost primene postupka za slučaj **B<b**, koji je zapravo najinteresantniji (ne postoje tabulisane vrednosti, a s druge strane za ovaj slučaj postupak NIJE NA STRANI SIGURNOSTI) - predlog je da u ovakvim slučajevi koristi tačan postupak

Primer 15. Odrediti visinu i potrebnu površinu armature za T presek zadatih geometrijskih karakteristika, opterećen momentima savijanja usled stalnog (M_g) i povremenog (M_p) opterećenja. Podaci za proračun[2]:

$M_g = 200$ kNm	$B = 60$ cm	$d_p = 10$ cm	MB 30
$M_p = 250$ kNm	$b = 30$ cm		RA 400/500

$$M_u = 1.6 \times 200 + 1.8 \times 250 = 770 \text{ kNm}$$

$$\text{MB 30} \quad \Rightarrow \quad f_B = 2.05 \text{ kN/cm}^2$$

pretpostavljeno: $a_1 = 9$ cm[3] $\Rightarrow$ $h = 60 - 9 = 51$ cm

*U praktičnim proračunima T preseka korisno je pretpostaviti da se neutralna linija nalazi u ploči. U tom slučaju se presek dimenzioniše kao pravougaoni, širine **B**. Nakon sračunavanja bezdimenzionog koeficijenta **k**, iz tabela za dimenzionisanje pravougaonih preseka se najpre očita vrednost koeficijenta **s** i proveri tačnost pretpostavke o položaju neutralne linije. Ukoliko je pretpostavka zadovoljena, površina armature se određuje iz odgovarajućih izraza za pravougaoni poprečni presek, a ukoliko nije, sprovodi se dimenzionisanje T preseka na jedan od izloženih načina, zavisno od odnosa B/b.*

1. korak

U prvom koraku se pretpostavlja da se neutralna linija nalazi u ploči ($b_i = B$). Sledi:

$$k = \frac{51}{\sqrt{\frac{770 \times 10^2}{60 \times 2.05}}} = 2.038 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_b/\varepsilon_a = 3.5/6.57‰ \;\; ; \;\; s = 0.348$$

$$x = 0.348 \times 51 = 17.7 \text{ cm} > d_p = 10 \text{ cm}$$

Neutralna linija se nalazi u rebru, pa se presek dimenzioniše kao T presek. Kako je **B/b** = 60/30 = **2<5**, potrebno je u proračun uvesti nosivost pritisnutog dela rebra.

$$d_p/h = 10/51 = 0.196 \approx 0.20$$

Na levom delu tabele za određivanje bezdimenzione veličine κ potrebno je izabrati kolonu koja odgovara sračunatoj vrednosti d_p/h (uokvirena debljom linijom). Ukoliko takva vrednost ne postoji, potrebno je izvršiti linearnu interpolaciju (preporuka: odmah interpolirati čitavu kolonu, radi jednostavnosti i sagledavanja postupka određivanja κ).

U toj koloni potrebno je uočiti PRVU VEĆU[4] vrednost **s** od sračunate (s=0.348). To je vrednost s=0.40 (svetlo osenčen red).

[2] Podaci iz Primera 13, s tim da je B=60 cm umesto B=180 cm

[3] S obzirom na manju širinu preseka, dobiće se veća površina armature nego u Primeru 1, pa se pretpostavlja veće a_1

[4] Veća vrednost se bira jer se kroz iteracije širina preseka smanjuje, a neutralna linija pomera ka zategnutoj ivici preseka (nasuprot tome, da u tabeli postoje vrednosti za B/b<1, uzimala bi se prva manja vrednost, jer bi se širina idealizovanog preseka povećavala, a neutralna linija pomerala ka pritisnutoj ivici preseka)

d_p/h										B/b											
0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	7.5	10	15	20	25
$s = x/h$										$\kappa = b_i/B$											
0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.5	0.44	0.39	0.33	0.28	0.22	0.17	0.11	0.06	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
		0.5	0.44	0.38	0.31	0.25	0.19	0.13	0.06	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
			0.5	0.43	0.36	0.29	0.21	0.14	0.07	0.95	0.92	0.9	0.89	0.89	0.88	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85
				0.5	0.42	0.33	0.25	0.17	0.08	0.91	0.87	0.84	0.82	0.81	0.8	0.79	0.77	0.76	0.75	0.75	0.75
					0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.87	0.81	0.77	0.75	0.73	0.71	0.7	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63
						0.5	0.38	0.25	0.13	0.83	**0.75**	0.7	0.66	0.64	0.62	0.6	0.56	0.54	0.53	0.52	0.51
							0.5	0.33	0.17	0.79	0.69	0.62	0.58	0.55	0.53	0.5	0.45	0.43	0.41	0.4	0.39
								0.5	0.25	0.75	0.62	0.55	0.5	0.46	0.44	0.4	0.35	0.32	0.3	0.29	0.28
									0.5	0.71	0.56	0.47	0.42	0.37	0.34	0.3	0.24	0.21	0.18	0.17	0.16

Na desnom delu tabele se bira kolona sa odgovarajućim odnosom B/b=60/30=2 (uokvirena debljom linijom). Ukoliko kolona sa takvom vrednošću ne postoji, ponovo je potrebno izvršiti linearnu interpolaciju vrednosti iz susednih kolona.

Iz s=0.40 i B/b = 2 dobija se **κ = 0.81**, pa je:

$$b_i = 0.81 \times 60 = 48.6 \text{ cm}$$

vrednost širine sa kojom je potrebno nastaviti proračun.

2. korak

$$k = \frac{51}{\sqrt{\dfrac{770 \times 10^2}{48.6 \times 2.05}}} = 1.835$$

$$\varepsilon_b/\varepsilon_a = 3.5/4.24‰ \;\; ; \;\; s = 0.452 > 0.40$$

Za d_p/h = 0.20 prvo veće s od upravo sračunatog je s = 0.50. Za ovu vrednost i odnos B/b = 2 sledi **κ = 0.75** (tamno osenčen red). Dalje je:

$$b_i = 0.75 \times 60 = 45.0 \text{ cm}$$

3. korak

$$k = \frac{51}{\sqrt{\dfrac{770 \times 10^2}{45 \times 2.05}}} = 1.765$$

$$\varepsilon_b/\varepsilon_a = 3.5/3.49‰ \;\; ; \;\; s = 0.501 \approx 0.50 \;\; ; \;\; \bar{\mu} = 40.533\%$$

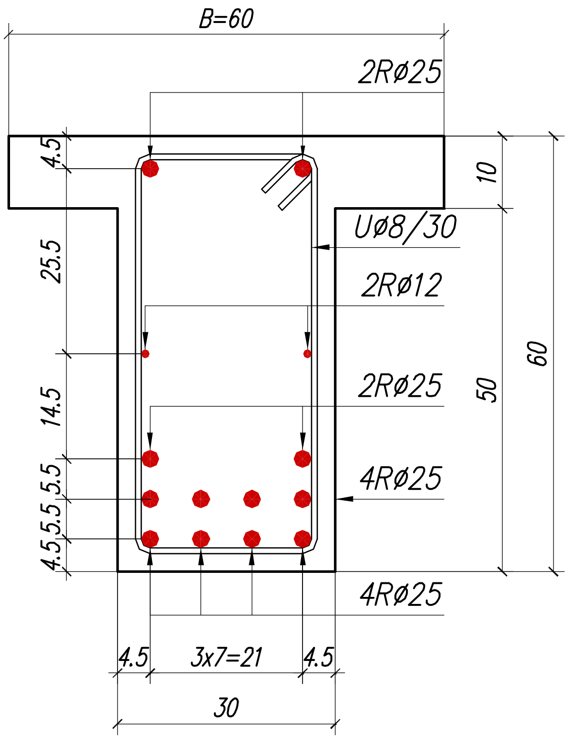
Kako je postignuta potrebna tačnost, sračunava se potrebna površina armature kao:

$$A_a = 40.533 \times \frac{45 \times 51}{100} \times \frac{2.05}{40} = 47.67\ cm^2$$

usvojeno: **10RØ25** (49.09 cm^2)

$$a_1 = \frac{4 \times (4.5 + 10) + 2 \times 15.5}{10} = 8.9\ cm$$

$h_{stv.} = 60 - 8.9 = 51.1\ cm > h_{rač.} = 51\ cm$



Napomene:

– Postupak se na analogan način sprovodi i za slučaj složenog savijanja.

– Za slučaj ε_a<3.0‰ potrebno je, kao i u slučaju dimenzionisanja ostalih tipova preseka, pristupiti DVOSTRUKOM ARMIRANJU. Međutim, treba uočiti da je maksimalna tabulisana vrednost **s=0.50** (ε_b=ε_a=3.5‰). To praktično znači da pri eventualnom prekoračenju ove vrednosti treba zadržati b_i iz poslednje iteracije i sračunati A_{a2} i ΔA_{a1} za odgovarajući pravougaoni presek.

TAČAN POSTUPAK DIMENZIONISANJA "T" PRESEKA UZIMAJUĆI U OBZIR NOSIVOST PRITUSNUTOG DELA REBRA

Poznato je da se potrebna površina armature jednostruko armiranog preseka određuje iz uslova ravnoteže normalnih sila:

$$\Sigma N = 0 \;\Rightarrow\; D_{bu} - Z_{au} = N_u \;\Rightarrow\; A_{a1} = \frac{D_{bu} - N_u}{\sigma_v} \qquad (1)$$

Problem je u tome što je nepoznata vrednost sile D_{bu} i njen tačan položaj. Veličina sile D_{bu} se određuje iz uslova ravnoteže momenata savijanja u odnosu na težište zategnute armature:

$$\Sigma M_{a1} = 0 \;\Rightarrow\; D_{bu1} \times z_{b1} - D_{bu2} \times z_{b2} = M_{au} = M_u + N_u \times (y_{b1} - a_1) \qquad (2)$$

pri čemu su sile D_{bu1}, D_{bu2} određene kao:

$$D_{bu1} = \alpha_{b1} \times B \times x \times f_B = \alpha_{b1} \times s \times B \times h \times f_B \qquad (\ s = x/h\ )$$

$$D_{bu2} = \alpha_{b2} \times (B - b) \times (x - d_p) \times f_B = \alpha_{b2} \times (B - b) \times (s - \delta) \times h \times f_B \qquad (\ \delta = d_p/h\ )$$

a njihov položaj u odnosu na krajnju pritisnutu ivicu preseka, prema skici na str. 7, kao:

$$z_{b1} = h - \eta_1 \times x = h \times (1 - \eta_1 \times s)$$

$$z_{b2} = h - d_p - \eta_2 \times (x - d_p) = h \times [(1 - \delta - \eta_2 \times (s - \delta)]$$

Sve veličine sa leve strane izraza (2) su funkcija isključivo položaja neutralne linije, pa se problem dimenzionisanja proizvoljnog poprečnog preseka zapravo svodi na određivanje njenog položaja iz uslova ravnoteže momenata savijanja. Ako je poznat položaj neutralne linije u poprečnom preseku, tada veličine koje se pojavljuju u izrazu (2) mogu biti određene iz sledećih relacija:

a. dilatacije betona i zategnute armature (uslov loma):

Iz *Bernoulli*-eve hipoteze ravnih preseka sledi da je dijagram dilatacija po visini preseka pravolinijski, odnosno da se položaj neutralne linije određuje iz relacije:

$$s = \frac{x}{h} = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_b + \varepsilon_{a1}}$$

Iz uslova da bar jedna dilatacija mora dostići graničnu vrednost (ε_b=3.5‰, ε_a=10‰) sledi:

$$s \le 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{a1} = 10‰ \quad ; \quad \varepsilon_b = \frac{s}{1-s} \times \varepsilon_{a1}$$

$$s \ge 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_b = 3.5‰ \quad ; \quad \varepsilon_{a1} = \frac{1-s}{s} \times \varepsilon_b$$

Jasno je sa skice u prilogu da se dilatacija na donjoj ivici ploče dobija kao:

$$\varepsilon_{bd} = \frac{x - d_p}{x} \times \varepsilon_b$$

b. koeficijenti $\boldsymbol{\alpha_{bi}}$, $\boldsymbol{\eta_i}$ (računski dijagram betona):

Koeficijenti punoće naponskog dijagrama α_{b1} i α_{b2} su funkcije odgovarajućih dilatacija betona ε_b, odnosno ε_{bd} i mogu se sračunati iz analitičkih izraza:

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_b}{12} \times (6 - \varepsilon_b) \quad \text{za } \varepsilon_b \le 2‰ \quad ; \quad \text{odnosno} \quad \alpha_b = \frac{3 \times \varepsilon_b - 2}{3 \times \varepsilon_b} \quad \text{za } 2‰ \le \varepsilon_b \le 3.5‰$$

Zavisno od veličine dilatacija ε_b, odnosno ε_{bd}, iz odgovarajućeg izraza se sračunava α_{b1} (ε_b), odnosno α_{b2} (ε_{bd}). Naravno, ove vrednosti se mogu, za odgovarajuću (ili najpribližniju) dilataciju, očitati i iz tabela za dimenzionisanje pravougaonih poprečnih preseka.

Veličine z_{b1}, z_{b2} se, prema skici u prilogu, određuju kao:

$$z_{b1} = h - \eta_1 \times x = h \times (1 - \eta_1 \times s)$$

$$z_{b2} = h - d_p - \eta_2 \times (x - d_p) = h \times [(1 - \delta - \eta_2 \times (s - \delta)]$$

pri čemu se vrednosti η_1 (ε_b), odnosno η_2 (ε_{bd}) određuju iz tabela za dimenzionisanje ili iz analitičkih izraza za odgovarajuće dilatacije ε_b, odnosno ε_{bd}:

$$\eta = \frac{8 - \varepsilon_b}{4 \times (6 - \varepsilon_b)} \quad \text{za } \varepsilon_b \le 2‰ \quad ; \quad \text{odnosno} \quad \eta = \frac{\varepsilon_b \times (3 \times \varepsilon_b - 4) + 2}{2 \times \varepsilon_b \times (3 \times \varepsilon_b - 2)} \quad \text{za } 2‰ \le \varepsilon_b \le 3.5‰$$

Uvrštavanjem svih napred navedenih relacija u uslov ravnoteže (2), položaj neutralne linije postaje jednoznačno određen. Međutim, s obzirom na oblik izraza za dilatacije ε_b i ε_{a1} i koeficijente α_b i η, racionalnije je **s** određivati iterativno nego traženjem rešenja u zatvorenom obliku.

Dakle, postupak dimenzionisanja se sastoji u pretpostavljanju položaja neutralne linije, nakon čega se određuju sve ostale veličine: dilatacije ε_b i ε_{a1} i koeficijenti α_b i η. Međutim, kako je položaj neutralne linije nasumice pretpostavljen, uslov ravnoteže momenata savijanja (2) ne mora biti zadovoljen. Mogu nastupiti tri slučaja:

a. uslov ravnoteže (2) je zadovoljen - potpuno neverovatno u prvom koraku

b. u uslovu ravnoteže (2) leva strana je veća od desne - moment rezultante unutrašnjih sila je veći od spoljašnjeg momenta $M_{au} \Rightarrow$ treba pomeriti neutralnu liniju ka pritisnutoj ivici preseka, odnosno smanjiti **s**

c. u uslovu ravnoteže (2) leva strana je manja od desne - moment rezultante unutrašnjih sila je manji od spoljašnjeg momenta $M_{au} \Rightarrow$ treba pomeriti neutralnu liniju ka zategnutoj ivici preseka, odnosno povećati **s**

Postupak se u potpunosti ponavlja dok se ne zadovolji uslov ravnoteže (2), odnosno do postizanja željene tačnosti, npr. max. 1% od vrednosti M_{au}.

Primer 16. Dimenzionisati presek iz Primera 15 tačnim postupkom.

1. korak:

Racionalno je najpre proveriti da li se neutralna linija nalazi u ploči ili rebru, što u daljem može pojednostaviti proračun. Stoga se pretpostavlja $\mathbf{s = d_p/h = 0.196}$. Sledi:

$s < 0.259 \Rightarrow \varepsilon_{a1} = 10‰$, $\varepsilon_b = 0.196/(1-0.196)\times 10 = 2.439‰$

$$\alpha_{b1} = \frac{3\times 2.439 - 2}{3\times 2.439} = 0.727 \quad ; \quad \eta_1 = \frac{2.439\times(3\times 2.439 - 4) + 2}{2\times 2.439\times(3\times 2.439 - 2)} = 0.389$$

$D_{bu1} = 0.727\times 60\times 0.196\times 51\times 2.05 = 893.8$ kN

$z_{b1} = 51\times(1-0.389\times 0.196) = 47.11$ cm

$\varepsilon_{bd} = 0 \;\Rightarrow\; D_{bu2} \equiv 0$

$\Sigma M_{a1} = 893.8\times 47.11\times 10^{-2} = 421.1$ kNm $< M_u = 770$ kNm $\Rightarrow$ **s>0.196**

2. korak: pretpostavljeno **s = 0.40**

$s > 0.259 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰$, $\varepsilon_{a1} = (1-0.40)/0.40\times 3.5 = 5.25‰$

$$\alpha_{b1} = \frac{3\times 3.5 - 2}{3\times 3.5} = 0.810 \quad ; \quad \eta_1 = \frac{3.5\times(3\times 3.5 - 4) + 2}{2\times 3.5\times(3\times 3.5 - 2)} = 0.416$$

$D_{bu1} = 0.810\times 60\times 0.40\times 51\times 2.05 = 2031.3$ kN

$z_{b1} = 51\times(1-0.416\times 0.4) = 42.51$ cm

$\varepsilon_{bd} = (0.40-0.196)/ 0.40\times 3.5 = 1.784‰$

$$\alpha_{b2} = \frac{1.784}{12} \times (6 - 1.784) = 0.627 \;\; ; \;\; \eta_2 = \frac{8 - 1.784}{4 \times (6 - 1.784)} = 0.369$$

$D_{bu2} = 0.627 \times (60\text{-}30) \times (0.40\text{-}0.196) \times 51 \times 2.05 = 400.9$ kN

$z_{b2} = 51 - 10 - 0.369 \times (0.4 \times 51 - 10) = 37.17$ cm

$\Sigma M_{a1} = (2031.3 \times 42.51 - 400.9 \times 37.17) \times 10^{-2} = 714.6 \text{ kNm} < M_u = 770$ kNm

$$\boxed{s > 0.40}$$

<u>3. korak:</u> pretpostavljeno **s = 0.50**

$s > 0.259 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰$, $\varepsilon_{a1} = (1\text{-}0.50)/\ 0.50 \times 3.5 = 3.50‰$

$$\alpha_{b1} = \frac{3 \times 3.5 - 2}{3 \times 3.5} = 0.810 \;\; ; \;\; \eta_1 = \frac{3.5 \times (3 \times 3.5 - 4) + 2}{2 \times 3.5 \times (3 \times 3.5 - 2)} = 0.416$$

$D_{bu1} = 0.810 \times 60 \times 0.50 \times 51 \times 2.05 = 2539.1$ kN

$z_{b1} = 51 \times (1\text{-}0.416 \times 0.5) = 40.39$ cm

$\varepsilon_{bd} = (0.50\text{-}0.196)/\ 0.50 \times 3.5 = 2.127‰$

$$\alpha_{b2} = \frac{3 \times 2.127 - 2}{3 \times 2.127} = 0.687 \;\; ; \;\; \eta_2 = \frac{2.127 \times (3 \times 2.127 - 4) + 2}{2 \times 2.127 \times (3 \times 2.127 - 2)} = 0.379$$

$D_{bu2} = 0.687 \times (60\text{-}30) \times (0.50\text{-}0.196) \times 51 \times 2.05 = 654.4$ kN

$z_{b2} = 51 - 10 - 0.379 \times (0.5 \times 51 - 10) = 35.12$ cm

$\Sigma M_{a1} = (2539.1 \times 40.39 - 654.4 \times 35.12) \times 10^{-2} = 795.7 \text{ kNm} > M_u = 770$ kNm

$$\boxed{0.50 > s > 0.40}$$

<u>4. korak:</u> pretpostavljeno **s = 0.467**

$s > 0.259 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰$, $\varepsilon_{a1} = (1\text{-}0.467)/\ 0.467 \times 3.5 = 3.998‰$; $\alpha_{b1} = 0.810$, $\eta_1 = 0.416$

$D_{bu1} = 0.810 \times 60 \times 0.467 \times 51 \times 2.05 = 2370.5$ kN

$z_{b1} = 51 \times (1\text{-}0.416 \times 0.467) = 41.10$ cm

$\varepsilon_{bd} = (0.467\text{-}0.196)/\ 0.467 \times 3.5 = 2.030‰$

$$\alpha_{b2} = \frac{3 \times 2.03 - 2}{3 \times 2.03} = 0.672 \;\; ; \;\; \eta_2 = \frac{2.03 \times (3 \times 2.03 - 4) + 2}{2 \times 2.03 \times (3 \times 2.03 - 2)} = 0.376$$

$D_{bu2} = 0.672 \times (60\text{-}30) \times (0.467\text{-}0.196) \times 51 \times 2.05 = 570.2$ kN

$z_{b2} = 51 - 10 - 0.376\times(0.467\times51 - 10) = 35.81$ cm

$\Sigma M_{a1} = (2370.5\times41.10 - 570.2\times35.81)\times10^{-2} = 770.0$ kNm $= M_u$

$$\boxed{s = 0.467}$$

$D_{bu} = 2370.5 - 570.2 = 1800.2$ kN

$Z_{bu} = D_{bu} - N_u = 1800.2$ kN

$A_{a1} = 1800.2 / 40.0 = 45.01\text{ cm}^2 < 47.67\text{ cm}^2 = A_{a1,potr.}$ (približni postupak - primer 15)

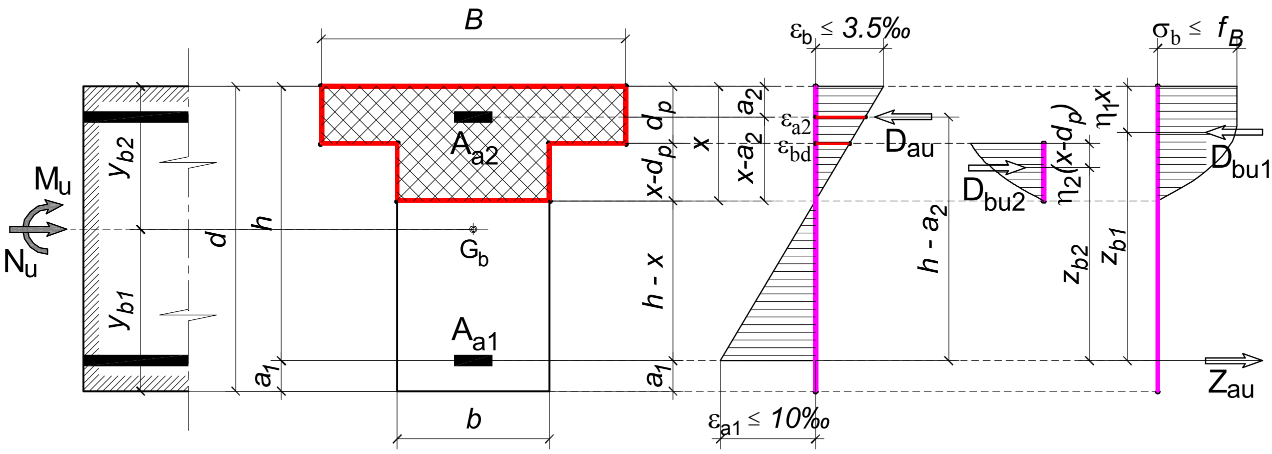
usvojeno: **10RØ25** (49.09 cm^2)

$$a_1 = \frac{4\times(4.5+10)+2\times15.5}{10} = 8.9\text{ cm} \;\Rightarrow\; h_{stv.} = 60 - 8.9 = 51.1\text{ cm} > h_{rač.} = 51\text{ cm}$$

Usvojeni poprečni presek je istovetan kao u Primeru 15.

ODREĐIVANJE MOMENTA LOMA - "T" PRESEK

Na skici dole su prikazane sve potrebne geometrijske veličine, dijagrami dilatacija i napona, spoljašnje i unutrašnje sile i njihovi položaji.



poznato: geometrija preseka (B , b , d , d_p)

kvalitet materijala (MB, Č $\Rightarrow$ f_B, σ_v)

količina i položaj armature u preseku (A_{a1} , A_{a2} , a_1 , a_2)

normalna sila N_u za koju se sračunava M_u

Na raspolaganju imamo dva uslova ravnoteže, iz kojih možemo odrediti dve nepoznate veličine. To su npr. položaj neutralne linije **s** i traženi moment $\mathbf{M_u}$. Postupak će biti prikazan na preseku oblika T, proračunom će biti obuhvaćena ukupna armatura u preseku, a moment loma će biti određen za presek napregnut na složeno savijanje. Iz ovog slučaja se mogu izvesti svi ostali, jednostavniji slučajevi (čisto savijanje, pravougaoni presek, samo zategnuta armatura u preseku obuhvaćena proračunom i sve kombinacije).

ODREĐIVANJE POLOŽAJA NEUTRALNE LINIJE

Korišćenjem oznaka sa prethodne skice, uslov ravnoteže normalnih sila može se napisati u obliku:

$$\Sigma N = 0: \quad D_{bu1} - D_{bu2} + D_{au} - Z_{au} - N_u = 0 \qquad (1)$$

Pritom su unutrašnje sile pritiska u betonu određene izrazima:

$$D_{bu1} = \alpha_{b1} \times B \times x \times f_B = \alpha_{b1} \times s \times B \times h \times f_B \qquad (s = x/h)$$

$$D_{bu2} = \alpha_{b2} \times (B - b) \times (x-d_p) \times f_B = \alpha_{b2} \times (B - b) \times (s - \delta) \times h \times f_B \qquad (\delta = d_p/h)$$

Koeficijenti punoće naponskog dijagrama α_{b1} i α_{b2} su funkcije odgovarajućih dilatacija betona ε_b, odnosno ε_{bd} i mogu se sračunati iz analitičkih izraza:

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_b}{12} \times \left(6 - \varepsilon_b\right) \text{ za } \varepsilon_b \le 2‰ \quad ; \text{ odnosno } \quad \alpha_b = \frac{3\varepsilon_b - 2}{3\varepsilon_b} \text{ za } 2‰ \le \varepsilon_b \le 3.5‰$$

Jasno je sa skice da se dilatacija u nivou donje ivice ploče sračunava kao:

$$\varepsilon_{bd} = \frac{x - d_p}{x} \times \varepsilon_b$$

Zavisno od veličine dilatacija ε_b, odnosno ε_{bd}, uzima se odgovarajući izraz i sračunava α_{b1} (ε_b), odnosno α_{b2} (ε_{bd}). Naravno, ove vrednosti se mogu, za odgovarajuću (ili najpribližniju) dilataciju, očitati i iz tabele za dimenzionisanje pravougaonih poprečnih preseka.

Unutrašnje sile u armaturi su određene izrazima:

$Z_{au} = A_{a1} \times \sigma_{a1}$; pri čemu je $\sigma_{a1} = E_a \times \varepsilon_{a1} \leq \sigma_v$

$D_{au} = A_{a2} \times \sigma_{a2}$; pri čemu je $\sigma_{a2} = E_a \times \varepsilon_{a2} \leq \sigma_v$

Jasno je sa skice da se dilatacija u nivou pritisnute armature sračunava kao:

$$\varepsilon_{a2} = \frac{x - a_2}{x} \times \varepsilon_b$$

Presek je u graničnom stanju ako je bar jedna od dilatacija ε_b, odnosno ε_{a1} dostigla graničnu vrednost. Kako su dilatacija betona ε_b, odnosno dilatacija zategnute armature ε_{a1}, jednoznačno određene za poznat bezdimenzioni koeficijent položaja neutralne linije **s**, izrazima:

$$s \leq 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{a1} = 10‰ \quad ; \quad \varepsilon_b = \frac{s}{1-s} \times \varepsilon_{a1}$$

$$s \geq 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_b = 3.5‰ \quad ; \quad \varepsilon_{a1} = \frac{1-s}{s} \times \varepsilon_b$$

to je izborom veličine **s** kao parametra potpuno određeno stanje unutrašnjih sila u preseku. Naravno, za nasumice izabrano **s** nije zadovoljen uslov ravnoteže **ΣN = 0**, pa se postupak određivanja položaja neutralne linije sprovodi iterativno. Za pretpostavljenu vrednost **s** (ili para dilatacija $\boldsymbol{\varepsilon_b/\varepsilon_{a1}}$, od kojih bar jedna dostiže graničnu vrednost) se sračunaju sve unutrašnje sile i proveri uslov ravnoteže **ΣN = 0**. Tom prilikom mogu nastupiti tri slučaja:

a. uslov ravnoteže (1) je zadovoljen - potpuno neverovatno u prvom koraku

b. uslov ravnoteže (1) umesto nule daje pozitivan rezultat (za oblik u kome je napisan) - rezultanta unutrašnjih sila je veća od spoljašnje sile pritiska ⇒ treba pomeriti neutralnu liniju ka pritisnutoj ivici preseka, odnosno smanjiti **s**

c. uslov ravnoteže (1) umesto nule daje negativan rezultat (za oblik u kome je napisan) - rezultanta unutrašnjih sila je manja od spoljašnje sile pritiska ⇒ treba pomeriti neutralnu liniju ka zategnutoj ivici preseka, odnosno povećati **s**

Postupak se u potpunosti ponavlja dok se ne zadovolji uslov ravnoteže (1), odnosno do postizanja željene tačnosti, npr. max. 1% od veće od sila D_{bu1}, Z_{au}.

ODREĐIVANJE TRAŽENOG MOMENTA LOMA

Tek kada se odredi položaj neutralne linije (stanje dilatacija u preseku) iz uslova ravnoteže (1), određuje se položaj unutrašnjih sila D_{bu1}, D_{bu2} u odnosu na težište zategnute armature. Veličine z_{b1}, z_{b2} se, prema skici, određuju kao:

$$z_{b1} = h - \eta_1 \times x = h \times (1 - \eta_1 \times s)$$

$$z_{b2} = h - d_p - \eta_2 \times (x - d_p) = h \times [(1 - \delta - \eta_2 \times (s - \delta)]$$

pri čemu se vrednosti η_1 (ε_b), odnosno η_2 (ε_{bd}) određuju iz tabela za dimenzionisanje ili iz analitičkih izraza za odgovarajuće dilatacije ε_b, odnosno ε_{bd} iz poslednje iteracije:

$$\eta = \frac{8-\varepsilon_b}{4\times(6-\varepsilon_b)} \quad \text{za } \varepsilon_b \le 2‰ \quad ; \quad \text{odnosno} \quad \eta = \frac{\varepsilon_b \times (3\varepsilon_b - 4) + 2}{2\varepsilon_b \times (3\varepsilon_b - 2)} \quad \text{za } 2‰ \le \varepsilon_b \le 3.5‰$$

Moment loma preseka $\mathbf{M_u}$ se određuje iz uslova ravnoteže momenata u odnosu na težište zategnute armature u preseku:

$$\Sigma M_{a1} = 0: \quad D_{bu1} \times z_{b1} - D_{bu2} \times z_{b2} + D_{au} \times (h - a_2) = M_{au} = M_u + N_u \times y_{a1}$$

u kome su sve veličine poznate. Napominje se da je traženi rezultat veličina $\mathbf{M_u}$, a ne $\mathbf{M_{au}}$.

Takođe se skreće pažnja da navedeni izrazi važe i za preseke kod kojih je **B<b**, pri čemu je **B** uvek širina na krajnjoj pritisnutoj ivici preseka. Za slučaj ekscentričnog zatezanja, normalna sila N_u se unosi sa **negativnim** znakom. Za slučaj da se proračunom obuhvata samo zategnuta armatura u preseku, potrebno je u izraze uvrstiti $\mathbf{A_{a2} = 0}$. Iz prezentiranih izraza se može sračunati i moment loma za pravougaoni poprečni presek, za **B=b**.

Primer 17. Odrediti moment loma za presek prikazan na skici, opterećen na čisto savijanje. Podaci za proračun:

MB 40 $\Rightarrow f_B = 2.55$ kN/cm^2

RA 400/500 $\Rightarrow \sigma_v = 40$ kN/cm^2

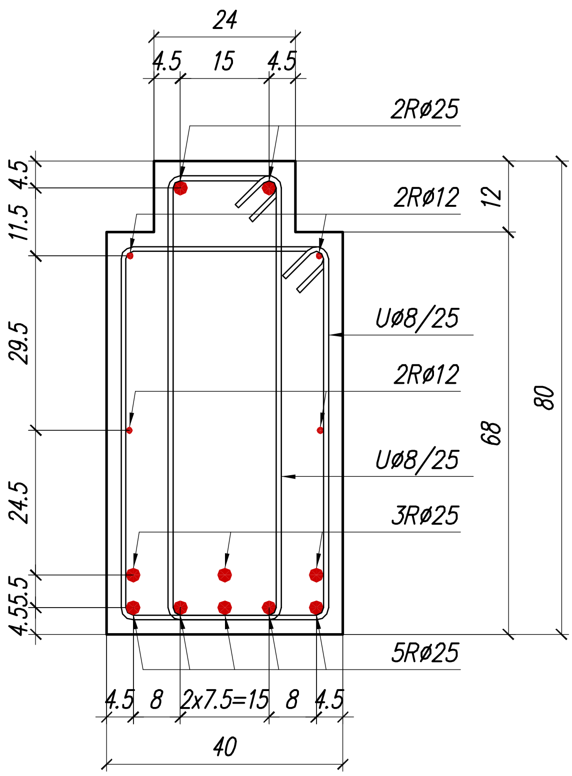
$A_{a1} = 39.27$ cm^2 (**8RØ25**)

$$a_1 = \frac{5\times4.5+3\times10}{8} = 6.56 \text{ cm}$$

$$h = 80 - 6.56 = 73.44 \text{ cm}$$

$A_{a2} = 9.82$ cm^2 (**2RØ25**)

$a_2 = 4.5$ cm



$$\alpha_2 = \frac{a_2}{h} = \frac{4.5}{73.44} = 0.061$$

$$\delta = \frac{d_p}{h} = \frac{12}{73.44} = 0.163$$

U prvom koraku najracionalnije je pretpostaviti da se neutralna linija nalazi na donjoj ivici ploče, kada je pritisnuta zona betona pravougaonog oblika. Sledi:

$$s = 0.163 < 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{a1} = 10‰ \quad ; \quad \varepsilon_b = \frac{0.163}{1-0.163} \times 10 = 1.953‰$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{0.163 - 0.061}{0.163} \times 1.953 = 1.221‰ < \varepsilon_v = \frac{400}{210 \times 10^3} = 1.905‰$$

$$\sigma_{a2} = 1.221 \times 10^{-3} \times 210 \times 10^3 = 256.4 \text{ MPa} = 25.64 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{a1} = 10‰ > \varepsilon_v \quad \Rightarrow \quad \sigma_{a1} = \sigma_v = 400 \text{ MPa} = 40 \text{ kN/cm}^2$$

Vrednost koeficijenta punoće naponskog dijagrama betona α_{b1} očitava se iz tabela za dimenzionisanje pravougaonih preseka ili sračunava iz analitičkog izraza:

$$\alpha_{b1} = \frac{1.953}{12} \times (6 - 1.953) = 0.659 \quad ; \quad \alpha_{b2} = 0$$

Uvrštavanjem sračunatih vrednosti u izraze za unutrašnje sile sledi:

$$D_{bu1} = 0.659 \times 0.163 \times 24 \times 73.44 \times 2.55 = 483.7 \text{ kN}$$

$$D_{bu2} = \qquad = 0.0 \text{ kN}$$

$$D_{au} = 9.82 \times 25.64 = 251.7 \text{ kN}$$

$$Z_{au} = 39.27 \times 40 = 1570.8 \text{ kN}$$

Konačno, proverava se uslov ravnoteže normalnih sila:

$$\Sigma N = 0: \quad D_{bu1} - D_{bu2} + D_{au} - Z_{au} - N_u = 0$$

$$\Sigma N = 0: \quad 483.7 - 0 + 251.7 - 1570.8 - 0 = -835.4 < 0$$

$$\boxed{s > 0.163}$$

S obzirom da uslov ravnoteže nije zadovoljen, potrebno je korigovati proračun. Kako ukupna unutrašnja sila zatezanja premašuje silu pritiska, potrebno je neutralnu liniju pomeriti ka zategnutoj ivici preseka, tako da će pritisnuta površina betona postati oblika "**T**".

S obzirom da je u prvom koraku došlo do relativno velikog odstupanja u uslovu ravnoteže normalnih sila, u drugom koraku se pretpostavlja znatno veća vrednost bezdimenzionog koeficijenta položaja neutralne linije **s** i čitav napred izloženi postupak u potpunosti ponavlja.

2. korak: $s = 0.4 > 0.259 = 7/27 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰ \;;\; \varepsilon_{a1} = \dfrac{1-0.4}{0.4}\times 3.5 = 5.25‰$

$$\varepsilon_b = 3.5‰ \Rightarrow \alpha_{b1} = \frac{3\times 3.5-2}{3\times 3.5} = 0.810$$

$$\varepsilon_{a1} = 5.25‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a1} = \sigma_v = 400\text{ MPa} = 40\text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{0.4-0.061}{0.4}\times 3.5 = 2.964‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a2} = \sigma_v = 400\text{ MPa} = 40\text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{bd} = \frac{0.4-0.163}{0.4}\times 3.5 = 2.070‰ \Rightarrow \alpha_{b2} = \frac{3\times 2.07-2}{3\times 2.07} = 0.678$$

$$D_{bu1} = 0.810\times 0.4\times 24\times 73.44\times 2.55 = 1455.3\text{ kN}$$

$$D_{bu2} = 0.678\times(24-40)\times(0.4-0.163)\times 73.44\times 2.55 = -480.6\text{ kN}$$

$$D_{au} = 9.82\times 40 = 392.7\text{ kN}$$

$$Z_{au} = 39.27\times 40 = 1570.8\text{ kN}$$

$$\Sigma N = 0: \quad 1455.3-(-480.6)+392.7-1570.8-0 = 757.8 > 0 \Rightarrow \mathbf{s < 0.40}$$

S obzirom da uslov ravnoteže nije zadovoljen, potrebno je izvršiti novu korekciju. Kako ukupna unutrašnja sila pritiska sada premašuje silu zatezanja, sledi:

$$\boxed{0.4 > s > 0.163}$$

3. korak: $s = 0.27 > 0.259 = 7/27 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰ \;;\; \varepsilon_{a1} = \dfrac{1-0.27}{0.27}\times 3.5 = 9.46‰$

$$\varepsilon_b = 3.5‰ \Rightarrow \alpha_{b1} = \frac{3\times 3.5-2}{3\times 3.5} = 0.810$$

$$\varepsilon_{a1} = 9.46‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a1} = \sigma_v = 400\text{ MPa} = 40\text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{0.27-0.061}{0.27}\times 3.5 = 2.706‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a2} = \sigma_v = 400\text{ MPa} = 40\text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{bd} = \frac{0.27-0.163}{0.27}\times 3.5 = 1.382‰ \Rightarrow \alpha_{b2} = \frac{1.382}{12}\times(6-1.382) = 0.532$$

$$D_{bu1} = 0.810\times 0.27\times 24\times 73.44\times 2.55 = 982.3\text{ kN}$$

$$D_{bu2} = 0.532\times(24-40)\times(0.27-0.163)\times 73.44\times 2.55 = -169.8\text{ kN}$$

$$D_{au} = 9.82\times 40 = 392.7\text{ kN}$$

$$Z_{au} = 39.27\times 40 = 1570.8\text{ kN}$$

$\Sigma N = 0$: $982.3 - (-169.8) + 392.7 - 1570.8 - 0 = -25.9 < 0 \Rightarrow$ **s > 0.27**

$$\boxed{0.4 > s > 0.27}$$

4. korak: $s = 0.274 > 0.259 = 7/27 \Rightarrow \varepsilon_b = 3.5‰$; $\varepsilon_{a1} = \dfrac{1-0.274}{0.274} \times 3.5 = 9.256‰$

$$\varepsilon_b = 3.5‰ \Rightarrow \alpha_{b1} = \frac{3 \times 3.5 - 2}{3 \times 3.5} = 0.810$$

$$\varepsilon_{a1} = 9.256‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a1} = \sigma_v = 400 \text{ MPa} = 40 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{0.274-0.061}{0.274} \times 3.5 = 2.718‰ > \varepsilon_v \Rightarrow \sigma_{a2} = \sigma_v = 400 \text{ MPa} = 40 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{bd} = \frac{0.274-0.163}{0.274} \times 3.5 = 1.416‰ \Rightarrow \alpha_{b2} = \frac{1.416}{12} \times (6-1.416) = 0.541$$

$$D_{bu1} = 0.810 \times 0.274 \times 24 \times 73.44 \times 2.55 = 998.3 \text{ kN}$$

$$D_{bu2} = 0.541 \times (24-40) \times (0.274-0.163) \times 73.44 \times 2.55 = -179.8 \text{ kN}$$

$$D_{au} = 9.82 \times 40 = 392.7 \text{ kN}$$

$$Z_{au} = 39.27 \times 40 = 1570.8 \text{ kN}$$

$\Sigma N = 0$: $998.3 - (-179.8) + 392.7 - 1570.8 - 0 = 0 \Rightarrow$ **s = 0.274**

Zadovoljenjem uslova ravnoteže normalnih sila određen je položaj neutralne linije u preseku i veličina unutrašnjih sila. Da bi se mogao ispisati uslov ravnoteže momenata savijanja, potrebno je iz izraza odrediti i položaj sila D_{bu1}, D_{bu2}, odnosno veličinu kraka unutrašnjih sila z_{b1}, z_{b2}:

$$\varepsilon_b = 3.5‰ \Rightarrow \eta_1 = \frac{3.5 \times (3 \times 3.5 - 4) + 2}{2 \times 3.5 \times (3 \times 3.5 - 2)} = 0.416$$

$$z_{b1} = h - \eta_1 \times x = 73.44 \times (1 - 0.416 \times 0.274) = 65.06 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{bd} = 1.416‰ \Rightarrow \eta_2 = \frac{8-1.416}{4 \times (6-1.416)} = 0.359$$

$$z_{b2} = 73.44 \times [(1 - 0.163 - 0.359 \times (0.274 - 0.163)] = 58.51 \text{ cm}$$

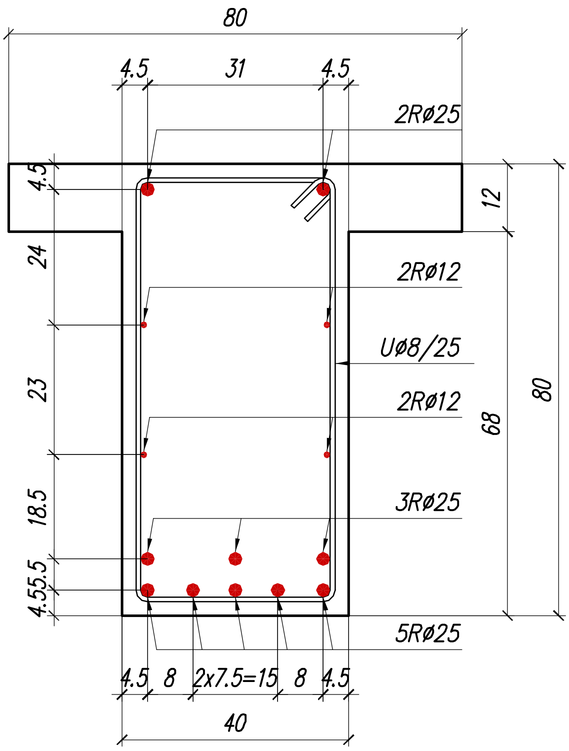
Tražena vrednost momenta loma dobija se iz sume momenata oko težišta zategnute armature:

$$M_{au} = 998.3 \times 65.06 - (-179.8) \times 58.51 + 392.7 \times (73.44 - 4.5) = 102540 \text{ kNcm}$$

$$\boxed{M_u = 1025.4 \text{ kNm}}$$ [5]

[5] Uporediti sa nosivošću preseka iz Primera 10 (pravougani presek armiran istom armaturom, čisto savijanje)

Primer 18. Odrediti moment loma za presek prikazan na skici, ukoliko je, pored momenta savijanja, opterećen i graničnom računskom silom pritiska N_u = 800 kN. Podaci za proračun:



MB 40 $\Rightarrow f_B = 2.55\ \text{kN/cm}^2$

RA 400/500 $\Rightarrow \sigma_v = 40\ \text{kN/cm}^2$

$A_{a1} = 39.27\ \text{cm}^2$ (**8RØ25**)

$$a_1 = \frac{5\times 4.5 + 3\times 10}{8} = 6.56\ \text{cm}$$

$$h = 80 - 6.56 = 73.44\ \text{cm}$$

$A_{a2} = 9.82\ \text{cm}^2$ (**2RØ25**)

$a_2 = 4.5$ cm

U prvom koraku se pretpostavlja da se neutralna linija nalazi na donjoj ivici ploče. Sledi:

$$s = 0.163 < 0.259 = 7/27 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{a1} = 10‰ \quad ; \quad \varepsilon_b = \frac{0.163}{1-0.163}\times 10 = 1.953‰$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{0.163-0.061}{0.163}\times 1.953 = 1.221‰ < \varepsilon_v = \frac{400}{210\times 10^3} = 1.905‰$$

$$\sigma_{a2} = 1.221\times 10^{-3}\times 210\times 10^3 = 256.4\ \text{MPa} = 25.64\ \text{kN/cm}^2$$

$$\varepsilon_{a1} = 10‰ > \varepsilon_v \quad \Rightarrow \quad \sigma_{a1} = \sigma_v = 400\ \text{MPa} = 40\ \text{kN/cm}^2$$

$$\alpha_{b1} = \frac{1.953}{12}\times(6-1.953) = 0.659 \quad ; \quad \alpha_{b2} = 0$$

Uvrštavanjem sračunatih vrednosti u izraze za unutrašnje sile sledi:

$$D_{bu1} = 0.659\times 0.163\times 80\times 73.44\times 2.55 = 1612.5\ \text{kN}$$

$$D_{bu2} = \quad = 0.0\ \text{kN}$$

$$D_{au} = 9.82\times 25.64 = 251.7\ \text{kN}$$

$$Z_{au} = 39.27\times 40 = 1570.8\ \text{kN}$$

Konačno, proverava se uslov ravnoteže normalnih sila:

$$\Sigma N = 0: \quad 1612.5 - 0 + 251.7 - 1570.8 - 800 = -506.7 < 0$$

$$\boxed{s > 0.163}$$

Postupak se ponavlja variranjem *s* do zadovoljenja uslova ravnoteže normalnih sila. Rezultati proračuna prikazani su tabelarno.

s	ε_{b1}	ε_{a1}	ε_{a2}	σ_{a2}	D_{au}	α_{b1}	D_{bu1}	ε_{bd}	α_{b2}	D_{bu2}	σ_{a1}	Z_{au}	ΣN_u
(-)	(‰)	(‰)	(‰)	(MPa)	(kN)	(-)	(kN)	(‰)	(-)	(kN)	(MPa)	(kN)	(kN)
0.200	2.500	10	1.734	364.1	357.5	0.733	2197.3	0.457	0.211	57.9	400	1570.8	126
0.190	2.346	10	1.589	333.7	327.6	0.716	2037.5	0.328	0.155	30.9	400	1570.8	-36.6
0.195	2.422	10	1.661	348.8	342.5	0.725	2117.4	0.392	0.183	43.4	400	1570.8	45.6
0.192	**2.379**	**10**	**1.621**	**340.4**	**334.2**	**0.720**	**2072.8**	**0.357**	**0.168**	**36.2**	**400**	**1570.8**	**0.0**

Zadovoljenjem uslova ravnoteže normalnih sila određen je položaj neutralne linije u preseku i veličina unutrašnjih sila. Da bi se mogao ispisati uslov ravnoteže momenata savijanja, potrebno je iz izraza odrediti i položaj sila D_{bu1}, D_{bu2}, odnosno veličinu kraka unutrašnjih sila z_{b1}, z_{b2}:

$$\varepsilon_b = 2.379‰ \;\Rightarrow\; \eta_1 = \frac{2.379\times(3\times2.379-4)+2}{2\times2.379\times(3\times2.379-2)} = 0.387$$

$$z_{b1} = h - \eta_1 \times x = 73.44 \times (1 - 0.387\times0.192) = 67.97 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{bd} = 0.357‰ \;\Rightarrow\; \eta_2 = \frac{8-0.357}{4\times(6-0.357)} = 0.339$$

$$z_{b2} = 73.44 \times [(1 - 0.163 - 0.339 \times (0.192 - 0.163)] = 60.72 \text{ cm}$$

Tražena vrednost momenta loma dobija se iz sume momenata oko težišta zategnute armature:

$$M_{au} = 2072.8\times67.97 - 36.2\times60.72 + 334.2\times(73.44 - 4.5) = 161733 \text{ kNcm}$$

$$M_u = M_{au} - N_u \times\left(\frac{d}{2} - a_1\right) = 161733 - 800\times\left(\frac{80}{2} - 6.07\right) = 134980 \text{ kNcm}$$

$$\boxed{M_u = 1349.8 \text{ kNm pri } N_u = 800 \text{ kN}}$$ [6]

Zanemarenjem nosivosti pritisnute armature u preseku, dobija se:

s	ε_{b1}	ε_{a1}	α_{b1}	D_{bu1}	ε_{bd}	α_{b2}	D_{bu2}	σ_{a1}	Z_{au}	ΣN_u
(-)	(‰)	(‰)	(-)	(kN)	(‰)	(-)	(kN)	(MPa)	(kN)	(kN)
0.219	**2.805**	**10**	**0.762**	**2501.7**	**0.713**	**0.314**	**130.9**	**400**	**1570.8**	**0.00**

$\eta_1 = 0.400 \;\Rightarrow\; z_{b1} = 67.01$ cm ; $\eta_1 = 0.345 \;\Rightarrow\; z_{b1} = 60.03$ cm

$$\boxed{M_u = 1330.3 \text{ kNm pri } N_u = 800 \text{ kN}}$$ [7]

[6] Uporediti sa nosivošću preseka iz Primera 11b (pravougaoni presek armiran istom armaturom, N_u = 800 kN)

[7] Uporediti sa nosivošću preseka iz Primera 11a (pravougaoni presek armiran istom armaturom, N_u = 800 kN). Potpuno očekivano, doprinos pritisnute armature kod **T** preseka je manji nego kod odgovarajućeg pravougaonog, i iznosi 1.47% umesto 5.72% (Primer 11).