

Proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabivosti

Novosel, Antonio

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:122:204479>

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

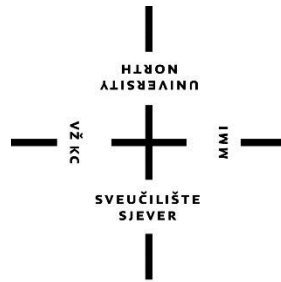
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





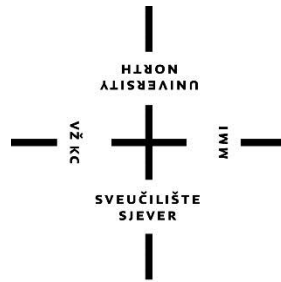
Sveučilište Sjever

Završni rad br. 312/GR/2017

Proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti

Antonio Novosel, 0146/336

Varaždin, rujan 2017. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za graditeljstvo

Završni rad br. 312/GR/2017

Proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti

Student

Antonio Novosel, 0146/336

Mentor

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

Varaždin, rujan 2017. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Antonio Novosel	MATIČNI BROJ	0146/336
DATUM	10.09.2017.	KOLEGIJ	Betonske konstrukcije
NASLOV RADA	PRORAČUN AB ELEMENATA PREMA GRANIČNIM STANJIMA NOSIVOSTI I UPORABIVOSTI		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Design of rc elements according to Ultimate limit state and serviceability limit state		
MENTOR	Dr.sc. Matija Orešković, dipl.ing.građ.	ZVANJE	Viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Prof.dr.sc. Božo Soldo 2. Dr.sc. Matija Orešković, viši predavač 3. Dr.sc. Aleksej Aniskin, viši predavač 4. mr.sc. Ivan Špišić, predavač 5. Željko Kos, predavač		

Zadatak završnog rada

BROJ 312/GR/2017

OPIS

U radu je potrebno detaljno obraditi granična stanja nosivosti te granična stanja uporabivosti armirano betonskih elemenata. Potrebno je detaljno objasniti metode proračuna po tim graničnim stanjima, sve prema Eurokodu 2.

Rad se sastoji od:

1. UVOD
2. BETON I ARMATURA - OPĆENITO
3. OSNOVE PRORAČUNA AB KONSTRUKCIJA PREMA EUROKODU
4. DIMENZIONIRANJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN)
5. DIMENZIONIRANJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABIVOSTI (GSU)
6. ZAKLJUČAK
Popis slika
Popis tablica

ZADATAK URUČEN

28.09.2017



POTPIS MENTORA

[Handwritten signature]

Zahvala

Ovom prilikom želio bih se zahvaliti prof. dr.sc. Matiji Oreškoviću, koji mi je uvelike pomogao u ovom radu i kojeg ću pamtiti kao uistinu zanimljivog predavača, profesora, kolegu i mentora. Njegova predavanja su bila uistinu zanimljiva, a prof. Orešković me zainteresirao za betonske konstrukcije kroz ovaj studij, te je uvijek izlazio u susret i bio spreman pomoći. Hvala Vam!

Također, želio bih se zahvaliti kolegicama, kolegama i bliskim prijateljima, koji su bili potpora tijekom cijelog studija i koji su uljepšali moje studentske dane, te se nadam da će prijateljstvo potrajati i nakon fakulteta. Hvala vam!

Najveće hvala ide mojim roditeljima, koji su mi nesebično pomagali kroz sve tri godine studija te omogućili studiranje i bili velika potpora te su vjerovali u mene kad nitko drugi nije. Ovaj završni rad posvetio bih upravo njima; majci Slavici i ocu Vladimiru. Hvala vam!

Antonio Novosel

SAŽETAK

Ovaj završni rad bazira se na predmetu Betonske konstrukcije (a kasnije i Betonske konstrukcije II), a cilj je objasniti na koji način se provode proračuni graničnog stanja nosivosti i uporabljivosti. Na samom uvodu čitatelj može pronaći osnovne informacije o Eurokodu, te ostale načine normiranja i pravilnika, dok se ostala poglavlja baziraju na Eurokodu 2. Rad sadrži i osnovne stvari o betonu (pretežito očvrslom, ali i svježem) poput definiranja radnih i računskih dijagrama, što su oni i čemu služe, razredi tlačne čvrstoće i deformacije.

Glavni dio, odnosno tema ovog završnog rada je proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti, gdje su detaljno objašnjene formule i metode kojima se proračunavaju armirano betonski elementi te način provedbe proračuna.

Ključne riječi: beton, armatura, granična stanja, nosivost, uporabljivost, Eurokod 2

ABSTRACT

This final paper is based on course Concrete constructions (and Concrete constructions II), and the goal is to explain the procedure of designing elements on ultimate limit state (ULS) and serviceability limit state (SLS). On very beginning, the reader can find basic informations about Eurocode, and different ways of standards and regulations, while other chapters are based on Eurocode 2. Also, this work contains basic informations for concrete (mostly hardened , but also fresh concrete) such as defining real and design diagram, what are they and what's the difference, classes of compressive strength and deformations.

The main part, otherwise the subject of this work is design of reinforced concrete according to ultimate limit state and serviceability limit state and it contains detailed explained formulas and methods which are used for designing and different ways of implementations.

Key words:: concrete, steel, limit states, bearing, usability, Eurocode 2

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Velika latinična slova

A	ploština
A	izvanredna djelovanja
AB	armirani beton
C	beton
CEM	cement
CEN	Europski odbor za normizaciju
E	modul elastičnosti
EC2	Eurokod 2
F	sila, djelovanje
G	stalna djelovanja
I	moment tromosti
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju
JUS	Jugoslavenski standard
M	moment (općenito)
N	osna sila
TPBK	Tehnički propisi za betonske konstrukcije
V	posmična sila
Q	promjenjiva djelovanja
GSN	granično stanje nosivosti
GSU	granično stanje uporabljivosti

Velika latinična slova s indeksima

A_c	ploština betonskog presjeka
A_s	ploština presjeka čelika za armiranje
A_{s1}	ploština poprečnog presjeka čelika za armiranje u vlačnom području
A_{s2}	ploština poprečnog presjeka čelika za armiranje u tlačnom području
A_{s1,min}	minimalna ploština presjeka čelika za armiranje
A_{s1,max}	maksimalna ploština presjeka čelika za armiranje
A_{sw}	ploština presjeka poprečne armature
E_{cd}	proračunski sekantni modul elastičnosti betona
E_{cm}	sekantni modul elastičnosti običnoga betona
F_c	sila (djelovanje) u betonu (tlačna zona)
F_{s1}	sila (djelovanje) u vlačnoj zoni betona (armatura)
M_{Ed}	proračunski moment savijanja od djelovanja
N_{Ed}	proračunska djelujuća uzdužna (aksijalna) sila (vlak ili tlak)
Q_k	karakteristična vrijednost
V_{Ed}	proračunska djelujuća posmična sila

Mala latinična slova s indeksima

a	razmak
b	ukupna širina presjeka ili širina pojasnice grede presjeka Γ , T ili I
b_{eff}	sudjelujuća širina pojasnice grede presjeka Γ ili T
b_w	širina hrpta grede presjeka Γ , T ili I
d	promjer (dijametar)
e	ekscentricitet
f_c	tlačna čvrstoća betona
f_{cd}	proračunska tlačna čvrstoća betonskog cilindra (valjka)
f_{ck}	karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana

f_{cm}	srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka
f_{ctk}	karakteristična osna vlačna čvrstoća betona
f_p	vlačna čvrstoća prednapetog čelika
f_{pk}	karakteristična vlačna čvrstoća prednapetog čelika
$f_{p0,1k}$	karakterističnih 0,1% dokazano napregnutog prednapregnutog čelika
f_t	vlačna čvrstoća čelika za armiranje
f_{tk}	karakteristična vlačna čvrstoća čelika za armiranje
f_y	granica popuštanja čelika za armiranje
f_{yd}	proračunska granica popuštanja čelika za armiranje
f_{yk}	karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje
l	raspon, duljina
l_{eff}	proračunski raspon
s	razmak spona
t	promatrano vrijeme
x	neutralna osna duljina (visina tlačnog područja)
z	krak unutarnjih sila

Grčka slova s indeksima

γ_c	parcijalni faktor sigurnosti za beton
γ_s	parcijalni faktor sigurnosti za armaturni čelik
γ_G	parcijalni faktor sigurnosti za stalna djelovanja, G
γ_Q	parcijalni faktor sigurnosti za promjenjiva djelovanja, Q
γ_P	parcijalni faktor sigurnosti kod prednapinjanja, P
ϵ_c	tlačna deformacija betona
ϵ_{c1}	tlačna deformacija betona pri najvećem naprezanju betona f_c
ϵ_{cu}	krajnja tlačna deformacija betona
ϵ_{s1}	relativna deformacija vlačne armature
ϵ_{s2}	relativna deformacija tlačne armature
ϵ_u	deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem opterećenju
ϵ_{uk}	karakteristična deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem opterećenju
ρ_l	omjer armiranja uzdužnom armaturom
ρ_w	omjer armiranja poprečnom armaturom
σ_c	tlačno naprezanje u betonu
σ_{cu}	tlačno naprezanje u betonu pri krajnjoj deformaciji ϵ_{cu}

Mala grčka slova

α	kut, omjer
β	kut, omjer
γ	parcijalni koeficijent sigurnosti
ϵ	relativna deformacija
λ	vitkost
μ	koeficijent trenja
ν	Poissonov koeficijent
ρ	gustoća
σ	normalno naprezanje
τ	posmično naprezanje
ψ	koeficijenti koji definiraju karakterističnu vrijednost
Φ	promjer čelične šipke za armiranje, natege ili cijevi za nategu

SADRŽAJ

1.	Uvod.....	7
2.	Općenito o betonu i armaturi	8
2.1.	Svježi beton	9
2.2.	Očvrsnuli beton	11
2.3.	Čelik za armiranje	18
3.	Osnove proračuna AB konstrukcija prema Eurokodu	22
3.1.	Granična stanja	23
3.2.	Djelovanja na konstrukcije i koeficijenti sigurnosti.....	25
4.	Dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti (GSN).....	33
4.1.	Elementi naprezani na savijanje	33
4.2.	Elementi naprezani uzdužnom silom	40
4.3.	Poprečna armatura u gredama	43
5.	Dimenzioniranje prema graničnom stanju uporabljivosti (GSU)	46
5.1.	Granično stanje naprezanja	46
5.2.	Granično stanje raspucavanja (kontrola pukotina).....	47
5.3.	Granično stanje deformiranja (kontrola progiba).....	50
6.	Zaključak.....	57
7.	Literatura.....	58
	Popis Slika	59
	Popis Tablica.....	60

1. UVOD

U ovom radu biti će opisani načini proračuna armirano-betonskih elementa prema graničnom stanju nosivosti i uporabljivosti, koristeći Eurokod 2. U svijetu, pa tako i u Europi oduvijek je postojala želja za normiranjem i standardiziranjem, pa možemo reći da je Eurokod produkt ljudske potrebe za osnovne proračune, koji se primjenjuju u graditeljstvu a koristi se u Europskoj Uniji i šire. Također, Eurokod postoji kako bi poboljšao funkcionalnost tržišta za proizvode i graditeljske usluge, na način da jasno definira pravila, formule, jednadžbe i postupke s kojima se inženjeri u svim granama graditeljstva susreću. Važno je i napomenuti kako je Eurokod uvelike poboljšao konkurentnost europskog graditeljstva i graditeljske struke, pa tako i industrije koje su povezane s graditeljstvom, u zemljama izvan i unutar Europske Unije. U razvoju Eurokoda osnovna je ideja stvaranje ujednačenog sistema konstrukcijskih pravila pridržavajući se CEN-ovih normizacijskih pravila. Kako bi se postupak proračuna olakšao, Eurokod je podijeljen na devet glavnih dijelova.

Prva generacija Eurokoda nastala je 1985. godine, donošenjem odluke Komisije Europske zajednice o programu djelovanja u području građevinarstva. Druga generacija (ENV) izlazi 1989. godine, a cilj je potvrđivanje usklađenosti proračuna (projekata) zgrada i inženjerskih građevina s bitnim zahtjevima za građevne proizvode i to s dva bitna zahtjeva, a to su: mehanička otpornost i stabilnost te sigurnost u slučaju požara. Treća generacija (EN) sadrži ukupno 58 norma (oko 4900 stranica), te se koristi i danas, a objavljuje se od 2007. do 2009. godine.

U poglavljima koji dolaze najviše će se govoriti o Eurokodu 2, koji se koristi za projektiranje betonskih konstrukcija, a za dubinsku analizu bilo je potrebno pogledati i Eurokod 1 (Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije).

No prije graničnih stanja, potrebno je navesti općenite stvari u betonu, koje su potrebne za daljnje razumijevanje. Fokusirajući se posebno na očvrtnuli beton i armaturu, u drugom poglavlju objašnjeni su esencijalni pojmovi poput tlačne čvrstoće betona i armature te radnih i računskih dijagrama betona i armature.

U trećem poglavlju opisane su osnove proračuna AB konstrukcija, ali su i objašnjeni raznorazni koeficijenti sigurnosti te podijele opterećenja.

U četvrtom poglavlju cilj je bio opisati proračun prema graničnom stanju nosivosti, a detaljnije su opisani elementi naprezani na savijanje i poprečnu silu, te poprečna armatura u gredama. Peto poglavlje sadrži proračun prema graničnom stanju uporabljivosti, u kojemu je riječ o naprezanju, pukotinama i deformiranju. Cilj ovog rada je prezentirati Eurokod 2 te proračun prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti, uz raznorazne formule, vizualne elemente i tablice.

2. OPĆENITO O BETONU I ARMATURI

Beton je građevinski proizvod izrađen od cementnog veziva (prema normi HRN EN 197-1 postoji 5 vrsta cementa: CEM I – CEM V), agregata (pijesak, šljunak drobljenac) i vode. Osim ovih osnovnih materijala postoje i raznorazni dodaci (aditivi), koje se mogu podijeliti na mineralne (tip I i tip II) i kemijske (plastifikatori, superplastifikatori, dodaci za zadržavanje vode, ubrzivači i usporivači vezanja te mnogi drugi. U skladu sa ENV 206, beton koji se predviđa za sustave od betona, armiranog i prednapetog betona treba biti načinjen od agregata, cementa, vode i aditiva u omjeru koji će osigurati dobru obradivost i svojstva koja ne smiju biti ispod danih vrijednosti u tim propisima. Beton na koji se odnosi TPBK može biti:

- obični (gustoće između 2000 i 2600 kg/m³)
- teški (gustoće veće od 2600 kg/m³)
- lagani beton (gustoće između 800 i 2000 kg/m³)

Svojstva materijala koriste se za određivanje otpornosti, tj. nosivosti elemenata i konstrukcija. Određuju se ispitivanjem u skladu s Eurokodom 2, odnosno ENV 206 (Europäische Vornorm). Velimir Ukrainczyk u svojoj knjizi Poznavanje gradiva navodi kako postoji i više svojstava materijala osim fizikalnih i mehaničkih, a to su kemijska, trajnosna, proizvodna, estetska i ekonomična.

Fizikalna svojstva materijala su: masa, gustoća, pozornost, ponašanje prema vodi i plinovima, termička, optička, magnetska, akustična i električna, dok su pak s druge strane mehanička svojstva: modul elastičnosti i koeficijent prigušenja čvrstoće, granica tečenja, tvrdoća, žilavost, skupljanje i puzanje.

U normi za projektiranje/proračun betonskih konstrukcija HRV ENV 1992-1-1 navodi se da obični beton ima gustoću između 2000 i 2800 kg/m³, a teški beton gustoću veću od 2800 kg/m³.

Prema mjestu proizvodnje (tj. proizvodnom pogonu, beton se dijeli na:

- beton proizveden u tvornici betona (centralna betonara)
- beton proizveden u betonari na gradilištu za potrebe toga gradilišta
- beton proizveden u betonari za predgotovljene betonske elemente

Prema zahtjevima iz specifikacije beton se proizvodi kao:

- beton zadanog sastava
- projektirani beton (zadavanjem svojstava)
- beton normiranog zadanog sastava

Tehnička svojstva betona i materijal od kojih se beton proizvodi moraju biti specificirana prema TPBK i normi HRN EN 206-1, te normama specifikacijama za materijale. Svojstva svježeg betona specificira izvođač betonskih radova, ili su prema potrebi specificirana u projektu betonske konstrukcije.

2.1. Svježi beton

Što se svježeg betona tiče, veliku odgovornost ima proizvođač, on preuzima odgovornost kod proizvodnje i transporta, dok s druge strane izvođač za ugradnju, zbijanje i njegu svježeg betona. Kod svježeg betona važno je spomenuti da se posveti dovoljno pozornosti kod projektiranja sastava, ali i ostalim stavkama koje radi izvođač, jer postoji velika mogućnost da zbog nepravilnog tretiranja svježeg betona kasnije se neće postići željena čvrstoća i trajnost konstrukcijskog elementa.

Postoji i nekoliko glavnih svojstva koje valja spomenuti; a koje treba imati svježa betonska mješavina za vrijeme ugradnje i zbijanja:

1. Fluidnost – svježi beton mora biti dovoljno tekuć da se može ugraditi u oplatu i oko armature uz pomoć odgovarajuće opreme. Ovo svojstvo je bitno kod visokih elemenata koji zahtijevaju veliku fluidnost kako bi beton ispunio oplatu po cijeloj dužini elementa.

2. Zbijenost – postoji više metoda zbijanja betona; a svojstvo je važno zbog istiskivanja pora zraka iz betona.

3. Stabilnost (kohezivnost) – u prijevodu beton mora ostati kao homogena masa, što znači da u svakom dijelu ima jednak udio sastava. Na primjer, mort ne bi trebao biti tako tekuć da dolazi do segregacije (tj. odvajanja) od krupnog agregata.

Najčešći pojmovi kojima se definiraju i mjere svojstva svježeg betona jesu: obradivost (konzistencija), izdvajanje vode, segregacija (odvajanje), vrijeme vezanja betona, homogenost betonske mješavine, temperatura te količina pora u svježem betonu.



Slika 2.1 Slijeganje (HRN EN 12350-2)



Slika 2.2 Rasprostiranje (HRN EN 12350-5)

Slika 2.1 i Slika 2.2 prikazuju načine ispitivanja konzistencije (obradivosti) betona. Obradivost je relativno svojstvo betona, koje obuhvaća namjenu betona, način miješanja i ugradnju, a može se definirati količinom korisne unutrašnje energije potrebne za potrebno zbijanje betona, tj. količinom energije koja je potrebna da se svlada unutrašnji otpor između pojedinih čestica u betonu.

U reologiji se konzistencija definira kao svojstvo materijala kojim se on odupire trajnom mijenjanju oblika i definirana je funkcijom posmično naprezanje – tečenje. Na gradilištu se pod konzistencijom podrazumijeva stanje svježeg betona izmjereno empirijskom metodom (slijeganje ili rasprostiranje), a može se razvrstati na sljedeći način:

RAZREDI KONZISTENCIJE							
Razredi slijeganjem		Vebe razredi		Razredi zbijanjem		Razredi rasprostiranjem	
Razred	Slijeganje (mm)	Razred	Vebe vrijeme (s)	Razred	Stupanj zbijenosti	Razred	Promjer rasprostiranja (mm)
S1	10 do 40	V0	≥ 31	C0	$\geq 1,46$	F1	≤ 340
S2	50 do 90	V1	30 do 21	C1	1,45 do 1,26	F2	350 do 410
S3	100 do 150	V2	20 do 11	C2	1,25 do 1,11	F3	420 do 480
S4	160 do 210	V3	10 do 6	C3	1,10 do 1,04	F4	490 do 550
S5	≥ 220	V4	5 do 3	C4	$< 1,04$	F5	560 do 620
-	-	-				F6	≥ 630

Tablica 2.1 Razredi konzistencije

2.2. Očvrsnuli beton

Svojstva očvrsnulog betona specificiraju se u projektu betonske konstrukcije. U ovom završnom radu fokus neće biti svježi, već očvrsnuli beton te svojstva i proračuni očvrsnulog betona, pa je svakako važno i spomenuti kako se ispituju svojstva takvog betona.

Vezano za ispitivanje svojstava očvrsnulog betona, u projektu betonske konstrukcije najčešće se specificiraju (tj. zahtijevaju) sljedeća svojstva:

- tlačna i vlačna čvrstoća
- modul elastičnosti betona
- skupljanje i puzanje betona
- trajnost betona
- otpornost na djelovanje smrzavanja i soli za odmrzavanje
- otpornost na alkalno-silikatnu reakciju
- otpornost na habanje
- otpornost na požar
- propusnost betona
- vodonepropusnost betona
- plinopropusnost
- kapilarno upijanje vode
- korozija armature u betonu

S obzirom na velik broj svojstva očvrsnulog betona, u daljnjim analizama mogu se pronaći najbitnija svojstva betona, a to je tlačna i vlačna čvrstoća te korozija armature u betonu, koja dolazi u narednim stranicama.

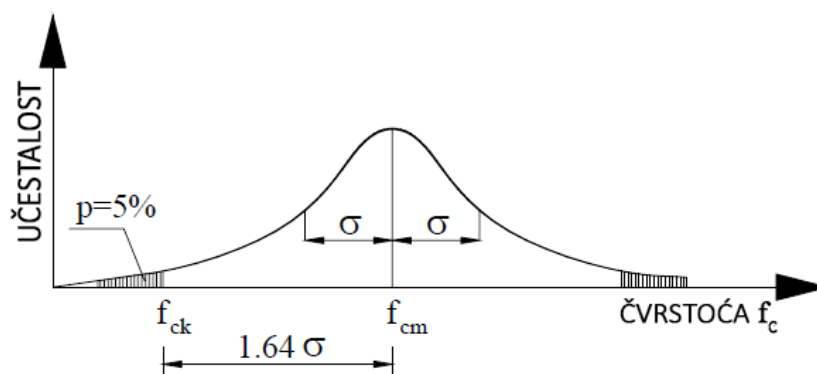
Tlačna čvrstoća betona

Važno je napomenuti da je za tlačno ispitivanje propisana norma HRN EN 12390-3. U prešu se stavlja kocka brida $a=150$ mm ili valjak (koji ima visinu 300 mm i promjer od 150 mm). Nakon ispitivanja, dobivamo određeni razred tlačne čvrstoće, te beton možemo, sukladno dobivenim rezultatima smjestiti u dolje navedenu tablicu. Ovakvo ispitivanje se provodi u laboratoriju na uzorku starom 28 dana. Tablica 2.2 ima prikazane sve razrede tlačne čvrstoće za obične i teške betone.

Razredi tlačne čvrstoće	Najmanja karakteristična čvrstoća valjka $f_{ck, valj}$ (N/mm ²)	Najmanja karakteristična čvrstoća kocke $f_{ck, koc}$ (N/mm ²)
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tablica 2.2 Razredi tlačne čvrstoće za obične i teške betone

Zahtijeva se da najmanje 95% svih rezultata pokaže čvrstoću veću ili jednaku propisanoj klasi betona, odnosno da najviše 5% rezultata može biti manje čvrstoće od određene klase betona (5% fraktil). Nadalje, pretpostavka je da će statistička raspodjela rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće slijediti log-normalnu tj. Gaussovu krivulju (Slika 2.3).



Slika 2.3 Gaussova krivulja raspodjele rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona

Sva pravila i formule za konstruiranje i dimenzioniranje, prema Eurokodu 2, osnivaju se na karakterističnoj čvrstoći dobivenoj preko valjda $f_{ck,cyl}$ ili skraćeno f_{ck} . Međutim, kako neke zemlje određuju karakterističnu čvrstoću betona preko rezultata dobivenih ispitivanjem kocke brida $a=200$ mm $f_{ck,cube}$, postoji i tablica za pretvorbu ovih čvrstoća. Ako je potrebno poznavati srednju tlačnu čvrstoću betona, ona se može približno odrediti po izrazu:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

Razredi betona	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{ck} (N/mm ²)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
f_{cm}	20	24	28	33	38	43	48	53	58

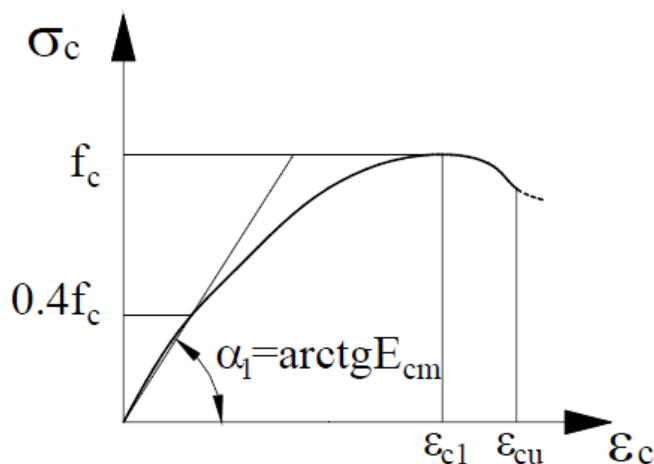
Tablica 2.3 Razredi betona sa srednjom tlačnom čvrstoćom (f_{cm})

Vlačna čvrstoća betona

Što se pak, vlačne čvrstoće tiče, postoje dvije metode, a to su metoda cijepanja i savijanja. Vlačna čvrstoća cijepanjem (prema HRN EN 12390-6) određuje se na uzorcima starosti 28 dana. Karakteristična vlačna čvrstoća betona cijepanjem treba biti veća ili jednaka od zahtijevane karakteristične vlačne čvrstoće cijepanjem. Za pojedine zahtjeve može se ispitivati i vlačna čvrstoća savijanjem (HRN EN 12390-5).

Dijagrami betona

Što se tiče dijagrama betona (a kasnije valja spomenuti i dijagrame čelika), bitni su radni i računski dijagrami. Dakako, postoji i idealizirani radni dijagram naprezanje-deformacija (σ - ϵ) za beton, predložen u Eurokodu 2 za analizu AB i prednapetih sustava po nelinearnoj teoriji, teoriji plastičnosti ili za proračun po teoriji II reda za kratkotrajno opterećenje. Upravo Slika 2.4. prikazuje idealizirani dijagram naprezanje-deformacija za beton.



Slika 2.4 Idealizirani dijagram naprezanje-deformacija za beton

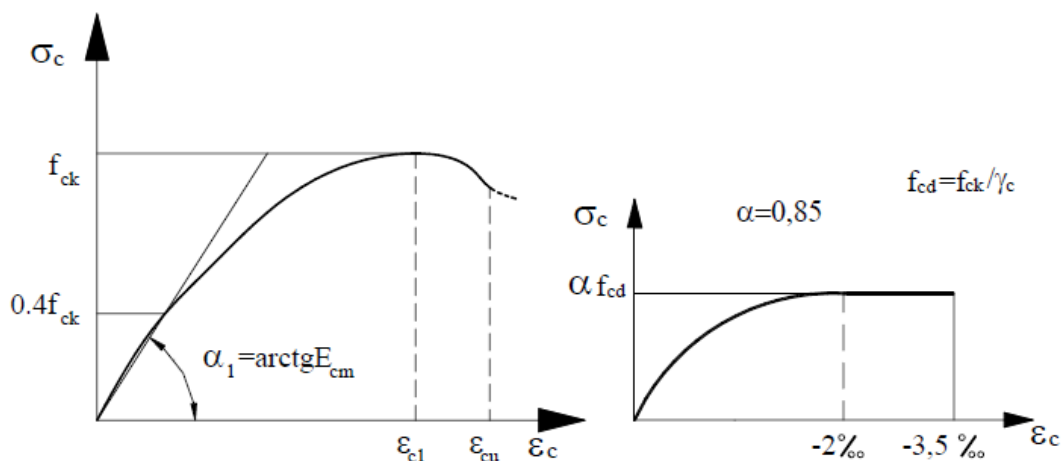
Naprezanje gore danog dijagrama možemo izraziti u obliku:

$$\sigma_c = \frac{f_c (k - \eta - \eta^2)}{1 + (k - 2)\eta} \quad (2)$$

pri čemu je:

- σ_c – naprezanje
- f_c – tlačna čvrstoća betona (uzima se da je jednaka računskoj, tj. $f_c = f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$)
- η – odnos relativne deformacije u betonu i ϵ_{c1} ($\epsilon_c / \epsilon_{c1}$)
- ϵ_{c1} – odgovarajuća deformacija maksimalnoj vrijednosti naprezanja f_c koja se obično uzima kao $\epsilon_{c1} = 0,0022$
- E_{cm} – sekantni (statistički) modul elastičnosti betona

Na sljedećoj strani objašnjene su veze između računskog i radnog dijagrama betona, kao i objašnjenja jednadžbi koje ih povezuju. Slika 2.5 na sljedećoj stranici prikazuje radni i računski dijagram betona, također u naprezanje-deformacija (σ - ϵ) sustavu.



Slika 2.5 Radni (lijevo) i računski (desno) dijagram betona

Računska tlačna čvrstoća betona (f_{cd}) definirana je kao:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3)$$

pri čemu je:

- f_{ck} – radna čvrstoća betona
- γ_c – parcijalni faktor sigurnosti za beton (prema EC2 za beton iznosi 1,5 – poglavlje 2.4.1.4)
- α_{cc} – koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni efekti na tlačnu čvrstoću i nepovoljni efekti (učinci); a preporučena vrijednost je $\alpha_{cc}=1$

Dakle, možemo konstatirati da se računski tlačna čvrstoća može pojednostavljeno prikazati u obliku (s obzirom da je $\alpha_{cc}=1$):

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

Vlačna čvrstoća betona definirana je prema obliku uzorka i metodi ispitivanja na vlak, pa tako razlikujemo:

- $f_{ct,ak}$ – vlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem uzorka na središnji vlak
- $f_{ct,sp}$ – vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem
- $f_{ct,fl}$ – vlačna čvrstoća dobivena savijanjem uzorka

Kako se za proračun koristi $f_{ct,ax}$, to su izrazi za pretvorbu:

$$f_{ct,ax} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (5)$$

$$f_{ct,ax} = 0,5 f_{ct,fl} \quad (6)$$

Računsku vlačnu čvrstoću možemo prikazati u obliku:

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (7)$$

pri čemu je:

- γ_c – parcijalni faktor sigurnosti za beton (prema EC2 za beton iznosi 1,5 – poglavlje 2.4.1.4)
- α_{ct} – koeficijent kojim se uzimaju u obzir dugotrajni efekti na vlačnu čvrstoću i nepovoljni efekti (učinci); a preporučena vrijednost je $\alpha_{cc}=1$
- $f_{ctk,0,05}$ – karakteristična aksijalna vlačna čvrstoća betona a kreće se u rasponu od 1,1-3,5

Za dizajniranje poprečnih presjeka možemo koristiti sljedeći izraz za naprezanje:

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \text{ za } 0 \leq |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{c2}| \quad (8)$$

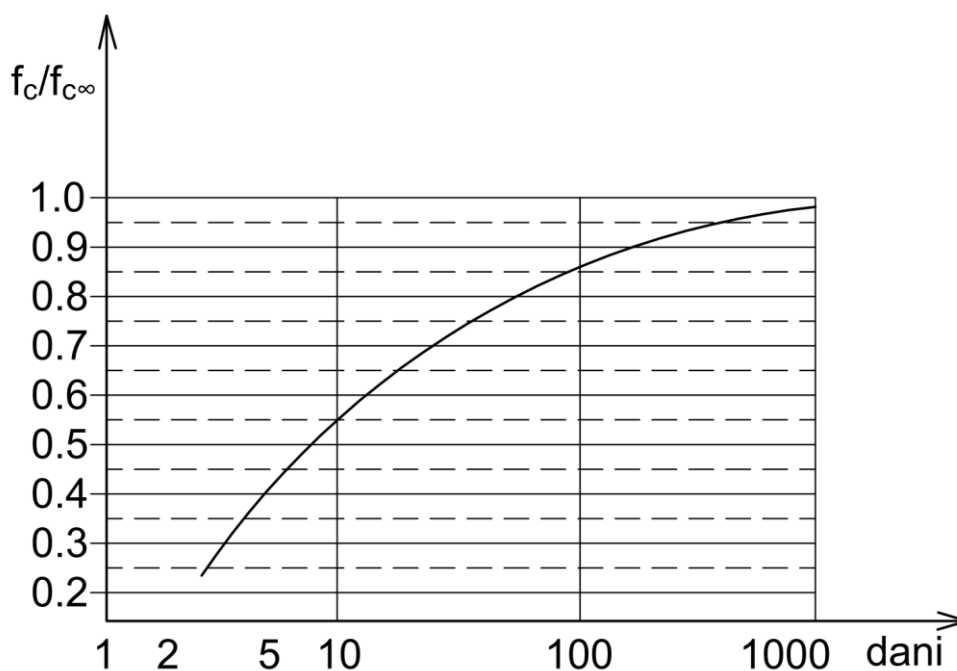
pri čemu je

n – koeficijent; u rasponu od 2,0-1,4

ε_{c2} – relativna deformacija (iznosi -2,0 ‰ za betone tlačne čvrstoće od 12/15 do 50/60, što je i većina betona)

ε_{cu2} – konačna (krajnja) relativna deformacija (iznosi -3,5 ‰ za betone tlačne čvrstoće od 12/15 do 50/60, što je i većina betona)

Čvrstoća betona starosti do 1000 dana (cca 2,5 godina) u odnosu na konačnu $f_{c\infty}$ može se približno odrediti dijagramom (Slika 2.6). Na x osi tog dijagrama prikazana je tlačna čvrstoća betona u odnosu na konačnu tlačnu čvrstoću $f_{c\infty}$. Ukoliko je, npr. $f_c/f_{c\infty}=1$; to znači da je tlačna čvrstoća jednaka konačnoj odnosno postigla je svoju maksimalnu vrijednost.



Slika 2.6 Promjena čvrstoće betona uzrokovana starenjem

Tablica 2.4 prikazuje razne razrede čvrstoće za beton, zajedno sa relativnim deformacijama. Opširnija verzija ove tablice može se pronaći u Eurokodu 2 na stranici 27, gdje se nalaze i formule pojedinih čvrstoća, a razredi betona idu do C 90/105. U tablici ispod navedeni će biti razredi betona od C 12/15 do C 60/75, jer daljnji betoni visoke čvrstoće se koriste kod mnogo zahtjevnijih građevina.

f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$f_{ck,koc}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9

Tablica 2.4 Razni razredi čvrstoća i relativne deformacije

2.3. Čelik za armiranje

Za armiranje betonskih konstrukcija rabe se čelici pod nazivom betonski čelik ili čelik za armiranje. Betonski čelik dijeli se prema:

- profilu, na žice $\varphi \leq 12$ mm i šipke $\varphi > 12$ mm;
- mehaničkim karakteristikama (granica popuštanja, vlačna čvrstoća i rastezljivost pri slomu probnog uzorka na dijelu njegove dužine 10φ), na visoko i normalno duktilne čelike;
- zavarljivosti, na nezavarljiv, zavarljiv pod određenim uvjetima i zavarljiv;
- površinskoj obradi pri izvlačenju, na glatki i rebrasti, uključujući i zavarene mreže;
- vrsti obrade, na toplo valjan, toplo valjan i hladno obrađen i termički poboljšan čelik.

Proizvođač čelika za armiranje garantira ove mehaničke karakteristike:

- karakterističnu čvrstoću pri kidanju (vlačna čvrstoća) (f_{tk});
- karakterističnu granicu popuštanja (f_{yk});
- rastezljivost poslije kidanja na dužini od 10φ (δ);
- sposobnost savijanja i povratnog savijanja šipke oko trna određenog promjera s određenim
- kutom savijanja bez pukotina šipke u vlačnom i tlačnom pojasu;
- karakterističnu dinamičku čvrstoću (granicu zamora).

Oznaka vrste čelika	Č0002	Č0300	Č0550	Č0551	
Oznaka profila prema JUS C.K 6.120 (Jugoslavenski standardi za oblike i mjere betonskih čelika, izdani 1986 godine)	GA	GA	RA1 RA2 RA3 RA4	RA2	
Gornje naprezanje tečenja R_{eH} (N/mm ²) ili $R_{p0,2}$ najmanje	220	240	400	400	
Zatezna čvrstoća R_m (%), najmanje	340	360	500	500	
Izduženje A_{10} (%), najmanje	18	18	10	10	
Savijanje	promjer trna	2_{d0}	5_{d0}	5_{d0}	
	ugao savijanja	180°	90°	90°	
Povratno savijanje	promjer trna	-	7_{d0}	7_{d0}	
	ugao savijanja	-	45°	45°	
	ugao povratnog savijanja	-	22,5°	22,5°	
Dinamička izdržljivost σ_g (N/mm ²), najmanje	-	190	220	220	
Računski modul elastičnosti (GPa)	-	-	200 do 210	200 do 210	
Kemijski udio punjenja i proizvoda (u % mase)	C (ugljik)	-	0,60	0,28	
	Si (silicij)	0,60	0,60	0,60	
	P (fosfor)	-	-	0,05	0,05
	S sumpor)	-	-	0,05	0,05

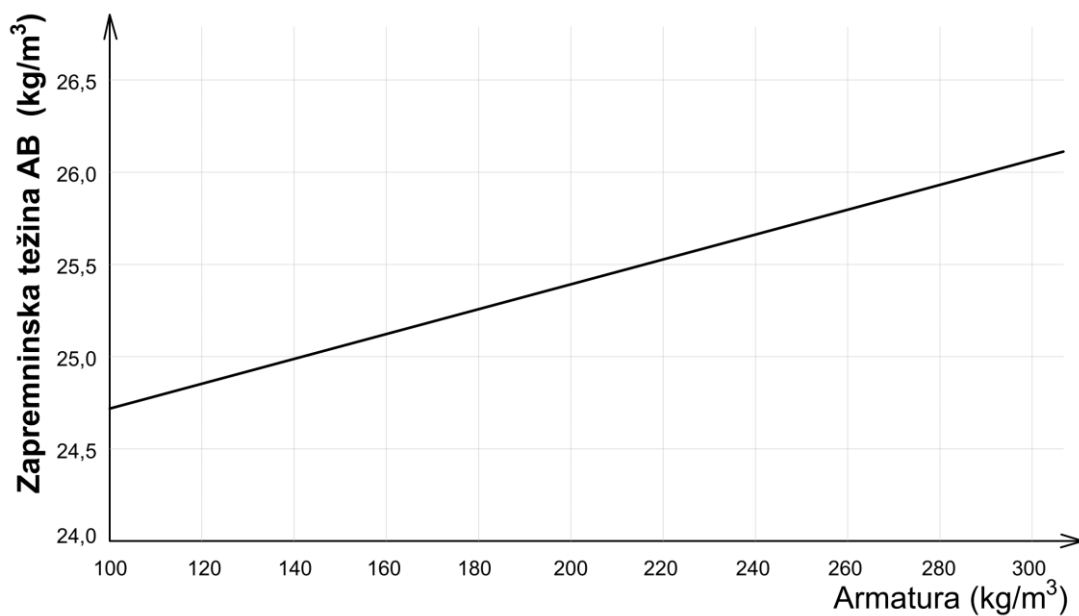
Tablica 2.5 Vrste čelika, oznake i osobine prema Jugoslavenskim standardima

Jedno od svojstva čelika za armiranje je veličina. Kako je presjek čelika okrugao, veličina se obilježava sa samim promjerom šipke, po kojem se proračunava nazivna ploština, neto masa po m^1 šipke i druge vrijednosti koje se odnose na razna svojstva. Nazivni promjeri i ploštine poprečnih presjeka dani su u Tablici dolje:

Promjer (mm)	φ6	φ8	φ10	φ12	φ14	φ16	φ20	φ25	φ28	φ32	φ40
Ploština poprečnog presjeka, A_s (cm ²)	0,283	0,503	0,785	1,131	1,540	2,010	3,140	4,910	6,160	8,040	12,57
Masa (kg/m ¹)	0,222	0,395	0,617	0,888	1,210	1,580	2,470	3,850	4,830	6,310	9,86

Tablica 2.6 Uobičajeni promjer šipki, njihove ploštine poprečnog presjeka i masa po jedinici duljine

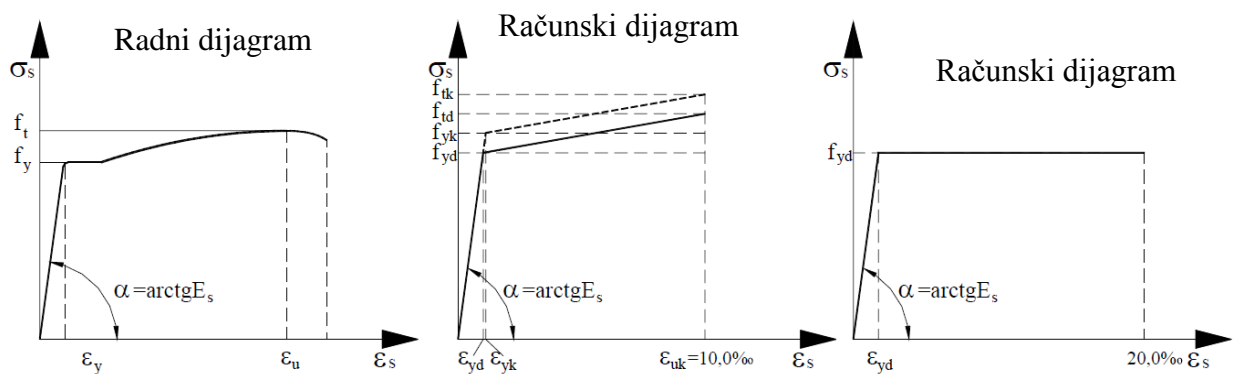
Armatura povećava i zapreminsku težinu armiranog betona, što se vidi na slici dolje. Slika prikazuje armaturu na x osi, a zapreminsku težinu na y osi. Vidljivo je da zapreminska težina armiranog betona linearno povećava s porastom armature na m^3 .



Slika 2.7 Utjecaj količine armature na zapreminnsku težinu armiranog betona

Dokaz svih nabrojanih mehaničkih svojstava armature obavlja se prema standardima ispitivanja čelika za armiranje, koji su propisani. Jedan od glavnih uvjeta armiranobetonskih konstrukcija je potpuno sprezanje između betona i čelika, što znači da ne smije doći do pojave klizanja armature u betonu. Pri malim posmičnim napreznjima (τ) između armature i betona zadovoljava glatki okrugli presjek. S izradom kvalitetnijeg čelika raste i sila u armaturi, pa tako i sve više prijete opasnost da se čelik odijeli („odvoji“) od betona.

Sprečavanje klizanja postiže se upotrebom rebrastih (ili pak, sukanih) profila te sukano-rebrastih profila. Rebrasti čelici dopuštaju veća posmična napreznja zbog samih rebara te imaju veću prionjivost od glatkih rebara. Čelik za armiranje mora imati veliku rastezljivost, tj. veliko relativno produljenje prije sloma (produljenje na ukupnu dužinu šipke). Čelične šipke koje imaju malu rastezljivost moraju se savijati u užarenom stanju, što dodatno otežava rad, a kod nekih vrsta čelika mogu se čak promijeniti i njihova svojstva (kod hladno obrađenog čelika).



Slika 2.8 Radni (lijevo) i računski (desno) dijagram čelika (armature)

Eurokodom 2, odnosno EN 10080, zahtijeva se:

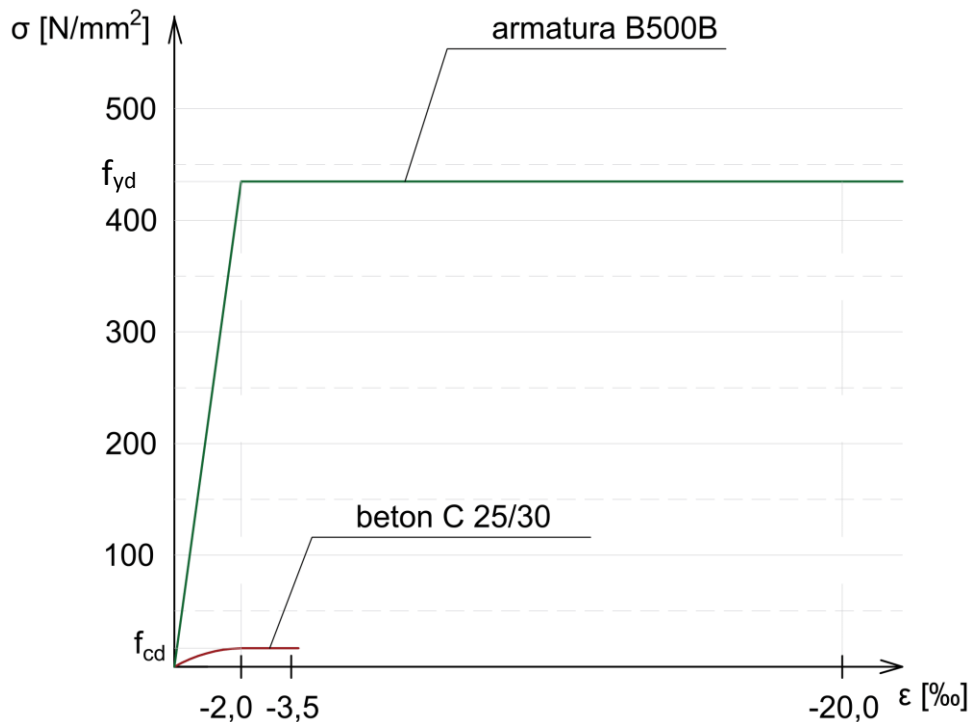
- za čelik visoke duktilnosti da je $\epsilon_{uk} \geq 5\%$, $(f_t/f_y)_k \geq 1.08$,
- za čelik normalne duktilnosti da bude $\epsilon_{uk} \geq 2.5\%$, $(f_t/f_y)_k \geq 1.05$.

Za modul elastičnosti predlaže se stalna veličina $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$, a za temperaturni koeficijent $\alpha_{T,s} = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ kod temperatura od -20° do 200°C .

Normama za čelik predviđaju se dvije vrste betonskog čelika različitih prema duktilnosti:

- B500H - čelik kome je granica popuštanja 500 N/mm^2 i koji ima visok duktilitet ($(f_t/f_y)_k = 1.08$, $\epsilon_{uk} > 5.0\%$),
- B500N - čelik kome je granica popuštanja 500 N/mm^2 i koji ima normalan duktilitet ($(f_t/f_y)_k = 1.05$, $\epsilon_{uk} > 2.5\%$).

Da bismo dobili osjećaj koliko je računski tlačna čvrstoća armature veća od betona, Slika 2.9 prikazuje računsku čvrstoću betona i armature na jednom σ - ϵ dijagramu. Iz nje se može vidjeti da je tlačna čvrstoća armature B500B otprilike 26 puta veća od računске čvrstoće betona C 25/30.



Slika 2.9 Računski dijagram na kojemu možemo vidjeti usporedbu između armature tipa B500B i betona tlačne čvrstoće C 25/30

Dakle, računsku čvrstoću armature B500B možemo dobiti na sljedeći način:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_c} = \frac{500}{1,15} = 434,67 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je f_{yk} karakteristična čvrstoća armature a γ_s parcijalni faktor sigurnosti za armaturu. Računsku čvrstoću betona C 25/30 možemo izračunati:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,15} = 16,67 \text{ N/mm}^2$$

Gdje je f_{ck} karakteristična čvrstoća dobivena preko valjka dimenzije 150/300 mm a γ_c parcijalni faktor sigurnosti za beton.

3. OSNOVE PRORAČUNA AB KONSTRUKCIJA PREMA EUROKODU

Konstrukcija mora biti planirana, projektirana i izvedena na način da tijekom predviđenog vijeka trajanja uz zadovoljavajući stupanj pouzdanosti i na ekonomičan način:

- ostane uporabiva za predviđenu namjenu
- bude u stanju podnijeti sva predvidiva djelovanja i učinke tijekom izvedbe i uporabe

Proračun i izvedba konstrukcije moraju biti takvi da se ona ne može oštetiti zbog požara, eksplozije, udara ili ljudske greške nerazmjerno uzroku (mora se ostvarivati razmjernost uzroka i posljedice). Proračunske situacije opisuju okolnosti u kojima konstrukcija ispunjava svoju ulogu a moraju biti dovoljno zahtjevne i tako varirane da obuhvate sve uvjete koji se mogu očekivati tijekom izvedbe i uporabe konstrukcije. Proračunske situacije dijele se na:

- Stalne situacije – svi uvjeti uobičajene uporabe
- Prolazne situacije – povremeni uvjeti, npr. tijekom izvedbe ili popravka
- Izvanredne situacije – iznimni uvjeti ili požar, eksplozija, udar
- Seizmičke situacije – potres

Proračunski uporabni vijek (Tablica 3.1) je pretpostavljeno razdoblje korištenja konstrukcije uz održavanje, ali bez velikih popravaka.

Klasa	Uporabni vijek	Primjer
1	10 god	Privremene konstrukcije
2	10-25 god	Zamjenjivi dijelovi konstrukcije
3	15-30 god	poljoprivredne i slične konstrukcije
4	50 god	Konstrukcije zgrada
5	100 god	Mostovi i inženjerske konstrukcije, brane

Tablica 3.1 Proračunski uporabni vijek

3.1. Granična stanja

Granična stanja su stanja izvan kojih konstrukcija više ne zadovoljava projektom predviđene zahtjeve. Razlikuju se:

- **granična stanja nosivosti** – GSN (engl. ULS) i
- **granična stanja uporabljivosti** – GSU (engl. SLS).

Koeficijenti sigurnosti služe da pokriju sve netočne pretpostavke koje smo uveli u proračun, kao što su:

- Netočnost procjene stalnog i pokretnog opterećenja,
- Netočnost određivanja čvrstoća i deformacija materijala,
- Netočnost usvojenog statičkog sustava u odnosu na stvarno ponašanje konstrukcije,
- Odstupanje računskih radnih dijagrama σ - ϵ od stvarnih za pojedine materijale,
- Tolerantne greške proračuna,
- Greške određivanja kritičnih presjeka kod dimenzioniranja konstrukcije,
- Utjecaj puzanja i skupljanja betona na konačnu čvrstoću, kao i utjecaj nejednolike temperature,
- Netočnosti izvedbe (tolerantna odstupanja vertikalnosti elemenata, netočnost dimenzija presjeka, itd.),
- Netočnost u položaju armature, naročito odstupanje u veličini zaštitnog sloja u odnosu na projektiranu statičku visinu presjeka,
- Moguću koroziju čelika, koja utječe na smanjenje nosivosti,
- Zanemarivanje prostornog djelovanja konstrukcije i zanemarivanje prostornog stanja naprezanja na čvrstoće.

GSN (ULS) – granična stanja nosivosti – stanja koja mogu izazvati rušenje konstrukcije (stanja netom prije rušenja konstrukcije) ili dovode konstrukciju u stanje mehanizma. Tu spadaju:

- gubitak ravnoteže konstrukcije ili njezina elementa promatranih kao kruto tijelo
- granično stanje sloma ili prekomjerne deformacije kritičnog presjeka
- gubitak ravnoteže zbog velikog deformiranja (teorija II. reda)
- granično stanje sloma uzrokovano zamorom
- transformacija konstrukcije u mehanizam

Metoda graničnih stanja temelji se na **šest pretpostavki**:

1. vrijedi Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka,
2. beton u vlačnoj zoni uopće ne sudjeluje u nošenju,
3. ostvarena je dobra prionjivost između armature i betona do sloma,
4. vrijedi računski dijagram betona $\sigma_c - \varepsilon_c$ (Slika 2.5),
5. vrijedi računski dijagram armature $\sigma_s - \varepsilon_s$ (Slika 2.8),
6. unutarnje sile proračunavaju se po teoriji elastičnosti za naponsko stanje I (bez pukotina)

Granično stanje sloma:

$$E_d \leq R_d \quad (9)$$

- E_d - proračunska vrijednost djelovanja
- R_d - proračunska vrijednost nosivosti (svojstva materijala)

Granično stanje statičke ravnoteže ili velikih pomaka konstrukcije:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \quad (10)$$

- $E_{d,dst}$ - proračunska vrijednost destabilizirajućeg djelovanja
- $E_{d,stb}$ - proračunska vrijednost stabilizirajućeg djelovanja

GSU (SLS) – granična stanja uporabljivosti – podređena su mjerodavnim kriterijima za normalnu upotrebu:

- granično stanje naprezanja
- granično stanje trajnosti (ograničenje širina pukotina)
- granično stanje deformiranja (ograničenje progiba)
- granično stanje vibracija

Granično stanje uporabljivosti:

$$E_d \leq C_d \quad (11)$$

- E_d - proračunska vrijednost djelovanja
- C_d - granična računski vrijednost bitnog kriterija uporabljivosti (deformacija, vibracija, naprezanje)

Granično stanje uporabljivosti predstavlja stanje čijim se prekoračenjem **narušavaju** ili **onemogućuju** projektom utvrđeni kriteriji uporabe. Kriteriji se odnose na samo funkcioniranje konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata u uobičajenoj uporabi, udobnost ljudi, izgled građevine (uslijed deformacije konstrukcije ili nekog njezinog dijela). Kriterije uporabe trebalo bi prethodno dogovoriti s investitorom i posebno utvrditi za svaki projekt ovisno o predviđenoj uporabi građevine.

3.2. Djelovanja na konstrukcije i koeficijenti sigurnosti

U sklopu norme EN 1991 nalaze se dijelovi koji opisuju pojedina djelovanja na konstrukcije kao vlastitu težinu, požar, snijeg, vjetar, temperaturu, djelovanja za vrijeme izvođenja, udar, eksplozije, pritisak zemlje i vode, led, valovi. Hrvatska prednorma **HRN ENV 1991** (Tablica 3.2 sadrži uspoređene hrvatske norme s europskim)– djelovanje raspoređena je na sljedeći način:

- HRN ENV 1991 – 2 – 1 – Vlastita težina i uporabna opterećenja
- HRN ENV 1991 – 2 – 2 – Požarno djelovanje
- HRN ENV 1991 – 2 – 3 – Snijeg
- HRN ENV 1991 – 2 – 4 – Vjetar
- HRN ENV 1991 – 2 – 5 – Toplinska djelovanja
- HRN ENV 1991 – 2 – 6 – Djelovanja pri izvedbi
- HRN ENV 1991 – 2 – 7 – Izvanredna djelovanja uzrokovana udarom ili eksplozijom
- HRN ENV 1991 – 3 – Prometna opterećenja mostova
- HRN ENV 1991 – 4 – Djelovanja na silose i spremnike tekućina
- HRN ENV 1991 – 5 – Djelovanja od kranova i strojeva
- HRN ENV 1991 – 1 – 1 – Potresno djelovanje

Podjela djelovanja

Prema promjenljivosti tijekom vremena:

- **stalna djelovanja G** (vlastita težina, nepokretna oprema (dodatno stalno), pritisak tla, pritisak vode, prenapinjanje, slijeganje oslonaca, deformacije uslijed načina izgradnje konstrukcije)
- **promjenljiva djelovanja Q** (uprabno opterećenje, opterećenje snijegom i opterećenje vjetrom, djelovanje temperature, opterećenje ledom, promjena razine površine vode, opterećenje valovima)
- **izvanredna djelovanja A** (eksplozije, udar vozila, potres, požar, slijeganje i klizanje terena).

Stalna opterećenja su ona za koje se smatra da će vjerojatno djelovati na konstrukciju u cijelom vijeku trajanja, ili imati promjenu intenziteta ali su te promjene zanemarive u odnosu na srednju vrijednost. **Promjenjiva opterećenja** su ona za koje je vjerojatno da će djelovati tijekom zadane proračunske situacije te da će imati promjenu intenziteta tijekom vremena (npr. padanje snijega). **Izvanredna opterećenja** su općenito kratkog vremena trajanja, a vjerojatnost njihovog nastupanja u planiranom vijeku trajanja je mala.

Prema mogućnosti promjene položaja u prostoru:

- **nepomična** (vlastita težina)
- **slobodna djelovanja** (pomična uporabna opterećenja, vjetar, snijeg)

Prema svojoj prirodi i/ili odzivu konstrukcije:

- **statička djelovanja** – koja ne izazivaju značajno ubrzanje konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata
- **dinamička djelovanja** – koja izazivaju značajno ubrzanje konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata

Djelovanje	Hrvatske norme	Europske norme
Prostorne težine, vlastite težine, uporabna opterećenja	HRN ENV 1991-2-1	EN 1991-1-1
Požarno djelovanje	HRN ENV 1991-2-2	EN 1991-1-2
Opterećenje snijegom	HRN ENV 1991-2-3	EN 1991-1-3
Opterećenje vjetrom	HRN ENV 1991-2-4	EN 1991-1-4
Toplinska djelovanja	HRN ENV 1991-2-5	EN 1991-1-5
Djelovanja tijekom izvedbe	HRN ENV 1991-2-6	EN 1991-1-6
Izvanredna djelovanja uzrokovana udarom i eksplozijom	HRN ENV 1991-2-7	EN 1991-1-7
Prometna opterećenja mostova	HRN ENV 1991-3	EN 1991-2
Djelovanja na silose i spremnike tekućina	HRN ENV 1991-4	EN 1991-3
Djelovanja uzrokovana kranovima i drugim strojevima	HRN ENV 1991-5	EN 1991-4
Potresno djelovanje	HRN ENV 1991-1-1	prEN 1998-1

Tablica 3.2 Pregled hrvatskih i europskih normi za djelovanja na konstrukcije

Vlastita težina konstrukcije (ili njenih dijelova ili opreme) može se prikazati pomoću jedne karakteristične vrijednosti (G_k), uzevši u obzir da je promjenljivost mala, a proračunava se na osnovi nazivnih izmjera i karakterističnih prostornih težina. Kada promjenljivost nije mala i kada je poznata statistička razdioba, koriste se dvije vrijednosti, gornja ($G_{k,sup}$) i donja vrijednost ($G_{k,inf}$). Gornja vrijednost ima predviđenu vjerojatnost da neće biti premašena, a donja vjerojatnost da ne padne ispod predviđene vrijednosti.

Promjenjivo djelovanje ima četiri reprezentativne vrijednosti:

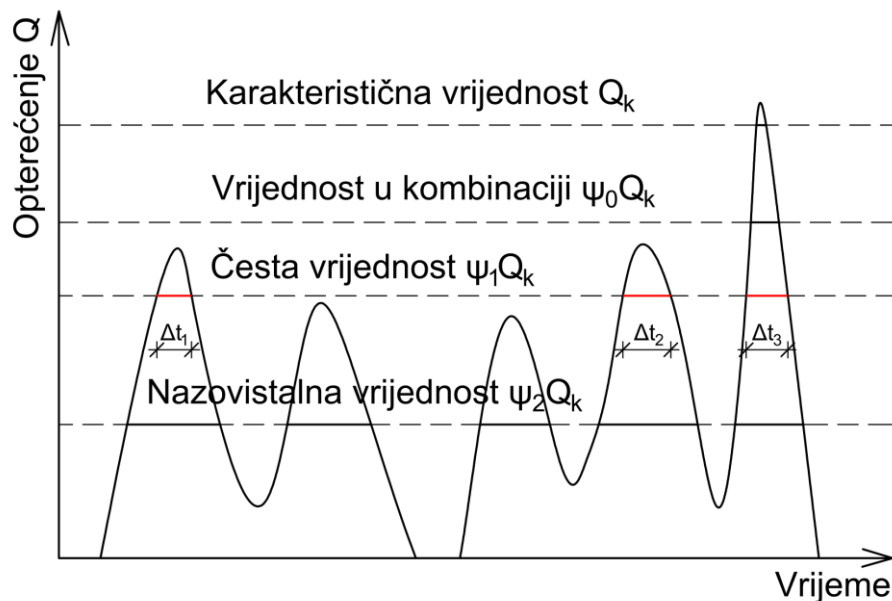
- karakteristična vrijednost (Q_k)
- vrijednost u kombinaciji ($\psi_0 Q_k$)
- česta vrijednost ($\psi_1 Q_k$)
- nazovistalna vrijednost ($\psi_2 Q_k$)

Vrijednost u kombinaciji ($\psi_0 Q_k$) uzima u obzir smanjenu vjerojatnost istovremenog djelovanja više promjenljivih neovisnih opterećenja s njihovom najnepovoljnijom vrijednošću. Koristi se kod

provjeru graničnog stanja nosivosti i nepovratnog graničnog stanja uporabljivosti. Vrlo rijetka kombinacija koja se u vijeku trajanja konstrukcije događa jednom ili nijednom.

Česta vrijednost ($\psi_1 Q_k$) koristi se za provjeru graničnog stanja nosivosti uzimajući u obzir izvanredna djelovanja i za povratna granična stanja. Ovakva kombinacija može se dogoditi npr. jednom godišnje.

Nazovistalna vrijednost ($\psi_2 Q_k$) koristi se za provjeru graničnog stanja nosivosti uzimajući u obzir izvanredna djelovanja te za povratna granična stanja uporabljivosti. Ovakva kombinacija događa se npr. jednom tjedno.



Slika 3.1 Četiri reprezentativne vrijednosti promjenjivog opterećenja

Vlastita težina

Vlastita težina građevinskih elemenata razvrstava se kao stalno djelovanje te kao nepomično djelovanje. Proračunava se na temelju prostornih težina i nazivnih dimenzija.

Težina nepomičnih strojeva, elektroopreme, obloge ubraja se u vlastitu težinu isto kao i težina zemlje, izolacije ili zastora. Oprema kojoj položaj nije točno definiran u vrijeme projektiranja ili primjerice pomični pregradni zidovi mogu se modelirati jednoliko raspoređenim opterećenjem. Vrijednosti zamjenskog kontinuiranog opterećenja najbolje se procjenjuju na temelju iskustva, razumnim pristupom projektanta.

Minimalna vrijednost od $1,0 \text{ kN/m}^2$ koristi se za prostorije s uobičajenim pregradnim zidovima i visinama katova. Za čelične konstrukcije, karakterističnu vlastitu težinu treba odrediti kao umnožak zbroja nazivnih težina pojedinih elemenata i koeficijenta 1,1, da bi se uzeli u obzir limovi i spojna sredstva u čvorovima.

Pokrovi	Površinska težina (kN/m²)
Dvostruki bieber crijep	0,75-0,82
Glineni crijep (utoreni, mediteran,...)	0,42-0,48
Betonski crijep	0,44-0,53
Valoviti lim	0,15

Tablica 3.3 Težine pokrova

Materijal	Zapreminska težina (kN/m³)
Armirani beton	25,0
Čelik	78,5
Meko drvo –četinari	6,00
Tvrdo drvo –lišćari	8,00
Puni zidni elementi od pečene gline	16,00 – 18,00
Šuplji zidni elementi sa više od 25 % šupljina	8,20 – 13,50
Vapneno –silikatni zidni element	17,00
Šamotni zidni elementi	18,50
Fasadni zidni elementi	18,00
Vapneni mort	12,00 – 16,00
Produžni mort	17,50 – 18,00
Cementni mort	21,00
Gipsani mort	14,00 – 18,00
Žbuka od vapna i cementa	19,00
Beton od pijeska i šljunka	22,5 – 24,00
Zidovi od produžnog morta i opeke	15,00 – 19,00
Zidovi od šupljih zidnih elemenata	11,50 – 14,50
Asfalt	24,00
Keramičke pločice	24,00
Staklo	25,00
Armirano staklo	27,00
PVC podne pločice	16,00
Težina polunabijenog pijeska	18,00 – 22,00
Težina polunabijenog šljunka	16,00 – 18,00
Voda	10,00

Tablica 3.4 Zapreminske težine materijala

Uporna opterećenja zgrada

Uporna opterećenja se uglavnom svrstavaju u promjenljiva i slobodna. Uporna opterećenja u zgradama je ono koje proizlazi iz samog korištenja i uglavnom je modelirano jednoliko raspoređenim opterećenjem. Karakteristične vrijednosti ove vrste opterećenja dane su u ovisnosti o namjeni zgrade, odnosno prostorije. U nekim slučajevima važna su i koncentrirana uporna opterećenja i to sama ili u kombinaciji s kontinuiranim opterećenjem

Prostorije u zgradama ovisno o namjeni svrstane su u pet osnovnih razreda i neke podrazrede s odgovarajućim karakterističnim opterećenjem. Krovovi koji su pristupačni projektiraju se na istu razinu uporabnog opterećenja kao i podovi zgrada, dok se krovovi za posebne namjene (slijetanje helikoptera), garaže, i površine s prometnim opterećenjem promatraju odvojeno. Koncentrirano opterećenje djeluje na bilo kojoj točki poda, balkona ili stubišta ili na kvadratnoj površini, stranice 50 mm.

A	Stambene prostorije, odjeljenja u bolnicama, hotelske sobe
B	Uredi
C	Površine na kojima je moguće okupljanje ljudi (5 podrazreda prema vjerojatoj gustoći okupljanja i gužve)
D	Površine za skladištenje

Tablica 3.5 Razredi površina po zgradama

	Opterećene površine	q_k (kN/m ²)	Q_k (kN)
A	općenito	2,0	2,0
	stubišta	3,0	2,0
	balkoni	4,0	2,0
B	B	3,0	2,0
C	C1	3,0	4,0
	C2	4,0	4,0
	C3	5,0	4,0
	C4	5,0	7,0
	C5	5,0	4,0
D	D1	5,0	4,0
	D2	5,0	7,0
E	E	6,0	7,0

Tablica 3.6 Uporna opterećenja u zgradama

Koeficijenti sigurnosti

Kod proračuna konstrukcija projektanti se žele „osigurati“, pa se tako uzimaju vrijednosti opterećenja koje su veće upravo zbog koeficijenata sigurnosti. To znači da će konačne vrijednosti biti veće od početnih, te će se s njima ići u daljnji proračun. Tablica 3.7 prikazuje koeficijente sigurnosti na materijal (čelik i beton, koji nam najčešće trebaju kod proračuna), dok Tablica 3.8 prikazuje koeficijente sigurnosti za opterećenje (stalno, pokretno i prednapeto), a Tablica 3.9 prikazuje tzv. koeficijente kombinacije (ψ).

Materijal / Kombinacija	Beton (γ_c)	Čelik (γ_s)
Uobičajena kombinacija	1,50	1,15
Izvanredna kombinacija	1,30	1,00

Tablica 3.7 Koeficijenti sigurnosti na materijal

Djelovanje	Stalno (γ_G)	Pokretno (γ_Q)	Stalno (γ_P)
Nepovoljno	1,35	1,50	1,0-1,2
Povoljno	1,00	0,00	0,9-1,0

Tablica 3.8 Koeficijenti sigurnosti za opterećenje

Promjenjivo djelovanje	Vrijednost u kombinaciji (ψ_0)	Česta vrijednost (ψ_1)	Kvazistalna vrijednost (ψ_2)
Uporabna opterećenja u zgradama			
- Stambeni prostori	0,7	0,5	0,3
- Uredi	0,7	0,5	0,3
- Prostori za veće skupove ljudi	0,7	0,7	0,6
- Trgovine	0,7	0,7	0,6
- Skladišta	1,0	0,9	0,8
Prometna opterećenja u zgradama			
- Težine vozila ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
- Težine vozila ≤ 30 kN	0,7	0,5	0,3
- Krovovi	0,0	0,0	0,0
Opterećenje vjetrom na zgrade	0,6	0,5	0,0
Opterećenje snijegom	0,6	0,2	0,0
Opterećenje u zgradama (ne požar)	0,6	0,5	0,0

Tablica 3.9 Koeficijenti kombinacije (ψ)

Kombinacija	Proračunske rezne sile
Osnovna kombinacija za stalno (G) + jedno promjenjivo opterećenje	$M_{Ed} = 1,35M_g + 1,5M_q$ $V_{Ed} = 1,35V_g + 1,5V_q$ $N_{Ed} = 1,35N_g + 1,5N_q$ $T_{Ed} = 1,35T_g + 1,5T_q$
Osnovna kombinacija za stalno (G) + istovremeno više promjenjivih opterećenja (Q _i) kao npr. uporabno, snijeg ili vjetar	$M_{Ed} = 1,35M_g + 1,35 \cdot \Sigma M_{q,i}$ $V_{Ed} = 1,35V_g + 1,35 \cdot \Sigma V_{q,i}$ $N_{Ed} = 1,35N_g + 1,35 \cdot \Sigma N_{q,i}$ $T_{Ed} = 1,35T_g + 1,35 \cdot \Sigma T_{q,i}$
Kombinacije s potresom (tzv. seizmička kombinacija) pri čemu se oznaka e odnosi na reznu silu od potresa	$M_{Ed} = M_g + 0,30M_q + M_e$ $V_{Ed} = V_g + 0,30V_q + V_e$ $N_{Ed} = N_g + 0,30N_q + N_e$ $T_{Ed} = T_g + 0,30T_q + T_e$

Tablica 3.10 Kombinacije za određivanje proračunskih reznih sila za granično stanje nosivosti u nekom presjeku

U slučaju da stalno opterećenje djeluje povoljno (Tablica 3.10), umjesto faktora sigurnosti 1,35 potrebno je u izrazima rabiti faktor sigurnosti 1,00. U slučaju da promjenjivo opterećenje djeluje povoljno, umjesto faktora sigurnosti 1,5 potrebno je u izrazima rabiti faktor sigurnosti 0,00.

Kod **graničnih stanja nosivosti (GSN)** postoje tri kombinacije:

- uobičajena (ili stalna),
- izvanredna i
- seizmička proračunska kombinacija,

dok kod **graničnog stanja uporabljivosti (GSU)** postoje također tri kombinacije:

- rijetka kombinacija, koja se koristi kod proračuna širine pukotina i progiba (trajna lokalna oštećenja i deformacije),
- česta kombinacija (koja se koristi kod proračuna širine pukotina i progiba za privremena lokalna oštećenja i deformacije, te kod proračuna ograničenja naprezanja)
- nazovistalna (kvazistalna) kombinacija, koja se koristi kod proračuna ograničenja naprezanja u elementima

Uobičajena (stalna) proračunska kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i (\gamma_G \cdot G_{k,i}) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_P \cdot P_k \quad (12)$$

U jednadžbi (13), pa sve do jednadžbe (17) znak “+“ znači “kombinira se sa“ a pojedine oznake predstavljaju sljedeće:

- γ_G – koeficijent sigurnosti za stalno opterećenje (Tablica 3.8)
- γ_Q – koeficijent sigurnosti za pokretno opterećenje (Tablica 3.8)
- γ_P – koeficijent sigurnosti za prednapeto opterećenje (Tablica 3.8)

- $\psi_{0,i}$ – vrijednost u kombinaciji (Tablica 3.9)

Izvanredna proračunska kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i (\gamma_G \cdot G_{k,i}) + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + A_d + \gamma_P \cdot P_k \quad (13)$$

U jednadžbi (13) pojedine oznake predstavljaju sljedeće:

- γ_G – koeficijent sigurnosti za stalno opterećenje (Tablica 3.8)
- γ_P – koeficijent sigurnosti za prednapeto opterećenje (Tablica 3.8)
- $\psi_{1,1}$ – česta vrijednost (Tablica 3.9)
- $\psi_{2,i}$ – kvazistalna vrijednost (Tablica 3.9)

Seizmička proračunska kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i G_{k,i} + \sum_i (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_i \cdot A_d + P_k \quad (14)$$

U jednadžbi (14) pojedine oznake predstavljaju sljedeće:

- $\psi_{2,i}$ – kvazistalna vrijednost (Tablica 3.9)
- γ_i – koeficijent važnosti (0,7 za građevinu niže važnosti; 1,0 građevina normalne važnosti; 1,3 za građevinu povećane važnosti)

Rijetka kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i G_{k,i} + Q_{k,i} + \sum_{i>1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \quad (15)$$

Gdje je $\psi_{0,i}$ – vrijednost u kombinaciji (Tablica 3.9)

Česta kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i G_{k,i} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,i} + \sum_{i>1} (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \quad (16)$$

Gdje je

- $\psi_{1,1}$ – česta vrijednost (Tablica 3.9)
- $\psi_{2,i}$ – kvazistalna vrijednost (Tablica 3.9)

Nazovistalna kombinacija

$$S_{Ed} = \sum_i G_{k,i} + \sum_i (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + P_k \quad (17)$$

Gdje je

- $\psi_{2,i}$ – kvazistalna vrijednost (Tablica 3.9)

4. DIMENZIONIRANJE PREMA GRANIČNOM STANJU NOSIVOSTI (GSN)

Beton i armaturni čelik imaju jako izraženu plastičnu deformaciju, pa stoga slom armiranobetonske konstrukcije ne nastupa odmah po postizanju granične (tj. proračunske) čvrstoće, nego kasnije. Zato teoriju čija je osnova plastično ponašanje betona i armature, nazivamo teorijom granične nosivosti.

Za svaku armirano-betonsku konstrukciju (ili element) može se reći da imaju određenu nosivosti. Tako je npr. najveći moment savijanja koji neki element može prihvatiti, nosivost tog elementa na savijanje. Uvjet nosivosti presjeka zadovoljen je ako je računski vrijednost utjecaja (unutarnje sile) E_d manja od odgovarajuće računski nosivosti presjeka R_d ili jednaka njoj:

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

U proračunu možemo usvojiti da će se konstrukcija, kad neka od reznih sila izazvana vanjskim opterećenjem, dostigne najveću (graničnu) vrijednost koja odgovara nosivosti presjeka. Stoga se izraz (18) koji je sveden na razinu presjeka, za uobičajene rezne sile, može napisati u obliku:

$$E_d \leq R_d \rightarrow \begin{cases} M_{Ed} \leq M_{Rd} \\ V_{Ed} \leq V_{Rd} \\ N_{Ed} \leq N_{Rd} \\ T_{Ed} \leq T_{Rd} \end{cases} \quad (19)$$

4.1. Elementi naprezani na savijanje

Jednostruki armirani pravokutni presjek

Izrazi za dimenzioniranje dobiju se iz uvjeta ravnoteže koji za savijanje glasi:

$$M_{Ed} = M_{Rd} \quad (20)$$

gdje je:

- $M_{Ed} = \Sigma(\gamma_{g,i} \cdot M_{g,i} + \gamma_q \cdot M_{q,1}) + \gamma_p \cdot M_p$ - računski moment savijanja

- $M_{Rd} = F_c \cdot z = 0.85 \cdot \alpha_v \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} \cdot z = \mu_{Rd} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}$ - računski moment nosivosti presjeka

- α_v - koeficijent punoće

- $x = \xi \cdot d$ - udaljenost neutralne osi od tlačnog ruba

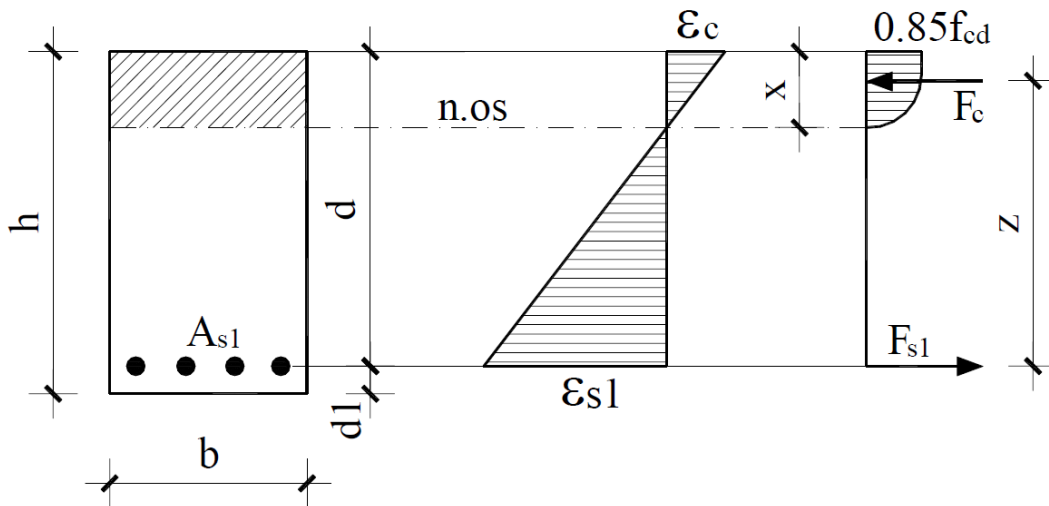
- $z = \zeta \cdot d$ - krak unutrašnjih sila

- μ_{Rd} - bezdimenzionalna vrijednost za moment nosivosti.

Uvrštavanjem izraza za računski momente u jednadžbu dolazi se do formule za bezdimenzionalnu vrijednost momenta savijanja:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \mu_{rd} = 0,85 \cdot \alpha_v \cdot \zeta \cdot \xi \quad (21)$$

gdje je $\xi = \epsilon_{c2} / (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})$



Slika 4.1 Dimenzioniranje na moment savijanja

- ε_c – deformacija betona na tlačnom rubu
- ε_{s1} – deformacija armature u težištu vlačnih šipki
- F_{s1} – sila u vlačnoj armaturi
- F_c – sila u betonu

Izraz za potrebnu vlačnu armaturu dobije se iz uvjeta ravnoteže:

$$M_{Ed} = F_{s1} \cdot z = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot z \quad (22)$$

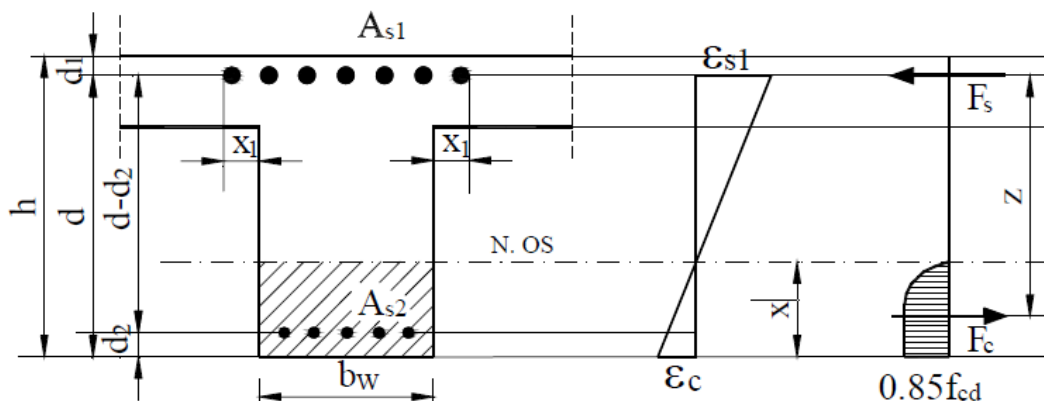
$$A_{s1} = \frac{M_{sd}}{z \cdot f_{yd}} = \frac{M_{sd}}{(\zeta \cdot d) \cdot f_{yd}} \quad (23)$$

Pet osnovnih mogućnosti napreznja ovisit će o deformacijama betona i čelika:

- 1) Ekscentrični vlak s malim ekscentricitetom, čelik je potpuno iskorišten.
- 2) Savijanje ili savijanje s uzdužnom vlačnom silom, čelik je potpuno iskorišten, beton dostiže granične deformacije.
- 3) Savijanje ili savijanje s uzdužnom tlačnom silom, beton i čelik su potpuno iskorišteni.
- 4) Ekscentrični tlak, beton je potpuno iskorišten, čelik dostiže graničnu deformaciju
- 5) Ekscentrični tlak s malim ekscentricitetom, cijeli presjek je u tlaku, deformacije u betonu ograničuju se od $-3,5 \div -2,0$ ‰.

Dvostruko armirani pravokutni presjek

Ukoliko je $M_{Ed} > M_{Rd,lim}$ ili ($\mu_{Sd} > \mu_{lim}$) presjek se mora dvostruko armirati. Presjek je potrebno armirati i u tlačnoj zoni.



Slika 4.2 Dvostruko armirani presjek za negativni moment savijanja

Najveći moment savijanja koji jednostruko armirani presjek može preuzeti je:

$$M_{Rd,lim} = \mu_{lim} \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd} \quad (24)$$

Tlačna armatura povećava duktilnost, ali ukupna armatura mora biti manja od 4% presjeka betona. Koeficijent armiranja cjelokupnog presjeka:

$$\rho_{max} = \frac{A_{s1,max} + A_{s2,max}}{b_w \cdot h} \leq 0,04 \quad (25)$$

Ukupna vlačna armatura sastoji se od dva dijela:

$$A_{s1} = A_{s1,lim} + A_{s2} \quad (26)$$

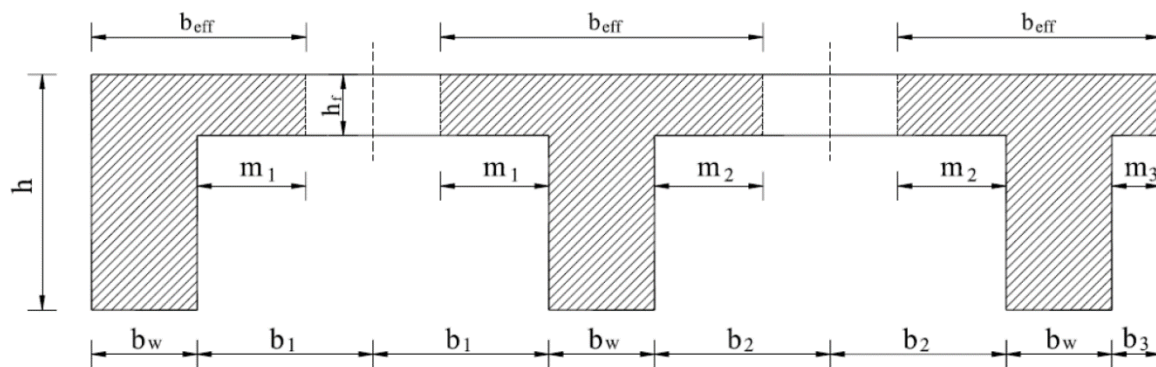
Vlačna i tlačna armatura dane su izrazima:

$$A_{s1} = \frac{M_{Rd,lim}}{(\zeta_{lim} \cdot d) \cdot f_{yd}} + \frac{M_{Ed} - M_{Rd,lim}}{(d - d_2) \cdot f_{yd}} \quad (\text{vlačna}) \quad (27)$$

$$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{Rd,lim}}{(d - d_2) \cdot f_{yd}} \quad (\text{tlačna}) \quad (28)$$

Dimenzioniranje T-presjeka na moment savijanja

Kod ploča s rebrima proračunska širina ploče ovisi o dimenzijama ploče i rebra, o vrsti opterećenja, rasponu, uvjetima na ležajevima i poprečnoj armaturi. Za proračun unutarnjih sila, kada se ne zahtijeva velika točnost (npr. kontinuirani nosači u zgradama), može se pretpostaviti stalna širina duž čitavog raspona.



Slika 4.3 Sudjelujuća širina grede kod T presjeka

Proračunska širina ploče, b_{eff} , za unutarnju gredu T-presjeka uzima se iz dva uvjeta:

$$b_{eff} \leq b_1 + b_w + b_2 \quad (29)$$

$$b_{eff} \leq \frac{L_0}{10} + b_w + \frac{L_0}{10} = \frac{L_0}{5} + b_w \quad (30)$$

gdje su

- b_1 i b_2 - polovica svijetlog razmaka rebara lijevo, odnosno desno od rebra.

- L_0 - razmak nul-točaka momentnog dijagrama

(za prvo polje $L_0=0.85 \cdot L$, za srednje $L_0=0.7 \cdot L$, a za prostu gredu $L_0=L$, za konzolu $L_0=2L$).

Proračunska širina ploče, b_{eff} , za rubnu gredu uzima se iz dva uvjeta:

$$b_{eff} \leq b_1 + b_w \quad (31)$$

$$b_{eff} \leq \frac{L_0}{10} + b_w \quad (32)$$

Za pozitivni moment $b=b_{eff}$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed} (polje)}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (33)$$

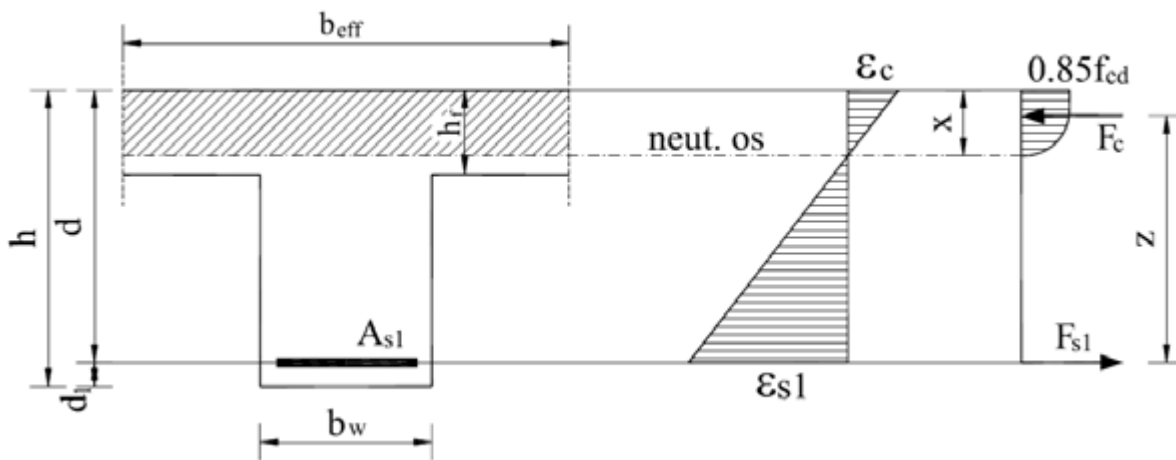
(uz uvjet da neutralna os prolazi kroz ploču, tj. da je $x \leq h_f$)

Za negativni moment $b=b_w$

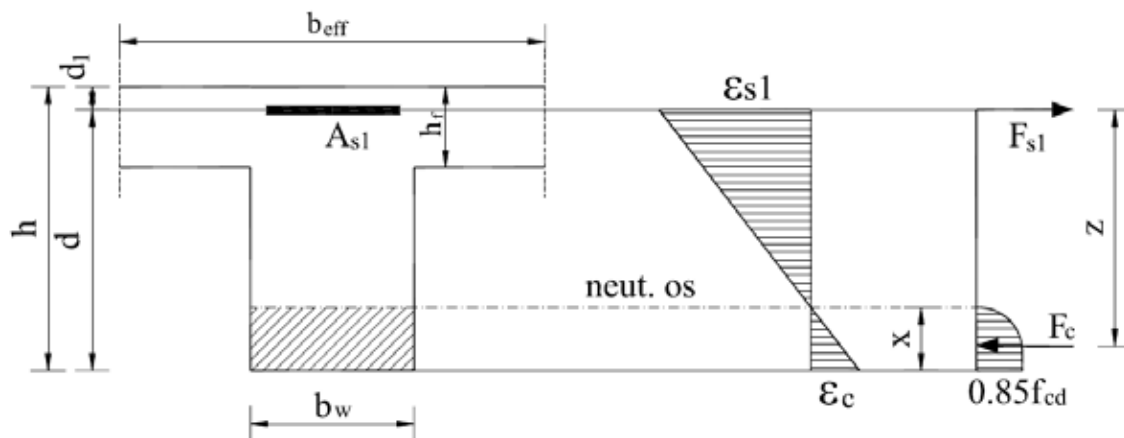
$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed} (ležaj)}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (34)$$

Potrebna armatura:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{(\zeta \cdot d) \cdot f_{yd}} \quad (35)$$



Slika 4.4 Dimenzioniranje T-presjeka na pozitivan moment savijanja



Slika 4.5 Dimenzioniranje T-presjeka na negativan moment savijanja

Ukoliko kod dimenzioniranja na pozitivan moment savijanja neutralna os prolazi kroz rebro ($x > h_f$) tada postoje dva slučaja:

a) Za $b_{eff} \geq 5b_w$

U ovom slučaju može se zanemariti dio rebra ispod ploče, te tada cijelu tlačnu silu preuzima ploča, tj. pojasnica T-presjeka. Potrebnu armaturu u ovom slučaju izračunamo prema formuli:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed} (polje)}{\left(d - \frac{h_f}{2}\right) \cdot f_{yd}} \quad (36)$$

Tlačna naprezanja ne smiju premašiti računsku čvrstoću betona proračunska:

$$\sigma_{cd} = \frac{M_{Ed} (polje)}{\left(d - \frac{h_f}{2}\right) \cdot (b_{eff} \cdot h_f)} \leq 0,85 \cdot f_{cd} \quad (37)$$

b) Za $b_{eff} \leq 5b_w$

Takav T-presjek treba računati tako da se tlačni dio presjeka zamijeni pravokutnikom širine b_i kojem neutralna os prolazi donjim rubom. $b_i = \lambda_b \cdot b_{eff}$. Koeficijent λ_b pronalazi se u tablici ovisno o: h_f/d i b_{eff}/b_w , te $\xi = x/d$ koji se uzima za $\varepsilon_{c2} = 0.0035$ i $\varepsilon_{s1} = 0.01$. Nakon toga provodi se dimenzioniranje kao za pravokutni presjek b_i/h . Minimalna površina računa se prema izrazu:

polje:
$$A_{s1,min} = 0,6 \cdot b_w \cdot \frac{d}{f_{yk}} \geq 0,0015 \cdot b_w \cdot d \quad (38)$$

ležaj:
$$A_{s1,min} = 0,0015 \cdot b_{eff} \cdot d \quad (39)$$

Maksimalna površina armature za T-presjek u polju računa se prema izrazu:

$$A_{s1,max} = 0,85 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b_{eff} \cdot h_f \quad (40)$$

Minimalna i maksimalna armatura

Slom slabo armiranih presjeka nastaje trenutačno. Da se takav slom ne dogodi potrebno je presjek armirati minimalnom armaturom. Količina armature u vlačnoj zoni mora biti tolika da primi silu vlaka koju prije pojave prve pukotine preuzima vlačna zona betona. Minimalna armatura je armatura momenta prve pukotine.

$$A_{s1,min} = \frac{M_{cr}}{z \cdot f_{yk}} = \frac{W_c \cdot f_{ct,m}}{(0,9d) \cdot f_{yk}} \quad (41)$$

$$A_{s1,min} \cdot f_{yk} \cdot (0,9d) = W_c \cdot f_{ct,m} \quad (42)$$

pri čemu je

- W_c - moment otpora betonskog presjeka

- $f_{ct,m}$ – srednja vlačna čvrstoća betona

U nastavku možemo napisati i formulu za minimalnu armaturu kod pravokutnog presjeka, uz napomenu da je $z=0,9d$ (krak unutarnjih sila), a formula glasi:

$$A_{s1,min} = 0,022 \cdot \frac{f_{ck}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d \quad (43)$$

Minimalna armatura se određuje po sljedećem izrazu:

$$A_{s1,min} = 0,6 \cdot b_t \cdot \frac{d}{f_{yk}} \geq 0,0015 \cdot b_t \cdot d \quad [f_{yk} \text{ u } N/mm^2] \quad (44)$$

gdje je b_t srednja širina vlačne zone. Iz uvjeta duktilnosti, kako ne bi došlo do krtog loma, odabrana armatura mora biti veća od minimalne i manja od maksimalne ($A_{min} < A_{od} < A_{max}$)

Maksimalna armatura određuje se po sljedećem izrazu:

$$A_{s1,max} = 0,04 \cdot b \cdot d \quad (45)$$

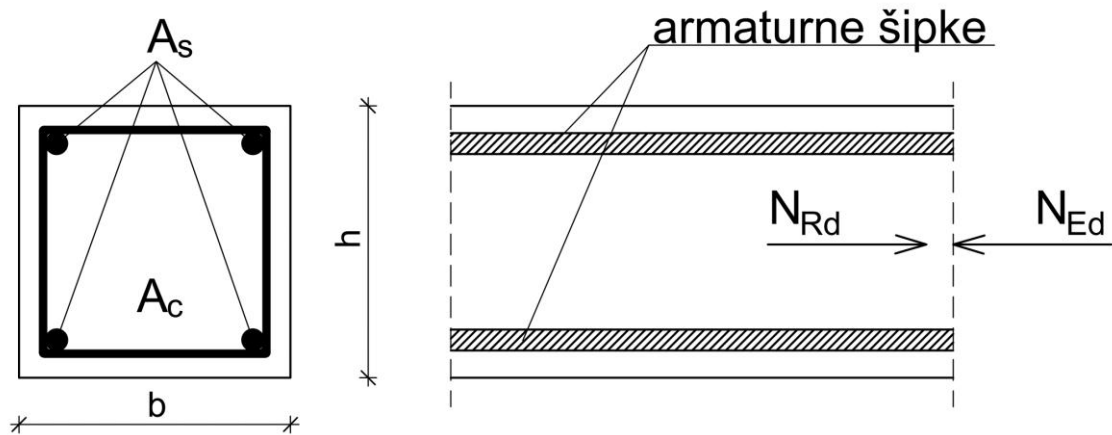
4.2. Elementi naprezani uzdužnom silom

Centrično-tlačno naprezani elementi

Kratki elementi, odnosno elementi kojima je vitkost $\lambda \leq 25$, te odnos stranica $h \leq 4b$, proračunavaju se ne uzimajući u obzir nepravilnosti:

$$e_{min} = h/30 ; b/30 \text{ (imperfekcije od netočnosti izvedbe)} \quad (46)$$

$$e_{min} = 20 \text{ mm}$$



Slika 4.6 Poprečni presjek naprezan centričnom tlačnom silom

Uz pretpostavku zajedničke nosivosti betona i čelika izraz za centrično opterećen element glasi:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (47)$$

$$N_{Ed} = A_c \sigma_c + A_s \sigma_s$$

Za punu iskorištenost betona $\epsilon_c = -2.0 \text{ ‰}$ i čelika proizlazi:

$$N_{Ed} = A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd} \quad (48)$$

Potrebna uzdužna armatura prema Eurokodu 2 računa se po izrazu:

$$A_s = \frac{N_{Ed} - A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (49)$$

Potrebna armatura za presjek opterećen centričnom tlačnom silom iznosi:

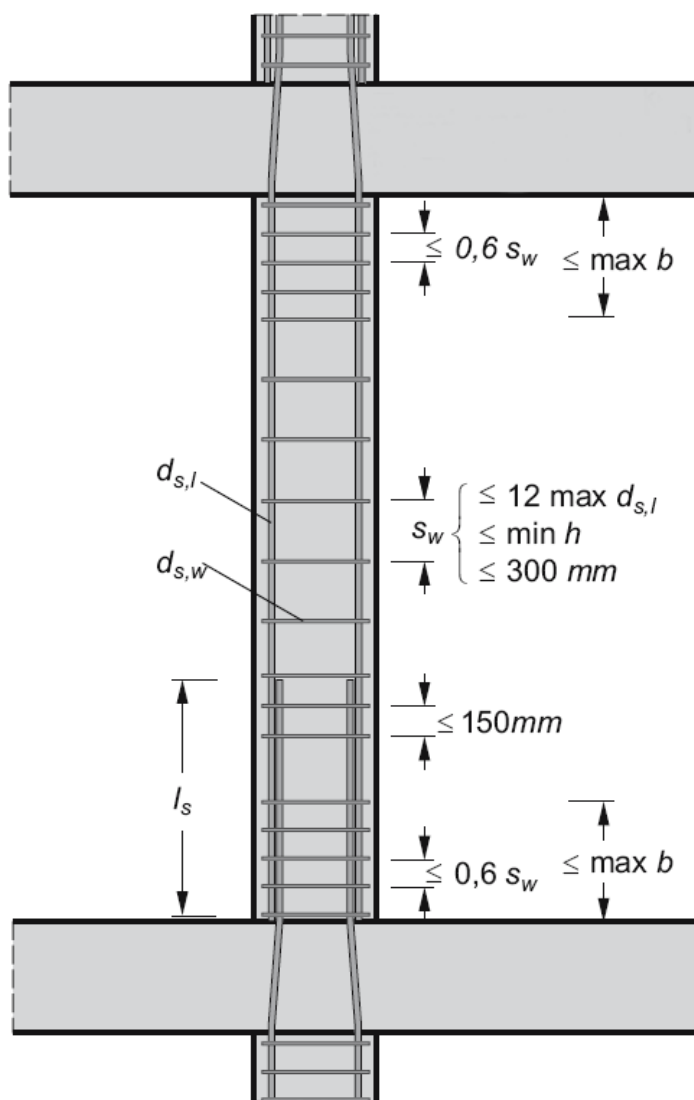
$$A_s = \frac{N_{Ed} - A_c \cdot 0,85 \cdot f_{cd}}{f_{yd} - 0,85 \cdot f_{cd}} \quad (50)$$

Minimalna površina uzdužne armature proračuna se po izrazu:

$$A_{s,min} = 0,15 \cdot N_{Ed} / f_{yd} \geq 0,003 \cdot A_c \quad (51)$$

a za najmanji profil treba uzeti $\Phi 12$ mm. Maksimalnu armaturu na mjestu nastavka možemo izračunati prema izrazu:

$$A_{s,max} = 0,008 \cdot A_c \quad (52)$$



Slika 4.7 Razmak poprečne armature kod stupa

Najmanji profil spona je $\phi 6$ mm, ali ne manji od $1/4 \phi$ (uzdužne armature). Razmak spona treba biti

$e \leq b \leq 12 \Phi \leq 300$ mm, gdje je b manja stranica presjeka a Φ promjer najtanje uzdužne šipke. Razmak spona treba reducirati faktorom 0,6; i to iznad grede ili ploče oslonjene na stup i ispod nje na dužini veće dimenzije stupa te na mjestu nastavka uzdužnih šipki profila većih od 14 mm. Svaku šipku ili grupu šipki u kutu presjeka valja sponama pridržati od izvijanja. Do 5 šipki u kutu ili blizu njega može se osigurati od izvijanja jednom sponom. U stupovima poligonalnog presjeka mora se, u svakom njegovu kutu, predvidjeti barem jedna uzdužna šipka, a u onima kružnog

presjeka barem 6 uzdužnih šipki jednoliko raspoređenih po opsegu spona.

Naprezanje u betonu i armaturi kod centrično tlačno opterećenog presjeka:

$$N_{Ed} = F_c + F_s \quad (53)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s$$

$$\frac{\sigma_c}{E_{cm}} = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\sigma_s = E_s/E_{cm} \cdot \sigma_c = \alpha_e \cdot \sigma_c \quad (54)$$

$$N_{Ed} = (A_c - A_s) \cdot \sigma_c + A_s \cdot \alpha_e \cdot \sigma_c \quad (55)$$

Naprezanje u betonu (u trenutku opterećenja $t=0$):

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{(A_c - A_s) + A_s \cdot \alpha_e} = \frac{N_{Ed}}{A_c + A_s \cdot (\alpha_e - 1)} = \frac{N_{Ed}}{A_{id}} \quad (56)$$

pri čemu je A_{id} idealna površina poprečnog presjeka:

$$A_{id} = A_c + A_s \cdot (\alpha_e - 1) = A_c + \rho \cdot (\alpha - 1) \quad (57)$$

$$\rho = A_s/A_c$$

Vremenom, zbog puzanja i skupljanja, beton se skraćuje, naprezanje u betonu se smanjuje a naprezanje u armaturi raste. Utjecaj puzanja betona može se približno uzeti preko efektivnog modula elastičnosti:

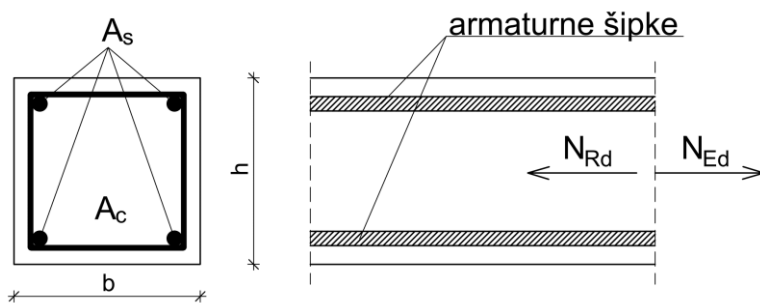
$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1,0 + \phi \cdot (t_{\infty}, t_0)} \quad (58)$$

Odnos modula elastičnosti čelika i betona:

$$\alpha_e = E_s/E_{cm}, \quad \text{za } t = 0$$

$$\alpha_e = E_s/E_{c,eff}, \quad \text{za } t = \infty$$

Centrično-vlačno naprezani elementi



Slika 4.8 Poprečni presjek naprezan centričnom vlačnom silom

Sve sile vlaka preuzima armatura. Potrebna uzdužna armatura računa se po izrazu:

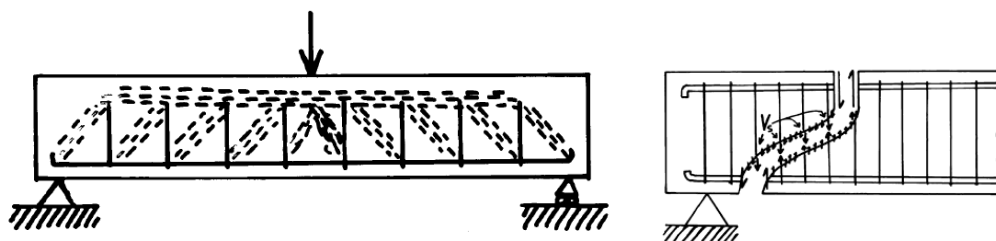
$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

pri čemu je:

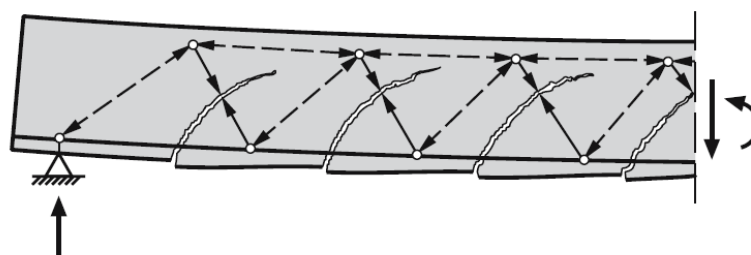
$$N_{Ed} = A_s \cdot \sigma_s = A_s \cdot f_{yd}$$

4.3. Poprečna armatura u gredama

Proračun elemenata na poprečne sile provodi se prema poboljšanoj Morsch-Ritterovoj analogiji s rešetkom. Prema toj metodi pretpostavlja se da jedan dio poprečne sile preuzima beton i uzdužna armatura, a preostali se dio prihvaća sponama ili kosom armaturom (Standardna metoda). Prema drugoj metodi (Metoda slobodnog odabira nagiba tlačnih štapova), nosivost betona se ne uzima u obzir, već se uzima blaži kut nagiba tlačnih dijagonala od 45° . Time se dobiva manja poprečna armatura ali se povećava uzdužna armatura ili dolazi do većeg pomaka dijagrama vlačnih sila.



Slika 4.9 Morschova rešetka – nosivi mehanizam sa vertikalnim sponama

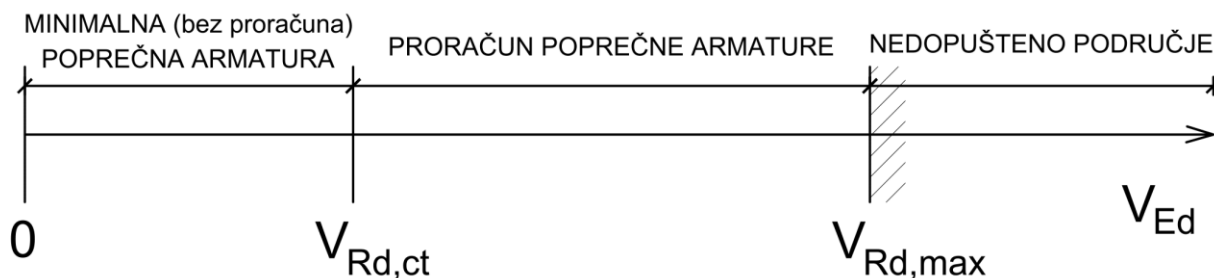


Slika 4.10 Morschova rešetka – nosivi mehanizam sa kosim sponama

Uvjet nosivosti na poprečne sile glasi:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (59)$$

- V_{Ed} – računski poprečna sila, tj. nosivost armature bez armature
- V_{Rd} - računski nosivost na poprečne sile



Slika 4.11 Područja poprečnih sila

Postupak dimenzioniranja osniva se na dvjema proračunskim vrijednostima nosivosti na poprečnu silu: $V_{Rd,ct}$ (proračunska otpornost na poprečnu silu elemenata bez poprečne armature, tj. otpornost na poprečnu silu samog betona i uzdužne armature) i $V_{Rd,max}$ (proračunska vrijednost najveće poprečne sile koju preuzima element ograničen tlačnom čvrstoćom betona). Na temelju tih dviju vrijednosti proračunske otpornosti i vrijednosti proračunske poprečne sile mogu se postaviti sljedeći uvjeti (Slika 4.11):

- a) Ako je $V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$ - nije potreban proračun poprečne armature
- b) Ako je $V_{Rd,ct} < V_{Ed} < V_{Rd,max}$ - potreban je proračun poprečne armature
- c) Ako je $V_{Ed} > V_{Rd,max}$ - potrebno je povećati poprečni presjek ili kvalitetu gradiva kako bi proračunska poprečna sila bila manja od maksimalne otpornosti

Ako je V_{Ed} manji od $V_{Rd,ct}$ teoretski ne trebamo stavljati vilice, već ih stavljamo čisto zbog konstruktivnih razloga. Proračunska nosivost na poprečnu silu elementa bez poprečne armature dana je izrazom:

$$V_{Rd,ct} = \left[\left(\frac{0,18}{\gamma_c} \right) \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (60)$$

pri čemu je

- $V_{Rd,ct}$ – proračunska vrijednosti otpornosti presjeka bez poprečne armature u N
 - $b_w \cdot d = A_c$
 - $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ (k je koeficijent koji uzima u obzir visine elemenata)
 - $\rho_1 = A_{s1}/b_w \cdot d \leq 0,02$ – koeficijent armiranja uzdužne armature sidrene za min. $d+l_{b,net}$
- Kod sila koje vertikalno opterećuju nosač, $V_{Rd,s}$ iznosi:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (61)$$

Maksimalna nosivost na poprečne sile sa poprečnom armaturom može se izraziti preko formule:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z v_1 \cdot \frac{f_{cd}}{(\cot\theta + \cot\alpha)} \quad (62)$$

pri čemu je

- $V_{Rd,max}$ – proračunska vrijednost najveće poprečne sile koju preuzima element ograničen tlačnom čvrstoćom betona u N
- α_{cw} – koeficijent koji uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu i za proračune u zgradarstvu gdje su uzdužne tlačne sile male ili ih nema, može se uzeti da iznosi 1,0
- b_w – širina hrpta (rebra) poprečnog presjeka [mm]
- z – krak unutarnjih sila (udaljenost od f_{s1} do f_c - približno 0,9d)

- v_1 – koeficijent smanjenja čvrstoće za beton raspucan posmikom a određuje se prema izrazu $0,6 (1-f_{ck}/250)$ [N/mm²]
- f_{cd} – proračunska tlačna čvrstoća betona [N/mm²]
- f_{ywd} – proračunska granica popuštanja čelika spona [N/mm²]
- θ – nagib usvojenih tlačnih dijagonala

Za približne se proračune u zgradarstvu može uzeti da je preporučena vrijednost kuta $\theta=39,8^\circ$, te da vrijedi $f_{ck} \leq 60$ n/mm² i da je $f_{ywd}=0,8f_{yk}$, što omogućuje da se izraz (62) može napisati u obliku:

$$V_{Rd,max} = 0,265 \cdot b_w \cdot d \cdot f_{cd} \quad (63)$$

Za sile koje su pod kutom, poprečna sila se umanjuje za kut:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (64)$$

gdje je:

- $V_{Rd,s}$ – proračunska vrijednost poprečne sile koju preuzima čelična armatura (spone) prilikom popuštanja [kN]
- A_{sw} – ploština presjeka svih krakova spona na duljini s i širini b_w [cm²] a određuje se kao $A_{sw}=A_{sw}^1 \cdot m$, pri čemu je A_{sw}^1 ploština jedne grane spona, a m je broj grana spona u jednom presjeku (reznost spona)
- z – krak unutarnjih sila (udaljenost od f_{s1} do f_c - približno $0,9d$)
- s – razmak spona po duljini grede [cm] (može se koristiti i oznaka s_w)
- f_{ywd} – proračunska granica popuštanja čelika spona [N/mm²]
- θ – nagib usvojenih tlačnih dijagonala

a maksimalni moment iznosi:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z v_1 \cdot \frac{f_{cd} (\cot\theta + \cot\alpha)}{(1 + \cot^2\theta)} \quad (65)$$

Maksimalni razmak vilica:

$$s_{w,max} = \frac{A_{sw}}{\rho_w \cdot b_w} \quad (66)$$

dok se razmak vilica izračunava po formuli:

$$\rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin\alpha) \quad (67)$$

5. DIMENZIONIRANJE PREMA GRANIČNOM STANJU UPORABLJIVOSTI (GSU)

Prema europskim normama konstrukciju i njene elemente potrebno je kontrolirati ne samo prema graničnim stanjima nosivosti već i na granična stanja uporabljivosti. U granična stanja uporabljivosti spada:

- granično stanje naprezanja (kontrola naprezanja),
- granično stanje trajnosti (kontrola širina pukotina),
- granično stanje deformiranja (kontrola progiba) i
- granično stanje vibracija

Za razliku od graničnih stanja nosivosti koeficijenti sigurnosti za opterećenje i za materijal u graničnim stanjima uporabljivosti iznose ukoliko nije drugačije određeno:

$$\gamma_{Gj} = \gamma_{Qj} = 1 \quad i \quad \gamma_M = 1 \quad (68)$$

U proračunima je potrebno dokazati da je proračunska vrijednost djelovanja (odnosno E_d) manja ili jednaka graničnoj računskoj vrijednosti bitnog kriterija uporabljivosti (deformacija, vibracija, naprezanje):

$$E_d = C_d \quad (69)$$

5.1. Granično stanje naprezanja

Beton:

Naprezanje u betonu, σ_c , za rijetku kombinaciju opterećenja treba biti:

$$\sigma_c \leq 0,6 \cdot f_{ck} \quad (70)$$

dok za nazovistalnu kombinaciju:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck} \quad (71)$$

Armatura:

Naprezanje u armaturi, za rijetku kombinaciju opterećenja treba biti:

$$\sigma_c \leq 0,80 \cdot f_{yk} \quad (72)$$

Prednapeti čelik:

Maksimalni dopušteno naprezanje u prednapetom čeliku za vrijeme prednapinjanja (registrirano na preši σ_{p0}) ne smije prijeći:

$$\sigma_{p0} \leq 0,80 \cdot f_{pk} \quad (73)$$

$$\sigma_{p0} \leq 0,90 \cdot f_{p0.1,k} \quad (74)$$

Neposredno nakon uklanjanja preše i unošenja sile u beton maksimalno dopušteno naprezanje ne smije prijeći:

$$\sigma_{pm,0} \leq 0,75 \cdot f_{pk} \quad (75)$$

$$\sigma_{pm,0} \leq 0,85 \cdot f_{p0.1,k} \quad (76)$$

5.2. Granično stanje raspucavanja (kontrola pukotina)

Glavna pretpostavka armiranog betona je da je beton u vlaku raspucao i da sva vlačna naprezanja preuzima armatura. Pukotine nastaju kada vlačna naprezanja od unutarnjih sila prekorače vlačnu čvrstoću betona. Pukotine nisu smetnja ako im širina ne premašuju propisanu graničnu vrijednost uvjetovanu korozijom, vanjskim izgledom ili nepropusnošću za tekućine ili plinove. Granična širina kreće se od $w_g = 0$ do 0.4 mm.

Prema normi HRN ENV 1992-1-1 za graničnu širinu pukotina armiranobetonskih konstrukcija za razrede okoliša "vlažno" do "elementi djelomično u morskoj vodi", te ako nema posebnih zahtjeva (vodonepropusnost), propisuje se granična širina pukotine $w_g = 0.3$ mm. Za prednapete sustave $w_g = 0.2$ mm. Za provjeru graničnog stanja trajnosti primjenjuje se nazovistalna i česta kombinacija opterećenja. Za suhi okoliš širine pukotina nemaju utjecaja na trajnost armiranobetonskih konstrukcija, pa se ograničenja mogu zahtijevati iz drugih razloga (vodonepropusnost, vanjski izgled). Za građevine koje se nalaze u vrlo agresivnom okolišu, postavljaju se posebni zahtjevi koji nisu dani u normi.

Ograničenje širine pukotina u armiranobetonskim i prednapetim konstrukcijama može se postići:

- ugrađivanjem armature jednake ili veće od minimalne u vlačno područje
- ograničenjem razmaka i promjera sipki armature.

Trajnost građevine ne ovisi samo o širini pukotina već prije svega o kvaliteti i vodonepropusnosti betona, zaštiti armature od korozije, kvaliteti izvedbe, prekidu betoniranja, rješenju spojeva elemenata te o drugim manje važnim uzrocima. Armiranobetonske i prednapete elemente treba uvijek armirati u području vlačnih naprezanja barem minimalnom armaturom za ograničenje širina pukotina, osobito ako se očekuje indirektno djelovanje izazvano spriječennošću slobodnog skupljanja ili prinudnim deformacijama (popuštanje oslonaca).

Minimalna armatura može se izračunati po izrazu:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (77)$$

pri čemu je:

- k_c – koeficijent kojim se uzima u obzir raspodjela naprezanja po visini presjeka pri pojavi prve pukotine ($k_c=1.0$ za centrični vlak; $k_c=0.4$ za savijanje)

- k – koeficijent umanjena kojim se uzima u obzir nelinearna raspodjela vlačnog naprezanja po presjeku izazvanog temperaturnim promjenama i skupljanjem unutar elementa.

$k = 0.8$ - općenito

$k = 1,0$, za pravokutni presjek $h < 30$ cm

$k = 0.65$, za pravokutni presjek $h > 80$ cm

između gornjih vrijednosti vrijedi linearna interpolacija.

- $f_{ct,eff}$ – vlačna čvrstoća betona pri pojavi prve pukotine

- A_{ct} – vlačna površina neposredno prije pojave pukotine

- σ_s – naprezanje u armaturi neposredno nakon pojave pukotine

Kako bi se povećala trajnost i uporabljivost građevine potrebno je ograničiti širine pukotina. U kontroli pukotina potrebno je izračunati karakterističnu širinu pukotina i usporediti je s graničnom širinom. Za proračun graničnih stanja pukotina upotrebljava se kvazistalna i česta kombinacija opterećenja. Ako želimo točniji dokaz graničnog stanja pukotina, proračunava se karakteristična vrijednost širine pukotina i uspoređuje se s graničnom vrijednošću ($w_k \leq w_g$).

Karakteristična širina pukotine računa se prema sljedećem izrazu:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad [mm] \quad (78)$$

pri čemu je $s_{r,max}$ maksimalan razmak pukotina, ε_{sm} predstavlja relativnu deformaciju ojačanja kod relevantnih (bitnih) kombinacija opterećenja, uključujući efekt nametnute deformacije i uzimajući u obzir efekt krutosti vlačnog naprezanja, dok se $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ izraz može napisati kao:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 - \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (79)$$

Izraz (79) ima puno koeficijenata, koji se mogu pronaći u Eurokodu 2. Koristeći Džepni rječnik za građevinare, autora Špiranec i Pavkovića, sljedeći izrazi imaju sljedeće značenje:

- σ_s – vlačno naprezanje u armaturi uz pretpostavku napuknutog dijela

- α_e – omjer E_s/E_{cm}

- $\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1 + A'_p) / A_{c,eff}$

- A'_p – površina napregnute armature prije ili poslije unutar površine $A_{c,eff}$

- $A_{c,eff}$ – površina poprečnog presjeka betona bez površine armature

- ξ_1 – omjer čvrstoće spoja prednapetog čelika i armature za beton

Širina pukotine (w) na površini betona u odnosu na udaljenost od šipke

$$S_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{p,eff}} \quad (80)$$

Izraz iz Eurokoda 2 prikazuje formulu za najveću (maksimalnu) udaljenost pukotina, a pojedine oznake imaju sljedeće značenje:

- ϕ – promjer šipki
- c – pokrivanje uzdužne armature
- k_1 – koeficijent koji uzima u obzir svojstva spoja (veze), a iznosi 0,8 za šipke visokih veza a 1,6 za šipke efektivnom ravnom i glatkom površinom (npr. prednapeta armatura)
- k_2 – koeficijent koji uzima u obzir raspodjelu deformacija, a iznosi 0,5 za savijanje; 1,0 za čisti vlak (prosječna vrijednost koeficijenta za slučajevne ekscentričnog vlaka lokalnih područja može se izračunati po formuli $k_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / (2\epsilon_1)$, gdje je $\epsilon_1 > \epsilon_2$)
- k_3 i k_4 – vrijednosti ovih koeficijenata mogu se pronaći u Nacionalnim dodacima (engl. *National Annex*), a preporučene vrijednosti su 3,4 i 0,425

Ako je razmak pukotina spojenih ojačanja veći od $5(c + \phi/2)$ ili gdje nema spojenih ojačanja unutar zone vlaka, gornja veza širine pukotina može se pronaći ako se pretpostavi maksimalni razmak pukotina:

$$S_{r,max} = 1,3(h - x) \quad (81)$$

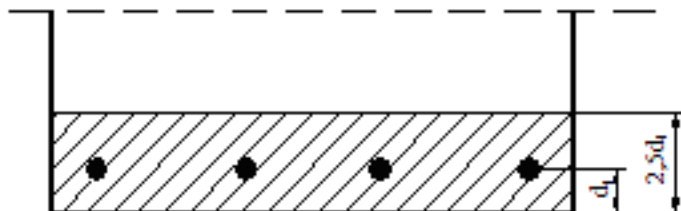
Srednji razmak pukotine računa se prema sljedećem izrazu:

$$s_{rm} = 50 [mm] + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r} \quad (82)$$

pri čemu je

- k_1 - koeficijent prionjivosti (0,8 za RA i 1,6 za GA)
- k_2 - koeficijent raspodjele deformacija (0,5 za savijanje i 1,0 za čisti vlak)
- ϕ - srednja vrijednost promjera šipke (mm)

$\rho_r = A_s / A_{c,eff}$ – djelotvorni koeficijent armiranja pri čemu je A_s ploština vlačne armature a $A_{c,eff}$ djelotvorna vlačna ploština betona



Slika 5.1 Određivanje djelotvorne vlačne ploštine betona

Naprezanje u vlačnoj armaturi na mjestu pukotine σ_s :

$$\sigma_s = \frac{M_{sd}}{z \cdot A_s} \approx \frac{M_{sd}}{(d - \frac{x}{3}) \cdot A_s} \quad (83)$$

Naprezanje u vlačnoj armaturi kod pojave prve pukotine σ_{sr} :

$$\sigma_{sr} = \frac{M_{cr}}{z \cdot A_s} \quad (84)$$

Moment prve pukotine je umnožak vlačne čvrstoće betona i momenta otpora. Presjeci koji nemaju težište u polovici visine imaju različite momente prve pukotine na gornjem i donjem rubu. Na primjer kod grede T-presjeka moment prve pukotine na ležaju i u polju nije isti. Kako taj moment ulazi i u proračun minimalne uzdužne armature, greda T-presjeka ima različite minimalne armature u polju i na ležaju. Za pravokutni presjek M_{cr} iznosi:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot w_y = f_{ctm} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (85)$$

5.3. Granično stanje deformiranja (kontrola progiba)

Deformiranje građevinskog elementa općeniti je naziv za deformaciju, progib, zakrivljenost, izduženje ili skraćenje, uvrtnje i promjenu nagiba elementa. Značajan parametar graničnog stanja deformiranja je progib konstruktivnih elemenata.

Prognoziranje progiba vrlo je složeno zbog utjecaja velikog broja čimbenika koji se mijenjaju uzduž osi elementa i vremenski. Zbog toga nije moguće dobiti potpuno točan algoritam za proračun progiba već se koriste približni postupci koji se temelje na rezultatima eksperimentalnih istraživanja.

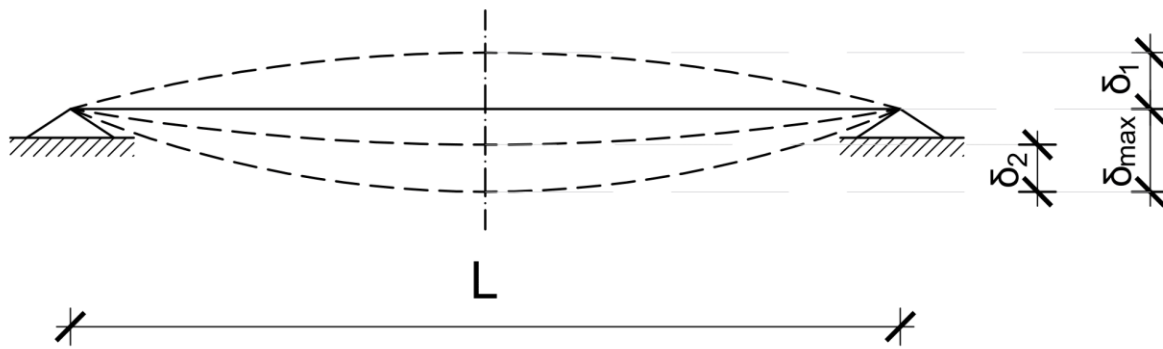
Da se spriječi nepovoljan utjecaj na izgled i uporabljivost, progib za slučaj kvazistalne kombinacije opterećenja ne smije prijeći 1/250 raspona, dakle:

$$v \leq l/250 \quad (86)$$

Kvazistalna kombinacija znači da djeluje stalno opterećenje i dio korisnog opterećenja za koji se pretpostavlja da stalno djeluje (npr. težina namještaja, opreme i dr.).

Da se spriječe oštećenja lakih pregradnih zidova, ostakljenja, zidnih obloga i drugih nekonstruktivnih elemenata povezanih pločom ili gredom, progib koji nastaje nakon ugradnje spomenutih elemenata ne smije preći 1/500 raspona, dakle:

$$v' \leq l/500 \quad (87)$$



Slika 5.2 Grafički prikaz progiba

Konstrukcija	δ_{max}	δ_2
Krovovi	L/200	L/300
Pristupačni krovovi za drugu namjenu osim održavanja	L/250	L/300
Stropovi	L/250	L/300
Stropovi ili krovovi sa žbukom ili drugim krhkim završnim slojevima ili nesavjetljivim pregradama	L/250	L/350
Stropovi koje podupiru stupovi (osim ako je progib uzet u obzir u sklopu globalnog proračuna za GSU)	L/400	L/500
Kada δ_{max} može narušiti izgled zgrade	L/250	-

Tablica 5.1 Preporučene vrijednosti maksimalnih vertikalnih progiba

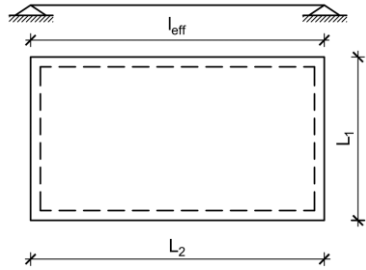
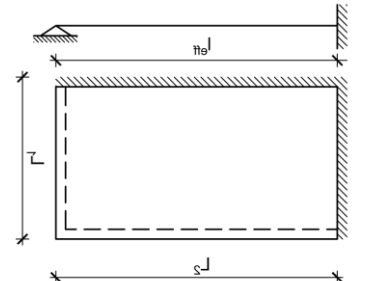
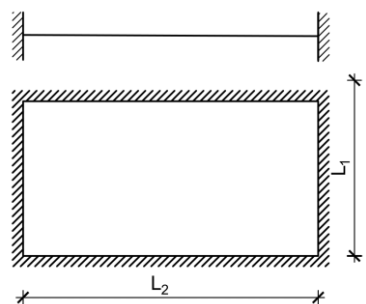
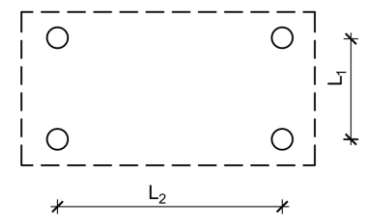
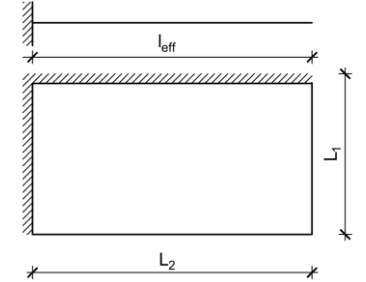
U Tablici gore dane su preporučene vrijednosti maksimalnih vertikalnih progiba, što je i grafički interpretirano (Slika 5.2), gdje δ_{max} označava maksimalni (tj. ukupni) progib, δ_1 označava progib za kratkotrajno opterećenje, a δ_2 progib od vremenskih efekata.

Kontrolu progiba nije potrebno uvijek provoditi. Eurokod 2 propisuje da kontrolu graničnog stanja uporabe nije potrebno provoditi kada vitkost elemenata na savijanje (L_{eff}/d) ne prelazi vrijednosti dane u tablici (Tablica 5.2 Granične vitkosti elemenata kada nije potrebno provoditi kontrolu progiba.) Vrijednosti dane u istoj tablici valja umanjiti, i to za grede T presjeka kojima je b_{eff}/b_w manji od 3 s faktorom 0,8. Za sve elemente (osim ravnih ploča) raspona preko 7m, koji nose pregradne zidove, s faktorom $7/l_{eff}$, dok za ravne ploče raspona preko 8,5m s faktorom $8,5/l_{eff}$.

Ako je stvarno naprezanje u armaturi manje od 250 MN/m^2 , vrijednosti u tablici treba korigirati s nepovoljnijim od dva faktora:

$$f_3 = \frac{250}{\sigma_s} \quad f_3 = \frac{400}{f_{yk} \cdot \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}}}$$

gdje je $A_{s,prov}$ postojeća ploština (tj. površina) armature
a $A_{s,req}$ potrebna površina armature.

Statički sustav	Dopušteni odnos L_{eff}/d odnosno (L_1/d) ili (L_2/d) za		Shema sustava
	Slabo naprezan beton (ploče) $\rho \leq 0,5\%$	Jako naprezan beton (ploče) $\rho \geq 1,5\%$	
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	

Tablica 5.2 Granične vitkosti elemenata kada nije potrebno provoditi kontrolu progiba.

Kod deformiranja potrebno je dokazati da je progib izazvan opterećenjem manji od ograničenog, odnosno:

$$f_k \leq f_g \quad (88)$$

Općeniti izraz za vrijednost deformiranja (uglavnom naprezane na savijanje) glasi:

$$\alpha = \zeta \cdot \alpha_{II} + (1 - \zeta) \cdot \alpha_I \quad (89)$$

U gornjem izrazu (89) α predstavlja općenitu vrijednost deformiranja, a može biti progib, zakrivljenost, pomak, uvrtnanje i slično, dok α_I i α_{II} predstavljaju vrijednosti deformiranja izračunate za ne napuknute i potpuno napuknute elemente.

Za elemente koji su konstante visine može se koristiti i pojednostavljena metoda prema kojoj se izračunava zakrivljenost na mjestu maksimalnog momenta (M_{\max}), pa progib se tada računa prema izrazu:

$$f_{tot} = k \cdot l^2 \cdot \frac{1}{r_{tot}} \quad (90)$$

Pri čemu je

- k – koeficijent (ovisan o statičkom sustavu i opterećenju – Tablica 5.3)
- l – raspon elementa
- r_{tot} – ukupna zakrivljenost elementa, koja se može dobiti prema izrazu:

$$\frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{r_{csm}} \quad (91)$$

U izrazu (91) r_m predstavlja zakrivljenost zbog opterećenja i puzanja a r_{csm} zakrivljenost zbog skupljanja.

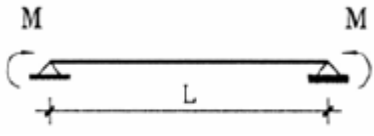

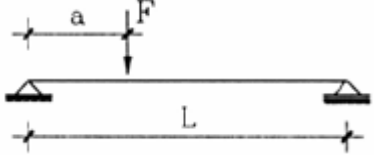
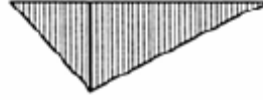
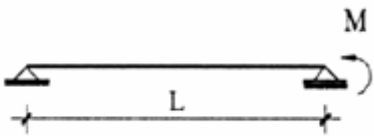
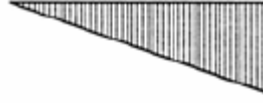
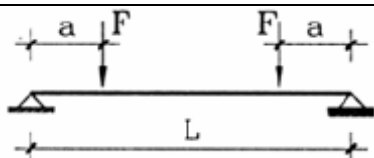
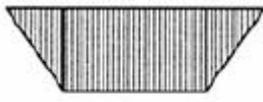
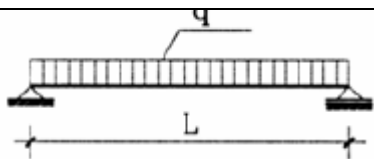
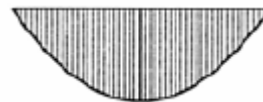
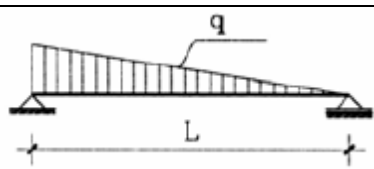

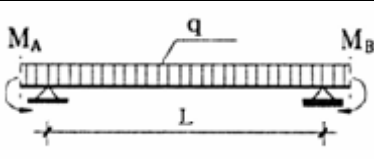

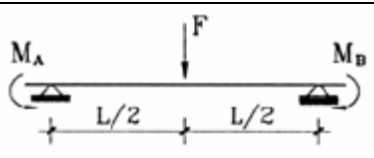
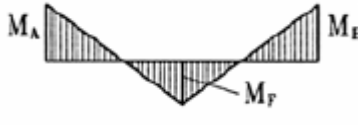
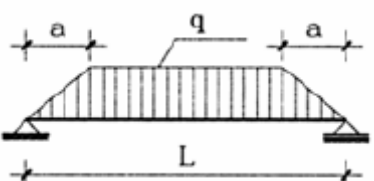
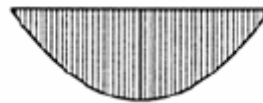
Promatraju se dvije granične mogućnosti:

1. neraspucalo stanje - armatura i beton zajedno sudjeluju u nošenju i
2. potpuno raspucano stanje - nosivosti vlačnog područja betona se zanemaruje

Koeficijent ζ naziva se koeficijentom distribucije, a možemo ga izraziti kao:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (92)$$

Koeficijent ζ iznosi 0,0 za ne napuknute presjeke; β predstavlja koeficijent koji uzima u obzir utjecaj duljine opterećenja ili ponavljanja na prosječnu armaturnu šipku kod prednapetog betona, a iznosi 1,0 za kratkotrajno opterećenje i 0,5 za dugotrajna opterećenja ili kod velikog broja ponavljanja ciklusa. U izrazu (92) imamo još i σ_s koja predstavlja naprezanje u vlačnom ojačanju proračunato na osnovi puknutog poprečnog presjeka, a σ_{sr} predstavlja također naprezanje u vlačnom ojačanju puknutog poprečnog presjeka kod opterećenja koji uzrokuju prvu pukotinu, tj. prvo pucanje. Izraz u prethodnoj formuli (92) σ_{sr} / σ_s može se zamijeniti sa M_{cr}/M za savijanje ili N_{cr}/N za čisti vlak, gdje je M_{cr} moment pucanja a N_{cr} sila kod pukotine.

Red	Tip opterećenja	Dijagram momenata savijanja	Koeficijent k iz izraza (90)
	1	2	3
1			0,125
2			$\frac{3 - 4\left(\frac{\alpha}{L}\right)^2}{48\left[1 - \left(\frac{\alpha}{L}\right)\right]}$
3			0,0625
4			$0,125 - \frac{\left(\frac{\alpha}{L}\right)^2}{6}$
5			$\frac{5}{48}$
6		 $M = q \cdot L^2 / 15.6$	0,102
7			$k = \frac{5}{48}(1 - 0,1\beta)$ $\beta = \frac{ M_A + M_B }{ M_F }$
8			$k = 0,083\left(1 - \frac{\beta}{4}\right)$ $\beta = \frac{ M_A + M_B }{ M_F }$
9		 $M = q \cdot \frac{L^2}{24} \left[3 - 4\left(\frac{a}{L}\right)^2 \right]$	$\frac{1}{80} \cdot \frac{\left[5 - 4\left(\frac{\alpha}{L}\right)^2 \right]^2}{3 - 4\left(\frac{\alpha}{L}\right)^2}$

Tablica 5.3 koeficijenti k za pojednostavljeni proračun progiba

Za proračun progiba izraz (89) glasi:

$$v = \zeta \cdot v_{II} + (1 - \zeta) \cdot v_I \quad (93)$$

Za opterećenja koja s vremenom uzrokuju pukotinu, totalna deformacija uključujući pukotinu može se izračunati korištenjem efektivnih modula elastičnosti za beton prema sljedećem izrazu:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \phi(\infty, t_0)} \quad (94)$$

gdje je $\phi(\infty, t_0)$ koeficijent pukotine koji je bitan za opterećenje i vremenski interval.

Zakrivljenosti kod skupljanja mogu se procijeniti izrazom:

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I} \quad (95)$$

gdje je

- $1/r_{cs}$ – zakrivljenost zbog skupljanja
- ε_{cs} – slobodno skupljanje naprezanja
- S – prvi moment površine ojačanja
- I – drugi moment površine poprečnog presjeka
- α_e – efektivni modularni omjer ($\alpha_e = E_s / E_{c,eff}$)

Napomena: S i I treba izračunati za normalne uvijete (ne napuknute) i potpuno napuknute uvijete, a konačna zakrivljenost procjenjuje se izrazom (89).

Mjere ograničavanja progiba

Najtočniji je način ograničavanja progiba njihov proračun po određenim metodama te usporedba dobivene veličine s dopuštenim vrijednostima. U velikom broju slučajeva progib nije ni potreban jer se veličine progiba na neizravan način mogu ograničiti prikladnim mjerama oblikovanja, prije svega ograničavanjem vitkosti ploča i grede, pri čemu za ploče i grede (za razliku od stupova) vitkost označuje omjer raspona i visine betonskog presjeka (l/h).

Za ploče i grede koje trebaju zadovoljiti normalni uvjet ($v \leq l/250$) vrijedi uvjet:

$$h \geq l_i/30 \quad \text{za ploče} \quad (96)$$

$$h \geq l_i/20 \quad \text{za grede} \quad (97)$$

Ovdje l_i označava zamjenjujući raspon koji iznosi $l_i = \alpha \cdot l$, gdje je l stvarni raspon a koeficijent α iznosi:

- | | |
|--|-----|
| -za prosto položenu gredu | 1 |
| -za krajnje polje kontinuirane ploče ili grede | 0,9 |
| -za srednje polje kontinuirane ploče ili grede | 0,7 |
| -za konzolu | 2,5 |

Pri tome je za križno armirane ploče mjerodavan kraći raspon, a za ploče izravno oslonjene na stupove dulji raspon. Iz veličine koeficijenta α vidi se da su zahtjevi stroži za slobodno oslanjanje nego za upeto, dok su najstroži za konzole.

Općenito govoreći, uvjet vitkosti mnogo se češće primjenjuje na ploče nego za grede. Naime, u ploči je po pravilu najmanja debljina ujedno i ekonomski optimalna, dok grede najčešće iz raznih razloga imaju visinu veću od minimalne za ograničenje progiba, a i ekonomski optimalna visina (oko 1/15) veća je od spomenute vrijednosti. Stropne ploče koje trebaju zadovoljiti stroži uvjet ($v' \leq 1/500$), trebaju zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$h \geq l_i^2 / 135 \quad (98)$$

gdje su h i l_i dani u [m]. Taj zahtjev za ploče raspona većeg od oko 5 m daje znatno veće debljine ploča.

6. ZAKLJUČAK

U proteklih 35 godina veliki napori stručnjaka država članica Europske Unije rezultirali su Euro kodovima – Europskim normama za projektiranje konstrukcija. Danas se smatraju najnaprednijim svjetskim pravilima za proračun građevinskih konstrukcija, a obavezni su za primjenu u javnim nabavama, te su postali općeprihvaćene norme za privatni sektor u Europi i svijetu.

Da bi se razumjeli proračuni prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti, potrebno je biti upoznat sa osnovnim elementima betona i čelika, njihovim ponašanjem, svojstvima i načinu izvedbe. Veza armature i betona nedvojbeno je kvalitetna i trajna, a potrebne analize i proračuni su nužni za bolju ekonomičnost i sigurnost objekata.

Dimenzioniranjem prema graničnom stanju nosivosti (GSN), uz najnepovoljniju kombinaciju stalnog i promjenjivog opterećenja, kao i dodatnih utjecaja, AB konstrukcija se osigurava od sloma i prevrtanja. Međutim, taj proračun ne garantira da će se složena konstrukcija kao cjelina u uporabi ponašati na željeni način, stoga je ipak potrebna i provjera prema graničnom stanju uporabljivosti (GSU). Provjera graničnih stanja uporabljivosti u pravilu se provodi približnim postupcima proračuna širina pukotina i veličine progiba konstrukcijskog elementa.

Ponekad je i moguće da zahtjevi uporabljivosti nisu ispunjeni, no posljedica toga nije rezultat da građevina ne može služiti svrsi. Prekoračenje graničnih stanja uporabljivosti uzrokuje lokalna oštećenja i utječe na trajnost, izgled građevine i njezine korisnike. Kada govorimo o proračunu AB elemenata na GSU, jednostavno želimo ograničiti naprezanje, raspucavanja, deformacije i vibracije.

U Varaždinu _____

Antonio Novosel

7. LITERATURA

- [1] J. Radić i suradnici: *Betonske Konstrukcije – Priručnik*, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Andris, Zagreb, 2006
- [2] J. Radić i suradnici: *Betonske Konstrukcije – Riješeni primjeri*, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Andris, Zagreb, 2006
- [3] I. Špiranec, K. Pavković – *Džepni rječnik za građevinare*, 1. izdanje, Priručnici Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [4] HRN ENV 1991-1 EUROKOD 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije –1. dio: Osnove projektiranja*, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2005.
- [5] HRN ENV 1992-1-1 EUROKOD 2: *Projektiranje betonskih konstrukcija –1.1 dio: Opća pravila i pravila za zgrade*, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2004.
- [6] D. Momčilović - *Čelici za armiranje betona*, Beograd 2005.
- [7] I. Gukov – *Betonske konstrukcije I, predavanja*, Zagreb 2010.
- [8] T. Kišiček, I. Petrić: *Preliminirano dimenzioniranje armiranobetonskih presjeka*, *Građevinar* 12/2014 str. 1125-1143
- [9] Š. Polančec: *Odnosi naprezanja i deformacija kod ispitivanja betonskih prizmi*, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2015.
- [10] V. Ukrainczyk: *Poznavanje gradiva*, Alkor, Zagreb 2001.
- [11] J. Galić: *Betonske konstrukcije*, Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, Zagreb 2016.
- [12] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, NN 101/05

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Slijeganje (HRN EN 12350-2)	10
Slika 2.2 Rasprostiranje (HRN EN 12350-5)	10
Slika 2.3 Gaussova krivulja raspodjele rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona.....	13
Slika 2.4 Idealizirani dijagram naprezanje-deformacija za beton	14
Slika 2.5 Radni (lijevo) i računski (desno) dijagram betona	15
Slika 2.6 Promjena čvrstoće betona uzrokovana starenjem	16
Slika 2.7 Utjecaj količine armature na zapremninsku težinu armiranog betona	19
Slika 2.8 Radni (lijevo) i računski (desno) dijagram čelika (armature)	20
Slika 2.9 Računski dijagram na kojemu možemo vidjeti usporedbu između armature tipa B500B i betona tlačne čvrstoće C 25/30	21
Slika 3.1 Četiri reprezentativne vrijednosti promjenjivog opterećenja	27
Slika 4.1 Dimenzioniranje na moment savijanja	34
Slika 4.2 Dvostruko armirani presjek za negativni moment savijanja	35
Slika 4.3 Sudjelujuća širina grede kod T presjeka.....	36
Slika 4.4 Dimenzioniranje T-presjeka na pozitivan moment savijanja	37
Slika 4.5 Dimenzioniranje T-presjeka na negativan moment savijanja	37
Slika 4.6 Poprečni presjek naprezan centričnom tlačnom silom	40
Slika 4.7 Razmak poprečne armature kod stupa.....	41
Slika 4.8 Poprečni presjek naprezan centričnom vlačnom silom	42
Slika 4.9 Mörschova rešetka – nosivi mehanizam sa vertikalnim sponama	43
Slika 4.10 Mörschova rešetka – nosivi mehanizam sa kosim sponama	43
Slika 5.1 Određivanje djelotvorne vlačne ploštine betona	49
Slika 5.2 Grafički prikaz progiba	51

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Razredi konzistencije.....	10
Tablica 2.2 Razredi tlačne čvrstoće za obične i teške betone.....	12
Tablica 2.3 Razredi betona sa srednjom tlačnom čvrstoćom (f_{cm}).....	13
Tablica 2.4 Razni razredi čvrstoća i relativne deformacije	17
Tablica 2.5 Vrste čelika, oznake i osobine prema Jugoslavenskim standardima.....	18
Tablica 2.6 Uobičajeni promjer šipki, njihove ploštine poprečnog presjeka i masa po jedinici duljine	19
Tablica 3.1 Proračunski uporabni vijek.....	22
Tablica 3.2 Pregled hrvatskih i europskih normi za djelovanja na konstrukcije.....	26
Tablica 3.3 Težine pokrova	28
Tablica 3.4 Zapreminske težine materijala.....	28
Tablica 3.5 Razredi površina po zgradama	29
Tablica 3.6 Uporabna opterećenja u zgradama	29
Tablica 3.7 Koeficijenti sigurnosti na materijal	30
Tablica 3.8 Koeficijenti sigurnosti za opterećenje	30
Tablica 3.9 Koeficijenti kombinacije (ψ)	30
Tablica 3.10 Kombinacije za određivanje proračunskih reznih sila za granično stanje nosivosti u nekom presjeku.....	31
Tablica 5.1 Preporučene vrijednosti maksimalnih vertikalnih progiba.....	51
Tablica 5.2 Granične vitkosti elemenata kada nije potrebno provoditi kontrolu progiba.	52
Tablica 5.3 koeficijenti k za pojednostavljeni proračun progiba.....	54



**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, Antonio Novosel (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(*upisati ime i prezime*)

(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, Antonio Novosel (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Proračun AB elemenata prema graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(*upisati ime i prezime*)

(vlastoručni potpis)