

Proračun gubitaka sile prethodnog naprezanja

(važi za PN naknadnim utezanjem kablovima kroz zaštitne cevi unutar nosača)

Početni gubici (dati preko koeficijenata **preostale sile** Δ_τ, Δ_{el} i Δ_{sl}):

$$P_0 = \Delta_\tau \times \Delta_{el} \times \Delta_{sl} \times P^0$$

Gubitak od trenja:

$$\Delta_\tau = e^{-(\mu\theta + k_1 s)} \quad \text{ili (isto, drugi oblik)} \quad \Delta_\tau = e^{-\mu(\theta + k_1 s)} \quad (k_1 = k/\mu)$$

gde je

 s dužina kabla od mesta utezanja (m), μ (1/rad), k (1/m) i k_1 (rad/m) su koeficijenti trenja, i θ (rad) je ukupno skretanje kabla na dužini s .

Gubitak od elastičnog skraćanja (pri sukcesivnom utezanju):

$$\Delta_{el} = 1 - 0,5 \cdot \frac{E_p}{E_c} \cdot A_p \cdot \left(\frac{1}{A_c} + \frac{z_{cp}^2}{I_c} - \frac{M_{\min} \cdot z_{cp}}{\Delta_\tau \cdot N_p^0 \cdot I_c} \right)$$

za plitke trase kablova ($\cos\alpha \approx 1$): $N_p^0 = P^0 \cdot \cos\alpha \approx P^0$

Gubitak od uvlačenja klina:

važi za plitku paraboličnu trasu, pod uslovom da je $s_{sl} \leq s_{nepokretne\ tačke}$

$$s_{sl} = \sqrt{\frac{E_p \cdot A_p \cdot \delta_{sl}}{P^0 \cdot \left(\frac{\mu + \mu_s}{2} \cdot \bar{\alpha} + k \right)}}$$

$$\Delta_{sl} = \begin{cases} 1 - 2 \cdot \left(\frac{\mu + \mu_s}{2} \cdot \bar{\alpha} + k \right) \cdot (s_{sl} - s) & , \quad s \leq s_{sl} \\ 1 & , \quad s \geq s_{sl} \end{cases}$$

gde je

 s_{sl} dužina do koje se prostire gubitak od uklinjavanja δ_{sl} uvlačenje klina (prema katalogu sistema PN, uneto u jedinicama dužine koje odgovaraju jedinicama ostalih veličina u obrascu), μ_s (1/rad) koeficijent povratnog trenja, $\mu_s = (1 \div 1,5) \times \mu$, i $\bar{\alpha}$ (rad/m) je skretni ugao parabole po jedinici dužine (dobija se kada se ukupni skretni ugao podeli dužinom parabole).**Gubici u vremenu** (dati kao **gubici napona** u kablovima, prema EN 1992-1-1:2004)Gubitak napona u kablovima $\Delta\sigma_{pr}$ od čiste relaksacije: postupak iz člana 3.3.2 EN 1992-1-1.Skupni **gubitak napona** u kablovima $\Delta\sigma_p$ od relaksacije kablova i tečenja i skupljanja betona (obrazac 5.46 EN 1992-1-1):

$$\Delta\sigma_p = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_c} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,p}}{1 + \frac{E_p}{E_c} \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0))}$$

gde je

 $\sigma_{c,p}$ napon u betonu na mestu težišta kablova od uticaja prethodnog naprezanja (uzetog sa početnom silom P_0) i dugotrajnih dejstava ($g, \Delta g$), $\varphi(t, t_0)$ koeficijent tečenja koji odgovara dugotrajnim opterećenjima koja deluju počev od t_0 , ε_{cs} je dilatacija skupljanja betona.**Gubitak sile** PN u vremenu dobija se množenjem površine kablova A_p gubitkom napona $\Delta\sigma_p$. **Preostala (trajna) sila** PN iznosi

$$P_t = P_0 - A_p \times \Delta\sigma_p$$

(ili: $P_t = A_p \times (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_p)$, gde je $\sigma_{pi} = P_0/A_p$ početni napon u kablovima).

EN 1992-1-1:2004

3.3.2 SVOJSTVA

(1) P Svojstva čelika za prethodno naprezanje data su u EN 10138, delovi 2 do 4, ili u odgovarajućem Evropskom tehničkom odobrenju - ETA.

(2) P Kablovi za prethodno naprezanje (žice, užad i šipke) moraju da se klasifikuju prema sledećim karakteristikama:

(i) Čvrstoći, koja označava karakterističnu vrednost konvencionalne granice razvlačenja (napon pri kojem je nepovratna dilatacija 0,1%) (*0,1% proof stress*) ($f_{p0,1k}$), vrednost odnosa čvrstoće pri zatezanju i konvencionalne granice razvlačenja ($f_{pk}/f_{p0,1k}$) i dilataciji pri maksimalnom opterećenju (*elongation at maximum load*) (e_{uk})

(ii) Klasi, koja definiše ponašanje pri relaksaciji (*relaxation behaviour*)

(iii) Dimenzijama preseka (*size*)

(iv) Karakteristikama površine.

(3) P Stvarna masa kablova za prethodno naprezanje ne sme da se razlikuje od nominalne mase više od granica koje su propisane u EN 10138 ili date u odgovarajućem ETA.

(4) P U ovom Evrokodu definisane su tri klase relaksacije:

– klasa 1: Žice ili užad – kablovi sa običnom relaksacijom (*ordinary relaxation*)

– klasa 2: Žice ili užad – kablovi sa niskom relaksacijom (*low relaxation*)

– klasa 3: vruće valjane i naknadno obrađene šipke.

Napomena: Klasa 1 nije obuhvaćena u EN 10138.

(5) U proračunu gubitaka sile usled relaksacije čelika za prethodno naprezanje treba da se koristi veličina ρ_{1000} , kojom se označava gubitak usled relaksacije (u %) 1000 časova posle zatezanja, na srednjoj temperaturi od 20°C (videti EN 10138 za definiciju izotermičkog testa relaksacije).

Napomena: Vrednost ρ_{1000} izražena je u procentima u odnosu na početni napon i određuje se za početni napon koji je jednak $0,7 f_p$, gde je f_p stvarna čvrstoća pri zatezanju uzoraka čelika za prethodno naprezanje koji se ispituju. Za potrebe proračuna koristi se karakteristična vrednost čvrstoće pri zatezanju (f_{pk}), o čemu je u sledećim izrazima vođeno računa.

(6) Vrednosti ρ_{1000} mogu se pretpostaviti da iznose 8% za klasu 1, 2,5% za klasu 2 i 4% za klasu 3, ili se koriste vrednosti iz sertifikata.

(7) Gubitak usled relaksacije može se dobiti iz sertifikata o atestima proizvođača ili se može odrediti kao procentualni pad napona prethodnog zatezanja u odnosu na početni napon prethodnog zatezanja. Gubici treba da se odrede primenom jednog od izraza u daljem tekstu. Izraz (3.28) važi za žice i užad od običnog čelika za prethodno naprezanje, (3.29) za užad od niskorelaksacionog čelika za prethodno naprezanje, a izraz (3.30) za vruće valjane i naknadno obrađene šipke (*hot rolled and processed bars*).

$$\text{klasa 1} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 \rho_{1000} e^{6,7\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (3.28)$$

$$\text{klasa 2} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \rho_{1000} e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (3.29)$$

$$\text{klasa 3} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \rho_{1000} e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (3.30)$$

gde je:

$\Delta\sigma_{pr}$ apsolutna vrednost gubitaka prethodnog naprezanja usled relaksacije
 σ_{pi} pri naknadnom zatezanju (*post-tensioning*) σ_{pi} je apsolutna vrednost početnog napona prethodnog naprezanja $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$;

pri prethodnom zatezanju (*pre-tensioning*) σ_{pi} je maksimalni napon pri zatezanju kabla, umanjen za trenutne gubitke koji nastaju u toku zatezanja,
 t vreme posle zatezanja (u časovima)

$\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$, gde je f_{pk} karakteristična vrednost čvrstoće pri zatezanju čelika za prethodno naprezanje
 ρ_{1000} vrednost gubitka usled relaksacije (u %), 1000 časova posle zatezanja, na srednjoj temperaturi od 20°C.

(8) Može se proceniti da dugotrajne (konačne) vrednosti gubitaka usled relaksacije nastaju posle vremena $t = 500000$ časova (odnosno, oko 57 godina).

(9) Gubici usled relaksacije veoma zavise od temperature čelika. Kada se primenjuje termička nega betona (na primer, zaparivanjem), važi 10.3.2.2. U drugim slučajevima, kada je temperatura čelika viša od 50°C, gubitke usled relaksacije treba proveriti. (Napomena: povećava se brzina, ne i konačna mera relaksacije!)