

# Usporedni proračun armiranobetonske ploče prema graničnoj nosivosti (GSN) i uporabljivosti (GSU)

---

Žerjavić, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:388885>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

*Završni rad br. 227/GR/2016*

**USPOREDNI PRORAČUN ARMIRANOBETONSKE  
PLOČE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI  
(GSN) I UPORABLJIVOSTI (GSU)**

**Valentina Žerjavić, 0428/336**

Varaždin, prosinac 2016. godine





**Sveučilište  
Sjever**

**Odjel za graditeljstvo**

**Završni rad br. 277/GR/2016**

**USPOREDNI PRORAČUN ARMIRANOBETONSKE  
PLOČE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI  
(GSN) I UPORABLJIVOSTI (GSU)**

**Student**

Valentina Žerjavić, 0428/336

**Mentor**

Dr. sc. Matija Orešković, dipl. ing. građ.

Varaždin, prosinac 2016. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Valentina Žerjavić	MATIČNI BROJ	0428/336
DATUM	14.12.2016.	KOLEGIJ	Betonske konstrukcije 2
NASLOV RADA	USPOREDNI PRORAČUN ARMIRANOBETONSKE PLOČE PREMA GRANIČNOM NOSIVOSTI (GSN) I UPORABLJIVOSTI (GSU)		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Comparative calculation of reinforced concrete slab according to Ultimate limit state (ULS) and Serviceability limit state (SLS)		
MENTOR	Dr.sc. Matija Orešković, dipl.ing.građ.	ZVANJE	Viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	<ol style="list-style-type: none"><li>1. mr.sc. Ivan Špišić, predavač</li><li>2. Dr.sc. Matija Orešković, viši predavač</li><li>3. Aleksej Aniskin, viši predavač</li><li>4. Velimir Pavlic, predavač</li><li>5. Željko Kos, predavač</li></ol>		

## Zadatak završnog rada

BROJ	277/GR/2016
OPIS	<p>U okviru ispunjavanja temeljnih zahtjeva za građevinu a sukladno eurokodu i zakonskoj regulativi tehnička svojstva betonskih konstrukcija moraju biti takva da tijekom trajanja građevine ona podnese sve utjecaje uobičajene uporabe i utjecaje okoliša a da ne dođe do rušenja građevine te nedopuštenih deformacija i oštećenja građevine. Prema tome za betonske konstrukcije tijekom njihove izgradnje i uporabe vrijede bitni zahtjevi koje one moraju zadovoljiti, a to su: sigurnost, uporabljivost i trajnost.</p> <p>U ovom radu potrebno je opisati proračune i teorije graničnih stanja (nosivosti i uporabivosti) te usporednim proračunom ab ploče komentirati dobivene rezultate i njihovu primjenu.</p> <p>Rad se sastoji od:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. UVOD</li><li>2. GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI</li><li>3. GRANIČNO STANJE UPORABLJIVOSTI</li><li>4. PRORAČUN AB PLOČE</li><li>5. ZAKLJUČAK</li><li>6. LITERATURA</li></ol>

ZADATAK URUČEN

27.12.2016



*Matija Orešković*

## **Sažetak**

U teorijskom dijelu rada detaljno su opisane metode graničnog stanja nosivosti (GSN) i graničnog stanja uporabljivosti (GSU), a zatim je prema opisanim metodama proveden proračun armiranobetonske ploče. Metodom graničnog stanja nosivosti proveden je statički proračun i dimenzioniranje ab ploče s obzirom na zadana opterećenja, te je metodom graničnog stanja uporabljivosti dokazano da zadana ab ploča zadovoljava sve kriterije proračuna na uporabljivost (naprezanja, pukotine i progibi).

**Ključne riječi:** granična stanja, ab ploča, nosivost, uporabljivost, naprezanja, pukotine, progibi.

## **Abstract**

Theoretical part of this paper describes the ultimate limit states (ULS) method and the serviceability limit states (SLS) method. Then the calculation of the reinforced concrete slab was performed using these two limit states methods. Using the ULS method statical analysis and the dimensioning of the rc slab were calculated according to the predetermined loads. Using the SLS method was showed that the rc slab met all criteria of the serviceability calculation (stress limitation, crack control and deflection control).

**Key words:** limit states, rc slab, load, serviceability, stress, cracks, deflection.

## Popis korištenih kratica

<b>GSN</b>	Granično stanje nosivosti
<b>GSU</b>	Granično stanje uporabljivosti
<b>ab ploča</b>	armiranobetonska ploča

### Simboli:

$A_s$	površina vlačne armature
$A_{s1min}$	površina minimalne armature
$A_{c,eff}$	djelotvorna vlačna površina betona
$A_{ct}$	vlačna površina neposredno prije pojave pukotina
$c$	debljina zaštitnog sloja armature
$C_d$	granična računaska vrijednost bitnog kriterija uporabljivosti
$d$	udaljenost vlačne armature od tlačnog ruba
$d_1$	udaljenost težišta armature od vlačnog ruba presjeka
$E_d$	računska vrijednost djelovanja
$E_r$	reprezentativne vrijednosti djelovanja
$E_s$	modul elastičnosti čelika
$E_{ceff}$	efektivni model elastičnosti betona
$E_{cm}$	sekantni modul elastičnosti
$F_c$	računska tlačna sila u betonu
$f_{cd}$	računska čvrstoća betona
$f_{ck}$	karakteristična čvrstoća betona
$f_{ck,cub}$	karakteristična čvrstoća betona (kocke)
$f_{ct,eff}$	vlačna čvrstoća betona pri pojavi prve pukotine
$f_{ct,m}$	srednja vlačna čvrstoća betona
$f_d$	računska vrijednost čvrstoće materijala
$f_k$	karakteristična vrijednost čvrstoće materijala
$F_{s1}$	računska vlačna sila u armaturi
$f_{yd}$	računska granica popuštanja čelika
$f_{yk}$	karakteristična granica popuštanja čelika
$g$	stalno opterećenje
$h$	debljina ploče
$h_o$	srednji polumjer presjeka
$h_{cr}$	visina tlačne zone neposredno prije pojave prvih pukotina
$I$	moment tromosti
$K$	koeficijent strukture elementa
$k$	koeficijent umanjenja kojim se uzima u obzir nelinearna raspodjela vlačnog naprezanja po presjeku
$k_a$	položaj tlačne sile u odnosu na tlačni rub
$k_c$	koeficijent umanjenja koji uzima u obzir nelinearnu raspodjelu naprezanja po visini presjeka pri pojavi prve pukotine
$k_t$	koeficijent trajanja opterećenja
$k_1$	koeficijent prionjivosti
$k_2$	koeficijent raspodjele deformacija
$L$	raspon elementa
$M_{cr}$	moment prve pukotine
$M_{Ed}$	računska vrijednost djelovanja momenta savijanja
$M_{max,Ed}$	računski maksimalni moment savijanja
$M_{Rd}$	računska vrijednost nosivosti na momente savijanja



$N_{Ed}$	računska vrijednost djelovanja na uzdužne sile
$N_{Rd}$	računska vrijednost nosivosti na uzdužne sile
$q$	promjenjivo opterećenje
$1/r$	konačna zakrivljenost
$1/r_{cs,m}$	srednja zakrivljenost zbog skupljanja
$R_d$	računska vrijednost nosivosti
$1/r_m$	srednja zakrivljenost zbog momenta savijanja
$1/r_{tot}$	totalna zakrivljenost
$S$	statički moment ploštine armature
$S_{r,max}$	maksimalni razmak pukotina
$u$	poluopseg poprečnog presjeka betonskog elementa
$V_{Ed}$	računska vrijednost djelovanja poprečne sile
$V_{Rd}$	računska vrijednost nosivosti na poprečne sile
$W_g$	granična širina pukotina
$W_k$	karakteristična širina pukotina
$x$	udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba
$y_g$	udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba
$z$	krak unutrašnjih sila
$\alpha_e$	omjer modula elastičnosti čelika i betona
$\alpha_v$	koeficijent punoće za dijagram tlačnih naprezanja
$\beta$	koeficijent trajanja opterećenja
$\gamma_c$	koeficijent sigurnosti za beton
$\gamma_F$	parcijalni koeficijent sigurnosti za djelovanja
$\gamma_G$	koeficijent sigurnosti za stalno opterećenje
$\gamma_M$	parcijalni koeficijent sigurnosti za otpornost materijala
$\gamma_Q$	koeficijent sigurnosti za promjenjivo opterećenje
$\gamma_s$	koeficijent sigurnosti za čelik
$\epsilon_{c2}$	deformacija tlačnog ruba
$\epsilon_{s1}$	deformacija u vlačnoj armaturi
$\epsilon_{sm}$	srednja relativna deformacija armature
$\epsilon_{cs}$	relativna deformacija od skupljanja betona
$\zeta$	koeficijent kraka unutarnjih sila
$\zeta$	koeficijent raspodjele zakrivljenosti
$\mu_{Ed}$	bezdimenzionalni moment savijanja
$v_{lim}$	granični progib
$v_{tot}$	maksimalni progib od kratkotrajnog i dugotrajnog djelovanja
$\xi$	koeficijent položaja neutralne osi
$\rho$	koeficijent armiranja vlačne armature
$\rho_r$	djelotvorni koeficijent armiranja
$\rho_0$	referentni koeficijent armiranja
$\sigma_c$	naprezanje u betonu
$\sigma_p$	naprezanje u čeliku za prednapinjanje
$\sigma_s$	naprezanje u čeliku
$\sigma_{sr}$	naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine
$\phi$	promjer šipki armature
$\phi_s$	maksimalni promjer šipki armature
$\phi_s^*$	maksimalni promjer armature prema tablici
$\varphi(t, t_0)$	koeficijent pužanja betona
$\psi$	koeficijent kombinacije
$\psi_2$	koeficijent kvazistalnog djelovanja

# Sadržaj

1.	Uvod.....	5
2.	Granično stanje nosivosti .....	7
2.1.	Analiza opterećenja .....	8
2.2.	Statički proračun .....	8
2.3.	Dimenzioniranje elemenata naprezanih savijanjem .....	9
3.	Granično stanje uporabljivosti .....	13
3.1.	Granično stanje naprezanja .....	14
3.2.	Granično stanje pukotina.....	14
3.3.	Granično stanje deformacija.....	19
4.	Proračun AB ploče .....	22
4.1.	Proračun prema graničnom stanju nosivosti .....	22
4.1.1.	Analiza opterećenja .....	22
4.1.2.	Statički proračun.....	22
4.1.3.	Dimenzioniranje .....	23
4.2.	Proračun prema graničnom stanju uporabljivosti.....	26
4.2.1.	Geometrijske karakteristike .....	26
4.2.2.	Proračun prema graničnom stanju naprezanja.....	30
4.2.3.	Proračun pukotina.....	37
4.2.4.	Proračun progiba.....	43
5.	Zaključak.....	51
6.	Literatura.....	53

# 1. Uvod

U okviru ispunjavanja temeljnih zahtjeva za građevinu a sukladno eurokodu i zakonskoj regulativi (Zakon o gradnji NN 135/13 i Tehnički propisi za betonske konstrukcije NN139/09) tehnička svojstva betonskih konstrukcija moraju biti takva da tijekom trajanja građevine ona podnese sve utjecaje uobičajene uporabe i utjecaje okoliša a da ne dođe do rušenja građevine te nedopuštenih deformacija i oštećenja građevine. Prema tome za betonske konstrukcije tijekom njihove izgradnje i uporabe vrijede **bitni zahtjevi** koje one moraju zadovoljiti, a to su: sigurnost, uporabljivost i trajnost.[1][2]

Svrha proračuna prema **metodi graničnih stanja** jest projektom dokazati da će konstrukcija zadovoljiti sve bitne zahtjeve u slučaju dosezanja mogućih graničnih stanja odnosno graničnih slučajeva s obzirom na učinke djelovanja na konstrukciju i otpornost konstrukcije.

Opći oblik jednadžbe graničnih stanja:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

- $E_d$  je računski vrijednost rezne sile od vanjskog djelovanja ili kombinacije djelovanja (sila, moment, napreznje)
- $R_d$  je računski vrijednost otpornosti presjeka za identičnu rezu silu

Prema tome **uvjet nosivosti presjeka je zadovoljen ako je računski vrijednost rezne sile manja ili jednaka od računski vrijednosti nosivosti presjeka na te rezne sile**. Računski vrijednosti reznih sila mogu biti sve statičke veličine (normalna i poprečna sila i momenti) izazvane vanjskim djelovanjem (koncentrirana sila i kontinuirano opterećenje, skupljanje i puzanje betona i sl.), odnosno koje pružaju otpor tom vanjskom djelovanju.

Određivanje statičkih veličina za presjeke (rezne sile) provodi se na idealiziranoj shemi konstrukcije za najnepovoljnije (destabilizirajuće) kombinacije opterećenja.[3]

Također je važno spomenuti parcijalne koeficijente sigurnosti (Prilog 1.). Parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanja ( $\gamma_F$ ) množe se sa reprezentativnim vrijednostima djelovanja ( $E_r$ ) i time se dobivaju računski vrijednosti djelovanja ( $E_d$ ), dok se karakteristične vrijednosti otpornosti (čvrstoće) materijala ( $f_k$ ) dijele sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti za otpornost materijala ( $\gamma_M$ ) i dobivaju se računski vrijednosti otpornosti (čvrstoće) materijala ( $f_d$ ). Računski vrijednosti djelovanja i otpornosti materijala ( $E_d$  i  $f_d$ ) koriste se u daljnjem proračunu kod dimenzioniranja. Na taj se način u obzir uzimaju eventualne nepravilnosti i netočnosti karakteristične čvrstoće materijala dobivene u laboratoriju i odstupanja djelovanja od njegove reprezentativne vrijednosti te se time staje na stranu sigurnosti konstrukcije.

- Računski vrijednost djelovanja:  $E_d = \gamma_F \cdot E_r \quad (2)$

- Računski vrijednost otpornosti:  $f_d = \gamma_M \cdot f_r \quad (3)$

**S obzirom na karakter moguće štete koja nastaje njihovim prekoračenjem razlikuju se dvije grupe graničnih stanja:**

- **granična stanja nosivosti (GSN) i**
- **granična stanja uporabljivosti (GSU).**

Metodama graničnih stanja provodi se provjera nosivosti i uporabljivosti konstrukcije, međutim u većini slučajeva provodi se samo proračun za dokaz nosivosti, dok se uporabljivost osigurava kroz iskustvo u provođenju projekta i načelno ne ugrožava stabilnost konstrukcije.

## 2. Granično stanje nosivosti

Granična stanja nosivosti su stanja čijim prekoračenjem dolazi do gubitka ravnoteže konstrukcije kao cjeline (klizanje, prevrtanje, izvijanje, savijanje) ili prekoračenja otpornosti jednog ili više kritičnih područja konstrukcije čime dolazi do sloma ili prekomjerne deformacije kritičnog presjeka.[4]

Metodom graničnih stanja nosivosti promatra se gubitak nosivosti i stanje deformacija i naprezanja neposredno pred **slom** presjeka.[3]

Slom presjeka savijanjem nastaje zbog:

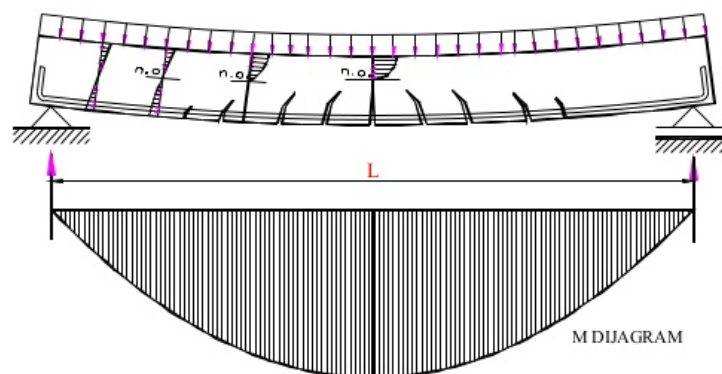
- Zamora vlačne armature,
- Zamora betona na tlak,
- Istodobnog zamora vlačne armature i tlačnog betona.[3]

Beton ima puno manju vlačnu nego tlačnu čvrstoću i nema svojstvo duktilnosti (sposobnost za velike deformacije pri naprezanjima bliskima slomu), dok armatura ima puno veću vlačnu čvrstoću u odnosu na beton.

Do sloma zbog zamora vlačne armature dolazi ako količina vlačne armature nije dovoljna da preuzme vlačna naprezanja i slom nastupa iznenada na donjem rubu u najopterećenijem presjeku pri čemu dolazi do drobljena betona[3]. Zbog toga je važno armirati minimalnom armaturom.

Ukoliko slom nastaje zbog zamora betona uz veliki postotak armiranja naprezanje u armaturi ne doseže granicu popuštanja i nastupa iznenadan slom bez prethodno naglašenih pukotina ili većih deformacija.[3]

Kod sloma zbog istodobnog zamora vlačne armature i tlačnog betona u vlačnom području nastaju prethodno naglašene deformacije i brojne pukotine što se smatra duktilnim slomom što je vrlo važno za sigurnost konstrukcije.[3]



Slika 2.1. Armiranobetonska greda u kojoj je beton naprezan na tlak, a čelik na vlak

Stoga se zbog osiguranja duktilnosti dimenzioniranje provodi uz pretpostavku istodobne iscrpljenosti armature i betona, odnosno uz potpuno iskorištenje svojstva nosivosti obiju materijala.

S obzirom na način djelovanja moguće su slijedeće vrste graničnih stanja nosivosti:

- Nosivost na poprečne sile (kod grede):  $V_{Ed} \leq V_{Rd}$
- Nosivost na uzdužne sile (kod stupa):  $N_{Ed} \leq N_{Rd}$
- Nosivost na momente savijanja (kod ploče i grede):  $M_{Ed} \leq M_{Rd}$

## 2.1. Analiza opterećenja

Iz poznatih vrijednosti djelovanja izračunava se računsko opterećenje na konstrukciju (element).

S obzirom na promjenjivost u vremenu djelovanja mogu biti stalna i promjenjiva. Stalna djelovanja (vlastita težina, opterećenje nadgradnje, pritisak tla i vode, prednapinjanje i sl.) su djelovanja kod kojih su promjene vrlo rijetke ili zanemarive u odnosu na srednju vrijednost. Promjenjiva djelovanja (korisno opterećenje, vlastita težina za vrijeme gradnje, pokretno opterećenje, kiša, snijeg i sl.) su djelovanja kod kojih su promjene vrlo česte ili imaju gotovo stalan karakter u odnosu na srednju vrijednost.[3]

Jednadžba za računsko opterećenje:

$$q_{Ed} = \gamma_G \cdot g + \gamma_Q \cdot q \quad (4)$$

gdje su:

g stalno opterećenje,

q promjenjivo opterećenje,

$\gamma_G$  koeficijent sigurnosti za stalno opterećenje (Prilog 1.),

$\gamma_Q$  koeficijent sigurnosti za promjenjivo opterećenje (Prilog 1.)

## 2.2. Statički proračun

Statički proračun svodi se na proračun reznih sila (momenti, poprečne i uzdužne sile) posebno od stalnog a posebno od promjenjivog opterećenja. Proračunavaju se na idealiziranim shemama metodama građevinske statike (Prilog 4.) [3].

Dobivene vrijednosti reznih sila za stalna i promjenjiva opterećenja množe se sa pripadajućim faktorima sigurnosti za stalna i promjenjiva opterećenja i dobivaju se računске vrijednosti pojedinih reznih sila mjerodavne za dimenzioniranje presjeka.

- Računska poprečna sila:

$$V_{Ed} = \gamma_G \cdot V_g + \gamma_Q \cdot V_q \quad (5)$$

- Računska uzdužna sila:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_g + \gamma_Q \cdot N_q \quad (6)$$

- Računski maksimalni moment savijanja:

$$M_{max,Ed} = \gamma_G \cdot M_g + \gamma_Q \cdot M_q \quad (7)$$

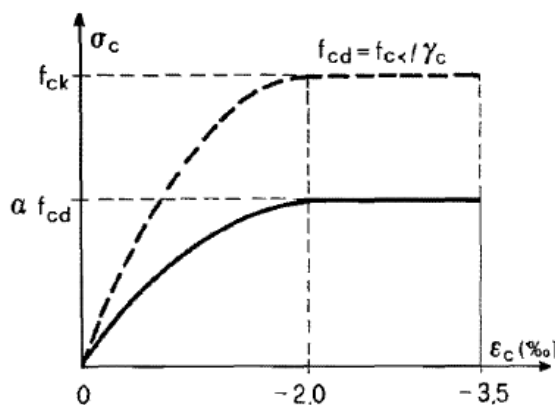
### 2.3. Dimenzioniranje elemenata naprezanih savijanjem

Za određivanje nosivosti presjeka i dimenzioniranje potrebna je vrijednost čvrstoće betona i granice popuštanja čelika.

Karakteristična čvrstoća betona ( $f_{ck}$ ) i karakteristična granica popuštanja čelika ( $f_{yk}$ ) dobivaju se eksperimentalno a njihove vrijednosti podijeljene u razrede nalaze se u tablici (Prilog 2.). Računska čvrstoća betona ( $f_{cd}$ ) i računski granica popuštanja čelika ( $f_{yd}$ ) određuju se temeljem poznatih vrijednosti karakterističnih čvrstoća betona i čelika (Slika 2.2 i Slika 2.3), te vrijedi slijedeće:

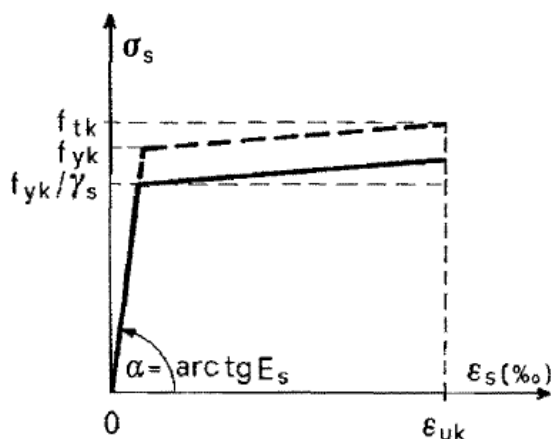
$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (8)$$

- gdje su:
- $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betona
  - $f_{yk}$  karakteristična granica popuštanja čelika
  - $f_{cd}$  računski čvrstoća betona
  - $f_{yd}$  računski granica popuštanja čelika
  - $\gamma_c$  koeficijent sigurnosti za beton
  - $\gamma_s$  koeficijent sigurnosti za čelik



Slika 2.2. Računski dijagram betona

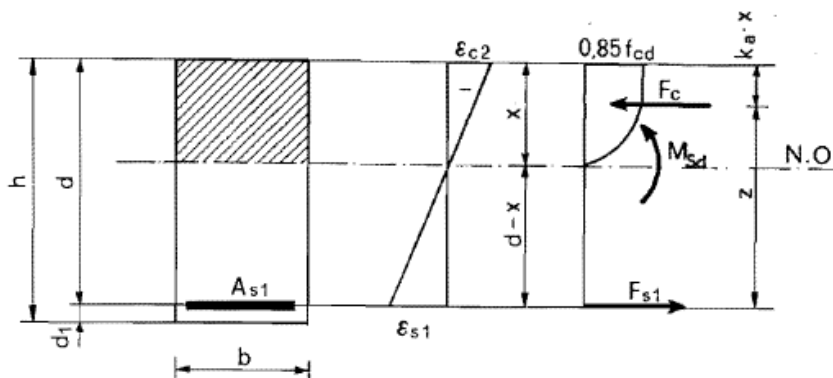
Računski dijagram betona opisuje odnos naprezanja i deformacija betona za deformacije do - 3,5‰, deformacija od -3,5‰ smatra se graničnom jer tada nastupa drobljenje betona. Koeficijentom  $\alpha$  uzima se u obzir nepovoljno djelovanje zbog dugotrajnog opterećenja a ovisi o obliku presjeka. Za pravokutne presjeke vrijedi:  $\alpha = 0,85$ .



Slika 2.3. Računski dijagram čelika

Iz računskog dijagrama čelika za armiranje vidljivo je da za naprezanje od 0 do deformacije koja odgovara granici popuštanja čelika ( $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$ ) vrijedi linearni zakon ( $E_s$  je pri tome modul elastičnosti čelika), a za veće deformacije naprezanje čelika ostaje konstantno.

Slijedeća slika opisuje pravokutni presjek armiran u vlačnoj zoni sa dijagramom napona i deformacija i unutrašnjim reznim silama.



Slika 2.4. Jednostruko armirani pravokutni presjek u vlačnoj zoni

Prema prikazu pravokutnog presjeka slijedi izvod jednadžbe za proračun armature:[3]

Računski moment za nosivost presjeka iznosi:

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = F_{s1} \cdot z \quad (9)$$

- gdje je:
- $F_c$       računska tlačna sila u betonu
  - $z$          krak unutrašnjih sila
  - $F_{s1}$      računska vlačna sila u armaturi



Računska tlačna sila u betonu:

$$F_c = 0.85 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_v \cdot x \cdot b \quad (10)$$

gdje je:  $\alpha_v$  koeficijent punoće za dijagram tlačnih napreznja  
 $f_{cd}$  računski čvrstoća betona  
 $x$  udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba  
 $b$  širina presjeka

Računska vlačna sila u armaturi iznosi:

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \quad (11)$$

gdje je:  $A_{s1}$  površina armature  
 $\sigma_{s1}$  naprezanje u armaturi

Iz odnosa deformacija i položaja neutralne osi dobiva se veličina tlačne zone:

$$\frac{x}{d} = \frac{-\varepsilon_{c2}}{-\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1}}$$
$$x = \frac{-\varepsilon_{c2}}{-\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1}} \cdot d = \xi \cdot d \quad (12)$$

gdje je:  $\varepsilon_{c2}$  deformacija tlačnog ruba  
 $\varepsilon_{s1}$  deformacija u vlačnoj armaturi (produljenje)  
 $d$  udaljenost vlačne armature od tlačnog ruba  
 $\xi$  koeficijent položaja neutralne osi

Vrijedi formula za krak unutarnjih sila ( $z$ ):

$$z = d - k_a \cdot x = d - k_a \cdot \xi \cdot d = d \cdot (1 - k_a \cdot \xi) = \zeta \cdot d \quad (13)$$

gdje je:  $k_a$  položaj tlačne sile u odnosu na tlačni rub  
 $\zeta$  koeficijent kraka unutarnjih sila

Jednadžba za računski moment nosivosti presjeka sada glasi:

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = 0.85 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_v \cdot \xi \cdot d \cdot b \cdot \zeta \cdot d = \mu_{Rd} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd} \quad (14)$$

S obzirom na jednadžbu ravnoteže ( $M_{Ed} = M_{Rd}$ ) dobiva jednadžba za bezdimenzionalni moment savijanja:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \mu_{Rd} = 0.85 \cdot \alpha_v \cdot \xi \cdot \zeta \quad (15)$$

Iz toga slijedi formula za potrebnu površinu armature:

$$M_{Ed} = F_{s1} \cdot z = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot \zeta \cdot d$$
$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\sigma_{s1} \cdot \zeta \cdot d} \quad (16)$$

Po dobivanju bezdiomenzionalnog momenta savijanja dobivena se vrijednost uspoređuje sa vrijednostima iz tablice za dimenzioniranje AB presjeka prema EC2 (Prilog 5.), te se iz tablice odabire vrijednost najbliža dobivenoj (prva veća vrijednost) sa pripadajućim deformacijama, koeficijentom kraka unutarnjih sila i koeficijentom položaja neutralne osi, a koji se dalje koriste za izračunavanje površine armature. Na isti način se kod proračuna potrebne armature iz armaturene tablice (Prilog 6.) odabire prva veća vrijednost potrebne površine armature od dobivene.

Kako ne bi došlo do trenutačnog sloma slabo armiranog betonskog presjeka potrebno je presjek armirati minimalnom armaturom. Količina armature u vlačnoj zoni mora biti tolika da preuzme vlačnu silu betona prije pojave prve pukotine. Količina minimalne armature se izračunava prema jednadžbi:

$$A_{s1min} = 0.022 \cdot \frac{f_{ck,cub}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d \quad (17)$$

### 3. Granično stanje uporabljivosti

Granično stanje uporabljivosti definirano je kriterijima čijim se prekoračenjem može ograničiti projektirana uporaba građevine, odnosno povezano je sa gubitkom svojstva uporabljivosti, a tu spadaju:

- **granično stanje naprezanja:** prekomjerno raspucavanje i plastično deformiranje zbog prevelikog naprezanja,
- **granično stanje raspucavanja:** lokalna oštećenja zbog pretjeranog raspucavanja (korozija i povećanje vodopropusnosti),
- **granično stanje deformacija:** progibi koji uzrokuju neprihvatljiva oštećenja konstruktivnih elemenata (pregradni zidovi) ili nepovoljno utječu na funkciju ili izgled konstrukcije.

Granično stanje uporabljivosti će biti zadovoljno ako vrijedi:

$$E_d \leq C_d \quad (18)$$

- $C_d$  je granična računaska vrijednost bitnog kriterija uporabljivosti (naprezanje, progibi, širina pukotina)
- $E_d$  je računaska vrijednost vanjskog djelovanja ili kombinacije djelovanja (sila, moment, napreznje)

Kod graničnih stanja uporabljivosti, ukoliko nije drugačije određeno, koeficijenti sigurnosti iznose:  $\gamma_F = \gamma_M = 1,0$ . [4]

Kod dugotrajnog opterećenja reprezentativne vrijednosti za promjenjiva djelovanja dobivaju se iz karakterističnih vrijednosti opterećenja množenjem sa koeficijentom kombinacije  $\psi$ . Iz tablice u prilogu (Prilog 8.) ovisno o trajanju i učestalosti opterećenja te djelovanju odabire se vrijednost koeficijenta kombinacije. Za kvazistalnu kombinaciju opterećenja vrijedi koeficijent kvazistalnog djelovanja ( $\psi_2$ ). Koeficijentima kombinacije uzima se u obzir smanjena vjerojatnost istodobnog djelovanja više promjenjivih opterećenja te vremensko trajanje i učestalost.

Kod dugotrajnog djelovanja važno je spomenuti pojavu puzanja i skupljanja betona. Puzanje betona opisuje se kao pojava viskoznih plastičnih deformacija koje utječu na povećanje progiba elementa i porast momenta a posljedica je kretanja apsorbirane vode u betonu [3]. Koeficijent puzanja betona  $\varphi(t, t_0)$  odabire se iz tablice (Prilog 9.).

Skupljanje betona je posljedica dugotrajnog djelovanja zbog smanjenja volumena betona u procesu sušenja i stvrdnjavanja, a ovisi o dimenzijama elementa što se izražava pomoću srednjeg polumjera presjeka  $h_o$  koji je odnos površine poprečnog presjeka i njegovog poluopsega ( $h_o = 2A_c/u$ ). Skupljanje betona izaziva vlačne sile u betonu, a tlačne u armaturi, zbog čega mogu nastati pukotine.

### 3.1. Granično stanje naprezanja

Naprezanje u betonu može zbog nehomogenosti betona uzrokovati pojavu pukotina i pretjerane plastične deformacije a kod armature pretjeranu deformaciju armature koja može izazvati širenje pukotina.

Graničnim stanjem naprezanja ograničava se prekomjerno naprezanje u materijalima slijedećim formulama:

- Naprezanje u betonu ( $\sigma_c$ ):

za rijetku kombinaciju opterećenja: 
$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck} \quad (19)$$

za kvazistalnu kombinaciju opterećenja: 
$$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck} \quad (20)$$

*(kvazistalna kombinacija opterećenja djeluje kroz duži vremenski period, više od polovice trajanja sustava)*

- Naprezanje u čeliku ( $\sigma_s$ ):

za rijetku kombinaciju opterećenja: 
$$\sigma_s \leq 0.8 \cdot f_{yk} \quad (21)$$

za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem: 
$$\sigma_s \leq 1.0 \cdot f_{yk} \quad (22)$$

naprezanje u čeliku za prednapinjanje: 
$$\sigma_p \leq 0.75 \cdot f_{pk} \quad (23)$$

### 3.2. Granično stanje pukotina

Glavna pretpostavka armiranog betona je da je beton raspucao u vlačnoj zoni i da sva vlačna naprezanja preuzima armatura. Stoga, pukotine nastaju kada vlačna naprezanja od unutarnjih sila prekorače vlačnu čvrstoću betona.[5]

Pukotine su uobičajena pojava kod AB konstrukcija napreznih savijanjem i poprečnim silama i one nisu smetnja ako im širine ne premašuju propisanu graničnu vrijednost uvjetovanu korozijom, vanjskim izgledom i nepropusnošću.[5]

- **Posljedice raspucavanja AB konstrukcije:**

**Korozija armature** se javlja kao posljedica raspucavanja konstrukcije. Može ovisiti o kvaliteti zaštitnog sloja i o sastavu odnosno kompaktnosti betona, te načinu njegove ugradnje i održavanja, stoga se ograničenjem širine pukotina povećava trajnost konstrukcije (osobito u agresivnom okolišu).

Istraživanjima je dokazano da uzdužne pukotine manje od 0,3 mm i poprečne pukotine manje od 0,5 mm nemaju velik utjecaj na koroziju armature.[4]

Što se tiče **estetike**, pojava pukotina narušava izgled građevine, te se uzima se da su pukotine čija je širina manja od 0,3 mm prihvatljive u smislu estetike.[4]

Raspucavanje se dopušta u mjeri koja ne smanjuje značajno **propusnost** građevine (ovisno o namjeni građevine, nalazi li se ona u vlažnom ili suhom okolišu). Kako je beton sam po sebi nepropustan moguće je izvesti vodonepropusnu betonsku konstrukciju i bez posebne izolacije. Pukotine kroz cijelu konstrukciju širine od 0,1 do 0,2 mm mogu u početku dovesti do slabog prokapavanja vode, a nakon nekoliko dana dolazi do samozacjeljenja i prestaje prokapavanje.[4]

- **Vrste pukotina:**

S obzirom na uzroke nastajanja razlikuju se:

- Pukotine uzrokovane slijeganjem betona:

Pri slijeganju betona plastične konzistencije nastaju pukotine (cca 3 h nakon betoniranja), a njihov nastanak može se spriječiti pravilnim sastavom betona i ispravnim mjerama ugradnje.[4]

- Pukotine uzrokovane spriječenosti promjene volumena:

Zbog temperaturnih promjena može doći do skupljanja betona pri čemu nastaju pukotine uzrokovane spriječenosti promjena volumena, a dijele se u pukotine koje nastaju kratko nakon betoniranja i pukotine koje nastaju od skupljanja zbog sušenja ili temperaturnih promjena tijekom uporabe betona. [4]

Pukotine koje nastaju kratko nakon betoniranja (nekoliko dana) nastaju zbog velikog sniženja temperature betona do temperature okoline i zbog još nepotpuno razvijene vlačne čvrstoće betona.[4]

Kod debelih elemenata (debele ploče ili zidovi) zbog spriječenosti skupljanja površinskih slojeva dolazi do mrežastih pukotina koje se pružaju u svim smjerovima i imaju razmjerno malu dubinu. Ovakve pukotine mogu se izbjeći ispravnom njegom betona tako da se spriječi brzi pad temperature i brzo sušenje betona, te ugradnjom površinskih slojeva armature.[4]

Kod tankih i dugih elemenata (ploča, greda) spriječenost skraćanja izaziva vlačne napone koji uzrokuju pukotine po čitavom presjeku (razdjelne pukotine), odnosno na mjestu oslabljenja presjeka. Ovakva se vrsta pukotina sprječava predviđanjem dilatacijskih rešetki na manjem razmaku, odnosno ograničenje odgovarajućom armaturom.[4]

Pukotine koje nastaju radi sušenja javljaju se više mjeseci nakon betoniranja a imaju iste pojavne oblike kao i pukotine prethodno opisane (pukotine kratko nakon betoniranja), te se na isti način sprječavaju (dilatacijske rešetke i površinski slojevi armature).[4]

Iskustva su pokazala da je što se tiče raspucavanja najkritičnije u prvih nekoliko dana nakon betoniranja, osim u slučaju kad je u uporabi konstrukcija izložena iznimno velikim varijacijama temperature.[4]

- Pukotine koje nastaju zbog djelovanja opterećenja:

Pukotine koje nastaju zbog djelovanja opterećenja koja uzrokuju vlačne uzdužne sile, momenti savijanja ili momenti torzije su izgledom identične pukotinama opterećenima od sloma. Ograničavaju se odgovarajućom količinom armature.[4]

Armatura ograničuje raspucavanje tako da omogućuje nastanak većeg broja pukotina koje imaju prihvatljivu širinu, u protivnom (bez armature) nastaje mali broj širokih pukotina koje mogu značajno ugroziti izgled i trajnost konstrukcije.[4]

- **Mjere ograničavanja širine pukotina:**

Granično stanje širine pukotina je stanje kada je karakteristična širina pukotina jednaka njenoj propisanoj graničnoj vrijednosti. Vrijednost granične širine pukotina armiranobetonskih konstrukcija definirana je ovisno o razredu okoliša, odnosno klasi izloženosti te s obzirom na vrstu ugradnje i sastav betona.

Sukladno normama (EC2) za graničnu širinu armiranobetonskih konstrukcija za klasu izloženosti u vlažnom okolišu do elementi djelomično u morskoj vodi, te ako nema posebnih zahtjeva što se tiče vodonepropusnosti, **propisana vrijednost granične širine pukotina je 0,3 mm**. Za suhi okoliš širine pukotina nemaju utjecaj na trajnost armiranobetonskih konstrukcija, pa se ograničenja mogu zahtijevati iz razloga kao što su vodonepropusnost ili vanjski izgled građevine.[4]

Ograničenje širine pukotina u armiranobetonskim i prednapetim konstrukcijama postiže se na slijedeće načine:

- Ugrađivanjem armature jednake ili veće od minimalne u vlačno područje:

Ugrađivanjem armature u vlačno opterećenim presjecima izbjegava se pojava granice popuštanja prilikom nastajanja pukotina, stoga armiranobetonske elemente treba uvijek armirati u području vlačnih naprezanja barem minimalnom armaturom za ograničenje širina pukotina.[5]

Minimalna površina armature se izračunava prema izrazu:

$$A_s = k_c \cdot k \cdot f_{c,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (24)$$

gdje je:

$A_s$  površina vlačne armature

$k_c$  koeficijent umanjenja koji uzima u obzir nelinearnu raspodjelu naprezanja po visini presjeka pri pojavi prve pukotine ( $k_c = 1,0$  za centrični vlak,  $k_c = 0,4$  za savijanje)

$k$  koeficijent umanjenja kojim se uzima u obzir nelinearna raspodjela vlačnog naprezanja po presjeku izazvanog temperaturnim promjenama i skupljanjem unutar elementa ( $k = 1$ )

$f_{c,eff}$  vlačna čvrstoća betona pri pojavi prve pukotine

$A_{ct}$  vlačna površina neposredno prije pojave pukotina

$\sigma_s$  naprezanje u armaturi neposredno nakon pojave pukotina

➤ Predviđanjem dilatacijskih rešetki

Na ovaj način se izbjegavaju naponi od spriječenih deformacija radi skupljanja i temperaturnih promjena.

Dilatacijske rešetke se za monolitne konstrukcije predviđaju na udaljenostima 40 – 60 m. Ovi su razmaci veći za montažne konstrukcije.[4]

➤ Ograničenjem razmaka i promjera šipki armature:

Ograničenje razmaka i promjera šipki armature, odnosno kontrola pukotina bez direktnog proračuna provodi se prema tablicama veličine graničnih promjera šipki i veličine najvećih razmaka šipki (Prilog 10.). Pri tome je potrebno uzeti u obzir da je presjek armiran barem minimalnom količinom armature.

Vrijedi sljedeće:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \cdot \frac{k_c \cdot h_{cr}}{2 \cdot (h-d)} [mm] \quad (25)$$

gdje je:

$\phi_s$  maksimalni promjer armature

$\phi_s^*$  maksimalni promjer armature prema tablici 9. iz priloga

$f_{ct,eff}$  vlačna čvrstoća betona pri pojavi prvih pukotina

$h$  ukupna visina poprečnog presjeka

$h_{cr}$  visina tlačne zone neposredno prije pojave prvih pukotina

$d$  statička visina poprečnog presjeka

➤ Provedbom proračuna širine pukotina:

U kontroli pukotina izračunava se karakteristična širina pukotina koja se zatim uspoređuje sa graničnom širinom.

Karakteristična širina pukotina izračunava se na sljedeći način:[5]

$$W_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) [mm] \quad (26)$$

$$W_k \leq W_g$$

gdje je:

$W_k$  karakteristična širina pukotina

$W_g$  granična širina pukotina

$S_{r,max}$  maksimalni razmak pukotina

$\varepsilon_{sm}$  srednja relativna deformacija armature

$\varepsilon_{cm}$  srednja relativna deformacija između pukotina u betonu

$$S_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}} \quad (27)$$

gdje je:

$k_1$  koeficijent prionjivosti ( $k_1 = 0,8$  za rebrastu armaturu,  $k_1 = 1,6$  za glatku armaturu)

$k_2$  koeficijent raspodjele deformacija ( $k_2 = 0,5$  za savijanje,  $k_2 = 1,0$  za čisti vlak)

$k_3$  koeficijent  $k_3 = 3.4$

$k_4$  koeficijent  $k_4 = 0.425$

$c$  zaštitni sloj armature

$\phi$  promjer šipki armature (mm)

$\rho_{eff}$  djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (28)$$

$A_s$  površina vlačne armature

$A_{c,eff}$  djelotvorna vlačna površina betona

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{c,eff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \leq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (29)$$

$\sigma_s$  naprezanje u vlačnoj armaturi na mjestu pukotine

$$\sigma_s = \frac{M_{Ed}}{z \cdot A_s} \quad (30)$$

$M_{Ed}$  računski moment savijanja

$z$  krak unutrašnjih sila u presjeku

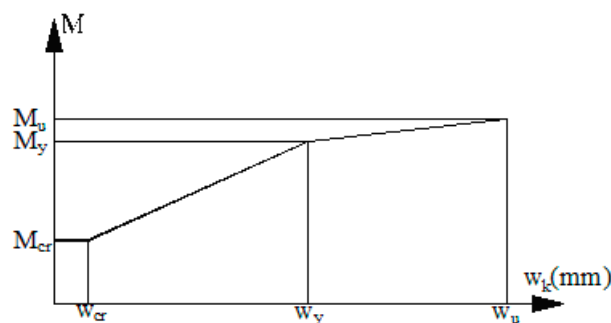
$k_t$  koeficijent trajanja opterećenja ( $k_t = 0.6$  za kratkotrajno djelovanje,  $k_t = 0.4$  za dugotrajno djelovanje)

$\alpha_e$  omjer modula elastičnosti čelika i betona

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (31)$$

$E_s$  modul elastičnosti armature

$E_{cm}$  sekantni modul elastičnosti



Slika 3.5. Dijagram ovisnosti momenta savijanja i širine pukotina  $M-W_k$



### 3.3. Granično stanje deformacija

Deformiranje građevinskog elementa je općenito naziv za deformaciju koja podrazumijeva progib, zakrivljenost, produljenje ili skraćenje, uvrtnje i promjenu nagiba elementa, međutim značajan parametar graničnog stanja deformiranja je **progib** armiranobetonskih konstruktivnih elemenata, a nastaje zbog djelovanja opterećenja i temperaturnih razlika[5]. Deformiranje armiranobetonskih elemenata i konstrukcija se dopušta pod uvjetom da ono ne izazove oštećenja konstrukcije te da ne ugrožava njezinu uporabljivost.[3]

#### **Posljedice deformacije AB konstrukcije[4]:**

Nepovoljni učinci deformacija na korisnika (subjektivne granice deformacija):

- Vizualni učinci deformiranih elemenata
- Učinci vibracija

Nepovoljni učinci deformacija na uporabljivost konstrukcija (granice deformacija se određuju prema konkretnim zahtjevima):

- Utjecaj na odvodnju krovnih ploha s projektiranim malim nagibom
- Utjecaj na nagib (ravnost) podova
- Ugrožavanje propisanog gabarita na prometnicama

Nepovoljan utjecaj na nekonstruktivne elemente (granice deformacija se određuju prema konkretnim uvjetima):

- Pucanje, drobljenje i pojava izbočivanja nekonstruktivnih zidova i pregrada
- Narušavanje funkcije vrata i prozora

Nepovoljan utjecaj na konstruktivne elemente:

- Deformacija zbog krute veze među konstruktivnim elementima (deformiranje jednih elemenata ima utjecaj na deformacije i sile u drugim elementima)

#### **Vrste deformacija[4]:**

Prema načinu djelovanja opterećenja:

- Povratne od kratkotrajnog opterećenja
- Nepovratne od dugotrajnog opterećenja (zbog puzanja betona)
- Djelomično nepovratne od cikličkog opterećenja (mnogokratnog opterećivanja i rasterećivanja) zbog narušavanja prionljivosti na mjestu pukotina

Prema načinu naprezanja konstrukcijskih elemenata:

- Deformacije od uzdužnih sila
- Deformacije od savijanja
- Deformacije od poprečne sile (posmika)
- Deformacije od momenta torzije

### Mjere ograničavanja deformacija progiba:

- Provjera progiba bez proračuna:

U slučaju kada nije potrebno raditi proračun progiba (prilagođeni omjer raspona i visine poprečnog presjeka), procjena omjera duljine raspona i statičke visine poprečnog presjeka određuje se na slijedeći način:

$$\frac{L}{d} = K \cdot \left[ 11 + 1.5 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 3.2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{3/2} \right] \text{ za } \rho \leq \rho_0 \quad (32)$$

gdje je:

$K$  koeficijent ovisan o strukturi elementa (za slobodno poduprtu ploču preko jednog ili dva raspona  $K = 1$ ) [8]

$f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betona

$\rho$  koeficijent armiranja vlačne armature

$\rho_0 = 10^{-3} \cdot \sqrt{f_{ck}}$  referentni koeficijent armiranja

Ovaj izraz vrijedi uz pretpostavku da naprezanje u armaturi ( $f_{yk} = 500MPa$ ) na sredini raspona ploče iznosi  $\sigma_s = 310MPa$ . Za drugačije vrijednosti naprezanja vrijednost dobivenu izrazom (32) potrebno je pomnožiti sa  $310/\sigma_s$ .

- Provjera progiba proračunom:

Kod ploče će uporabljivost konstrukcije biti zadovoljena kada je maksimalni progib manji od  $L/250$  razmaka ležaja (raspona).[4]

Proračunom progiba potrebno je dokazati slijedeće:

$$v \leq v_{lim} \quad (33)$$

gdje je:

$v_{tot}$  maksimalni progib od kratkotrajnog i dugotrajnog djelovanja

$v_{lim}$  granični progib ( $L/250$ )

Maksimalni progib izračunava se prema jednadžbi:

$$v = k \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r} \quad (34)$$

gdje je:

$k = L/k_1$  je koeficijent koji ovisi o statičnom sustavu i određuje se prema tablici (Prilog 10.)

$L$  raspon elementa

$1/r$  konačna zakrivljenost

Konačna zakrivljenost:

$$\frac{1}{r} = (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_{totI}} + \zeta \cdot \frac{1}{r_{totII}} \quad (35)$$

gdje je:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad \text{koeficijent raspodjele zakrivljenosti} \quad (36)$$

$\beta$  koeficijent trajanja opterećenja ( $\beta = 1$  za kratkotrajna djelovanja,  $\beta = 0.5$  za dugotrajna djelovanja)

$\sigma_s$  naprezanje u čeliku

$\sigma_{sr}$  naprezanje u vlačnoj armaturi na mjestu pukotine

$1/r_{totI}$  totalna zakrivljenost za naponsko stanje I

$1/r_{totII}$  totalna zakrivljenost za naponsko stanje II

$$\frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{r_{cs}} \quad (37)$$

gdje je:

$$\frac{1}{r_{mI}} = \frac{M_{Ed}}{E_{ceff} \cdot I_I} \quad \text{zakrivljenost zbog momenta svijanja za naponsko stanje I}$$

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - y_g} \quad \text{zakrivljenost zbog momenta svijanja za naponsko stanje II}$$

$$\frac{1}{r_{cs}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S}{I} \quad \text{zakrivljenost zbog skupljanja}$$

$$\frac{1}{r_{mI}} = \frac{M_{Ed}}{E_{ceff} \cdot I_I} \quad (38)$$

gdje je:

$$E_{ceff} = \frac{E_{cm}}{1.0 + \varphi(t, t_0)} \quad \text{efektivni modul elastičnosti betona} \quad (39)$$

$$E_{cm} = 9500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad \text{sekantni modul elastičnosti} \quad (40)$$

$\varphi(t, t_0)$  koeficijent puzanja betona (Prilog 8.)

$I$  moment tromosti

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - y_g} \quad (41)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad \text{relativna deformacija armature} \quad (42)$$

$E_s$  modul elastičnosti čelika ( $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$ )

$y_g$  udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba

$$\frac{1}{r_{cs}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S}{I} \quad (43)$$

$$\alpha_e = E_s / E_{ceff} \quad \text{omjer modula elastičnosti čelika i betona} \quad (44)$$

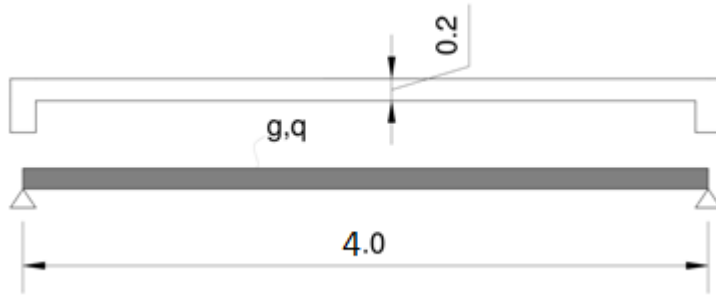
$\varepsilon_{cs}$  relativna deformacija od skupljanja betona (Prilog 11.)

$S$  statički moment ploštine armature

## 4. Proračun AB ploče

ZADATAK:

Ploča je slobodno poduprta na dva nasuprotna ležaja na rasponu od  $L=4.0$  m. Debljina ploče je  $h=20$  cm, a izrađena je od betona C25/30. Osim vlastitom težinom ( $g=6.94$  kN/m<sup>2</sup>), ploča je opterećena i dodatnim stalnim opterećenjem  $\Delta g=0.5$  kN/m<sup>2</sup>, te uporabnim opterećenjem  $q=2.0$  kN/m<sup>2</sup>. Ploča je armirana mrežastom armaturom B500B.



### 4.1. Proračun prema graničnom stanju nosivosti

#### 4.1.1. Analiza opterećenja

- Stalno opterećenje:  
vlastita težina:  $g = 6.94$  kN/m<sup>2</sup>  
dodatno opterećenje:  $\Delta g = 0.5$  kN/m<sup>2</sup>  
 $\Sigma g = 7.44$  kN/m<sup>2</sup>
- Promjenjivo opterećenje:  $q = 2.0$  kN/m<sup>2</sup>
- Ukupno granično računsko opterećenje:

$$q_{Ed} = \gamma_G \cdot g + \gamma_Q \cdot q$$
$$q_{Ed} = 1.35 \cdot 7.44 + 1.5 \cdot 2.0$$
$$q_{Ed} = 13.044$$
 kN/m<sup>2</sup>

#### 4.1.2. Statički proračun

- Proračun poprečnih sila(Prilog 4.):

$$R_g = \frac{g \cdot l}{2}$$

$$R_g = \frac{7.44 \cdot 4}{2}$$

$$R_g = 14.88$$
 kN/m<sup>1</sup>

$$R_q = \frac{q \cdot l}{2}$$

$$R_q = \frac{2 \cdot 4}{2}$$

$$R_q = 4.0 \text{ kN/m}^1$$

$$V_{Ed} = R_{Ed} = \gamma_G \cdot R_g + \gamma_Q \cdot R_q$$

$$V_{Ed} = R_{Ed} = 1.35 \cdot 14.88 + 1.5 \cdot 4.0$$

$$V_{Ed} = R_{Ed} = 26.088 \text{ kN/m}^1$$

- Maksimalni moment u polju (Prilog 4.):

$$M_{max,g} = \frac{g \cdot l^2}{8}$$

$$M_{max,g} = \frac{7.44 \cdot 4^2}{8}$$

$$M_{max,g} = 14.88 \text{ kNm/m}^1$$

$$M_{max,q} = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

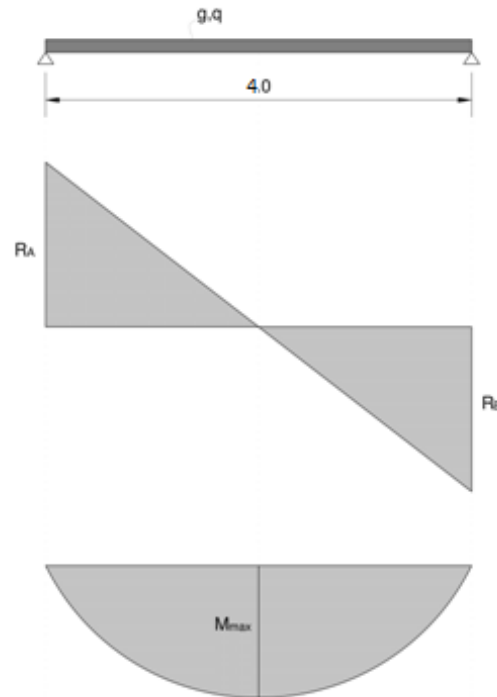
$$M_{max,q} = \frac{2 \cdot 4^2}{8}$$

$$M_{max,q} = 4 \text{ kNm/m}^1$$

$$M_{max,Ed} = \gamma_G \cdot M_g + \gamma_Q \cdot M_q$$

$$M_{max,Ed} = 1.35 \cdot 14.88 + 1.5 \cdot 4$$

$$M_{max,Ed} = 26.088 \text{ kNm/m}^1$$



### 4.1.3. Dimenzioniranje

- pretpostavka:

$$c = 1.5 \text{ cm}$$

$$\phi = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$$

$$h = 20 \text{ cm}$$

- statička visina presjeka:

$$d = h - c - \phi/2$$

$$d = 20 - 1.5 - 1/2$$

$$d = 18 \text{ cm}$$

- udaljenost težišta armature od vlačnog ruba presjeka:

$$d_1 = c - \phi/2$$

$$d_1 = 1.5 - 1/2$$

$$d_1 = 1 \text{ cm}$$

- karakteristična čvrstoća betona:

$$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$$

- računski čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1.5} = 16.66 \text{ N/mm}^2$$

- bezdimenzionalni moment savijanja:

$$M_{max,Ed} = 2608.8 \text{ kNcm/m}^1$$

$$f_{cd} = 1.66 \text{ kN/cm}^1$$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

$$\mu_{Ed} = \frac{2608.8}{100 \cdot 18^2 \cdot 1.66}$$

$$\mu_{Ed} = 0.066$$

- očitane vrijednosti iz Priloga 5., za  $\mu_{Ed} = 0.066$ :

$$\varepsilon_{c2} = -2.0 (\%)$$

$$\varepsilon_{s1} = 20.0 (\%)$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0.091$$

$$\zeta = \frac{z}{d} = 0.966$$

- karakteristična granica popuštanja armature:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

- računski granica popuštanja armature:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.78 \text{ N/mm}^2$$

- površina minimalne armature:

$$f_{c,cub} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{smin} = 0.022 \cdot \frac{f_{c,cub}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d$$

$$A_{smin} = 0.022 \cdot \frac{30}{434.78} \cdot 100 \cdot 18$$

$$A_{smin} = 2.732 \text{ cm}^2$$

- maksimalna površina armature:

$$A_{smax} = 0.4 \cdot \frac{0.85 \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d$$

$$A_{smax} = 0.4 \cdot \frac{0.85 \cdot 16.66}{434.78} \cdot 100 \cdot 18$$

$$A_{smax} = 23.45 \text{ cm}^2$$

- potrebna površina glavne armature u polju:

$$f_{yd} = 43.478 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$A_{s1} = \frac{2608.8}{0.966 \cdot 18 \cdot 43.478}$$

$$A_{s1} = 3.45 \text{ cm}^2$$

Odabrano iz Priloga 6.:

$$\text{za } A_{s1} = 3.93 \text{ cm}^2 \Rightarrow \phi 10/20 \text{ cm}$$

- razdjelna armatura:

$$1. \quad A_{s,raz} = 20\% \cdot A_{s1}$$

$$A_{s,raz} = 0.2 \cdot 3.93$$

$$A_{s,raz} = 0.786 \text{ cm}^2$$

$$2. \quad A_{s,raz} = 0.1\% \cdot A_c$$

$$A_{s,raz} = 0.001 \cdot 100 \cdot 20$$

$$A_{s,raz} = 2.0 \text{ cm}^2$$

- odabrano za razdjelnu armaturu:

$$A_{s,raz} = 2.51 \text{ cm}^2 \Rightarrow \phi 8/20 \text{ cm}$$

## 4.2. Proračun prema graničnom stanju uporabljivosti

### 4.2.1. Geometrijske karakteristike (Prilog 7)

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE ZA KRATKOTRAJNO DJELOVANJE ( $t = 0$ ):

- sekantni (statički) modul elastičnosti:

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{25 + 8}$$

$$E_{cm} = 30471.57 \text{ N/mm}^2$$

- omjer modula elastičnosti čelika i betona:

$E_s$  modul elastičnosti čelika

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

$$\alpha_e = \frac{200000}{30471.57}$$

$$\alpha_e = 6.563$$

- bezdimenzionalni koeficijenti armiranja:

$$\rho_I = \frac{A_{s1}}{A_{c1}} = \frac{A_{s1}}{b \cdot h}$$

$$\rho_I = \frac{3.93}{100 \cdot 20}$$

$$\rho_I = 1.965 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{II} = \frac{A_{s1}}{A_{c2}} = \frac{A_{s1}}{b \cdot d}$$

$$\rho_{II} = \frac{3.93}{100 \cdot 18}$$

$$\rho_{II} = 2.183 \cdot 10^{-3}$$

- koeficijenti za proračun položaja neutralne osi poprečnog presjeka:

$$A_I = \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \frac{d}{h} \cdot \left( 1 + A_{s2} \cdot \frac{d_2}{A_{s1} \cdot d} \right), A_2 = 0$$

$$A_I = 6.563 \cdot 1.965 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{18}{20}$$

$$A_I = 0.0116$$

$$B_I = \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \left( 1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \right), A_2 = 0$$

$$B_I = 6.563 \cdot 1.965 \cdot 10^{-3}$$

$$B_I = 0.0129$$



$$A_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot \left(1 + A_{s2} \cdot \frac{d_2}{A_{s1} \cdot d}\right), A_2 = 0$$

$$A_{II} = 6.563 \cdot 2.183 \cdot 10^{-3}$$

$$A_{II} = 0.0143$$

$$B_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right), A_2 = 0$$

$$B_{II} = 6.563 \cdot 2.183 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{II} = 0.0143$$

$$k_{xI} = \frac{0.5 + A_I}{1 + B_I}$$

$$k_{xI} = \frac{0.5 + 0.0116}{1 + 0.0129}$$

$$k_{xI} = 0.505$$

$$k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2 \cdot A_{II}}$$

$$k_{xII} = -0.0143 + \sqrt{0.0143^2 + 2 \cdot 0.0143}$$

$$k_{xII} = 0.155$$

- udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba poprečnog presjeka ploče:

za naponsko stanje I:

$$y_{Ig} = k_{xI} \cdot h$$

$$y_{Ig} = 0.505 \cdot 20$$

$$y_{Ig} = 10.1 \text{ cm}$$

$$y_{Id} = h - y_{Ig}$$

$$y_{Id} = 20 - 10.1$$

$$y_{Id} = 9.9 \text{ cm}$$

za naponsko stanje II:

$$y_{IIg} = k_{xII} \cdot h$$

$$y_{IIg} = 0.155 \cdot 20$$

$$y_{IIg} = 3.1 \text{ cm}$$

$$y_{II d} = h - y_{IIg}$$

$$y_{II d} = 20 - 3.1$$

$$y_{II d} = 16.9 \text{ cm}$$

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje I i II:

$$I_I = \frac{b}{3} \cdot (y_{Id}^3 + y_{Ig}^3) + (\alpha_e - 1) \cdot [A_{s1} \cdot (d - y_{Ig})^2 + A_{s2} \cdot (y_{Ig} - d_2)^2]$$

$$I_I = \frac{100}{3} \cdot (9.9^3 + 10.1^3) + (6.563 - 1) \cdot [3.93 \cdot (18 - 10.1)^2 + 0]$$

$$I_I = 68051.11 \text{ cm}^4$$

$$I_{II} = \frac{b}{3} \cdot y_{IIg}^3 + \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot (d - y_{IIg})^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (y_{IIg} - d_2)^2$$

$$I_{II} = \frac{100}{3} \cdot 3.1^3 + 6.563 \cdot 3.93 \cdot (18 - 3.1)^2 + (6.563 - 1) \cdot 0$$

$$I_{II} = 6719.24 \text{ cm}^4$$

- statički moment ploštine armature:

$$S_I = A_{s1} \cdot (d - y_{Ilg}) - A_{s2} \cdot (y_{Ilg} - d_2)$$

$$S_I = 3.93 \cdot (18 - 10.1) - 0$$

$$S_I = 31.047 \text{ cm}^3$$

$$S_{II} = A_{s1} \cdot (d - y_{IIlg}) - A_{s2} \cdot (y_{IIlg} - d_2)$$

$$S_{II} = 3.93 \cdot (18 - 3.1) - 0$$

$$S_{II} = 81.36 \text{ cm}^3$$

#### GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE ZA DUGOTRAJNO DJELOVANJE ( $t = \infty$ ):

- poluopseg poprečnog presjeka u dodiru sa zrakom ( $u/2$ ):

$$u = 100 + 100 = 200 \text{ cm}$$

$$\frac{u}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ cm}$$

- srednji polumjer presjeka:

$$h_0 = \frac{A_c}{u/2} = \frac{b \cdot h}{u/2}$$

$$h_0 = \frac{100 \cdot 20}{100}$$

$$h_0 = 20 \text{ cm}$$

- koeficijent pužanja  $\varphi(t, t_0)$  ovisi o geometriji poprečnog presjeka i srednjem polumjeru presjeka  $h_m$  a očitava se iz Priloga 9., za  $t = 28$  dana i  $h_m = 15 \text{ cm}$ , te suhe uvjete okoliša  $\Rightarrow \varphi(t, t_0) = 2.5$

- proračunski modul elastičnosti betona za dugotrajno djelovanje:

$$E_{cm} = 30471.576 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{ceff} = \frac{E_{cm}}{1.0 + \varphi(\infty, t_0)}$$

$$E_{ceff} = \frac{30471.576}{1.0 + 2.5}$$

$$E_{ceff} = 7806.164 \text{ N/mm}^2$$

- omjer modula elastičnosti čelika i betona:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{ceff}}$$

$$\alpha_e = \frac{200000}{7806.164}$$

$$\alpha_e = 22.972$$

- bezdimenzionalni koeficijenti armiranja:

$$\rho_I = 1.965 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{II} = 2.183 \cdot 10^{-3}$$

- koeficijenti za proračun položaja neutralne osi poprečnog presjeka:

$$A_I = \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \frac{d}{h} \cdot \left(1 + A_{s2} \cdot \frac{d_2}{A_{s1} \cdot d}\right), A_2 = 0$$

$$A_I = 22.972 \cdot 1.965 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{18}{20}$$

$$A_I = 0.04$$

$$B_I = \alpha_e \cdot \rho_I \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right), A_2 = 0$$

$$B_I = 22.972 \cdot 1.965 \cdot 10^{-3}$$

$$B_I = 0.045$$

$$A_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot \left(1 + A_{s2} \cdot \frac{d_2}{A_{s1} \cdot d}\right), A_2 = 0$$

$$A_{II} = 22.972 \cdot 2.183 \cdot 10^{-3}$$

$$A_{II} = 0.05$$

$$B_{II} = \alpha_e \cdot \rho_{II} \cdot \left(1 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}}\right), A_2 = 0$$

$$B_{II} = 22.972 \cdot 2.183 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{II} = 0.05$$

$$k_{xI} = \frac{0.5 + A_I}{1 + B_I}$$

$$k_{xI} = \frac{0.5 + 0.04}{1 + 0.045}$$

$$k_{xI} = 0.5167$$

$$k_{xII} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2 \cdot A_{II}}$$

$$k_{xII} = -0.05 + \sqrt{0.05^2 + 2 \cdot 0.05}$$

$$k_{xII} = 0.27$$

- udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba poprečnog presjeka ploče:

za naponsko stanje I:

$$y_{Ig} = k_{xI} \cdot h$$

$$y_{Ig} = 0.5167 \cdot 20$$

$$y_{Ig} = 10.334 \text{ cm}$$

$$y_{Id} = h - y_{Ig}$$

$$y_{Id} = 20 - 10.334$$

$$y_{Id} = 9.66 \text{ cm}$$

za naponsko stanje II:

$$y_{IIg} = k_{xII} \cdot h$$

$$y_{IIg} = 0.27 \cdot 20$$

$$y_{IIg} = 5.4 \text{ cm}$$

$$y_{II d} = h - y_{IIg}$$

$$y_{II d} = 20 - 5.4$$

$$y_{II d} = 14.6 \text{ cm}$$

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje I i II:

$$I_I = \frac{b}{3} \cdot (y_{Id}^3 + y_{Ilg}^3) + (\alpha_e - 1) \cdot [A_{s1} \cdot (d - y_{Ilg})^2 + A_{s2} \cdot (y_{Ilg} - d_2)^2]$$

$$I_I = \frac{100}{3} \cdot (9.66^3 + 10.334^3) + (22.972 - 1) \cdot [3.93 \cdot (18 - 10.334)^2 + 0]$$

$$I_I = 71908.33 \text{ cm}^4$$

$$I_{II} = \frac{b}{3} \cdot y_{IIg}^3 + \alpha_e \cdot A_{s1} \cdot (d - y_{IIg})^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (y_{IIg} - d_2)^2$$

$$I_{II} = \frac{100}{3} \cdot 5.4^3 + 22.972 \cdot 3.93 \cdot (18 - 5.4)^2 + 0$$

$$I_{II} = 19581.646 \text{ cm}^4$$

- statički moment ploštine armature:

$$S_I = A_{s1} \cdot (d - y_{Ilg}) - A_{s2} \cdot (y_{Ilg} - d_2)$$

$$S_I = 3.93 \cdot (18 - 10.334) - 0$$

$$S_I = 30.127 \text{ cm}^3$$

$$S_{II} = A_{s1} \cdot (d - y_{IIg}) - A_{s2} \cdot (y_{IIg} - d_2)$$

$$S_{II} = 3.93 \cdot (18 - 5.4) - 0$$

$$S_{II} = 49.518 \text{ cm}^3$$

#### 4.2.2. Proračun prema graničnom stanju naprezanja

ZA KRATKOTRAJNO DJELOVANJE ( $t = 0$ ):

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U BETONU:
  - Za stanje naprezanja I (prije pojave pukotina)

Za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck}$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = M_g + M_q$$

$$M_{ED} = 14.88 + 4.0$$

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = d - \frac{y_{Ilg}}{3}$$

$$z = 18 - \frac{10.1}{3}$$

$$z = 14.633 \text{ cm}$$

- moment tromosti betonskog presjeka:

$$b = 1\text{m} = 100 \text{ cm}$$

$$h = 20\text{cm}$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I_c = \frac{100 \cdot 20^3}{12}$$

$$I_c = 66666.67 \text{ cm}^4$$

- naprezanje u betonu:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1 = 1888 \text{ kNcm/m}^1$$

$$\sigma_c = \frac{M_{ED} \cdot z}{I_c}$$

$$\sigma_c = \frac{1888 \cdot 14.633}{66666.67}$$

$$\sigma_c = 0.414 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2 = 2.5 \text{ kN/cm}^2$$

$$0.414 \leq 0.6 \cdot 2.5$$

$$0.414 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.5 \text{ kN/cm}^2$$

za kvazistalnu kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck}$$

$$0.414 \leq 0.45 \cdot 2.5$$

$$0.414 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.125 \text{ kN/cm}^2$$

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U ČELIKU:

za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_s \leq 0.8 \cdot f_{yk}$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 14.633 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi:

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1888}{3.93 \cdot 14.633}$$

$$\sigma_s = 32.83 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2 = 50 \text{ kN/cm}^2$$

$$32.83 \leq 0.8 \cdot 50$$

$$32.83 \text{ kN/cm}^2 \leq 40 \text{ kN/cm}^2$$

- za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem:

$$\sigma_s \leq 1.0 \cdot f_{yk}$$

$$\sigma_s = 32.83 \text{ kN/cm}^2$$

$$32.83 \leq 1.0 \cdot 50$$

$$32.83 \text{ kN/cm}^2 \leq 50 \text{ kN/cm}^2$$

- Za stanje naprezanja II (raspucali presjek)

Za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck}$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = d - \frac{y_{IIg}}{3}$$

$$z = 18 - \frac{3.1}{3}$$

$$z = 16.966 \text{ cm}$$

- moment tromosti betonskog presjeka:

$$I_c = 66666.67 \text{ cm}^4$$

- naprezanje u betonu:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1 = 1888 \text{ kNcm/m}^1$$

$$\sigma_c = \frac{M_{ED} \cdot z}{I_c}$$

$$\sigma_c = \frac{1888 \cdot 16.966}{66666.67}$$

$$\sigma_c = 0.48 \text{ kN/cm}^2$$

$$0.48 \leq 0.6 \cdot 2.5$$

$$0.48 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.5 \text{ kN/cm}^2$$

za kvazistalnu kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck}$$

$$0.48 \leq 0.45 \cdot 2.5$$

$$0.48 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.125 \text{ kN/cm}^2$$

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U ČELIKU:

za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_s \leq 0.8 \cdot f_{yk}$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 16.966 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi:

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1888}{3.93 \cdot 16.966}$$

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2$$

$$28.315 \leq 0.8 \cdot 50$$

$$28.315 \text{ kN/cm}^2 \leq 40 \text{ kN/cm}^2$$

- za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem:

$$\sigma_s \leq 1.0 \cdot f_{yk}$$

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2$$

$$28.315 \leq 1.0 \cdot 50$$

$$28.315 \text{ kN/cm}^2 \leq 50 \text{ kN/cm}^2$$

ZA DUGOTRAJNO DJELOVANJE ( $t = \infty$ ):

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U BETONU:

- Za stanje naprezanja I (prije pojave pukotina)

Za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck}$$

- koeficijent kombinacije za stambene prostore (Prilog 8.):

$$\psi_2 = 0.3$$

- proračunski moment savijanja za dugotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = M_g + \psi_2 \cdot M_q$$

$$M_{ED} = 14.88 + 0.3 \cdot 4.0$$

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = d - \frac{y_{lg}}{3}$$

$$z = 18 - \frac{10.344}{3}$$

$$z = 14.55 \text{ cm}$$

- moment tromosti betonskog presjeka:

$$I_c = 66666.67 \text{ cm}^4$$

- naprezanje u betonu:

$$\sigma_c = \frac{M_{ED} \cdot z}{I_c}$$

$$\sigma_c = \frac{1608 \cdot 14.55}{66666.67}$$

$$\sigma_c = 0.35 \text{ kN/cm}^2$$

$$0.35 \leq 0.6 \cdot 2.5$$

$$0.35 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.5 \text{ kN/cm}^2$$

za kvazistalnu kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck}$$

$$0.35 \leq 0.45 \cdot 2.5$$

$$0.35 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.125 \text{ kN/cm}^2$$

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U ČELIKU:

za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_s \leq 0.8 \cdot f_{yk}$$

- proračunski moment savijanja za dugotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$



- krak unutarnjih sila:

$$z = 14.55 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi:

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1608}{3.93 \cdot 14.55}$$

$$\sigma_s = 28.11 \text{ kN/cm}^2$$

$$28.11 \leq 0.8 \cdot 50$$

$$28.11 \text{ kN/cm}^2 \leq 40 \text{ kN/cm}^2$$

- za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem:

$$\sigma_s \leq 1.0 \cdot f_{yk}$$

$$\sigma_s = 28.11 \text{ kN/cm}^2$$

$$28.11 \leq 1.0 \cdot 50$$

$$28.11 \text{ kN/cm}^2 \leq 50 \text{ kN/cm}^2$$

- za stanje naprezanja II (raspucali presjek)

Za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck}$$

- proračunski moment savijanja za dugotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = d - \frac{y_{IIg}}{3}$$

$$z = 18 - \frac{5.4}{3}$$

$$z = 16.2 \text{ cm}$$

- moment tromosti betonskog presjeka:

$$I_c = 66666.67 \text{ cm}^4$$

- naprezanje u betonu:

$$\sigma_c = \frac{M_{ED} \cdot z}{I_c}$$

$$\sigma_c = \frac{1608 \cdot 16.2}{66666.67}$$

$$\sigma_c = 0.39 \text{ kN/cm}^2$$

$$0.39 \leq 0.6 \cdot 2.5$$

$$0.39 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.5 \text{ kN/cm}^2$$

za kvazistalnu kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_c \leq 0.45 \cdot f_{ck}$$

$$0.39 \leq 0.45 \cdot 2.5$$

$$0.39 \text{ kN/cm}^2 \leq 1.125 \text{ kN/cm}^2$$

- GRANIČNO STANJE NAPREZANJA U ČELIKU:

za rijetku kombinaciju opterećenja:

$$\sigma_s \leq 0.8 \cdot f_{yk}$$

- proračunski moment savijanja za dugotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 16.2 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi:

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1608}{3.93 \cdot 16.2}$$

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2$$

$$25.25 \leq 0.8 \cdot 50$$

$$25.25 \text{ kN/cm}^2 \leq 40 \text{ kN/cm}^2$$

- za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem:

$$\sigma_s \leq 1.0 \cdot f_{yk}$$

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2$$

$$25.25 \leq 1.0 \cdot 50$$

$$25.25 \text{ kN/cm}^2 \leq 50 \text{ kN/cm}^2$$

### 4.2.3. Proračun pukotina

- minimalna površina armature za ograničenje širine pukotina:

$$A_{Smin} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

- koeficijent umanjenja kojim uzima u obzir nelinearna raspodjelu naprezanja po visini presjeka pri pojavi prve pukotine:

$$\text{za savijanje} \Rightarrow k_c = 0.4$$

- koeficijent umanjenja kojim se uzima u obzir nelinearna raspodjela vlačnog naprezanja po presjeku izazvanog temperaturnim promjenama i skupljanjem unutar elementa:

$$k=1$$

za kratkotrajno djelovanje:

- vlačna površina presjeka neposredno prije pojave pukotina:

$$A_{ct} = (h - x) \cdot b$$

$$A_{ct} = 9.9 \cdot 100$$

$$A_{ct} = 990 \text{ cm}^2$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 16.966 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1 = 1888 \text{ kNcm/m}^1$$

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1888}{3.93 \cdot 16.966}$$

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2$$

- srednja vlačna čvrstoća betona:

očita se iz Priloga 3. sa karakterističnim vrijednostima betona:

$$\text{za C25/30} \Rightarrow f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2,$$

$$f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{ct,eff} = f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

- minimalna površina armature:

$$A_{Smin} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$A_{Smin} = 0.4 \cdot 1 \cdot 0.26 \cdot \frac{990}{28.315} = 3.636 \text{ cm}^2$$

za dugotrajno djelovanje:

- vlačna površina presjeka neposredno prije pojave pukotina:

$$A_{ct} = (h - x) \cdot b$$

$$A_{ct} = 9.66 \cdot 100$$

$$A_{ct} = 966.66 \text{ cm}^2$$

- proračunski moment savijanja za dugotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 16.2 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1 = 1608 \text{ kNcm/m}^1$$

$$\sigma_s = \frac{M_{ED}}{A_{s1} \cdot z}$$

$$\sigma_s = \frac{1608}{3.93 \cdot 16.2}$$

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2$$

- srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ct,eff} = f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

- minimalna površina armature:

$$A_{Smin} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

$$A_{Smin} = 0.4 \cdot 1 \cdot 0.26 \cdot \frac{966.66}{25.25} = 3.981 \text{ cm}^2$$

## KONTROLA PUKOTINA BEZ PRORAČUNA:

- maksimalni promjer armature:

$$\phi_s = \phi_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \cdot \frac{k_c \cdot h_{cr}}{2 \cdot (h - d)} [mm]$$

- $\phi_s^*$  promjer armature koji se određuje prema tablici (Prilog 10.); za  $\sigma_s = 280 \text{ kN/cm}^2$  i  $w_k = 0.3 \text{ mm}$  vrijedi  $\phi_s^* = 12 \text{ mm}$

- $k_c = 0.4$

- Kritična visina presjeka:

$$h_{cr} = \frac{1}{2} \cdot h = \frac{1}{2} \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

$$\phi_s = 12 \cdot \frac{2.6}{2.6} \cdot \frac{0.4 \cdot 100}{2 \cdot (200 - 180)} = 12 \text{ mm}$$

$$10 \text{ mm} \leq 12 \text{ mm} \Rightarrow \text{unutar granice}$$

## PRORAČUN ŠIRINE PUKOTINA:

- karakteristična širina pukotina:

$$W_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$W_k \leq W_g$$

$$W_g \Rightarrow \text{granična širina pukotina}$$

$$W_g = 0.3 - 0.4 \Rightarrow \text{ovdje se uzima } W_g = 0.3 \text{ mm}$$

Za kratkotrajno djelovanje:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ceff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \leq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 1888 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 14.633 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2$$

- koeficijent trajanja opterećenja:

$$k_t = 0.6$$

- srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ct,eff} = f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

- udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba:

$$x = 3.1 \text{ cm}$$

- djelotvorna vlačna površina betona:

$$A_{c,eff} = \frac{h-x}{3} \cdot b = \frac{20-3.1}{3} \cdot 100 = 563.33 \text{ cm}^2$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{3.93}{563.33} = 6.976 \cdot 10^{-3}$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\alpha_e = 6.563$$

- modul elastičnosti armature:

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ceff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \leq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{28.315 - 0.6 \cdot \frac{0.26}{6.976 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 + 6.563 \cdot 6.976^{-3})}{20000} \leq 0.6 \cdot \frac{28.315}{20000}$$

$$2.464 \cdot 10^{-4} \leq 8.494 \cdot 10^{-4}$$

- maksimalni razmak pukotina:

$$S_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}}$$

- koeficijent prionljivosti:

$$k_1 = 0.8$$

- koeficijent raspodjele deformacija:

$$k_2 = 0.5$$

$$k_3 = 3.4$$

$$k_4 = 0.425$$

- zaštitni sloj armature:

$$c = 15 \text{ mm}$$

- promjer šipki armature:

$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\rho_{eff} = 6.976 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{r,max} = 3.4 \cdot 1.5 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \frac{1.0}{6.976 \cdot 10^{-3}}$$

$$S_{r,max} = 29.47 \text{ cm} = 294.69 \text{ mm}$$

- karakteristična širina pukotina:

$$W_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$W_k = 29.47 \cdot 2.464 \cdot 10^{-4} = 7.26 \cdot 10^{-3} \text{ cm} = 0.0726 \text{ mm}$$

- granična širina pukotina:

$$W_g = 0.3 \text{ mm}$$

$$0.072 \text{ mm} < 0.3 \text{ mm} \Rightarrow \text{unutar granice}$$

Za dugotrajno djelovanje:

- proračunski moment savijanja za kratkotrajno djelovanje:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1$$

- krak unutarnjih sila:

$$z = 16.2 \text{ cm}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2$$

- koeficijent trajanja opterećenja:

$$k_t = 0.4$$

- srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ct,eff} = f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

- udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba:

$$x = 5.4 \text{ cm}$$

- djelotvorna vlačna površina betona:

$$A_{c,eff} = \frac{h-x}{3} \cdot b = \frac{20-5.4}{3} \cdot 100 = 486.66 \text{ cm}^2$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{3.93}{486.66} = 8.075 \cdot 10^{-3}$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\alpha_e = 22.972$$

- modul elastičnosti armature:

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ceff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \leq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{25.25 - 0.4 \cdot \frac{0.26}{8.075 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 + 22.972 \cdot 8.075 \cdot 10^{-3})}{20000} \leq 0.6 \cdot \frac{25.25}{20000}$$

$$4.99 \cdot 10^{-4} \leq 7.575 \cdot 10^{-4}$$

- maksimalni razmak pukotina:

$$S_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{eff}}$$

- koeficijent prionljivosti:

$$k_1 = 0.8$$

- koeficijent raspodjele deformacija:

$$k_2 = 0.5$$

$$k_3 = 3.4$$

$$k_4 = 0.425$$

- zaštitni sloj armature:

$$c = 15 \text{ mm}$$

- promjer šipki armature:

$$\phi = 10 \text{ mm}$$



- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\rho_{eff} = 8.075 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{r,max} = 3.4 \cdot 1.5 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \frac{1.0}{8.075 \cdot 10^{-3}}$$

$$S_{r,max} = 26.15 \text{ cm} = 261.52 \text{ mm}$$

- karakteristična širina pukotina:

$$W_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$W_k = 26.15 \cdot 4.99 \cdot 10^{-4} = 0.013 \text{ cm} = 0.13 \text{ mm}$$

- granična širina pukotina:

$$W_g = 0.3 \text{ mm}$$

$$0.13 \text{ mm} < 0.3 \text{ mm} \Rightarrow \text{unutar granice}$$

#### 4.2.4. Proračun progiba

##### PROVJERA PROGIBA BEZ PRORAČUNA

Za kratkotrajno djelovanje:

- koeficijent ovisan o strukturi elementa

$$K = 1$$

- referentni koeficijent armiranja

$$\rho_0 = 10^{-3} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

$$\rho_0 = 10^{-3} \cdot \sqrt{25}$$

$$\rho_0 = 5 \cdot 10^{-3}$$

- koeficijent armiranja vlačne armature

$$\rho = \rho_{II} = 2.183 \cdot 10^{-3}$$

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2 = 283.15 \text{ N/mm}^2$$

- procjena omjera duljine raspona i statičke visine poprečnog presjeka (granična vitkost ploče):

$$\frac{L}{d} = K \cdot \left[ 11 + 1.5 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 3.2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \text{ za } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{L}{d} = 1 \cdot \left[ 11 + 1.5 \cdot \sqrt{25} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2.183 \cdot 10^{-3}} + 3.2 \cdot \sqrt{25} \cdot \left( \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2.183 \cdot 10^{-3}} - 1 \right)^{3/2} \right]$$

$$\frac{L}{d} = 51.63 \Rightarrow \frac{L}{d} \cdot \frac{310}{\sigma_s} = 51.63 \cdot \frac{310}{283.15} = 56.528$$

- vitkost ploče:

$$\frac{L}{d} = \frac{400}{18} = 22.22$$

$$22.22 < 56.528 \Rightarrow \text{unutar granice}$$

Za dugotrajno djelovanje:

- naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine:

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2 = 252.5 \text{ N/mm}^2$$

- procjena omjera duljine raspona i statičke visine poprečnog presjeka (granična vitkost ploče):

$$\frac{L}{d} \cdot \frac{310}{\sigma_s} = 51.63 \cdot \frac{310}{252.5} = 63.38$$

- vitkost ploče:

$$\frac{L}{d} = \frac{400}{18} = 22.22$$

$$22.22 < 63.38 \Rightarrow \text{unutar granice}$$

PRORAČUN PROGIBA ZA KRATKOTRAJNO DJELOVANJE (t=0)

- moment savijanja na sredini raspona ploče:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1 = 1888 \text{ kNcm}$$

Za stanje naprezanja I (neraspucali presjek):

- sekantni (statički) modul elastičnosti:

$$E_{cm} = 30471.576 \text{ N/mm}^2 = 3047.1576 \text{ kN/cm}^2$$

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje I:

$$I_I = 68051.11 \text{ cm}^4$$

- zakrivljenost zbog momenta za stanje naprezanja I:

$$\frac{1}{r_{mI}} = \frac{M_{Ed}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\frac{1}{r_{mI}} = \frac{1888}{68051.11 \cdot 3047.1576}$$

$$\frac{1}{r_{mI}} = 9.104 \cdot 10^{-6} \text{ 1/cm}$$

- totalna zakrivljenost za stanje naprezanja I:

$$\frac{1}{r_{totI}} = 9.104 \cdot 10^{-6} \text{ 1/cm}$$

Za stanje naprezanja II (raspucali presjek):

- naprezanje za stanje naprezanja II:

$$\sigma_s = 28.315 \text{ kN/cm}^2$$

- modul elastičnosti armature:

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

- relativna deformacija za stanje naprezanja II:

$$\varepsilon_{sI} = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_{sI} = \frac{28.315}{20000}$$

$$\varepsilon_{sI} = 1.415 \cdot 10^{-3}$$

- udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba poprečnog presjeka ploče za stanje naprezanja II:

$$y_{IIg} = 3.1 \text{ cm}$$

- zakrivljenost zbog momenta za stanje naprezanja II:

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{\varepsilon_{sI}}{d - y_{IIg}}$$

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{1.415 \cdot 10^{-3}}{18 - 3.1}$$

$$\frac{1}{r_{mII}} = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

- totalna zakrivljenost za stanje naprezanja II:

$$\frac{1}{r_{totII}} = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

- srednja vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ct,m} = 2.6 \text{ N/mm}^2 = 0.26 \text{ kN/cm}^2$$

- moment savijanja pri kojem dolazi do pojave prve pukotine:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{cr} = \frac{0.26 \cdot 100 \cdot 20^2}{6}$$

$$M_{cr} = 1733.33 \text{ kNcm}$$

- moment savijanja na sredini raspona ploče:

$$M_{ED} = 18.88 \text{ kNm/m}^1 = 1888 \text{ kNcm/m}^1$$

- koeficijent trajanja opterećenja:

$$\beta = 1$$

- koeficijent raspodjele zakrivljenosti:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - \beta \cdot \left( \frac{M_{cr}}{M_{ED}} \right)^2$$

$$\zeta = 1 - 1 \cdot \left( \frac{1733.33}{1888} \right)^2$$

$$\zeta = 0.157$$

- Konačna zakrivljenost za kratkotrajno djelovanje:

$$\frac{1}{r} = (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_{totI}} + \zeta \cdot \frac{1}{r_{totII}}$$

$$\frac{1}{r} = (1 - 0.157) \cdot 9.104 \cdot 10^{-6} + 0.157 \cdot 9.5 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{1}{r} = 2.258 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

- Progib za kratkotrajno djelovanje:

$$k = \frac{5}{48} \text{ (Prilog 12.)}$$

$$v = k \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r}$$

$$v = \frac{5}{48} \cdot 400^2 \cdot 2.258 \cdot 10^{-5}$$

$$v = 0.376 \text{ cm}$$

$$v_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{400}{250} = 1.6 \text{ cm}$$

$$0.37 \text{ cm} < 1.6 \text{ cm} \Rightarrow \text{unutar granice}$$

#### PRORAČUN PROGIBA ZA DUGOTRAJNO DJELOVANJE (t=0)

- moment savijanja na sredini raspona ploče:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1 = 1608 \text{ kNcm}$$

- srednji polumjer presjeka:

$$h_0 = 20 \text{ cm}$$

- proračunski modul elastičnosti betona za dugotrajno djelovanje:

$$E_{ceff} = 8706.164 \text{ N/mm}^2 = 870.616 \text{ kN/cm}^2$$

Za stanje naprezanja I (neraspucali presjek):

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje I:

$$I_I = 71908.33 \text{ cm}^4$$

- zakrivljenost zbog momenta za stanje naprezanja I:

$$\frac{1}{r_{ml}} = \frac{M_{Ed}}{E_{ceff} \cdot I_I}$$

$$\frac{1}{r_{ml}} = \frac{1608}{870.616 \cdot 71908.33}$$

$$\frac{1}{r_{ml}} = 2.568 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

- konačna vrijednost relativne deformacije do skupljanja betona se očitava iz Priloga 13.:

$$\varepsilon_{cs\infty} = -0.5\%$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\alpha_e = 22.972$$

- statički moment ploštine armature:

$$S_I = 30.127 \text{ cm}^3$$

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje I:

$$I_I = 71908.33 \text{ cm}^4$$

- zakrivljenost zbog skupljanja za stanje naprezanja I:

$$\frac{1}{r_{csl}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S_I}{I_I}$$

$$\frac{1}{r_{csl}} = \frac{5^{-4} \cdot 22.972 \cdot 30.127}{71908.33}$$

$$\frac{1}{r_{csl}} = 4.812 \cdot 10^{-6} \text{ 1/cm}$$

- totalna zakrivljenost za stanje naprezanja I:

$$\frac{1}{r_{totI}} = \frac{1}{r_{mI}} + \frac{1}{r_{csl}} = 2.568 \cdot 10^{-5} + 4.812 \cdot 10^{-6} = 3.049 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

Za stanje naprezanja II (raspucali presjek):

- naprezanje za stanje naprezanja II:

$$\sigma_s = 25.25 \text{ kN/cm}^2$$

- modul elastičnosti armature:

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ kN/cm}^2$$

- relativna deformacija za stanje naprezanja II:

$$\varepsilon_{sI} = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_{sI} = \frac{25.25}{20000}$$

$$\varepsilon_{sI} = 1.262 \cdot 10^{-3}$$

- udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba poprečnog presjeka ploče za stanje naprezanja II:

$$y_{IIg} = 5.4 \text{ cm}$$

- zakrivljenost zbog momenta za stanje naprezanja II:

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - y_{IIg}}$$

$$\frac{1}{r_{mII}} = \frac{1.262 \cdot 10^{-3}}{18 - 5.4}$$

$$\frac{1}{r_{mII}} = 1.00 \cdot 10^{-4} \text{ 1/cm}$$

- konačna vrijednost relativne deformacije do skupljanja betona (Prilog 13):

$$\varepsilon_{cs\infty} = -0.5\text{‰}$$

- djelotvorni koeficijent armiranja:

$$\alpha_e = 22.972$$

- statički moment ploštine armature:

$$S_{II} = 49.518 \text{ cm}^3$$

- moment tromosti presjeka za naponsko stanje II:

$$I_{II} = 19581.646 \text{ cm}^4$$

- zakrivljenost zbog skupljanja za stanje naprezanja II:

$$\frac{1}{r_{csII}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S_{II}}{I_{II}}$$

$$\frac{1}{r_{csI}} = \frac{5^{-4} \cdot 22.972 \cdot 49.518}{19581.646}$$

$$\frac{1}{r_{csI}} = 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/cm}$$

- totalna zakrivljenost za stanje naprezanja II:

$$\frac{1}{r_{totII}} = \frac{1}{r_{mII}} + \frac{1}{r_{csII}} = 1.00 \cdot 10^{-4} + 2.9 \cdot 10^{-5} = 1.29 \cdot 10^{-4} \text{ 1/cm}$$

- moment savijanja pri kojem dolazi do pojave prve pukotine:

$$M_{cr} = 1733.33 \text{ kNcm} = 17.33 \text{ kNm}$$

- moment savijanja na sredini raspona ploče:

$$M_{ED} = 16.08 \text{ kNm/m}^1 = 1608 \text{ kNcm}$$

- koeficijent trajanja opterećenja:

$$\beta = 0.5$$

- koeficijent raspodjele zakrivljenosti:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2 = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{ED}}\right)^2$$

$$\zeta = 1 - 0.5 \cdot \left(\frac{17.33}{16.08}\right)^2$$

$$\zeta = 0.419$$

- Konačna zakrivljenost za dugotrajno djelovanje:

$$\frac{1}{r} = (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_{totI}} + \zeta \cdot \frac{1}{r_{totII}}$$

$$\frac{1}{r} = (1 - 0.419) \cdot 3.049 \cdot 10^{-5} + 0.419 \cdot 1.29 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{1}{r} = 7.17 \cdot 10^{-5} 1/cm$$

- Progib za dugotrajno djelovanje:

- $k = \frac{5}{48}$  (Prilog 12.)

$$v = k \cdot L^2 \cdot \frac{1}{r}$$

$$v = \frac{5}{48} \cdot 400^2 \cdot 7.17 \cdot 10^{-5}$$

$$v = 1.196 \text{ cm}$$

$$v_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{400}{250} = 1.6 \text{ cm}$$

$$1.19 \text{ cm} < 1.6 \text{ cm unutar granica}$$



## 5. Zaključak

Kako je već prije opisano, u teorijskom dijelu rada objašnjene su metode graničnog stanja nosivosti (GSN) i uporabljivosti (GSU). Kod metode graničnog stanja nosivosti detaljno je opisano stanje sloma i postupak dimenzioniranja na savijanje ab konstrukcije, a kod metode graničnog stanja uporabljivosti opisana je svaka od pojedinih vrsta metode GSU i mjere sprječavanja mogućih posljedica koje nastaju njihovim prekoračenjem. Zatim je u računskom dijelu rada kroz primjer ab ploče proveden postupak dimenzioniranja na savijanje (analiza opterećenja zadanih u zadatku, statički proračun ploče i dimenzioniranje), i proračun kroz svaku od vrsta metoda GSU (ograničenje naprezanja, pukotina i progiba).

U proračunu graničnog stanja nosivosti za zadanu ab ploču duljine 4m i debljine 20cm opterećenu stalnim i promjenjivim opterećenjem, kroz analizu opterećenja dobivena je ukupna vrijednost računskog opterećenja od  $q_{Ed} = 13.044 \text{ kN/m}^2$  i proveden je statički proračun reznih sila te je dobivena maksimalna vrijednost poprečne sile od  $V_{Ed} = 26.088 \text{ kN/m}^1$  i maksimalni moment savijanja također od  $M_{max,Ed} = 26.088 \text{ kNm/m}^1$  mjerodavan za dimenzioniranje. U postupku dimenzioniranja proračunom je dobivena površina armature  $A_{s1} = 3.45 \text{ cm}^2$ , te je iz armaturene tablice (Prilog 6.) za ovu dobivenu vrijednost odabrana glavna armatura površine  $A_s = 3.93 \text{ cm}^2$  i profila  $\phi 10 \text{ mm}$  na razmaku od  $20 \text{ cm}$ , time je dobivena količina armature koja osigurava zadanu ab ploču od prekomjernih deformacija i sloma zbog momenta savijanja. Za sprječavanje trenutnog sloma presjeka u vlačnoj zoni ab ploče izračunata je površina minimalne armature  $A_{smin} = 2.73 \text{ cm}^2$ .

U proračunu graničnog stanja naprezanja za kratkotrajna i dugotrajna djelovanja dokazano je da su sve dobivene vrijednosti naprezanja manje od dopuštenih za rijetku kombinaciju opterećenja i kvazistalnu kombinaciju opterećenja kod betona, te rijetku kombinaciju opterećenja i naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem za čelik, odnosno dobiveni su slijedeći odnosi:

Tablica 1. Rezultati graničnog stanja naprezanja

	BETON		ČELIK	
	Za rijetku kombinaciju opterećenja ( $kN/cm^2$ )	Za kvazistalnu kombinaciju opterećenja ( $kN/cm^2$ )	Za rijetku kombinaciju opterećenja ( $kN/cm^2$ )	Za naprezanja izazvana indirektnim djelovanjem ( $kN/cm^2$ )
Za kratkotrajna djelovanje ( $t = 0$ )	$0.414 \leq 1.5$	$0.414 \leq 1.125$	$32.83 \leq 40$	$32.83 \leq 50$
Za dugotrajno djelovanje ( $t = \infty$ )	$0.351 \leq 1.5$	$0.351 \leq 1.125$	$28.11 \leq 40$	$28.11 \leq 50$

Što znači da za dimenzioniranu ab ploču nema prekomjernih naprezanja koja bi narušila uporabljivost elementa.

U ograničenju širine pukotina izračunata je minimalna površina armature za ograničenje širine pukotina, provedena je kontrola maksimalnog promjera armature (kontrola pukotina bez proračuna) te je proveden proračun širine pukotina. Dobivena širina pukotina za kratkotrajno djelovanje je  $W_k = 0.072 \text{ mm}$ , a za dugotrajno djelovanje je  $W_k = 0.13 \text{ mm}$  što su manje vrijednosti od granične širine pukotina  $W_g = 0.3 \text{ mm}$ . Što se tiče posljedica raspucavanja ab konstrukcija smatra se da pukotine manje od  $0.3 \text{ mm}$  nemaju značajan utjecaj na koroziju armature, niti narušavaju estetiku konstrukcije, i stoga se smatraju prihvatljivima.

Graničnim stanjem deformacija proveden je proračun progiba za kratkotrajna i dugotrajna djelovanja i dobivene su vrijednosti progiba od  $v = 0.376 \text{ cm}$  za kratkotrajno djelovanje, i  $v = 1.196 \text{ cm}$  za dugotrajno djelovanje što je manje od dozvoljenog progiba koji iznosi  $v_{lim} = 1.6 \text{ cm}$ . Prema tome, dobivene deformacije zbog progiba su prihvatljive i ne uzrokuju oštećenje ab ploče niti ugrožavaju njezinu uporabljivost.



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, VALENTINA ŽERJAVIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPORBENI PRORAČUN ARMIRANOBETONSKE PLOČE PREMA GRANICOM STANJU NOSIVOSTI (SSN) I UPORABLIVOSTI (SSU) (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

V. Žerjavić

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, VALENTINA ŽERJAVIĆ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPORBENI PRORAČUN ARMIRANOBETONSKE PLOČE PREMA GRANICOM STANJU NOSIVOSTI (SSN) I UPORABLIVOSTI (SSU) (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

V. Žerjavić

(vlastoručni potpis)

## 6. Literatura

- [1] Hrvatski sabor: Zakon o gradnji, Narodne Novine 153/13, 12. prosinca 2013.
- [2] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva: Tehnički propis za betonske konstrukcije, Narodne novine 139/2009, 20. studenog 2009.
- [3] I. Tomičić: Betonske konstrukcije, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1996.
- [4] I. Podhorsky: Nosive konstrukcije I, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2008.
- [5] I. Gukov: Granična stanja uporabljivosti betonskih konstrukcija, interna skripta, Zagreb 2012.
- [6] J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije II – Riješeni primjeri, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – građevinski fakultet, Zagreb 2006.
- [7] I. Gukov: Betonske konstrukcije I - predavanja, interna skripta, Zagreb 2010.
- [8] The European Union Per Regulation 305/2011: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC, EN 1992-1-1 (2004).

## Popis slika

- Slika 2.1. Armiranobetonska greda u kojoj je beton naprezan na tlak a čelik na vlak. Izvor: I. Gukov: Betonske konstrukcije I - predavanja, interna skripta, Zagreb 2010. .... 7
- Slika 2.2. Računski dijagram betona. Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1996. .... 9
- Slika 2.3. Računski dijagram čelika. Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1996. .... 10
- Slika 2.4. Jednostruko armirani pravokutni presjek u vlačnoj zoni: Izvor: I. Tomičić: Betonske konstrukcije, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1996. .... 10
- Slika 3.5. Dijagram ovisnosti momenta savijanja i širine pukotina  $M-W_k$ . Izvor: I. Gukov: Granična stana uporabljivosti betonskih konstrukcija, interna skripta, Zagreb 2012. .... 18

## Prilozi

Prilog 1. Parcijalni koeficijenti sigurnosti

Djelovanje	Parcijalni koeficijenti sigurnosti $\gamma_F$		
	Vrsta djelovanja		
	Stalno $\gamma_G$	Promjenjivo $\gamma_Q$	Prednapinjanje $\gamma_P$
Nepovoljno	1.35	1.5	1.0 ili 1.1
Povoljno	1.0	0	1.0 ili 0.9

Prilog 2. Karakteristična čvrstoća betona

Razredi betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60

Prilog 3. Srednja tlačna čvrstoća betona

Klasa betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ct,m}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1

Prilog 4. Statički utjecaji i deformacije grede jednog raspona

		Oslonačke reakcije $R$	Ekstremne vrednosti momenata $M_{max}$	Uglovi nagiba na krajevima $\Theta$	Najveći ugiš $f_{max}$
1.1		$A = B = \frac{P}{2}$	$M_C = \frac{Pl}{4}$	$\Theta_A = \Theta_B = \frac{Pl^2}{16EI}$	$f_C = \frac{Pl^3}{48EI}$
1.2		$A = P \frac{b}{l}$ $B = P \frac{a}{l}$	$M_D = P \frac{ab}{l}$	$\Theta_A = \frac{Pab}{6EI} (l+b)$ $\Theta_B = \frac{Pab}{6EI} (l+a)$	$f_C = \frac{Pab}{27EI} \sqrt{3b(l+a)^3}$ $x_C = l - \sqrt{\frac{b}{3}(l+a)}$ , za $a < b$ $f_C = \frac{Pab}{27EI} \sqrt{3a(l+b)^3}$ $x_C = \sqrt{\frac{a}{3}(l+b)}$ , za $a > b$
1.3		$A = B = P$	$M_D = Pa$	$\Theta_A = \Theta_B = \frac{Pa}{2EI} (l-a)$	$f_C = \frac{Pa}{24EI} (3l^2 - 4a^3)$ $x_C = \frac{l}{2}$
1.4		$A = \frac{P}{l} (2b+c)$ $B = \frac{P}{l} (2a+c)$	$M_{D1} = \frac{Pa}{l} (2b+c)$ , za $a > b$ $M_{D2} = \frac{Pb}{l} (2a+c)$ , za $a < b$	$\Theta_A = \frac{P(2b+c)}{6EI} k_1$ $k_1 = a(l+b) + c(a+b)$ $\Theta_B = \frac{P(2a+c)}{6EI} k_2$ $k_2 = b(l+a) + c(a+b)$	
1.5		$A = B = \frac{P}{2} (n-1)$	$M_C = \frac{Pl}{8} \frac{n^2-1}{n}$ , za n neparno $M_C = \frac{Pl}{8} n$ , za n parno	$\Theta_A = \Theta_B = \frac{Pl^2}{24EI} \frac{n^2-1}{n}$	$f_C = \frac{Pl^3}{384EI} \times$ $\frac{(n^2-1)(5n^2+1)}{n^3}$ , za n neparno $f_C = \frac{Pl^3}{384EI} \frac{5n^2-4}{n}$ , za n parno
1.6		$A = B = \frac{pl}{2}$	$M_C = \frac{pl^2}{8}$ $x_C = \frac{l}{2}$	$\Theta_A = \Theta_B = \frac{pl^3}{24EI}$	$f_C = \frac{5pl^4}{384EI}$ $x_C = \frac{l}{2}$
1.7		$A = \frac{3}{8} pl$ $B = \frac{pl}{8}$	$M_D = \frac{9}{128} pl^2$ $x_D = \frac{3}{8} l$	$\Theta_A = \frac{3pl^3}{128EI}$ $\Theta_B = \frac{7pl^3}{384EI}$	

Prilog 5. Dimenzioniranje AB pravokutnih presjeka

$\varepsilon_{c2}$ (‰)	$\varepsilon_{s1}$ (‰)	$\xi=x/d$	$\zeta=z/d$	$\omega_1$	$\mu_{sd}$	$k_d$
-0.1	20.0	0.005	0.998	0.000	0.000	$\infty$
-0.2	20.0	0.010	0.997	0.001	0.001	31.623
-0.3	20.0	0.015	0.995	0.002	0.002	22.361
-0.4	20.0	0.020	0.993	0.003	0.003	18.257
-0.5	20.0	0.024	0.992	0.005	0.005	14.142
-0.6	20.0	0.029	0.990	0.007	0.007	11.952
-0.7	20.0	0.034	0.988	0.009	0.009	10.541
-0.8	20.0	0.038	0.987	0.011	0.011	9.535
-0.9	20.0	0.043	0.985	0.014	0.014	8.452
-1.0	20.0	0.048	0.983	0.017	0.017	7.670
-1.1	20.0	0.052	0.982	0.020	0.019	7.255
-1.2	20.0	0.057	0.980	0.023	0.023	6.594
-1.3	20.0	0.061	0.978	0.026	0.026	6.202
-1.4	20.0	0.065	0.977	0.030	0.029	5.872
-1.5	20.0	0.070	0.975	0.033	0.033	5.505
-1.6	20.0	0.074	0.973	0.037	0.036	5.270
-1.7	20.0	0.078	0.971	0.040	0.039	5.064
-1.8	20.0	0.083	0.969	0.044	0.043	4.822
-1.9	20.0	0.087	0.968	0.048	0.046	4.663
-2.0	20.0	0.091	0.966	0.052	0.050	4.472
-2.1	20.0	0.095	0.964	0.055	0.053	4.344
-2.2	20.0	0.099	0.962	0.059	0.056	4.226
-2.3	20.0	0.103	0.960	0.062	0.060	4.082
-2.4	20.0	0.107	0.959	0.066	0.063	3.984
-2.5	20.0	0.111	0.957	0.069	0.066	3.892
-2.6	20.0	0.115	0.955	0.073	0.069	3.807
-2.7	20.0	0.119	0.953	0.076	0.073	3.701
-2.8	20.0	0.123	0.951	0.080	0.076	3.627
-2.9	20.0	0.127	0.949	0.083	0.079	3.558
-3.0	20.0	0.130	0.947	0.086	0.081	3.514
-3.1	20.0	0.134	0.945	0.089	0.084	3.450
-3.2	20.0	0.138	0.943	0.093	0.088	3.371
-3.3	20.0	0.142	0.942	0.096	0.091	3.315
-3.4	20.0	0.145	0.940	0.099	0.093	3.279
-3.5	20.0	0.149	0.938	0.103	0.096	3.227
-3.5	19.5	0.152	0.937	0.105	0.098	3.194
-3.5	19.0	0.156	0.935	0.107	0.100	3.162
-3.5	18.5	0.159	0.934	0.109	0.102	3.131
-3.5	18.0	0.163	0.932	0.112	0.105	3.086
-3.5	17.5	0.167	0.931	0.115	0.107	3.057
-3.5	17.0	0.171	0.929	0.118	0.109	3.029
-3.5	16.5	0.175	0.927	0.120	0.112	2.988
-3.5	16.0	0.179	0.926	0.123	0.114	2.962
-3.5	15.5	0.184	0.923	0.127	0.117	2.924
-3.5	15.0	0.189	0.921	0.130	0.120	2.887
-3.5	14.5	0.194	0.919	0.133	0.123	2.851
-3.5	14.0	0.200	0.917	0.138	0.126	2.817
-3.5	13.5	0.206	0.914	0.142	0.130	2.774
-3.5	13.0	0.212	0.912	0.146	0.133	2.742
-3.5	12.5	0.219	0.909	0.151	0.137	2.702
-3.5	12.0	0.226	0.906	0.156	0.141	2.663
-3.5	11.5	0.233	0.903	0.160	0.145	2.626
-3.5	11.0	0.241	0.900	0.166	0.149	2.591
-3.5	10.5	0.250	0.896	0.172	0.154	2.548
-3.5	10.0	0.259	0.892	0.178	0.159	2.508
-3.5	9.5	0.269	0.888	0.185	0.164	2.469
-3.5	9.0	0.280	0.884	0.193	0.170	2.425
-3.5	8.5	0.292	0.879	0.201	0.177	2.377
-3.5	8.0	0.304	0.874	0.209	0.183	2.338
-3.5	7.5	0.318	0.868	0.219	0.190	2.294
-3.5	7.0	0.333	0.861	0.229	0.197	2.253
-3.5	6.5	0.350	0.854	0.241	0.206	2.203
-3.5	6.0	0.368	0.847	0.253	0.214	2.162
-3.5	5.5	0.389	0.838	0.268	0.224	2.113
-3.5	5.0	0.412	0.829	0.283	0.235	2.063
-3.5	4.5	0.438	0.818	0.301	0.247	2.012
-3.5	4.0	0.467	0.806	0.321	0.259	1.965
-3.5	3.5	0.500	0.792	0.344	0.272	1.917
-3.5	3.0	0.538	0.776	0.370	0.287	1.867
-3.5	2.5	0.583	0.757	0.401	0.304	1.814
-3.5	2.0	0.636	0.735	0.438	0.322	1.762
-3.5	1.5	0.700	0.709	0.482	0.342	1.710
-3.5	1.0	0.778	0.676	0.535	0.362	1.662
-3.5	0.5	0.875	0.636	0.602	0.383	1.616
-0.1	10.0	0.010	0.997	0.000	0.000	$\infty$
-0.2	10.0	0.020	0.993	0.002	0.002	22.361
-0.3	10.0	0.029	0.990	0.004	0.003	18.257
-0.4	10.0	0.038	0.987	0.006	0.006	12.910

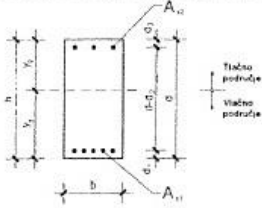
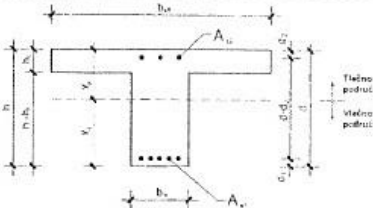
$\varepsilon_{c2}$ (‰)	$\varepsilon_{s1}$ (‰)	$\xi=x/d$	$\zeta=z/d$	$\omega_1$	$\mu_{sd}$	$k_d$
-0.5	10.0	0.048	0.984	0.009	0.009	10.541
-0.6	10.0	0.057	0.980	0.013	0.013	8.771
-0.7	10.0	0.065	0.978	0.017	0.017	7.670
-0.8	10.0	0.074	0.974	0.022	0.021	6.901
-0.9	10.0	0.083	0.971	0.027	0.026	6.202
-1.0	10.0	0.091	0.968	0.032	0.031	5.680
-1.1	10.0	0.099	0.965	0.038	0.036	5.270
-1.2	10.0	0.107	0.962	0.044	0.042	4.880
-1.3	10.0	0.115	0.959	0.050	0.048	4.564
-1.4	10.0	0.123	0.956	0.056	0.054	4.303
-1.5	10.0	0.130	0.953	0.062	0.059	4.117
-1.6	10.0	0.138	0.950	0.069	0.065	3.922
-1.7	10.0	0.145	0.947	0.075	0.071	3.753
-1.8	10.0	0.153	0.944	0.082	0.077	3.604
-1.9	10.0	0.160	0.940	0.088	0.083	3.471
-2.0	10.0	0.167	0.937	0.095	0.089	3.352
-2.1	10.0	0.174	0.934	0.101	0.094	3.262
-2.2	10.0	0.180	0.931	0.107	0.099	3.178
-2.3	10.0	0.187	0.928	0.113	0.105	3.086
-2.4	10.0	0.194	0.925	0.119	0.110	3.015
-2.5	10.0	0.200	0.922	0.125	0.115	2.949
-2.6	10.0	0.206	0.919	0.130	0.120	2.887
-2.7	10.0	0.213	0.915	0.136	0.125	2.828
-2.8	10.0	0.219	0.912	0.142	0.129	2.784
-2.9	10.0	0.225	0.910	0.147	0.134	2.732
-3.0	10.0	0.231	0.906	0.153	0.138	2.692
-3.1	10.0	0.237	0.903	0.158	0.143	2.644
-3.2	10.0	0.242	0.901	0.163	0.147	2.608
-3.3	10.0	0.248	0.898	0.168	0.151	2.573
-3.4	10.0	0.254	0.895	0.174	0.155	2.540
-3.5	10.0	0.259	0.892	0.178	0.159	2.508
-0.1	5.0	0.020	0.993	0.001	0.001	31.623
-0.2	5.0	0.038	0.987	0.003	0.003	18.257
-0.3	5.0	0.057	0.981	0.007	0.007	11.952
-0.4	5.0	0.074	0.975	0.012	0.011	9.535
-0.5	5.0	0.091	0.969	0.018	0.017	7.670
-0.6	5.0	0.107	0.963	0.025	0.024	6.455
-0.7	5.0	0.123	0.958	0.032	0.031	5.680
-0.8	5.0	0.138	0.952	0.041	0.039	5.064
-0.9	5.0	0.153	0.947	0.050	0.047	4.613
-1.0	5.0	0.167	0.942	0.059	0.056	4.226
-1.1	5.0	0.180	0.937	0.069	0.064	3.953
-1.2	5.0	0.194	0.931	0.079	0.074	3.676
-1.3	5.0	0.206	0.927	0.089	0.083	3.471
-1.4	5.0	0.219	0.921	0.100	0.092	3.297
-1.5	5.0	0.231	0.917	0.110	0.101	3.147
-1.6	5.0	0.242	0.912	0.121	0.110	3.015
-1.7	5.0	0.254	0.907	0.132	0.119	2.899
-1.8	5.0	0.265	0.902	0.142	0.128	2.795
-1.9	5.0	0.275	0.898	0.152	0.136	2.712
-2.0	5.0	0.286	0.893	0.162	0.145	2.626
-2.1	5.0	0.296	0.888	0.172	0.153	2.557
-2.2	5.0	0.306	0.883	0.181	0.160	2.500
-2.3	5.0	0.315	0.879	0.190	0.167	2.447
-2.4	5.0	0.324	0.874	0.199	0.174	2.397
-2.5	5.0	0.333	0.870	0.208	0.181	2.351
-2.6	5.0	0.342	0.865	0.216	0.187	2.312
-2.7	5.0	0.351	0.861	0.225	0.193	2.276
-2.8	5.0	0.359	0.857	0.232	0.199	2.242
-2.9	5.0	0.367	0.852	0.240	0.205	2.209
-3.0	5.0	0.375	0.848	0.248	0.210	2.182
-3.1	5.0	0.383	0.844	0.256	0.216	2.152
-3.2	5.0	0.390	0.840	0.262	0.221	2.127
-3.3	5.0	0.398	0.836	0.270	0.226	2.104
-3.4	5.0	0.405	0.832	0.277	0.230	2.085
-3.5	5.0	0.412	0.829	0.283	0.235	2.063



*Prilog 6. Armatura ploče i zida*

$\phi$ (mm)	razmak	$A_s$
8	20	2.51
8	15	3.35
10	20	3.93
8	12.5	4.02
8	10	5.03
10	15	5.24
12	20	5.65
10	12.5	6.28
12	15	7.54
14	20	7.70
10	10	7.85
12	12.5	9.05
16	20	10.05
14	15	10.26
12	10	11.31
14	12.5	12.32
16	15	13.40
19	20	14.18
14	10	15.39
20	20	15.71
16	12.5	16.08
19	15	18.90
22	20	19.01
16	10	20.11
20	15	20.94
19	12.5	22.68
25	20	24.54
20	12.5	25.13
22	15	25.34
19	10	28.35
22	12.5	30.41
28	20	30.79
20	10	31.42
25	15	32.72
22	10	38.01
25	12.5	39.27
32	20	40.21
28	15	41.05
25	10	49.09
28	12.5	49.26
36	20	50.89
32	15	53.62
28	10	61.58
32	12.5	64.34
36	15	67.86
32	10	80.42
36	12.5	81.43
36	10	101.79

Prilog 7. Proračun geometrijskih veličina pravokutnih i T - presjeka

Pravokutni presjek	T-presjek
	
$y_{ne} = h/2; \quad y_{wz} = y_{uz}$ $y_{te} = k_{ut} \cdot h; \quad y_{wz} = h - y_{te}$ $y_{te} = k_{ut} \cdot d; \quad y_{wz} = h - y_{te}$ $k_{ut} = (0,5 + A_1)/(1 + B_1)$ $k_{ut} = -B_{II} + \sqrt{B_{II}^2 + 2A_{II}}$ $A_1 = \alpha_c \cdot \rho_1 \cdot d/h \cdot (1 + A_2 \cdot d_2/(A_{s1} \cdot d))$ $B_1 = \alpha_c \cdot \rho_1 \cdot (1 + A_2/A_{s1})$ $A_{II} = \alpha_c \cdot \rho_{II} \cdot (1 + A_2 \cdot d_2/(A_{s1} \cdot d))$ $B_{II} = \alpha_c \cdot \rho_{II} \cdot (1 + A_2/A_{s1})$ $\rho_1 = A_{s1}/(b \cdot h); \quad \rho_{II} = A_{s1}/(b \cdot d)$	$y_{ne} = \frac{(b_w \cdot h^2)/2 + ((b_{eff} - b_w) \cdot h_f^2)/2}{b_w \cdot h + h_f \cdot (b_{eff} - b_w)}$ $y_{wz} = h - y_{ne}$ $y_{te} = k_{ut} \cdot h;$ $y_{wz} = h - y_{te} = (1 - k_{ut}) \cdot h$ $k_{ut} = (0,5 + C_1)/(1 + D_1)$ $C_1 = 0,5 \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)^2 \cdot \left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right) + A_1$ $D_1 = \left(\frac{h_f}{h}\right) \cdot \left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right) + B_1$ $\rho_1 = A_{s1}/(b_w \cdot h)$
$I_u = \frac{b \cdot h^3}{12}$ $I_1 = \frac{b}{3} \cdot (y_{te}^3 + y_{uz}^3) + (\alpha_c - 1) \cdot [A_{s1} \cdot (d - y_{te})^2 + A_2 \cdot (y_{te} - d_2)^2]$ $I_{II} = \frac{b}{3} \cdot y_{uz}^3 + \alpha_c \cdot A_{s1} \cdot (d - y_{uz})^2 + (\alpha_c - 1) \cdot A_2 \cdot (y_{uz} - d_2)^2$	$I_{II} = \frac{b_w}{3} \cdot (y_{wz}^3 + y_{uz}^3) + \frac{(b_{eff} - b_w) \cdot h_f^3}{12} + (b_{eff} - b_w) \cdot h_f \cdot (y_{te} - h_f/2)^2$ $I_1 = \frac{b_w}{3} \cdot (y_{wz}^3 + y_{uz}^3) + \frac{(b_{eff} - b_w) \cdot h_f^3}{12} + (b_{eff} - b_w) \cdot h_f \cdot (y_{te} - h_f/2)^2 + (\alpha_c - 1) \cdot [A_{s1} \cdot (d - y_{te})^2 + A_2 \cdot (y_{te} - d_2)^2]$ <p>Proračun <math>I_{II}</math></p> <p>1. Pretpostavi se da je <math>y_{uz} &lt; h_f</math>, i tada je <math>y_{uz} = k_{ut} \cdot d</math> kao za pravokutni presjek širine <math>b_{eff}</math> i visine <math>h</math>. Ako je <math>y_{uz} &lt; h_f</math> tada je:</p>
	$I_{II} = \frac{b_{eff} \cdot y_{uz}^3}{3} + \alpha_c \cdot A_{s1} \cdot (d - y_{uz})^2 + (\alpha_c - 1) \cdot A_2 \cdot (y_{uz} - d_2)^2$ <p>Ako je <math>y_{uz} &gt; h_f</math> tada je:</p> $y_{uz} = k_{ut} \cdot d; \quad y_{wz} = h - y_{uz} = (1 - k_{ut}) \cdot h$ $k_{ut} = -C_{II} + \sqrt{C_{II}^2 + D_{II}}$ $C_{II} = \left(\frac{h_f}{d}\right) \cdot \left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right) + B_{II}$ $D_{II} = \left(\frac{h_f}{d}\right)^2 \cdot \left(\frac{b_{eff}}{b_w} - 1\right) + 2 \cdot A_{II}$ $\rho_{II} = A_{s1}/(b_w \cdot d)$ $I_{II} = \frac{b_{eff} \cdot h_f^3}{12} + h_f \cdot b_{eff} \cdot \left(y_{uz} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \frac{b_w}{3} \cdot (y_{uz} - h_f)^2 + \alpha_c \cdot A_{s1} \cdot (d - y_{uz})^2 + (\alpha_c - 1) \cdot A_2 \cdot (y_{uz} - d_2)^2$
$S_1 = A_{s1}(d - y_{te}) - A_2(y_{te} - d_2); \quad S_{II} = A_{s1}(d - y_{uz}) - A_2(y_{uz} - d_2)$	

Prilog 8. Koeficijenti kombinacije

Koeficijenti kombinacije			
Djelovanje	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
<b>Pokretno opterećenje na ploče</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.3</b>
- stanovi, uredi, trgovine do 50m <sup>2</sup> , predvorja, balkoni, bolnice			
- prostor za skupove, garaže, zgrade za parkiranje, gimnastičke dvorane, predvorja učionica, knjižnice, arhivi	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>
- prostor za izložbe i trgovinu, trgovačke i robne kuće	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>
Vjetar	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0</b>
Snijeg	<b>0.7</b>	<b>0.2</b>	<b>0</b>
Sva druga djelovanja	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>

Prilog 9. Konačna vrijednost koeficijenta puzanja

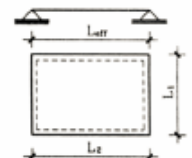
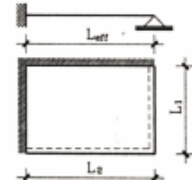
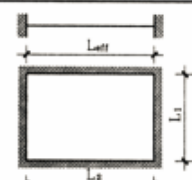
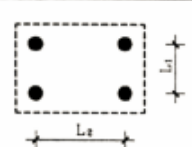
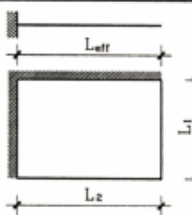
Starost pri opterećivanju $t_0$ (u danima)	Srednji polupjerner konstrukcijskog elementa ( $2 - A_c / u$ ) (mm)					
	58	150	600	50	150	600
	Suhi uvjeti okoliša (vanutra) (RH = 50%)			Vlažni uvjeti okoliša (vani) (RH = 80%)		
1	5,5	4,6	3,7	3,6	3,2	2,9
7	3,9	3,1	2,6	2,6	2,3	2,0
28	3,2	2,5	2,0	1,9	1,7	1,5
90	2,4	2,0	1,6	1,5	1,4	1,2
365	1,8	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0

Prilog 10. Maksimalni promjer šipki i njihovi maksimalni razmaci za različita naprezanja u armaturi

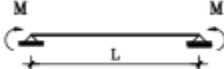


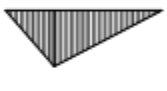
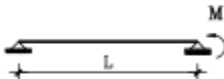
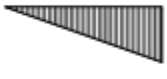
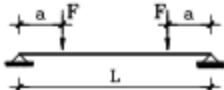

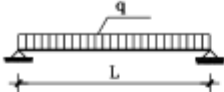

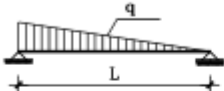
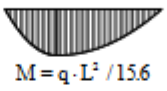
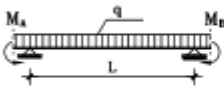

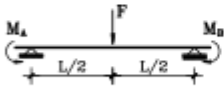

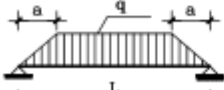
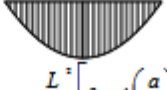
Steel stress <sup>2</sup> [MPa]	Maximum bar size [mm]		
	w <sub>k</sub> = 0,4 mm	w <sub>k</sub> = 0,3 mm	w <sub>k</sub> = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Steel stress <sup>2</sup> [MPa]	Maximum bar spacing [mm]		
	w <sub>k</sub> =0,4 mm	w <sub>k</sub> =0,3 mm	w <sub>k</sub> =0,2 mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Prilog 11. Granične vitkosti elemenata kada nije potrebno provoditi kontrolu progiba

Statički sustav	Dopušteni odnos $L_{eff}/d$ odnosno $(L_1/d)$ ili $(L_2/d)$ za		Schema sustava
	slabo naprezan beton (ploče) $\rho \leq 0,5 \%$	jako naprezan beton $\rho \geq 1,5 \%$	
1) Slobodno oslonjeni nosači, slobodno oslonjene ploče naprezane u jednom ili dva okomita smjera	25	18	
2) Prvo polje kontinuiranih nosača ili kontinuirane ploče nosive u jednom smjeru	32	23	
3) Srednje polje kontinuiranog nosača ili ploče nosive u jednom ili dva smjera	35	25	
4) Ploče oslonjene samo na stupove (bez podvlaka tj. bez greda) - ravne ploče	30	21	
5) Konzole	10	7	

Prilog 12. Ovisnost koeficijenta  $k$  o statičkom sustavu i tipu opterećenja

Rb	Tip opterećenja	Dijagram momenata savijanja	Koeficijent $k$
	1	2	3
1			0.125
2			$\frac{3-4(a/L)^2}{48(1-(a/L))}$
3			0.0625
4			$0.125 - (a/L)^2 / 6$
5			5/48
6		 $M = q \cdot L^2 / 15.6$	0.102
7			$k = \frac{5}{48}(1 - 0.1\beta)$ $\beta =  M_1 + M_2  /  M_r $
8			$k = 0.083(1 - \beta/4)$ $\beta =  M_1 + M_2  /  M_r $
9		 $M = q \cdot \frac{L^2}{24} \left[ 3 - 4 \left( \frac{a}{L} \right)^2 \right]$	$\frac{1}{80} \frac{(5 - 4(a/L)^2)^2}{3 - 4(a/L)^2}$

Prilog 13. Koeficijent skupljanja betona u ‰

položaj konstrukcijskog elementa	relativna vlažnost zraka [%]	srednji polumjer konstrukcijskog elementa, $2 \cdot A_c / u$ [mm]	
		$\leq 150$	600
unutra	50	-0,60	-0,50
vani	80	-0,33	-0,28