

DEJSTVA NA MOSTOVE
prema PRAVILNIKU O TEHNIČKIM NORMATMMA ZA ODREĐIVANJE
VELIČINA OPTEREĆENJA MOSTOVA iz 1990. god.
I Eurokodovima

Crna Gora će uskoro početi sa primjenom evropskih propisa za projektovanje mostova međutim još dugo će se koristiti, održavati i sanirati mostovi koji su projektovani po do sada važećim propisima.

PTP-5 - «Privremeni tehnički i propisi za određivanje veličine opterećenja na mostovima», propisi za određivanje korisnih proračunskih opterećenja drumskih mostova, bili su na snazi od 1947. do 1990, a od 1990 do danas se koristi „Pravilniku o tehničkim normatima za određivanje veličina opterećenja mostova“.

Proračunski vijek trajanja je predpostavljeni period u kojem je most upotrebljiv za namijenjenu svrhu uz odgovarajuće održavanje, ali bez znatnijih popravki. Uzima se da je to period od 100 god.

Trajnost je svojstvo građevine (ili njene nosive konstrukcije koje obezbjeđuje da će ona (ili njena nosiva konstrukcija) biti sposobna za namijenjenu upotrebu u proračunskom vijeku trajanja uz odgovarajuće uzdržavanje.

Категорија	Прор. век	
1	10	Privremene konstrukcije
2	10-25	Zamenjivi delovi konstrukcije
3	15-30	Poljoprivredne i sl. konstrukcije
4	50	Zgrade
5	100	Mostovi, monumentalne zgrade, inženjerski objekti

Proračunska situacija je ona situacija u kojima se nosiva konstrukcija može naći u vijeku trajanja i u kojima mora zadržati nosivost i upotrebljivost.

Granična stanja su ona stanja izvan kojih nosiva konstrukcija više ne zadovoljava zahtjeve za predviđeno ponašanje.

Razlikujemo: granična stanja nosivosti i granična stanja uporabivosti.

Proračun, dimenzionisanje i dokazi

U načelu treba

- dokazati nosivost
- dokazati upotrebljivost

Ovi dokazi moraju da odgovaraju planiranoj sigurnosti i predviđenoj upotrebljivosti objekta. Jedan dokaz se može izostaviti, ako nema odlučujuću ulogu.

Za konstrukcije koje su izložene i ugrožene na delovanje opterećenja koja se često ponavljaju treba u okviru kontrole nosivosti dokazati i sigurnost konstrukcije na zamor.

Dokaz nosivosti

Dozvoljena nosivost konstrukcije smatra se dokazanom, ako je ispunjen uslov:

$$S_d \leq \frac{R}{\gamma_R}$$

S_d : projektovana vrednost opterećenja

R : granična nosivosti

γ_R : koeficijent granične nosivosti

Koeficijent granične nosivosti uzima u obzir sledeće uticaje:

- odstupanja stvarnog konstrukcionog sistema od sistema koji je bio osnova za proračun
- pojednostavljenje i nedovoljna tačnost modela
- netačnost poprečnog preseka

Projektovana vrednost opterećenja u opštem obliku glasi:

$$S_d = S(G_d, Q_d, \Sigma Q_a)$$

G_d : projektovana vrednost sopstvenog opterećenja

Q_d : projektovana vrednost osnovnog uticaja

ΣQ_a : zbir sporednih – ostalih uticaja

Projektovana vrednost opterećenja uzima u obzir:

- statičku rasprostranjenost veličine uticaja uprošćeni prikaz uticaja
- uprošćenost modela uticaja koji nastaju usled zanemarivanja manje važnih uticaja ili usled zanemarivanja jednovremeno nastupajućih uticaja sa neznatnim međusobnim učincima.

Zahtevi koji su vezani za upotrebljivost određeni su u nacrtu upotrebe objekta.

Zahtevano ponašanje konstrukcije treba obezbediti izborom odgovarajućih građevinskih materijala, dovoljnim dimenzionisanjem, kvalitetnom razradom konstruktivnih detalja, kao i planiranim i odgovornim izvođenjem radova na održavanju. Ponašanje konstrukcije mora da bude u okvirima propisanih ili odgovarajućih granica.

Ove granice se odnose na:

- pukotine
- deformacije
- vibracije
- kvalitet građevinskih materijala

Opterećenja koja treba uzeti u obzir za računsko dokazivanje upotrebljivosti zavise od vrste dokaza kao što su dokazi za pukotine ili dokazi za deformacije.

Dokaz upotrebljivosti

Opterećenja se određuju na osnovu uticaja koji istovremeno nastupaju u stanju ispitivanja i upotrebe.

Pri upotrebi postoje dve vrste uticaja:

- dugotrajna vrednost $Q_{ser, l}$
- kratkotrajna vrednost $Q_{ser, k}$

Dugotrajne vrednosti važe za stalne uticaje, a sadrže i delove promenljivih uticaja koji su prisutni tokom dužeg vremena.

Kratkotrajne vrednosti opisuju promenljive uticaje koji nastaju u kratkom vremenu. Istovremeno sadrže i deo dugotrajnih uticaja.

Deformacije



Definicija ugiba

Navedene oznake definišu sledeće:

- w_1 : nadvišenja, npr. planirani radionički oblik čelične konstrukcije ili visina nadvišenja skele, odnosno oplata kod betonskih konstrukcija.
- w_2 : ugib nastao usled delovanja sopstvene težine konstrukcije sa uticajima stalnog delovanja i preuzetim pripadajućim dugotrajnim deformacijama.
- w_3 : ugib nastao usled dugotrajnog promenljivog uticaja sa preuzetim pripadajućim dugotrajnim deformacijama.
- w_4 : ugib nastao usled kratkotrajne vrednosti delovanja promenljivog uticaja.

Granične vrednosti ugiba zavise od zahteva koji se odnose na upotrebljivost:

- putni mostovi $l / 700$
- železnički mostovi $l / 600 - l / 1000$
- mostovi za pešake i bicikliste $l / 500$

Navedene orijentacione vrednosti važe kao granične, ako u elaboratu upotrebe objekta nisu dogovorene druge vrednosti.

Ugibe koji nastaju usled sopstvenih opterećenja konstrukcije i stalnih uticaja, uključujući i pripadajuće dugotrajne deformacije, treba kod mostova izjednačiti sa nadvišenjem.

Vibracije

Do vibracija može doći usled sledećih promenljivih uticaja:

- ritmičnog kretanja ljudi usled hodanja, trčanja itd.
- putnog ili železničkog saobraćaja
- Vibracije koje ugrožavaju konstrukciju, kao što su rezonanca ili gubitak granične nosivosti zbog zamora, moraju se uzeti u obzir pri dokazivanju dozvoljne nosivosti.

Na vibraciono ponašanje objekata mogu da utiču sledeće intervencije:

- promena dinamičkog uticaja
- promena sopstvenih frekvencija zbog promene krutosti konstrukcije ili njihajuće mase
- povećanje amortizacije

Sopstvene frekvencije treba ocenjivati gornjim i donjim vrednostima. U ovom slučaju treba uzeti u obzir moguće uticaje neravnosti kolovoza i drugih nenosećih građevinskih elemenata, kao i varijacije dinamičkog modula elastičnosti. Kod betonskih mostova treba uzeti u obzir i prelaz iz stanja bez pukotina u stanje sa pukotinama.

Kod objekata za pešake i bicikliste treba sprečiti pojavu sopstvenih frekvencija u intervalu od 1,6 do 2,4 Hz i 3,5 do 4,5 Hz.

Trkači mogu da prouzrokuju vibracije i rad objekata sa sopstvenom frekvencijom koja se nalazi između 2,4 i 3,5 Hz.

Sigurnost na zamor

Dokazom sigurnosti na zamor treba pokazati da uticaj zamora od opterećenja u eksploataciji ne utiče štetno na dovoljnu nosivost konstrukcije za vreme njene upotrebe.

Dokaz sigurnosti na zamor sprovodi se za konstrukcije koje su opterećene železničkim ili putnim opterećenjima, odnosno koje su izložene delovanju vibracija.

PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATMMA ZA ODREĐIVANJE VELIČINA OPTEREĆENJA MOSTOVA

PODJELA DELOVANJA prema vjerovatnoći pojave

- 1) osnovna;
- 2) dopunska;
- 3) izuzetna.

OSNOVNA DJELOVANJA

- 1) sopstvena masa;
- 2) korisno opterećenje;
- 3) stalni teret na mostu;
- 4) sile koje nastaju od prednaprezanja;
- 5) skupljanje i tečenje materijala (kod prednapregnutih i spregnutih konstrukcija);
- 6) opterećenje vodovima;
- 7) aktivni pritisak tla;
- 8) pritisak i masa mirne vode;
- 9) djelovanje tekuće vode;
- 10) uzgon;
- 11) pritisak na ogradu mosta;
- 12) deformacije nastale kao posljedica načina izgradnje.

DOPUNSKA DELOVANJA

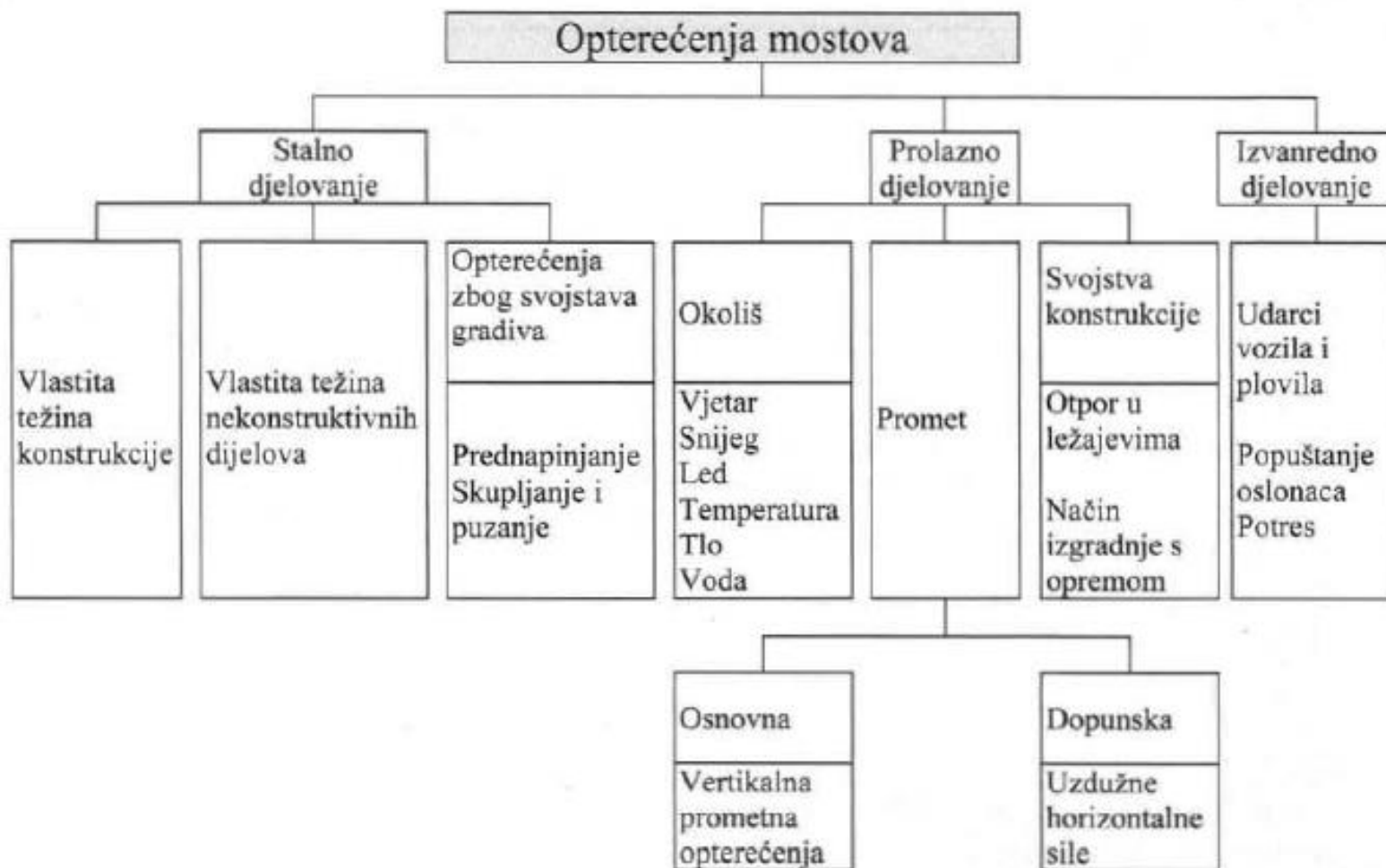
- 1) promjene temperature;
- 2) skupljanje betona;
- 3) tečenje betona;
- 4) vjetar;
- 5) snijeg;
- 6) udar leda;
- 7) sila pri pokretanju i sila pri zaustavljanju vozila;
- 8) otpori u ležištima;
- 9) centrifugalna sila;
- 10) moguće pomjeranje temeljnog tla;
- 11) zemljotres (Z1)

IZUZETNA DELOVANJA

- 1) udari vozila i plovnih objekata;
- 2) Zemljotres (Z2);
- 3) vanredna opterećenja;
- 4) privremena stanja pri građenju.

prema promjenljivosti u toku vremena

- stalna djelovanja G (vlastita težina, nepokretna oprema, kolnički zastor, prednapinjanje, slijeganje oslonaca**)
- promjenljiva djelovanja Q (korisno opterećenje, opterećenje od snijega* i opterećenje od vjetra, potres*, utjecaj temperature**)
- izvanredna djelovanja A (eksplozije, udar vozila, potres*, opterećenje od snijega*)



Soptvenu težinu mosta čine sopstvena težina konstrukcije kao i težine djelova, uređaja, sredstava i opreme koji se na njoj nalaze, težine vodova koji se preko mosta prevode i medijuma za koji vodovi namijenjeni. Veličina ovih opterećenja računa se na temelju prostornih dimenzija i zapreminskih težina materijala. Za neke dijelove opreme mosta može se koristiti težina po metru površine ili težina po metru dužnom.

Ukoliko je prije proračuna izvršeno potpuno i detaljno istraživanje u cilju određivanja nazivne težine instalacijskih razvodnih kanala, usvaja se gornja karakteristična težina za 20% veća od maksimalne nazivne vrijednosti određene istraživanjem. U nedostatku takvog istraživanja, gornja vrijednost se mora procjeniti na osnovi lokacije i vjerovatnih budućih potreba kao maksimalna vrijednost u dužem periodu.

Tablica 1. Zapreminske, površinske ili dužne težine nekih materijala i opreme mosta

Materijal ili element opreme mosta	Zapreminska težina (kN/m ³)
beton (teški beton)	24 - 28
armirani i prednapeti beton	25 - 29
čelik	77
lijevani asfalt ili asfalt-beton	25
mastiks asfalt	18
vruće valjani asfalt	23
zastor željezničkih mostova	20
	Površinska težina (kN/m ²)
hidroizolacija	0,5
konstrukcije sa zastorom:	
2 tračnice UIC 60	1,2
prednapregnuti betonski prag s kolovoznim priborom	4,8
drveni pragovi s kolovoznim priborom	1,9
	Linijska težina (kN/m)
elastični odbojnik	0,4
pješačka ograda	0,4
konstrukcije bez zastora:	
2 tračnice UIC 60 s kolovoznim priborom	1,7
2 tračnice s kolovoznim priborom, mosnom gredom i zaštitnim šinama	3,4

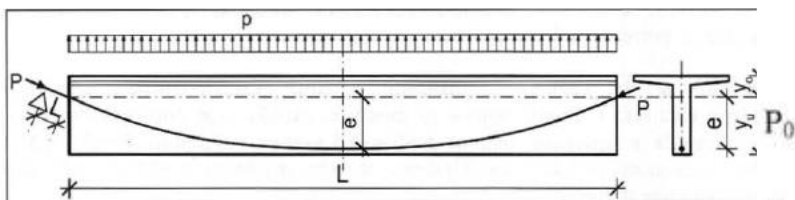
Opterećenja zbog svojstava gradiva-materijala

Prednaprezanje

Djelovanje sile prednapreznajna odgovara djelovanju zamjenjujućeg kontinualnog opterećenja p , orjentisanog prema gore. Dio pune sile prednapreznajna, koju smo unijeli u nosač, izgubi se trenutno (čine ga trenje kablova o cijev, prokliznuće klina i elastične deformacije), dok se dio sile gubi vremenom (čine ga vremenski gubici usljed skupljanja, tečenje i relaksacija čelika).

Izrazi kojima se približno mogu odrediti gubici sile prednapreznajna dati su u nastavku.

$$M_p = P \cdot e = \frac{p \cdot L^2}{8}, \quad p = \frac{8Pe}{L^2}$$



Kvalitet čelika može se opisati preko karakteristične čvrstoće na zatezanje f_{pk} i karakteristične granice napreznajna $f_{p0.1,k}$ koja odgovara napreznajnu s nepovratnom deformacijom od 0.1%.

Gubitak sile prednapreznajna zbog trenja:

$$\Delta P_\mu(x) = P_0(1 - e^{-\mu(\Theta + k \cdot x)})$$

A_p

– početna sila prednapreznajna koja ne smije prekoračiti veličinu $A_p \cdot \sigma_{p0}$

– površina presjeka čelika za prednapreznajanje

$$\sigma_{p0} \leq \begin{cases} 0,80f_{pk} \\ 0,9f_{p0.1,k} \end{cases}$$

– maksimalni dopušteni napon na preši, mjerodavan je manji

μ

– koeficijent trenja između kabela i zaštitne cijevi

Θ

– suma kutova skretanja kabela na duljini x u lučnoj mjeri

k

– valovitost kabela

Vrijednosti koeficijenata μ i k mogu se naći u dokumentaciji proizvođača sustava prednapreznajna.

Gubitak sile prednapinjanja prokliznućem klina:

$$\Delta P_{sl} = 2P_0 \cdot x_1 \cdot \mu \left(\frac{\Theta}{1} \right) + k$$

$$x_1 = \sqrt{\frac{\Delta l \cdot E_s}{\sigma_{p0} \cdot \mu(\Theta/1 + k)}} \quad - \text{duljina utjecaja prokliznuća klina.}$$

Gubitak sile prednapinjanja zbog elastičnih deformacija betona:

▪ prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona $\Delta P_c = \sigma_{c0}^* \cdot \frac{\alpha_e}{1 + \rho_1 \cdot \alpha_e} \cdot A_p$

$\sigma_{c0}^* = P_0^* \cdot \rho_1 / A_c$ – početni napon u betonu u visini težišta čelika umanjen za gubitke trenjem i prokliznućem klina

$\rho_1 = 1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot y_{cp}$ – utjecaj ekscentriciteta sile P_0

y_{cp} – udaljenost težišta betonskog presjeka i kabela

A_c – površina betonskog presjeka

I_c – moment tromosti betonskog presjeka

$\alpha_e = E_s / E_{cm}$ – omjer modula elastičnosti

Modul elastičnosti betona:

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

▪ naknadno prednapinjanje $\Delta P_c = 0,5 \frac{n-1}{n} \alpha_e \cdot \sigma_{c0}^* \cdot A_p$

n – broj kabela koji se sukcesivno prednapinju.

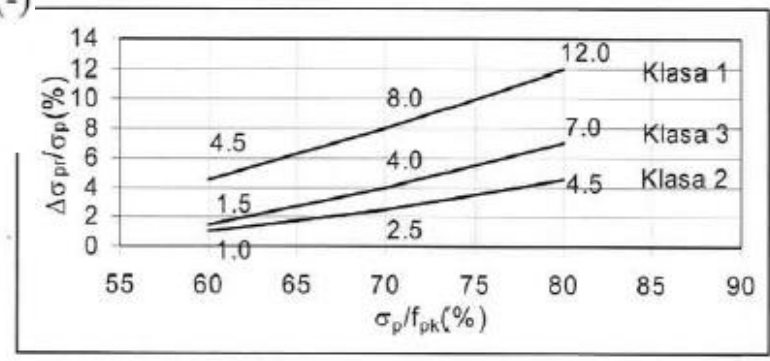
Gubitak sile prednapinjanja zbog početne relaksacije:

ΔP_{ir} koji se javlja kod prednapinjanja prije stvrdnjavanja može se na osnovi podataka o relaksaciji čelika procijeniti.

Vremenski gubici zbog skupljanja, puzanja i relaksacije čelika u vremenu t:

$$\Delta P_t(t) = \Delta \sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = \frac{\varepsilon_s(t, t_0) E_s + \Delta \sigma_{pr} + \alpha_e \cdot \varphi(t, t_0) (\sigma_{cg} + \sigma_{cp0})}{1 + \alpha_e \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} y_{cp}^2 \right) [1 + 0,8\varphi(t, t_0)]} \cdot A_p$$

- $\varepsilon_s(t, t_0)$ – procijenjena deformacija skupljanja
- $\Delta \sigma_{pr}$ – promjena prednapona u kabelu zbog relaksacije, a dobiva se prema slici na osnovi omjera (σ_p / f_{pk}) uz $\sigma_p \approx 0,85\sigma_{pg0}$
- σ_{pg0} – početni napon od prednapinjanja i stalnog opterećenja
- $\varphi(t, t_0)$ – prognozirana vrijednost za koeficijent puzanja
- σ_{cg} – napon u betonu u visini kabela od stalnog opterećenja (-)
- σ_{cp0} – početna vrijednost napona od prednapinjanja u betonu u visini kabela.



Relaksacija čelika nakon 1000 h kod 20°C

Uz poznate gubitke srednja vrijednost sile prednapinjana u vrijeme t na udaljenosti x od kraja uzduž prednapetog elementa određuje se prema izrazima:

- prednapinjanje prije stvrdnjavanja betona

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_c - \Delta P_{ir} - \Delta P_t(t)$$

- naknadno prednapinjanje

$$P_{m,t} = P_0 - \Delta P_{\mu}(x) - \Delta P_{sl} - \Delta P_c - \Delta P_t(t)$$

Sila prednapinjanja u vrijeme $t = 0$ je P_{m0} i određuje se smanjenjem početne sile za trenutne gubitke, dakle prema istim izrazima u kojima je zadnji član 0. Ova sila ne smije prekoračiti veličinu $A_p \cdot \sigma_{pm,0}$.

$\sigma_{pm,0}$ je maksimalni dopušteni napon nakon gubitaka sidrenjem kod prednapinjanja prije stvrdnjavanja betona, odnosno maksimalni dopušteni napon nakon uklanjanja preše kod kabelskog prednapinjanja. Mjerodavna je manja vrijednost od slijedećih:

$$\sigma_{pm,0} \leq \begin{cases} 0,75f_{pk} \\ 0,85f_{p0.1,k} \end{cases}$$

Konačna sila prednapinjanja $P_{m\infty}$ je sila nakon svih gubitaka i trenutnih i vremenskih u $t = \infty$.

Moment rastlačenja je moment savijanja izazvan vanjskim opterećenjem. Po veličini i smjeru takav je da na vlačnom rubu poništi naprezanja izazvana silom prednapinjanja.

Potpuno prednapeti elementi su oni u kojima pri najnepovoljnijoj kombinaciji djelovanja u betonu nema vlačnih naprezanja. Za njih je stupanj prednapinjanja 1,0.

U ograničeno prednapetim elementima mogu nastati vlačna naprezanja, ali manja od dopuštenih. Za njih je stupanj prednapinjanja manji od 1,0.

Kod djelomično prednapetih elemenata pri određenoj kombinaciji djelovanja mogu se pojaviti pukotine, ali njihove karakteristične širine moraju biti manje od propisanih. Stupanj prednapinjanja im je između 0,4 i 0,7.

Prema Eurokodu 2 prednapete konstrukcije valja dimenzionirati po metodi graničnih stanja, s tim da se prednapeta armatura predvidi ili odredi metodom dopuštenih napona. Umjesto determinističkog postupka koji je rabila metoda dopuštenih naprezanja, u Eurokodu 2 primjenjuje se probabilistički pristup. Dokaznim postupkom valja utvrditi, jednako za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti, da su računске veličine izazvane vanjskim djelovanjem (reznе sile, naponi, deformiranje, raspucavanje) manje od adekvatnih vrijednosti otpora (nosivosti) ili graničnih vrijednosti uporabljivosti.

Skupljanje i tečenje

U proračunu AB konstrukcija za granično stanje uporabljivosti (progibi i pukotine), i u proračunima prednapetih konstrukcija (padovi sile prednapinjanja) potrebno je poznavati ne samo konačne koeficijente puzanja i skupljanja nego i njihove vrijednosti u raznim vremenskim intervalima.

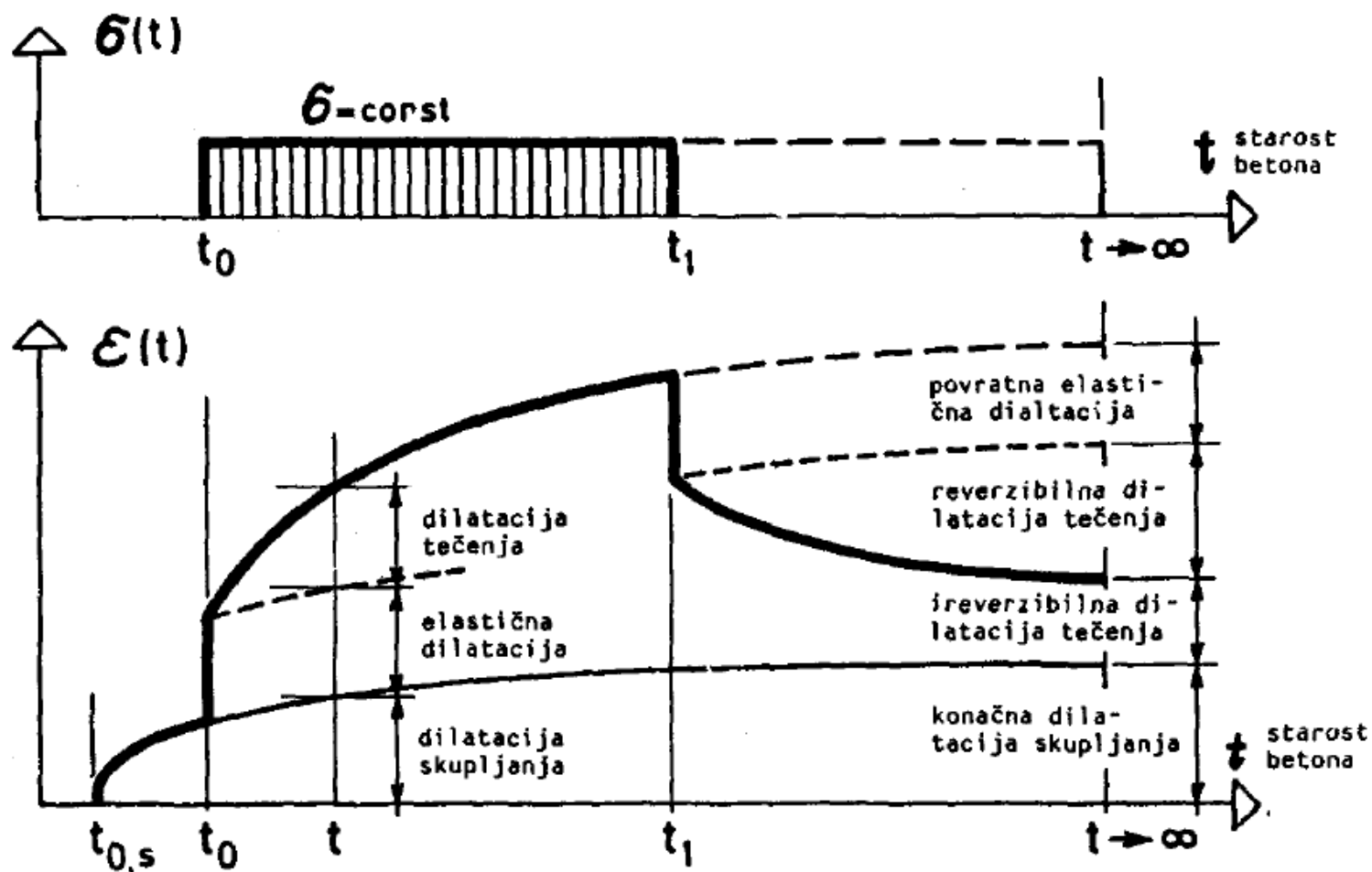
Ovaj problem je posebno značajan u proračunu mostova, gdje je u proračunu nadvišenja konstrukcije tijekom građenja potrebno što točnije odrediti sve parametre za proračun progiba, jer u tim slučajevima ne postoji strana sigurnosti.

Beton ima svojstvo plastičnosti i puže pod dugotrajnim naprežanjem. Puzanje betona posljedica je kretanja slobodne i apsorbirane vode u betonu i ovisno je o većem broju faktora: vlažnost zraka, srednji polumjer, trenutak nanošenja opterećenja, klasa betona, srednja temperatura, konzistencija betona (v/c-faktor), klasa cementa, količina cementnog tijesta, tip opterećenja (vlak, tlak, savijanje), postotak armiranja, granulometrijski sastav agregata i tip agregata, koji više ili manje utječu na vremensku promjenu koeficijenta puzanja.

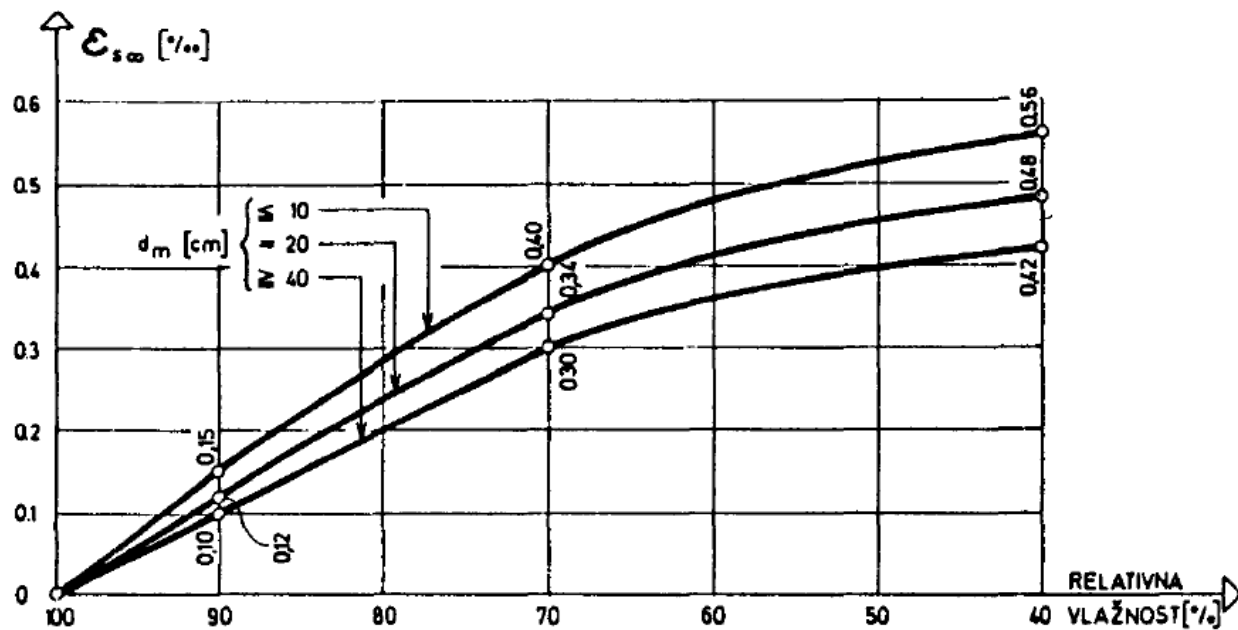
Linearna teorija puzanja, koja se može primijeniti kod naprežanja u eksploataciji $\sigma_c < 0.5f_c$ uzima da je plastična deformacija pri dugotrajnom opterećenju linearno proporcionalna deformaciji pri kratkotrajnom opterećenju, odnosno naprežanju.

$$\varepsilon_{cp}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c}$$

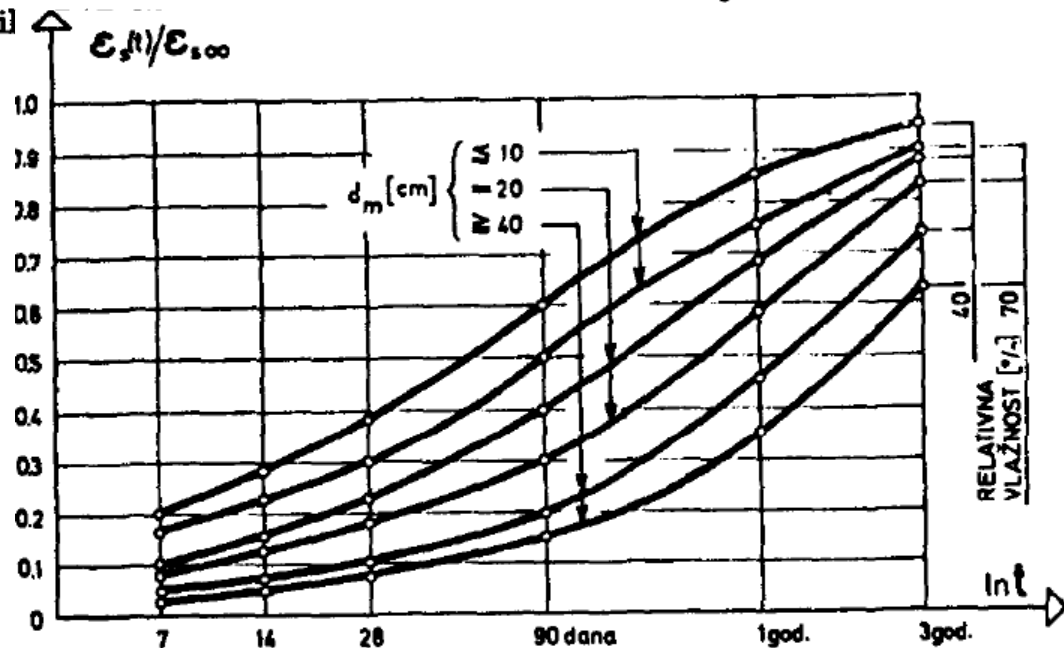
$\varphi(t, t_0)$ – koeficijent puzanja betona u trenutku t , starog t_0 u trenutku opterećenja,
 E_c – tangenti modul elastičnosti betona starog 28 dana.



Kvalitativan prikaz ukupnih kratkotrajnih i dugotrajnih dilatacija od skupljanja i tečenja linijskog betonskog elementa pod konstantnim jednoaksijalnim naponom u intervalu vremena $(t_1 - t_0)$



Slika 57/1 Konačne vrednosti skupljanja, u zavisnosti od relativne vlažnosti sredine i srednje debljine preseka, prema Pravilnik



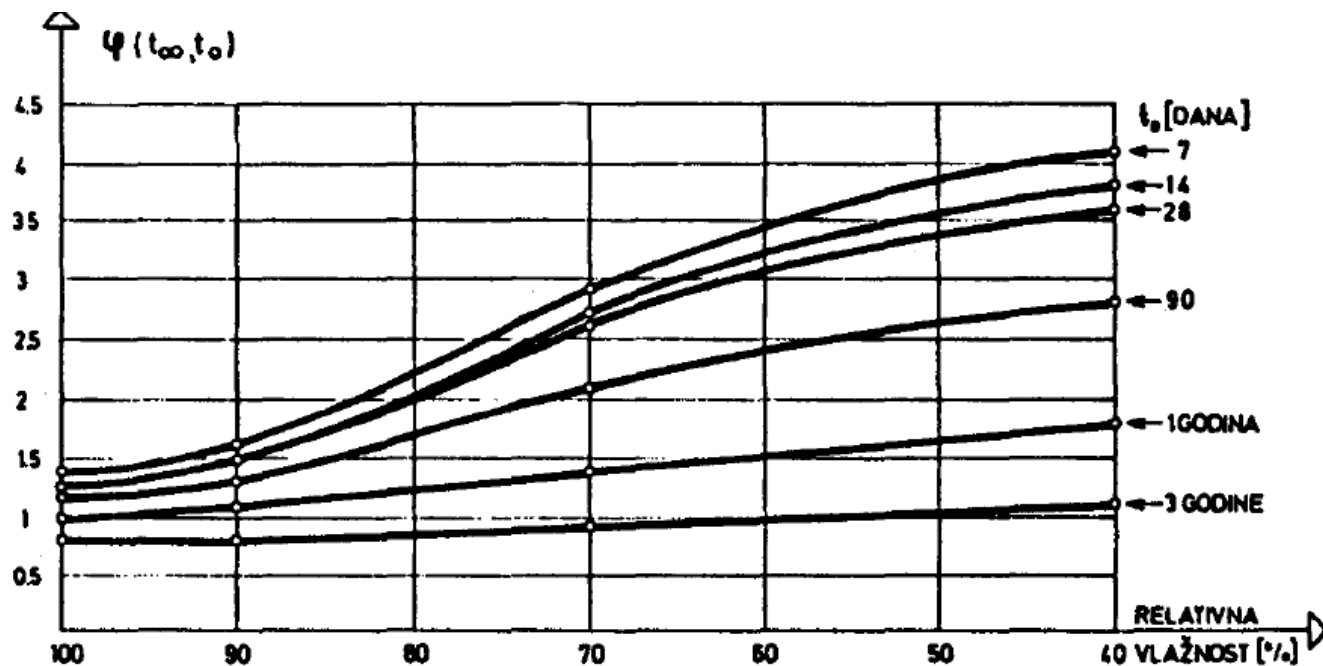
Skupljanje betona u toku vremena, u zavisnosti od relativne vlažnosti sredine i srednje debljine preseka, prema Pravilniku BAB 87

U vezi sa definisanjem osnovnih pojmova, značajno je da se zapazi da je definicija koeficijenta tečenja ostala ista kao i u našem starom Pravilniku BAB 71 /97/: *koeficijent tečenja betona je odnos dilatacije tečenja u posmatranom trenutku vremena t i trenutnih elastičnih dilatacija u trenutku opterećenja t_0*

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{b, teč}(t, t_0)}{\varepsilon_{b, el}(t_0)}$$

Koeficijent tečenja je, dakle, u suštini koeficijent proporcionalnosti dilatacija tečenja i trenutnih elastičnih dilatacija a funkcija je vremena i starosti betona.

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{b, teč}(t, t_0)}{\frac{\sigma_b(t_0)}{E_b(t=28)}}$$



$$\varepsilon_{cp}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c}$$

Slika 57/3 Konačne vrednosti koeficijenta tečenja, u zavisnosti od relativne vlažnosti sredine i starosti betona u trenutku opterećenja t_0 , prema Pravilniku BAB 87, za srednje debljine preseka $d_m = 20$ cm (krive za $d_m \leq 10$ cm i $d_m \geq 40$ cm nisu prikazane)

$$\varepsilon_{cp}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c}$$

$\varphi(t, t_0)$ – koeficijent pužanja betona u trenutku t , starog t_0 u trenutku opterećenja,

E_c – tangenti modul elastičnosti betona starog 28 dana.

Konačne vrijednosti skupljanja za nearmirani beton čuvan u vlažnoj sredini najmanje prvih sedam dana pri temperaturi od oko 20°C, prema Pravilniku za beton i armirani beton dane su u tablici 3.

Ove vrijednosti treba povećati za 15% kada je konzistencija svježje betonske mase žitka, odnosno smanjiti za 15% kada je konzistencija kruta.

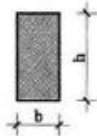
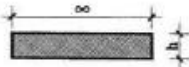

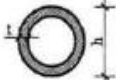

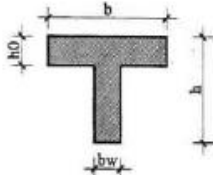
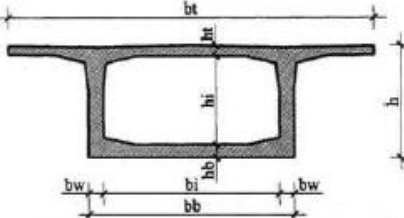
Tablica 3. Konačne vrijednosti koeficijenta skupljanja $\varepsilon_{cs\infty}$ prema PBAB-u

Srednji polumjer presjeka	Relativna vlažnost zraka (%)			
	40	70	90	100
mali ≤ 10	0,56	0,40	0,15	0
srednji ≈ 20	0,48	0,34	0,12	0
veliki ≥ 40	0,42	0,30	0,10	0

Tablica 4. Odnosi koeficijenta skupljanja betona u vremenu prema PBAB-u

Relativna vlažnost zraka	Srednji polumjer presjeka	7	14	28	90	365	3 godine
		$\varepsilon_{cst} / \varepsilon_{cs\infty}$					
40%	mali ≤ 10	0,20	0,28	0,38	0,60	0,85	0,95
	srednji ≈ 20	0,10	0,15	0,23	0,40	0,68	0,88
	veliki ≥ 40	0,05	0,07	0,10	0,20	0,45	0,73
70%	mali ≤ 10	0,16	0,23	0,30	0,50	0,75	0,90
	srednji ≈ 20	0,08	0,13	0,18	0,30	0,58	0,83
	veliki ≥ 40	0,03	0,05	0,08	0,15	0,35	0,63

Tablica 2. Proračun srednjeg polumjera presjeka

Poprečni presjek	srednji polumjer $h_0 = \frac{2A_c}{u}$
	$\frac{2 \cdot b \cdot h}{2 \cdot (b + h)} = \frac{b \cdot h}{b + h}$
	$\frac{2 \cdot h \cdot \infty}{2 \cdot \infty} = h$
	$\frac{2 \cdot h^2 \cdot \pi}{4 \cdot h \cdot \pi} = \frac{h}{2}$
	$\frac{2 \cdot h \cdot \pi \cdot t}{h \cdot \pi} = 2 \cdot t$
	$\frac{2 \cdot h \cdot \pi \cdot t}{2 \cdot h \cdot \pi} = t$
	$\frac{b \cdot h_0 + h \cdot b_w - h_0 \cdot b_w}{b + h}$
	$\frac{b_i \cdot h_i + b_o \cdot h_o + 2 \cdot b_w \cdot h_i}{b_i + h + \alpha_i \cdot (b_i + h_i)}$

Tablica 5. Konačne vrijednosti koeficijenta puzanja $\varphi(\infty, t_0)$ prema PBAB-u

Starost betona u trenutku opterećenja t_0 (dani)	Srednji polumjer presjeka	Relativna vlažnost zraka (%)			
		40	70	90	100
7	mali ≤ 10	4,3	3,1	1,7	1,4
	srednji ≈ 20	4,1	2,9	1,6	1,4
	veliki ≥ 40	3,8	2,7	1,6	1,4
14	mali ≤ 10	4,0	2,9	1,6	1,3
	srednji ≈ 20	3,8	2,7	1,5	1,3
	veliki ≥ 40	3,6	2,5	1,5	1,3
28	mali ≤ 10	3,7	2,6	1,6	1,3
	srednji ≈ 20	3,6	2,6	1,5	1,3
	veliki ≥ 40	3,4	2,5	1,4	1,3
90	mali ≤ 10	2,7	2,2	1,3	1,2
	srednji ≈ 20	2,8	2,1	1,3	1,2
	veliki ≥ 40	2,9	2,1	1,3	1,2
365	mali ≤ 10	1,7	1,3	1,0	1,0
	srednji ≈ 20	1,8	1,4	1,1	1,0
	veliki ≥ 40	2,0	1,5	1,1	1,0
3 godine	mali ≤ 10	0,9	0,8	0,7	0,8
	srednji ≈ 20	1,1	0,9	0,8	0,8
	veliki ≥ 40	1,2	1,0	0,8	0,8

Tablica 6. Odnosi koeficijenta puzanja betona u vremenu prema PBAB-u

Vrijeme opterećenja $(t-t_0)$ u danima	7	14	28	90	365	3 godine
t_0	$\varphi(t, t_0) / \varphi(t_\infty, t_0)$					
7	0,25	0,30	0,38	0,53	0,73	0,85
28-90	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

Evropske norme

Vrijednost koeficijenta skupljanja u određenom vremenskom intervalu prema Eurokodu 2:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s)$$

gdje je:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}$$

– osnovna vrijednost koeficijenta skupljanja

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + \beta_{sc} \cdot (90 - f_{cm})] \cdot 10^{-6}$$

– ovisnost u betonu i cementu

$$\beta_{sc} = \begin{cases} 4 \\ 5 \\ 8 \end{cases}$$

– za polagano stvrdnjavajući cement

– za normalno ili brzo stvrdnjavajući cement

– za brzo stvrdnjavajući visokovrijedni cement

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

– tlačna čvrstoća betona starog 28 dana (N/mm²)

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \beta_{sRH} \\ +0.25 \end{cases}$$

– za relativnu vlažnost 40% ≤ RH < 99% (na otvorenom)

– za relativnu vlažnost RH ≥ 99% (u vodi)

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3$$

– koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj vlažnosti zraka na osnovno skupljanje

RH

– relativna vlažnost okoliša u %

$$\beta_s(t - t_s) = \left(\frac{t - t_s}{0.035h_0^2 + t - t_s}\right)^{0.5}$$

– koeficijent koji opisuje vremensku promjenu skupljanja

t

– starost betona u danima u trenutku promatranja

t_s

– starost betona u danima u trenutku kad se počinje promatrati skupljanje

t - t_s

– stvarno trajanje skupljanja u danima

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

– srednji polumjer presjeka (mm)

Evropske norme

Koeficijent puzanja dobiva se preko izraza:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

gdje je:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / 100}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}}$$

RH

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0.3}$$

t

t₀

t-t₀

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500$$

– osnovna vrijednost za koeficijent puzanja

– koeficijent koji uzima u obzir relativnu vlažnost zraka

– relativna vlažnost okoliša u %

– srednji polumjer presjeka (mm)

– koeficijent koji uzima u obzir utjecaj čvrstoće betona

– tlačna čvrstoća betona starog 28 dana (N/mm²)

– starost betona u danima u trenutku promatranja

– starost betona u danima u trenutku početka djelovanja opterećenja

– vrijeme djelovanja opterećenja

– koeficijent ovisan o relativnoj vlazi i h₀.

Kada se ne traži velika točnost, za normalno teške betone (srednja čvrstoća C35/45), može se koristiti konačna vrijednost koeficijenta skupljanja betona $\epsilon_{cs\infty}$ dana u tablici 11. Ova vrijednost vrijedi kada je srednja temperatura zraka između $+ 10^{\circ}\text{C}$ i $+ 20^{\circ}\text{C}$ (kroz godinu između $- 20^{\circ}\text{C}$ i $+ 40^{\circ}\text{C}$), kolebanje vlažnosti zraka je između 20% i 100% i konzistencija betona je plastična.

Vrijednosti u tablici potrebno je modificirati koeficijentom:

0,7 – kada je beton krute konzistencije

1,2 – kada je beton tekuće konzistencije.

Tablica 11. Konačni koeficijent skupljanja $\epsilon_{cs\infty}$ prema EC2

Okoliš elementa	Relativna vlažnost zraka (%)	Srednji polumjer presjeka (mm)	
		≤ 150	600
Suh, unutrašnjost	50	-0,60	-0,50
Vlažan, na otvorenom	80	-0,33	-0,28

Koeficijent varijacije puzanja dobivenog preko danih formula iznosi oko 20 %. Uz uvjet da su zadovoljeni uvjeti da napon u betonu ne prelazi vrijednost $\sigma_c=0,45f_{ck}$ i da je srednja temperatura zraka između $+ 10^{\circ}\text{C}$ i $+ 20^{\circ}\text{C}$ (kroz godinu između $- 20^{\circ}\text{C}$ i $+ 40^{\circ}\text{C}$), kolebanje vlažnosti zraka između 20% i 100% a konzistencija betona je plastična, konačni koeficijent puzanja se može uzeti iz tablice 12:

Tablica 12. Konačni koeficijent puzanja $\varphi(t_{\infty}, t_0)$

Starost betona u vrijeme opterećenja	Srednji polumjer presjeka $h_0 = 2 A_c/u$ (mm)					
	50	150	600	50	150	600
	Okolina elementa					
	Suha, $\approx 50\%$, unutar			Vlažna, $\approx 50\%$, na otvorenom		
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	3,0	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

Vrijednosti u tablicama potrebno je modificirati koeficijentom:

0,7 – kada je beton krute konzistencije

1,2 – kada je beton tekuće konzistencije.

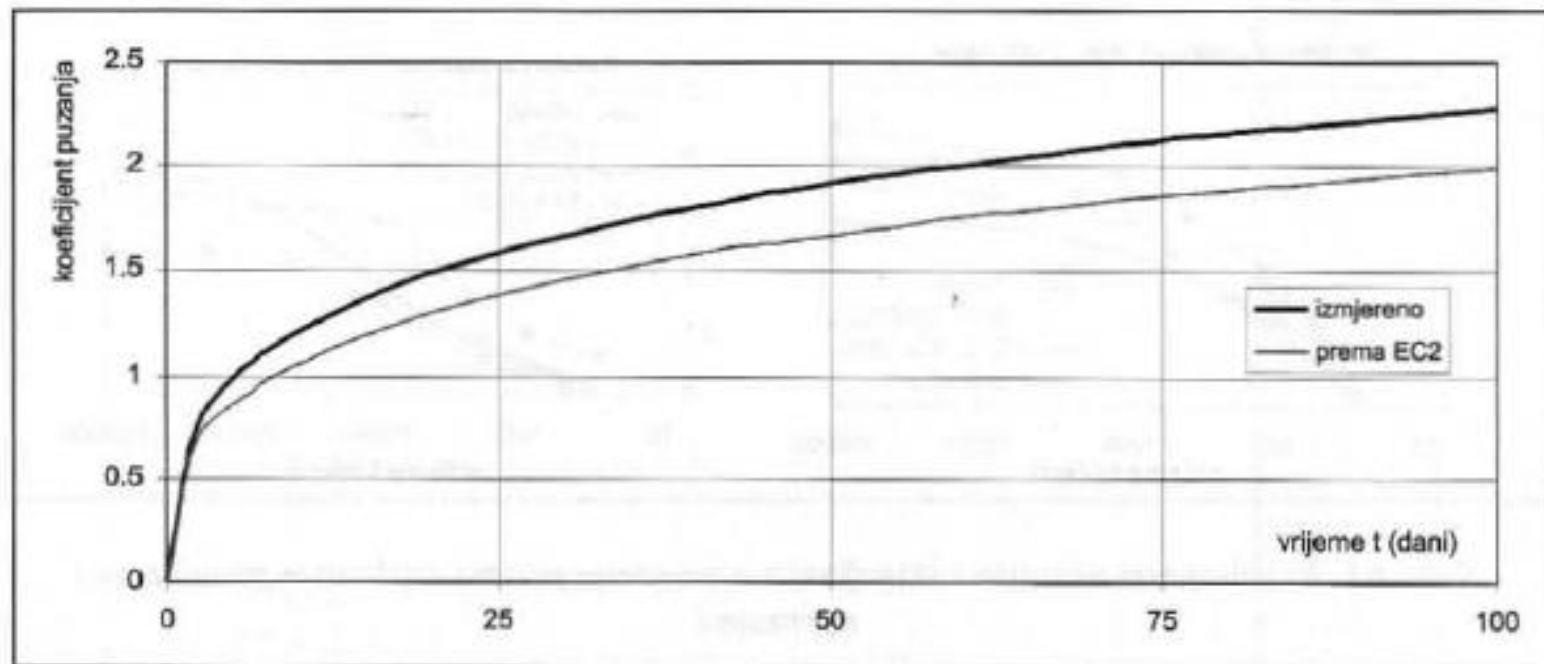
Puzanje betona može se u proračunu obuhvatiti preko modificiranog modula elastičnosti:

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi(t, t_0))$$

$\alpha_{e,eff} = E_s / E_{c,eff}$ – odnos modula elastičnosti.

E_{cm} – sekantni modul elastičnosti

$\varphi(t, t_0)$ – koeficijent puzanja betona



Slika 62. Usporedba koeficijenta puzanja prema EC2 propisu i izmjerenih vrijednosti