

*KATEDRA ZA BETONSKE KONSTRUKCIJE I MOSTOVE
STRUČNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA*

BETONSKE KONSTRUKCIJE I

(god. 2007/2008.)

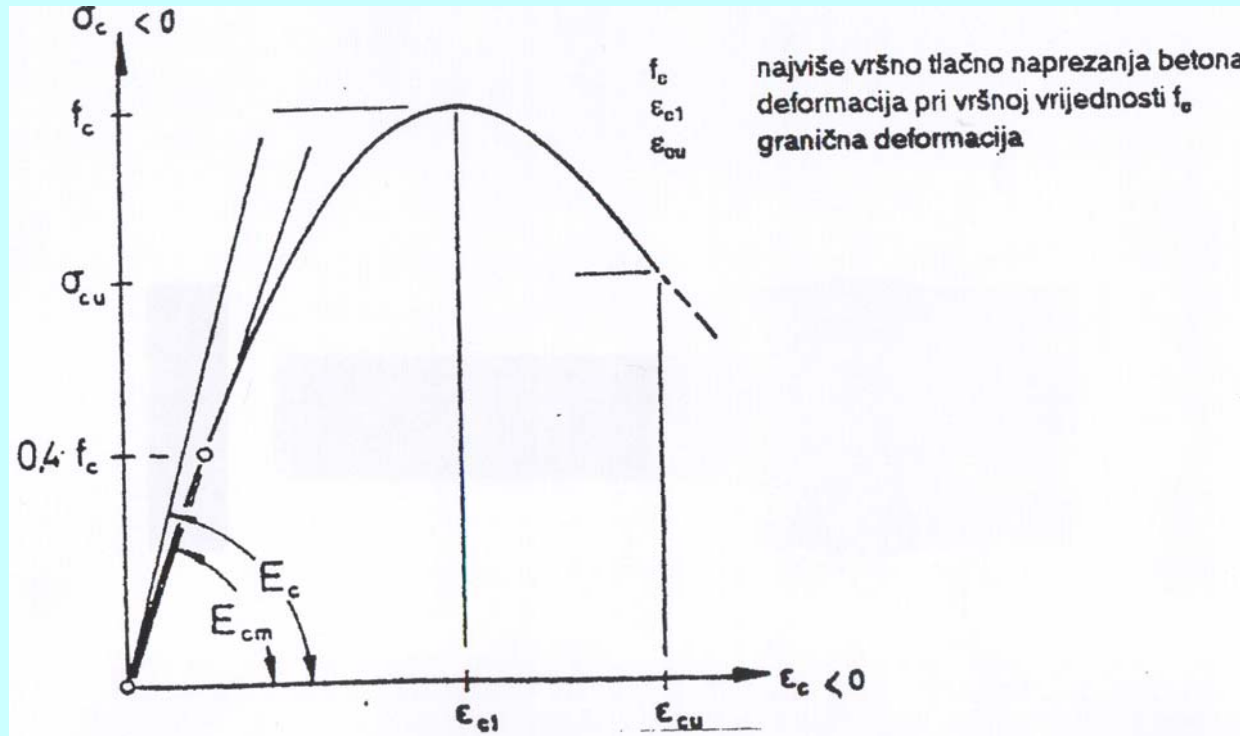
*Predmetni nastavnik:
V.pred. mr.sc. Vladica Herak-Marović, dipl.ing.građ.*

Nastavne jedinice kolegija:

- (1) **Fizikalno mehanička svojstva betona i čelika za armiranje; deformacije betona;**
- (2) Uvjeti zajedničkog rada betona i armature; prionljivost, sidrenje, nastavljanje, oblikovanje, zaštitni slojevi; razmaci šipki; odredbe propisa;
- (3) Osnove proračuna armiranobetonskih elemenata prema GSN;
- (4) Dimenzioniranje presjeka na savijanje (pravokutni presjeci, T-presjeci, jednostruki i dvostruko armirani presjeci);
- (5) Dimenzioniranje presjeka na centrični i ekscentrični tlak i vlak;
- (6) Dimenzioniranje na poprečne sile; dimenzioniranje na torziju;
- (7) Lokalni tlačni naponi;
- (8) Vitki elementi naprezani centričnom i ekscentričnom tlačnom silom; stupovi;
- (9) Osnove proračuna armiranobetonskih elemenata prema GSU (naprezanja, pukotine, progibi);
- (10) Konstruiranje armature u različitim elementima konstrukcija; neki detalji; odredbe propisa.

Deformacije betona

DIJAGRAM NAPREZANJE - DEFORMACIJA BETONA KOD JEDNOOSNOG TLAČNOG NAPREZANJA



Deformacije su osobito važne u armiranom betonu.

Monolitnost je osnovno svojstvo armiranog betona, a temelji se na čvrstom spoju betona i čelika. To znači da na međusobnom spoju dvaju gradiva moraju biti iste veličine deformacija u betonu i u čeliku ($\epsilon_s = \epsilon_c$).

Vrste deformacija betona:

(a) Volumenske deformacije

- ne ovise o vanjskom opterećenju
- uvjetovane su svojstvom betona da mijenja volumen zbog:
promjene temperature, skupljanja, bujanja

(b) Deformacije pod djelovanjem vanjskog opterećenja

- deformacije pod ***kratkotrajnim*** opterećenjem
- deformacije pod ***dugotrajnim*** opterećenjem (vremenske)
- deformacije pod ***ponavljanim*** opterećenjem

(A) VOLUMENSKJE DEFORMACIJE BETONA

(a) DEFORMACIJE ZBOG PROMJENE TEMPERATURE

**(b) DEFORMACIJE NASTALE ZBOG SKUPLJANJA I
BUJANJA BETONA**

DEFORMACIJE ZBOG PROMJENE TEMPERATURE

$$\Delta l = \alpha_t \times l \times \Delta t ; \quad \varepsilon = \Delta l / l = \alpha_t \times \Delta t$$

- Koeficijent linearnog rastezanja za sve vrste betona ($\alpha_{T,c}$) iznosi:

$$\alpha_{T,c} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

- Koeficijent linearnog rastezanja čelika ($\alpha_{T,s}$) za $0^\circ < T < 100^\circ \text{ C}$ iznosi:

$$\alpha_{T,s} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

- Okolnost da je $\alpha_{T,s} \approx \alpha_{T,c}$ od velikog je značaja za zajednički rad betona i čelika u armiranobetonskim konstrukcijama (zbog okolnosti da je $\alpha_{T,s} > \alpha_{T,c}$ na spoju betona i čelika se pri promjeni temperature javljaju dodatni naponi).

U proračunu se uzima $\alpha_{T,s} = \alpha_{T,c} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

- (Poseban problem su deformacije kod djelovanja visokih temperatura ($T > 90^\circ \text{ C}$) na beton.)

DEFORMACIJE NASTALE ZBOG SKUPLJANJA I BUJANJA BETONA

Beton mijenja svoj volumen u vremenu vezivanja i stvrdnjavanja:

- * ako stvrdnjava na zraku → smanjuje volumen (skuplja se),
- * ako stvrdnjava pod vodom ili u sredini zasićenoj vodenom parom → povećava volumen (buja).

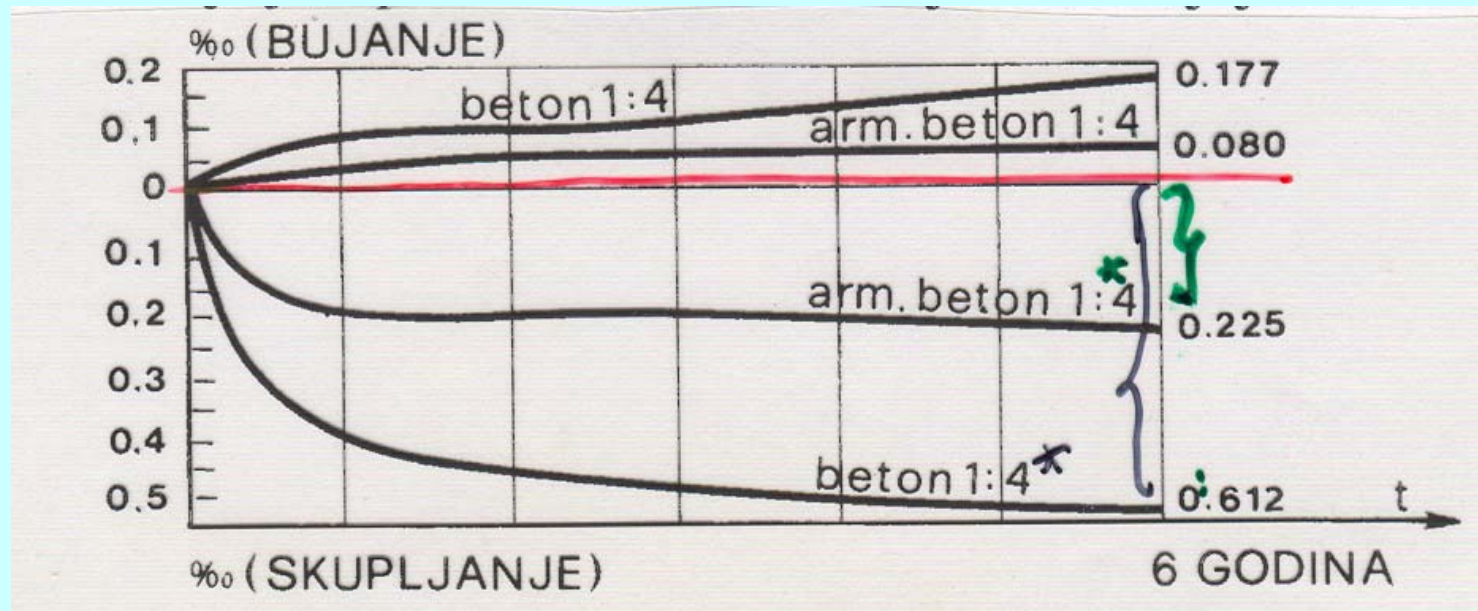
(Skupljanje i bujanje su *viskoplastične deformacije* što znači da su u funkciji vremena i da su nepovratne).

Tijek skupljanja betona može se razdijeliti u nekoliko faza:

- «**rano skupljanje**» - od miješanja cementa s vodom do početka vezivanja (~ 1 h)
- «**od početka do kraja vezivanja**» - neki cementi razvijaju mnogo hidratacijske topline, pa u toj fazi temperaturno rastezanje može sakriti skupljanje (~6-12 h)
- «**za vrijeme stvrdnjavanja**»

- Kad se u literaturi govori o skupljanju misli se na **skupljanje** koje je počelo **nakon vezivanja i početka stvrdnjavanja betona** (najviše 24 sata nakon miješanja cementa s vodom), a posljedica je gubitka vode (sušenja).

Iz dijagrama je vidljivo da je brzina deformacije u početku velika, a kasnije se smanjuje:



- **Skupljanje betona** ima nepovoljan učinak na betonske i armiranobetonske konstrukcije ako se ne može slobodno izvršiti (tj. ako je spriječeno deformiranje). Tada nastaju početni vlačni naponi i pukotine.

Nastajanje pukotina se smanjuje ako se početak skupljanja odgodi vlažnom njegom (dok beton ne postigne veću čvrstoću).

Plan betoniranja – Njega betona

Neposredno nakon betoniranja beton treba biti zaštićen od prebrzog isušivanja, od brze izmjene topline između betona i zraka, od oborina i tekuće vode, od visokih i niskih temperatura, od vibracija i drugih mehaničkih oštećenja u vrijeme vezivanja i početnog očvršćivanja.

Njegovanje i zaštitu betona treba provoditi istovremeno, jer će se na taj način osigurati normalan proces hidratacije, skoro eliminirati evaporaciju vode iz betona, te beton zaštititi od vjetrova. Zaštita i njegovanje imaju bitan učinak na konačnu kakvoću betona, a posebice na kakvoću površinskih slojeva betona, koji štite armaturu i jezgru betona od prodora vode i agresivnih utjecaja, kao i na smanjenje skupljanja betona. Njegovanje i zaštitu betona vršiti u ovisnosti o klimatskim uvjetima pri kojima se izvodi betoniranje. Za vrućeg vremena primjenjuju se sljedeće radnje:

- višekratno dnevno polijevanje vodom
- pokrivanje mokrim jutanim vrećama ili drugim prekrivačima koji zadržavaju vlagu, te ih stalnim polijevanjem održavati vlažnima
- dužim držanjem u oplati

Ako se betoniranje odvija zimi pri niskim temperaturama, zaštita betona se zasniva na zaštiti betonskog elementa od gubitka topline. Beton se ugrađuje s temperaturom, koja će mu zajedno s oslobođenom toplinom hidratacije i primjernom izolacijom pri određenim vanjskim uvjetima osigurati dovoljnu temperaturu da u predviđenom vremenskom periodu njegovanja dostigne potrebnu otpornost na smrzavanje.

U prijelaznom razdoblju prvih noćnih mrazova i pozitivnih dnevnih temperatura dovoljno je pokrivanje PVC folijom odignutom cca 5 cm iznad betona, koja štiti beton slojem zarobljenog toplog zraka.

Kod dužih trajanja niskih temperatura nužna je pojačana zaštita termoizolacijskih materijala (filcom, jutom, stiroporom, staklenom vunom i sl.).

- Skupljanje na površini napreduje brže nego skupljanje u unutrašnjosti (jezgri) betonskog elementa te nastaju **dodatni naponi**, (površinski dio-vlak, jezgra-tlak).
- Građevine velikih dimenzija se **dilatiraju** da bi se smanjio utjecaj skupljanja betona.
- Statički neodređene konstrukcije velikih raspona - skupljanje uzrokuje velika **dodatna naprezanja** koja je potrebno uzeti u obzir kod proračuna.
- Vrijeme ima dvostruku ulogu:
 - * raste f_{ct} - smanjuje mogućnost nastanka pukotina, ali
 - * raste E_c i ε_{cs} - povećava početna naprezanja ($\sigma = E \cdot \varepsilon$).

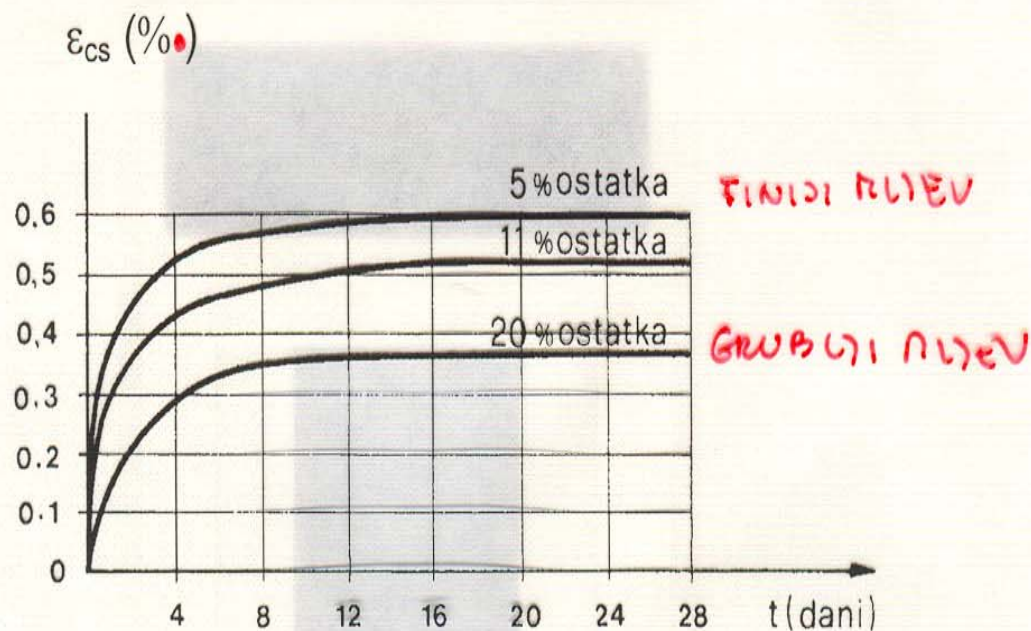
Skupljanje betona ovisi o slijedećim čimbenicima:

- (a) sastavu betona
- (b) vlažnosti okoliša
- (c) dimenzijama konstrukcijskog elementa
- (d) temperaturi okoliša (temperatura djeluje samo na brzinu razvoja skupljanja, a ne i na konačnu vrijednost)
- (e) izradi i postupku s betonom (zbijanje pri ugradnji, njegovanje i sl.)

(a) utjecaj sastava betona

- UTJECAJ KOLIČINE I FINOĆE MLJEVA NA SKUPLJANJE

- cementno tijesto se dva puta više skuplja od betona
- veća količina cementa (masniji beton) veće skupljanje
- kemijski sastav cementa ne utječe bitno na skupljanje



Skupljanje cementnog tijesta ovisno o finoći mljeva

- UTJECAJ DODATAKA BETONU NA SKUPLJANJE

- mineralni prašci koji se dodaju portland-cementu u obliku fine kamene prašine, vulkanskog pepela i mljevene pečene gline znatno povećavaju skupljanje (osobito glina)

- UTJECAJ v/c-FAKTORA NA SKUPLJANJE

- v/c-faktor bitno utječe na veličinu skupljanja, veći v/c-faktor skupljanje je veće

- UTJECAJ AGREGATA NA SKUPLJANJE

- povećanje količine agregata smanjuje skupljanje
- vrsta i granulometrijski sastav agregata utječu na skupljanje (pješčenjaka- veliko skupljanje, krupniji agregat- manje skupljanje)

(b) utjecaj vlažnosti okoliša

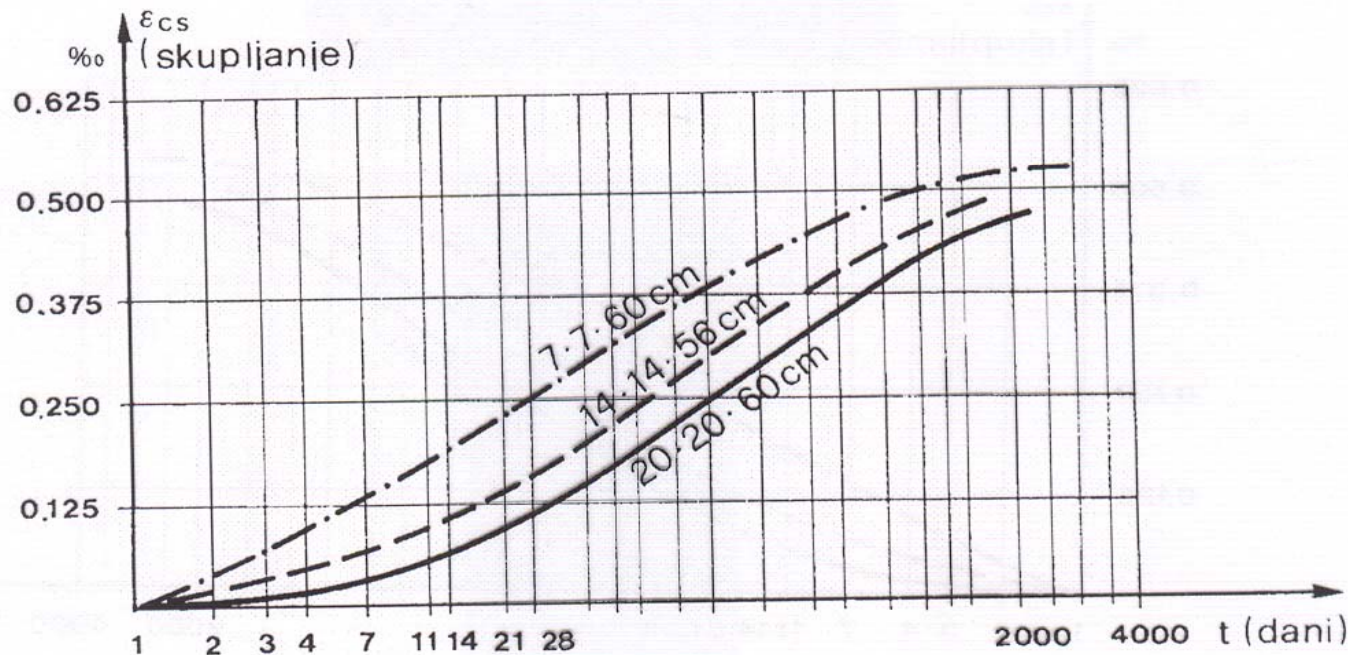
- manja relativna vlaga zraka ubrzava skupljanje
- zrak zasićen vlagom usporava skupljanje
- beton potopljen pod vodu ima suprotnu pojavu- bujanje
- prethodno bujanje betona potopljenog u vodi ne sprječava njegovo skupljanje kad je nakon toga izložen sušenju na zraku

(c) utjecaj dimenzija elementa

- utjecaj dimenzija elemenata izražava se pomoću "srednjeg polumjera (fiktivna debljina) presjeka" h_0

$$h_0 = 2A_c/u \text{ (cm)} ; (A_c = \text{površina poprečnog presjeka, } u = \text{opseg p. pr.)}$$

- debljina elementa utječe na brzinu skupljanja, ali ne znatnije na konačnu vrijednost (rezultati pokusa vide se iz dijagrama na slici)



Skupljanje betona iste vrste u prizmama raznih dimenzija (početak opažanja 24 sat nakon izrade betona)

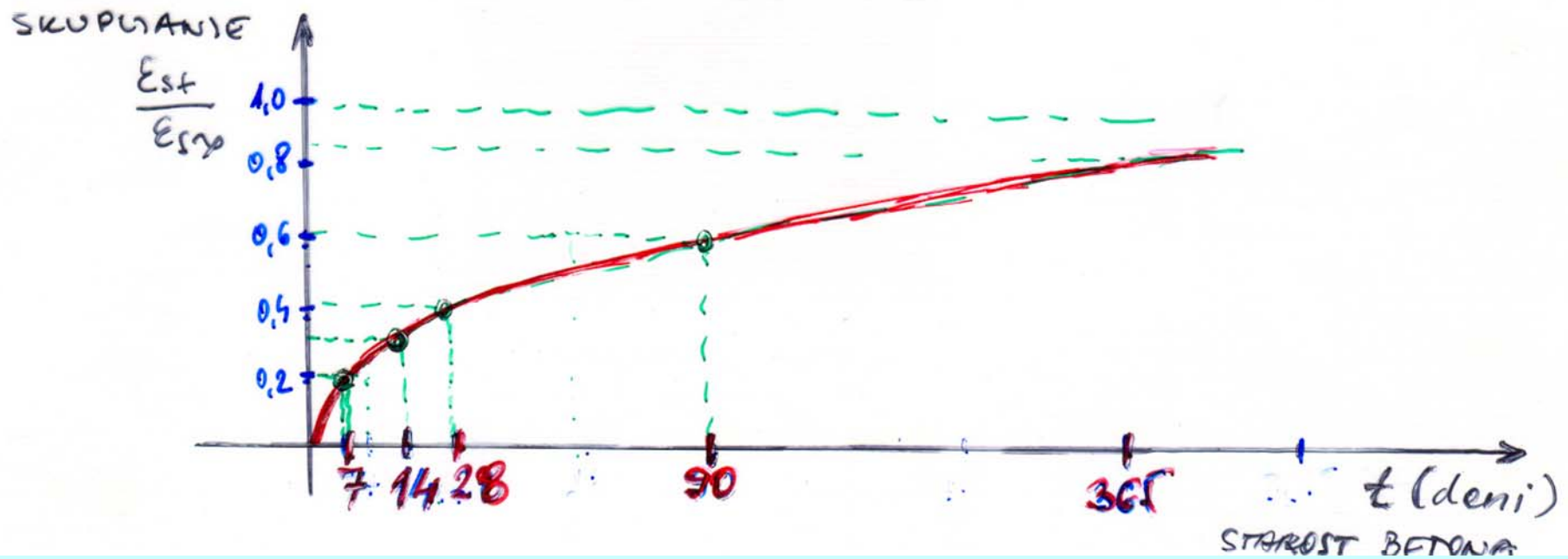
Tablica 3.4 – Konačne vrijednosti deformacije od skupljanja $\varepsilon_{cs\infty}$ (u mm/m, tj. ‰) za obični beton

Položaj konstrukcijskog elementa	Relativna vlažnost zraka (%)	Srednji polumjer konstrukcijskog elementa ($2 A_c / u$) (mm)	
		≤ 150	600
Unutra	50	-0,60	-0,50
Vani	80	-0,33	-0,28

gdje je A_c ploština presjeka betona, a u je opseg presjeka.

Dopuštena je linearna interpolacija između vrijednosti u tablicama 3.3 i 3.4.

TIJEK SKUPLJANJA BETONA U VREMENU od $t=0$ do $t=365$ dana:



(B) DEFORMACIJE BETONA POD OPTEREĆENJEM

(a) KRATKOTRAJNE DEFORMACIJE (TRENUTNE)

(b) DUGOTRAJNE DEFORMACIJE (VREMENSKE)

Ukupne deformacije betona pod opterećenjem ovise o:

- veličini nanesenog opterećenja (napona)
- vremenu djelovanja opterećenja (naprezanja)

TREKUTNE DEFORMACIJE

su pretežno elastične (povratne), a manjim dijelom plastične (nepovratne), ovisi o brzini nanošenja opterećenja

VREMENSKE DEFORMACIJE

su pretežno plastične (nepovratne), a manjim dijelom elastične (povratne), E betona raste s vremenom pa opada ε_{el}

TREKUTNE DEFORMACIJE

Što je trenutna deformacija?

Znači da opterećenje djeluje u vremenu koje je potrebno za očitavanje instrumenta.

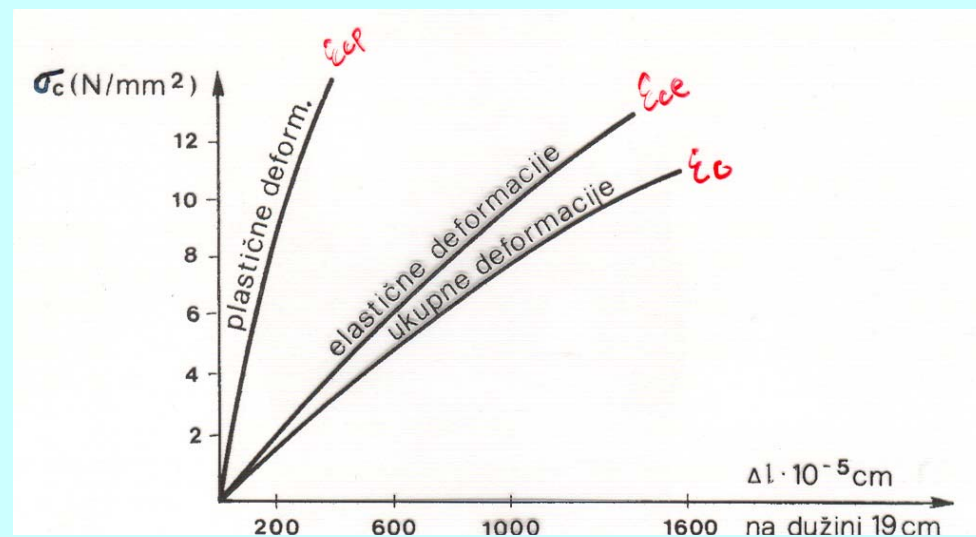
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cp}$$

ε_c = ukupna deformacija

ε_{ce} = elastična deformacija

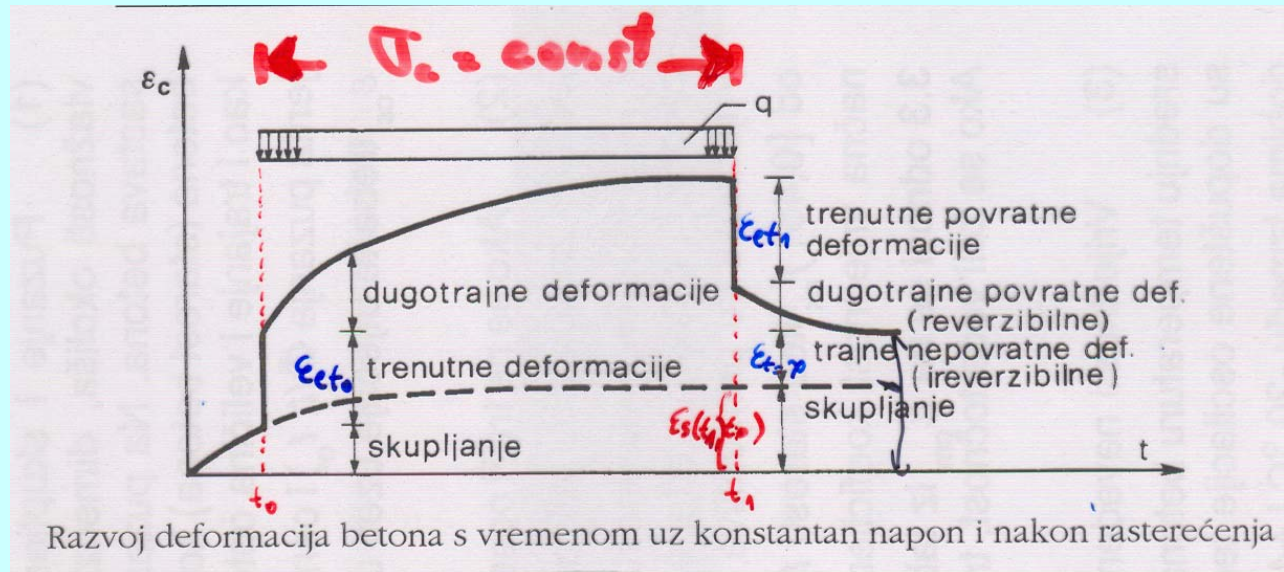
ε_{cp} = plastična deformacija

DIJAGRAM TRENUTNIH DEFORMACIJA:



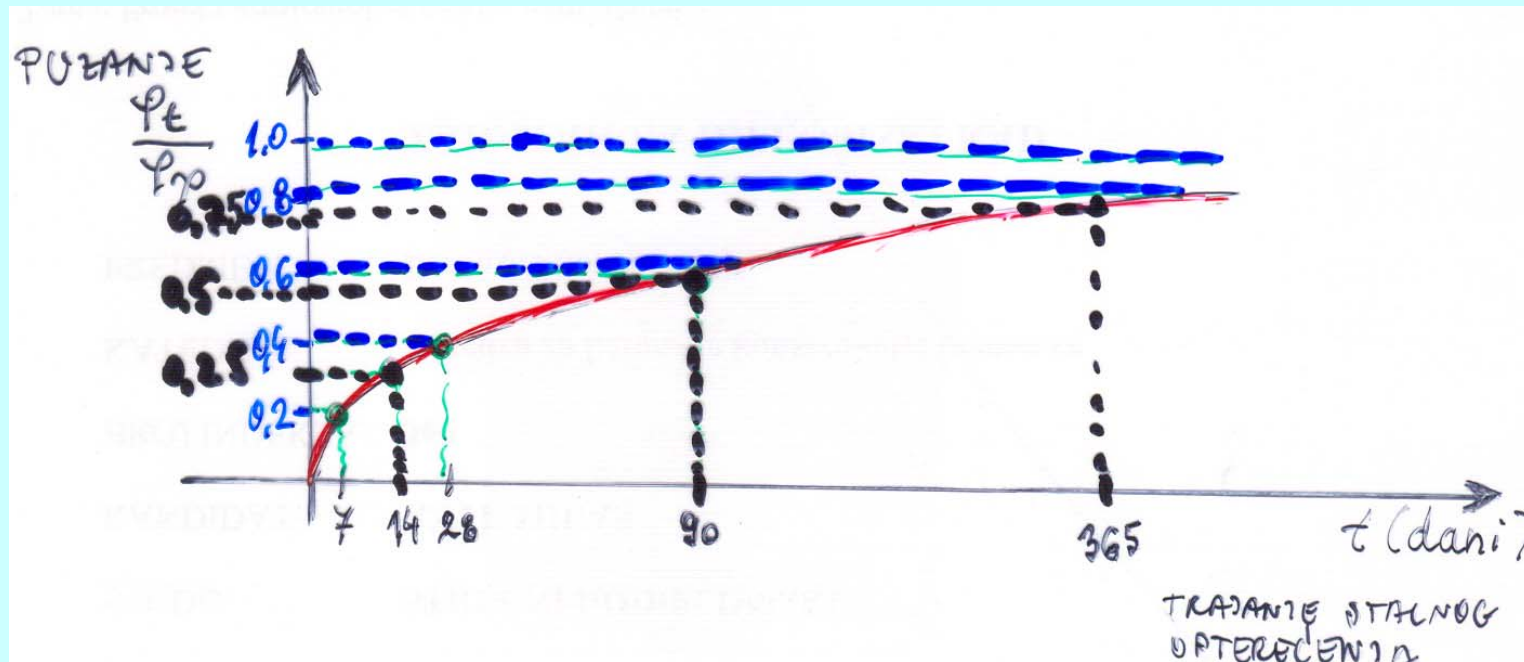
VREMENSKE DEFORMACIJE

S vremenom rastu elastične (viskoelastične) deformacije, a osobito plastične (viskoplastične).



- Iz dijagrama se vidi da je proces deformacije betona pod opterećenjem i nakon rasterećenja u funkciji vremena (viskozno)
- Pri opterećenju tijela određenim naprežanjem javlja se trenutna elastična deformacija, a ako isto naprežanje djeluje trajno, deformacija se povećava i u ∞ dugom vremenu dosegne konačnu vrijednost
- Deformacija puzanja je u funkciji vremena (prva 2 tjedna 25%; prva 3 mjeseca 50%; prva godina 75%; završetak puzanja cca 20 god.)

TIJEK PUZANJA BETONA U VREMENU od $t=0$ do $t=365$ dana:

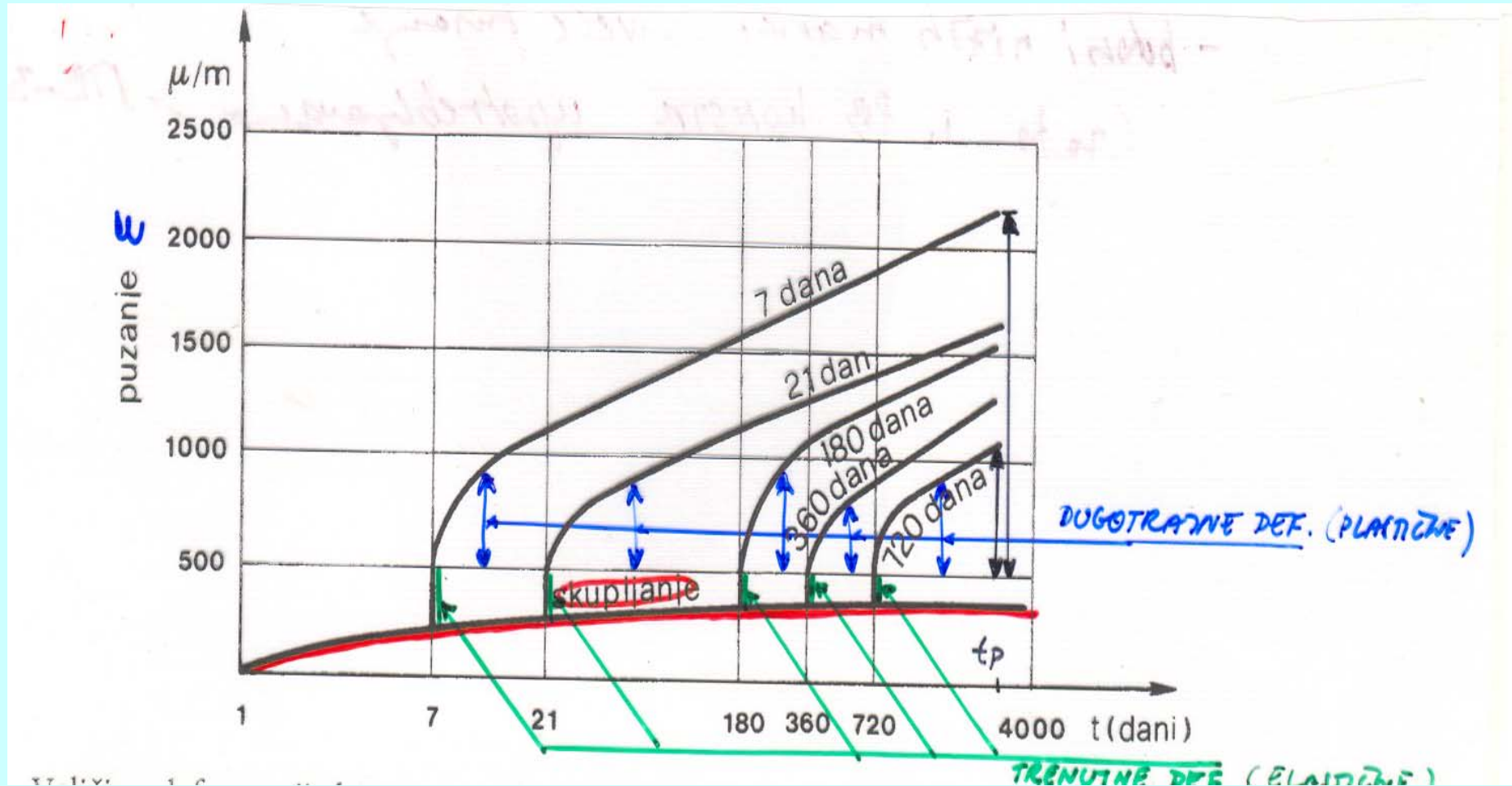


Starost betona u trenutku opterećenja t_0 (dani)	Odnosi koeficijenata puzanja betona ovisno o vremenu					
	Vrijeme opterećenja ($t - t_0$) u danima					
	7	14	28	90	365	3 godine
7	0.25	0.30	0.38	0.53	0.73	0.85
28 do 90	0.15	0.23	0.30	0.48	0.68	0.83
365	0.10	0.18	0.25	0.43	0.65	0.80

Puzanje betona ovisi o sljedećim čimbenicima:

- (a) vrsti cementa,
- (b) količini cementnog tijesta (masniji betoni-manje puzanje, mršaviji betoni-veće puzanje),
- (c) v/c- faktoru (više vode-veće puzanje),
- (d) temperaturi (brzina puzanja raste s porastom temperature),
- (e) granulometrijskom sastavu agregata,
- (f) uvjetima u kojima beton veže,
- (g) armaturi (smanjuje plastične deformacije betona),
- (h) naizmjeničnom opterećenju i rasterećenju,
- (i) starosti betona u vrijeme prvog nanošenja opterećenja, te trajanje i veličina opterećenja.

Veličine deformacija betona raznih starosti pod trajnom naponom od 10 N/mm²



Za proračun skupljanja i puzanja rabe se vrijednosti iz slijedećih tablica:

Tablica 3.3 – Konačna vrijednost koeficijenta puzanja $\Phi(\infty, t_0)$ za obični beton

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

Tablica 3.4 – Konačne vrijednosti deformacije od skupljanja $\epsilon_{GS-\infty}$ (u mm/m, tj. ‰) za obični beton

Položaj konstrukcijskog elementa	Relativna vlažnost zraka (%)	Srednji polumjer konstrukcijskog elementa ($2A_c/u$) (mm)	
		≤ 150	600
Unutra	50	-0,60	-0,50
Vani	80	-0,33	-0,28

gdje je A_c ploština presjeka betona, a u je opseg presjeka.

Dopuštena je linearna interpolacija između vrijednosti u tablicama 3.3 i 3.4

Linearna teorija puzanja – primjenjuje se kod napona u uporabi ($\sigma_c < 0,5f_c$)

- Puzanje se uzima linearno proporcionalno deformaciji pri kratkotrajnom opterećenju:

$$\varepsilon_{cp}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \times \varepsilon_{ce}(t_0) = \varphi(t, t_0) \times \sigma_c(t_0)/E_c(t_0)$$

gdje je:

$\varepsilon_{cp}(t, t_0)$ - deformacija puzanja

$\varphi(t, t_0)$ - koeficijent puzanja betona u trenutku "t", starog t_0 u trenutku opterećenja

E_c - tangentni modul elastičnosti betona starog 28 dana

$E_c \approx 1,05E_{cm}$ (E_{cm} - sekantni modul elastičnosti)

$E(t) > E(t_0) \Rightarrow \varepsilon_{ce}(t) < \varepsilon_{ce}(t_0)$

- Za proračun utjecaja puzanja i skupljanja betona u elementima i konstrukcijama može se (umjesto integralnog oblika) koristiti slijedeća algebarska veza:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_c(t_0)/E_c(t_0) (1 + \varphi(t, t_0)) + 1/E_c(t_0) \times (\sigma_c(t) - \sigma_c(t_0)) (1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)) + \varepsilon_{cs}(t, t_0)$$

$\varepsilon_c(t, t_0)$ - ukupna deformacija betona u trenutku t

$\sigma_c(t_0)$ - napon u betonu u trenutku opterećenja t_0

$\sigma_c(t)$ - napon u betonu u trenutku t

$\varphi(t, t_0)$ - koeficijent puzanja betona u trenutku "t", starog t_0 u trenutku opterećenja

$E_c(t_0)$ - modul elastičnosti betona u trenutku opterećenja t_0

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ - deformacija skupljanja u vremenu (t, t_0)

$\chi(t, t_0)$ - koeficijent starenja

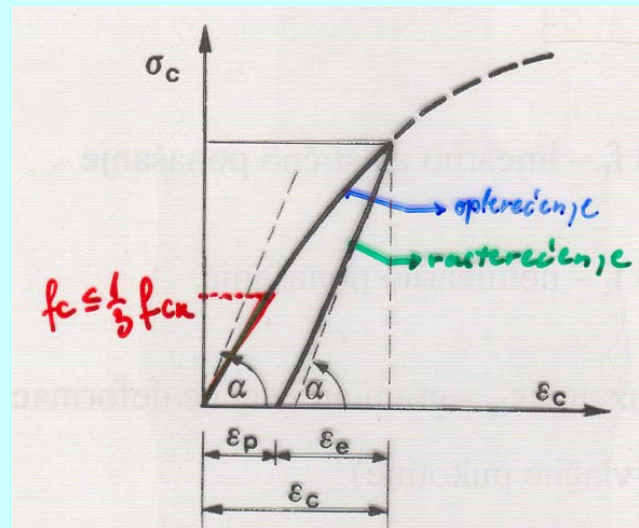
- za konačnu vrijednost koeficijenta starenja uzima se:

$$\chi_{\infty} = \chi(t_{\infty}, t_0) = 0,75 - 0,85$$

(NE)

DEFORMACIJE BETONA ZBOG PONAVLJANJA OPTEREĆENJA

- Odnos ε_e i ε_p ovisi o *veličini napona*.
- Pri malim naponima $\sigma_c < 1/3 f_c$ gotovo sve deformacije su elastične (dijagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ je linearan), a s povećanjem napona σ_c javljaju se plastične deformacije (dijagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ je zakrivljen).



$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cp}$$

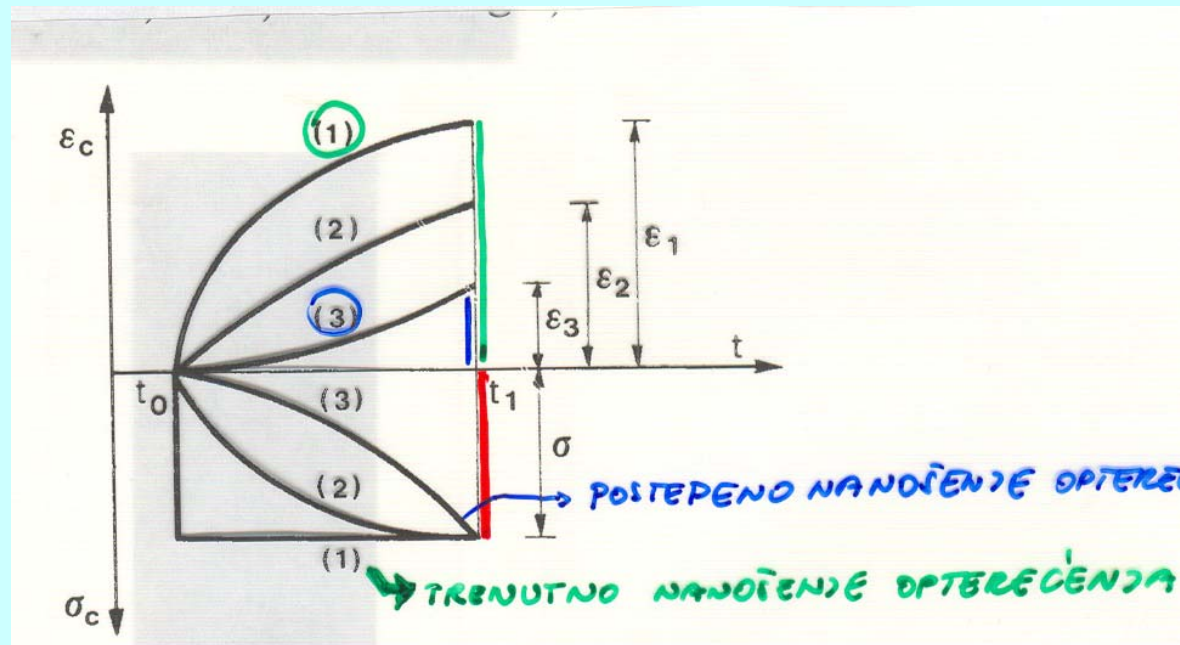
ε_c = ukupna deformacija

ε_{ce} = elastična deformacija

ε_{cp} = plastična deformacija

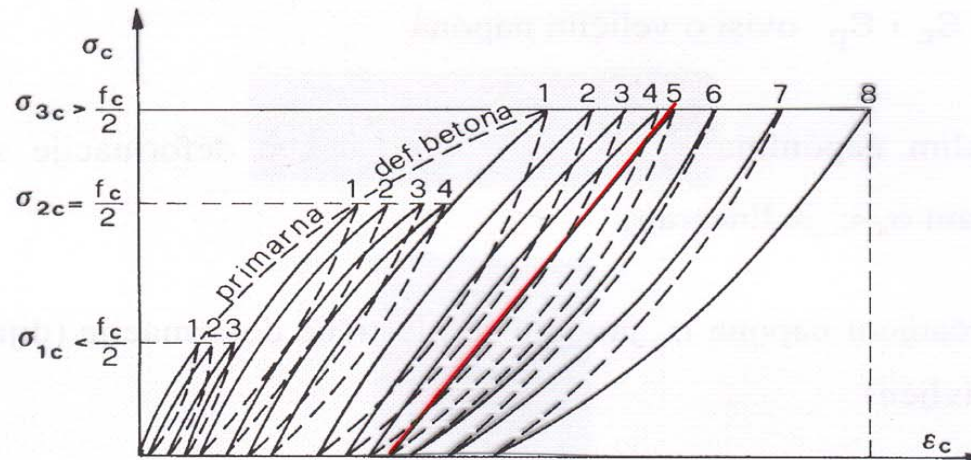
- *Trajanje opterećenja* također utječe na odnos ε_e i ε_p :
kratkotrajno opterećenje - dijagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ je pravac
porast dužine trajanja opterećenja - dijagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ je krivulja.

- Na oblik i krajnju veličinu deformacije bitno utječe *način nanošenja opterećenja i promjena opterećenje s vremenom*, što je prikazano slijedećim dijagramom:



- (1) trenutno nanošenje opterećenja – za isto vrijeme t veća je brzina deformiranja i veća deformacija na kraju promatranog vremenskog perioda
- (3) postepeno nanošenje opterećenja – za isto vrijeme t manja je brzina deformiranja i manja deformacija na kraju promatranog vremenskog perioda

Dijagram $\sigma_c - \varepsilon_c$ ponavljanom opterećenju i rasterećenju



- pri primarnom opterećenju krivulja $\sigma_c - \varepsilon_c$ ima konveksan oblik
- pri rasterećenju krivulja $\sigma_c - \varepsilon_c$ ima konkavan oblik
- pri ponavljanju ciklusa opterećenja i rasterećenja, a pri naponima $\sigma_c < f_c/2$, obje se **krivulje** postepeno **ispravljaju** i javlja se **proporcionalnost** između napona i deformacija; trajne (plastične) deformacije se prigušuju i nakon nekog broja opterećenja i rasterećenja nestaju; u takvim okolnostima neće biti sloma betona
- ako naponi u elementu premašuju granicu $\sigma_c > f_c/2$ krivulja u prvim ciklusima opterećenja ima **konveksni** oblik, a daljnjim povećanjem ciklusa opterećenja poprima **linearni** oblik pri opterećenju i **konkavni** pri rasterećenju, te brzo dobiva opet krivolinijski oblik i to **konkavni** pri opterećenju i rasterećenju; **krivljenje dijagrama znak je zamora materijala**
- granica zamora (trajna čvrstoća) je napon kojim se beton daje opteretiti i rasteretiti neizmerno mnogo puta, a da ne dođe do loma betona
- preporučuje se odabrati za granicu zamora približno $0.6 f_c$