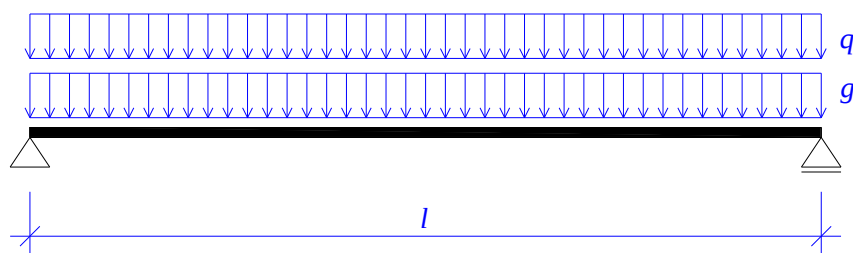


9. vaja: Dimenzioniranje prednapetega nosilca

1.1 Zasnova

Prednapeti betonski nosilec pravokotnega prečnega prereza, ki se po vzdolžni osi ne spreminja, premošča razpetino 16 m. Preko nosilca so položene votle prednapete betonske plošče, debeline 16 cm. Medsebojni osni razmak nosilcev je 5 m. Nosilci so obteženi z lastno težo, težo stropne konstrukcije in koristno obtežbo prostorov nad njimi.

1.1.1 Statični sistem



Slika 1 *Statični sistem prednapetega betonskega nosilca.*

1.1.2 Obtežba

Stalna obtežba

g_1 ... lastna teža

g_2 ... teža stropne konstrukcije

$$g_2 = 17,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Spremenljiva obtežba

q ... koristna obtežba v stavbah – kategorija B – pisarne

$$q = 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

kombinacijski faktorji:

$$\psi_0 = 0,7$$

$$\psi_1 = 0,5$$

$$\psi_2 = 0,3$$

1.1.3 Mehanske lastnosti materialov

Beton

C40/50 ... trdnostni razred betona

Preglednica 3.1: Trdnostne in deformacijske lastnosti betona

Trdnostni razredi betona														
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{ck} (MPa)														
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{cm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} (‰)	3,5													
ε_{c2} (‰)	2,0													
ε_{cu2} (‰)	3,5													
n	2,0													
ε_{c3} (‰)	1,75													
ε_{cu3} (‰)	3,5													

$$E_{cm} = 3500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{srednji modul elastičnosti betona}$$

$$f_{ck} = 4,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{karakteristična tlačna trdnost betona}$$

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5 \dots \text{materialni faktor varnosti za beton}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{4,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,5} = 2,67 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{računska tlačna trdnost betona}$$

$$f_{ctm} = 0,35 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{natezna trdnost betona}$$

okolje: zmerno vlažno okolje – $RH = 80\%$

Klasična armatura

S500 ... trdnostni razred armature

$$E_s = 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{modul elastičnosti armature}$$

$$f_{sy} = 50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{karakteristična trdnost armature pri deformaciji na meji elastičnosti}$$

$$\gamma_s = 1,15 \dots \text{materialni faktor varnosti za armaturo}$$

$$f_{sd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,15} = 43,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{računska trdnost armature pri deformaciji na meji elastičnosti}$$

Uporabimo armaturne palice $\phi 28 \text{ mm}$, $A_{s1} = 6,15 \text{ cm}^2$.

Jeklo za prednapenjanje

St 1570/1770, z nizko relaksacijo – razred 2 ... trdnostni razred armature

$$E_p = 19500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{modul elastičnosti armature, za vrvi}$$

$$f_{p0,1k} = 157 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{karakteristična trdnost armature pri deformaciji na meji elastičnosti}$$

$$f_{pk} = 177 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \dots \text{karakteristična trdnost armature pri porušni deformaciji}$$

$$\gamma_s = 1,15 \dots \text{materialni faktor varnosti za armaturo}$$

$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{157 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,15} = 136,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$... računska trdnost armature pri deformaciji na meji elastičnosti

Uporabimo vrvi 7 ϕ 5 mm, $A_{p1} = 1,4 \text{ cm}^2$.

Vrvi bomo združili v zaščitnih ceveh $\phi_n / \phi_z = 55 / 62 \text{ mm}$.

V eno cev lahko namestimo do 7 vrvi 7 ϕ 5 mm!

1.1.4 Krovni sloj betona

Okolje

Betonski element se nahaja v stavbi z zmerno vlažnostjo zraka $RH = 80\%$. Zaradi proizvodnega procesa v spodnjih prostorih je beton izpostavljen kloridom. Betonski element se nahaja v okolju razreda izpostavljenosti XD1 – betonske površine izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak.

Preglednica 4.1: Razredi izpostavljenosti glede na pogoje okolja v skladu z EN 206-1

Oznaka razreda	Opis okolja	Orientacijski primeri, kjer se lahko pojavi razred izpostavljenosti
1 Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja		
X0	Pri betonu brez armature ali vgrajenih kovinskih delov: vse vrste izpostavljenosti z izjemo zmrzovanja / tajanja, obrusa ali kemičnega delovanja Pri betonu z armaturo in vgrajenimi kovinskimi deli: zelo suho	Beton v stavbah z zelo nizko vlažnostjo zraka
2 Korozija zaradi karbonatizacije		
XC1	Suho ali trajno mokro	Beton v stavbah z nizko vlažnostjo zraka Beton, stalno potopljen v vodi
XC2	Mokro, le redko suho	Betonske površine v dolgotrajnem dotiku z vodo Številni temelji
XC3	Zmerno vlažno	Beton v stavbah z zmerno ali visoko vlažnostjo zraka Zunanji beton, zaščiten pred dežjem
XC4	Izmenično mokro in suho	Betonske površine v dotiku z vodo, ki ne sodijo v razred izpostavljenosti XC2
3 Korozija zaradi kloridov		
XD1	Zmerno vlažno	Betonske površine, izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak
XD2	Mokro, redko suho	Plavalni bazeni Betonski deli, izpostavljeni industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride
XD3	Izmenično mokro in suho	Deli mostov, izpostavljeni pršču, ki vsebuje kloride Tlaki Plošče parkirišč
4 Korozija zaradi kloridov iz morske vode		
XS1	Izpostavljeno soli, ki jo prenaša zrak, vendar ne v neposrednem dotiku z morsko vodo	Konstrukcije blizu obale ali ob njej
XS2	Trajno potopljeno	Deli morskih konstrukcij
XS3	Območja plimovanja, škropljenja in pršenja	Deli morskih konstrukcij
5 Zmrzovanje/tajanje		
XF1	Zmerna nasičenost z vodo, brez sredstva za tajanje	Navpične betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF2	Zmerna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje	Navpične betonske površine cestnih konstrukcij, izpostavljenih zmrzovanju in sredstvom za tajanje, ki se prenašajo po zraku
XF3	Velika nasičenost z vodo, ki ne vsebuje sredstev za tajanje	Vodoravne betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF4	Velika nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje, ali z morsko vodo	Vozišča cest in mostov, ki so izpostavljena sredstvom za tajanje Betonske površine, izpostavljene neposrednemu pršču, ki vsebuje sredstva za tajanje in zmrzovanje Območja škropljenja morskih konstrukcij, ki so izpostavljena zmrzovanju
6 Kemično delovanje		
XA1	Blago kemično agresivno okolje v skladu z EN 206-1, preglednica 2	Naravne zemljine in talna voda
XA2	Zmerno kemično agresivno okolje v skladu z EN 206-1, preglednica 2	Naravne zemljine in talna voda
XA3	Močno kemično agresivno okolje v skladu z EN 206-1, preglednica 2	Naravne zemljine in talna voda

OPOMBA: Sestava betona vpliva tako na zaščito armature kakor tudi na odpornost betona na delovanje agresivnih vplivov. Dodatek E podaja orientacijske trdnostne razrede betona za posamezne razrede izpostavljenosti. To lahko vodi do izbire trdnostnega razreda betona, ki je višji od trdnostnega razreda, potrebnega pri dimenzioniranju. V teh primerih je treba v računu najmanjše armature in širine razpok (glej 7.3.2-7.3.4) upoštevati vrednost f_{ctm} , ki pripada višjemu trdnostnemu razredu betona.

V razredu izpostavljenosti konstrukcije XD1 je orientacijski trdnostni razred betona za zagotavljanje trajnosti C30/37. Izbrani trdnostni razred betona C40/50 ustreza kriteriju, saj je višji od orientacijskega.

Preglednica E.1N: Orientacijski trdnostni razredi

Razredi izpostavljenosti v skladu s preglednico 4.1										
Korozija										
	Korozija zaradi karbonacije				Korozija zaradi kloridov			Korozija zaradi kloridov iz morske vode		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Orientacijski trdnostni razred	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Poškodbe betona										
	Ni nevarnostii		Zmrzovanje/tajanje				Kemično delovanje			
	X0		XF1	XF2	XF3		XA1	XA2	XA3	
Orientacijski trdnostni razred	C12/15		C30/37	C25/30	C30/37		C30/37			C35/45

Nazivni krovni sloj betona je določen kot vsota najmanjšega krovnega sloja in dovoljenega odstopanja

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev},$$

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10),$$

pri čemer so

$c_{min,b}$... najmanjša debelina krovnega sloja glede na zahteve sprijemnosti,

$c_{min,dur}$... najmanjša debelina krovnega sloja glede na pogoje okolja,

$\Delta c_{dur,\gamma}$... dodatni varnostni sloj, priporočena vrednost $\Delta c_{dur,\gamma} = 0$,

$\Delta c_{dur,st}$... zmanjšanje pri uporabi nerjavnega jekla, ker nimamo nerjavnega jekla $\Delta c_{dur,st} = 0$,

$\Delta c_{dur,add}$... zmanjšanje pri uporabi dodatne zaščite, ker nimamo posebne zaščite $\Delta c_{dur,add} = 0$.

Najmanjša debelina $c_{min,b}$ je določena

- pri klasični armaturi

$$c_{min,b} = \phi,$$

- pri prednapeti armaturi

$$c_{min,b} = \min(\phi_z, 80\text{mm}),$$

pri čemer je

ϕ_z ... premer zaščitne cevi.

V obravnavanem primeru je

- pri klasični armaturi

$$c_{min,b} = 28\text{mm},$$

- pri prednapeti

$$c_{min,b} = 62\text{mm}.$$

Najmanjšo debelino krovnega sloja glede na pogoje okolja $c_{min,dur}$ določimo v odvisnosti od razreda konstrukcije. Izberem priporočeno vrednost razreda konstrukcije S4, ki ima povratno življensko dobo 50 let. Vrednost je priporočena v Evrokodu. Po preglednici 4.3N v Evrokodu 2, pri razredu izpostavljenosti konstrukcije XD1, zaradi uporabe betona vsaj C40/50, ki je v našem primeru ravno enak C40/50, znižamo razred konstrukcije za 1. Tako upoštevamo razred konstrukcije S3.

Preglednica 2.1: Priporočene projektne življenjske dobe

Kategorija priporočene projektne življenjske dobe	Priporočena projektna življenjska doba v letih	Primeri
1	10	Začasne konstrukcije ⁽¹⁾
2	10 do 25	Zamenljivi konstrukcijski deli, npr. žerjavni nosilci, ležišča
3	15 do 30	Kmetijske in podobne konstrukcije
4	50	Stavbe in druge običajne konstrukcije
5	100	Monumentalne stavbe, mostovi in druge gradbene inženirske konstrukcije

(1) Konstrukcije ali konstrukcijski deli, ki se lahko razstavijo in ponovno uporabijo, se ne štejejo za začasne.

Preglednica 4.3N: Priporočene prilagoditve razreda konstrukcije

Kriterij	Razred konstrukcije						
	Razred izpostavljenosti po preglednici 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Projektna življenjska doba 100 let	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2	Razred zvišati za 2
Trdnostni razred ¹⁾²⁾	≥ C30/37 Razred znižati za 1	≥ C30/37 Razred znižati za 1	≥ C35/45 Razred znižati za 1	≥ C40/50 Razred znižati za 1	≥ C40/50 Razred znižati za 1	≥ C40/50 Razred znižati za 1	≥ C45/55 Razred znižati za 1
Elementi z geometrijo plošč (postopek graditve ne vpliva na lego armature)	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1
Zagotovljena posebna kontrola kakovosti proizvodnje betona	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1	Razred znižati za 1

OPOMBE K PREGLEDNICI 4.3N:

- Upošteva se, da sta trdnostni razred in vodo-cementno razmerje povezani količini. Za zagotovitev majhne prepustnosti se lahko upošteva posebna sestava betona (vrsta cementa, vrednost vodo-vezivnega razmerja, fina polnila).
- Če je vsebnost zraka večja od 4 %, se meja lahko zniža za en trdnostni razred.

V preglednici 4.4N je za klasično armaturo, pri kombinaciji razreda konstrukcije S3 in razreda izpostavljenosti konstrukcije XD1

$$c_{min,dur} = 30\text{mm}$$

Preglednica 4.4N: Zahtevane najmanjše debeline krovne sloja betona $c_{min,dur}$ glede na trajnost pri jeklih za armiranje v skladu z EN 10080

Razred konstrukcije	Zahteve za $c_{min,dur}$ (mm) glede na okolje						
	Razred izpostavljenosti po preglednici 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

V preglednici 4.5N je za prednapeto armaturo, pri kombinaciji razreda konstrukcije S3 in razreda izpostavljenosti konstrukcije XD1

$$c_{min,dur} = 40\text{mm}$$

Preglednica 4.5N: Zahtevane najmanjše debeline krovne sloja betona $c_{min,dur}$ glede na trajnost pri jeklih za prednapenjanje

Razred konstrukcije	Zahteve za $c_{min,dur}$ (mm) glede na okolje						
	Razred izpostavljenosti po preglednici 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

Najmanjša debelina krovne sloja c_{min} je za

- klasično armaturo

$$c_{min} =$$

- prednapeto armaturo

$$c_{min} =$$

Z upoštevanjem dovoljenega odstopanja $\Delta c_{dev} = 10\text{mm}$ je, po priporočilu Evrokoda 2, v poglavju 4.4.1.3, nazivni krovni sloj betona za

- klasično armaturo

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} =$$

- prednapeto armaturo

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} =$$

1.2 Določitev dimenzij betonskega prereza

1.2.1 Upogib – mejno stanje nosilnosti

Dimenzije prečnega prereza niso določene. Ocenimo, da sta širina in višina prečnega prereza $b/h = 0,35/1,15$ m.

Stalna teža je

$$g = g_1 + g_2 =$$

Projektna obtežba je

$$g_{Ed} + q_{Ed} = \gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot q =$$

Projektna obremenitev – projektni upogibni moment je

$$M_{Ed} = \frac{(g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l^2}{8} =$$

Izberem deformacije $\varepsilon_s / -\varepsilon_1 =$ / ‰, pri katerih je $k_d =$

Potrebna statična višina od kablov do zgornjega roba prečnega prereza je

$$d = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{b \cdot f_{cd} \cdot k_d}} =$$

Oddaljenost težišča kablov od spodnjega in stranskih robov betonskega prečnega prereza je

$$a_p \geq \frac{\phi_z}{2} + c_{nom} =$$

Spodaj izberemo $a_p = 15$ cm. Večji prerez betona izberemo, da bo možno spodaj vgraditi tudi klasično armaturo, če bo potrebno.

Potrebna višina prereza je

$$h \geq d + a_p =$$

Izberemo $b/h/a_p = 35/110/15$ cm.

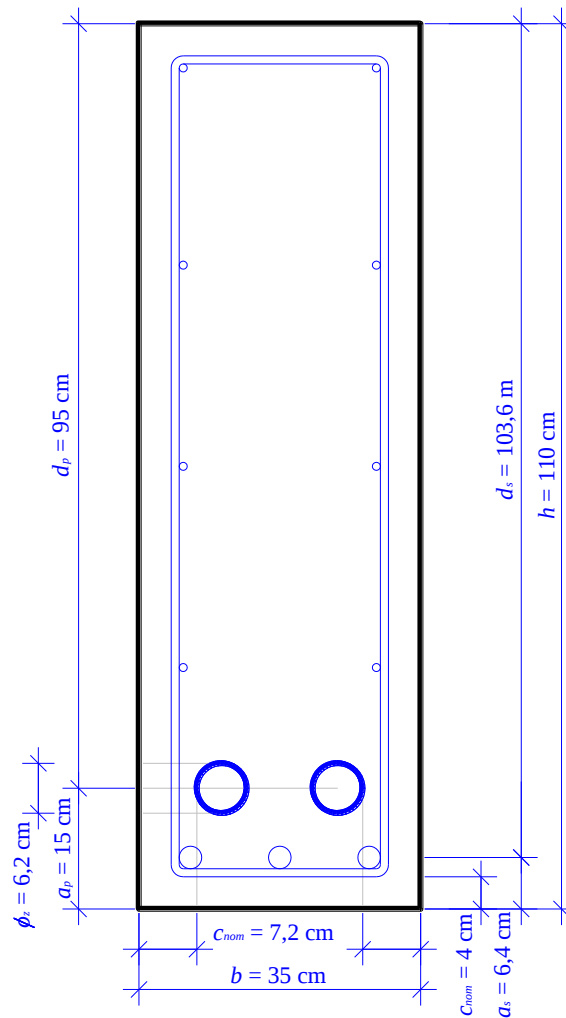
Lastna teža nosilca je

$$g_1 =$$

Zaščitna plast klasične armature je razdalja od roba prereza do prve armaturne palice, to je streme.

Oddaljenost težišča klasične armature od spodnjega robu betona je

$$a_s \geq \frac{\phi}{2} + \phi_s + c_{nom} =$$



Slika 2 Prečni prerez prednapetega betonskega nosilca.

Kontrolne točke za račun napetosti so:

- ① - na spodnjem robu betonskega prereza,
- ② - na zgornjem robu betonskega prereza,
- ③ - v težišču vzdolžne natezne klasične armature,
- ④ - v težišču prednapete armature.

1.3 Obremenitev prereza v sredini nosilca

Upogibni moment zaradi lastne teže nosilca je

$$M_{g1} = \frac{g_1 \cdot l^2}{8} =$$

Upogibni moment zaradi teže stropne konstrukcije je

$$M_{g2} = \frac{g_2 \cdot l^2}{8} =$$

Upogibni moment zaradi koristne obtežbe je

$$M_q = \frac{q \cdot l^2}{8} =$$

1.3.1 Kombinacije vplivov v mejnih stanjih uporabnosti

Kombinacije vplivov na obravnavani prednapeti nosilec v mejnih stanjih uporabnosti so

- karakteristična $\sum_j G_{k,j} + (P) + Q_{k1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{ki}$ (EN 1990 – 6.14b),
- pogosta $\sum_j G_{k,j} + (P) + \psi_{1,1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{ki}$ (EN 1990 – 6.15b),
- navidezno stalna $\sum_j G_{k,j} + (P) + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{ki}$ (EN 1990 – 6.16b).

Ker je v našem primeru koristna obtežba q edina spremenljiva obtežba, se izrazi poenostavijo

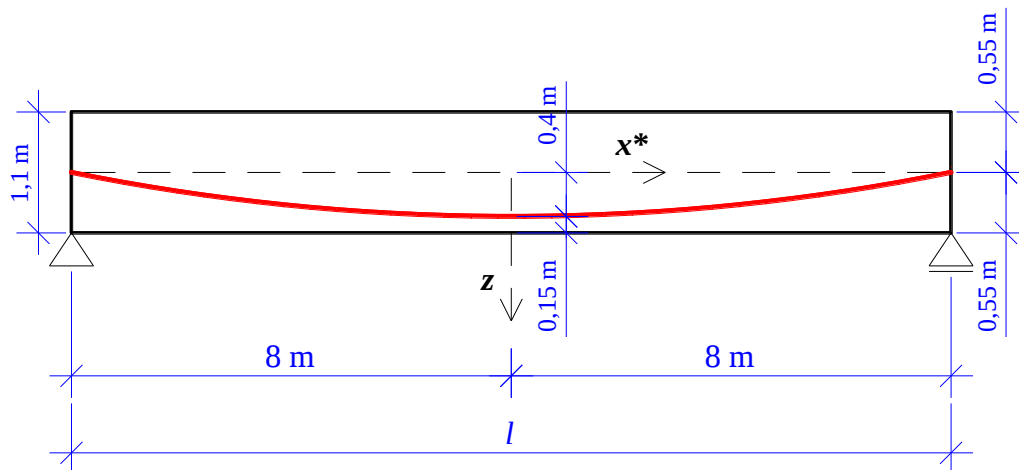
- karakteristična $\sum_j G_{k,j} + (P) + Q_k$,
- pogosta $\sum_j G_{k,j} + (P) + \psi_1 \cdot Q_k$,
- navidezno stalna $\sum_j G_{k,j} + (P) + \psi_2 \cdot Q_k$.

Preglednica A1.1: Priporočene vrednosti faktorjev ψ za stavbe

Vpliv	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Koristna obtežba v stavbah (glej EN 1991-1-1)			
Kategorija A: stanovanja	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: pisarne	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: stavbe, kjer se zbirajo ljudje	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišča	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometne površine vozilo teže ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometne površine 30 kN < teža vozila ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: strehe	0	0	0
Obtežba snega na stavbah (glej EN 1991-1-3)*			
Finska, Islandija, Norveška, Švedska	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino nad 1000 m	0,7	0,5	0,2
Druge članice CEN, za kraje z nadmorsko višino pod 1000 m	0,5	0,2	0
Obtežba vetra na stavbah (glej EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Spremembe temperature (ne pri požaru) v stavbah (glej EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
OPOMBA: Vrednosti ψ faktorjev so lahko določene v nacionalnem dodatku.			
*) Za države, ki niso omenjene v nadaljevanju, glej ustrezne krajevne pogoje.			

1.4 Potek kableske linije

Lega kablov je določena v srednjem prerezu nosilca. Težišče prereza kablov je od spodnjega robu betonskega prereza oddaljeno $a_p = 15$ cm. Kableska linija je kvadratna parabola in sledi poteku upogibnih momentov zaradi zunanje obtežbe. Ob podporah ni ekscentričnosti – težišče kablov sovpada s težiščem betonskega prereza.



Slika 3 Potek kableske linije v prednapetem betonskem nosilcu.

Enačba kableske linije je

$$z = a + b \cdot x^* + c \cdot x^{*2},$$

odvod enačbe po x je

$$z' = b + 2 \cdot c \cdot x^*.$$

Robni pogoji so

$$x^* = 0$$

$$z = f =$$

$$a =$$

$$x^* = 0$$

$$z' = 0$$

$$b =$$

$$x^* = \frac{l}{2} =$$

$$z =$$

$$c =$$

Enačba izbrane kableske linije je

$$z =$$

in odvod

$$z' =$$

1.5 Določitev potrebne kabelske sile

Ker ni drugih posebnih zahtev, kot je na primer nepropustnost za vodo, omejimo računsko širino razpok pri navidezno stalni kombinaciji obtežbe na vrednost $w_{\max}$, ki je navedena v preglednici 7.1N in glede videza in trajnosti pri armiranobetonskih elementih in konstrukcijah v splošnem zadošča.

Za prednapete betonske elemente s povezanimi kabli, v razredu izpostavljenosti XD1 je zahtevan pogoj dekompresije pri pogosti kombinaciji obtežbe. Omejitev dekompresije zahteva, da vsi deli povezanih kablov ali zaščitnih cevi ležijo najmanj 25 mm znotraj tlačnega betona.

Preglednica 7.1N: Priporočene vrednosti za $w_{\max}$ (mm)

Razred izpostavljenosti	Armiranobetonski elementi in prednapeti betonski elementi z nepovezanimi kabli	Prednapeti betonski elementi s povezanimi kabli
	Navidezno stalna kombinacija obtežbe	Pogosta kombinacija obtežbe
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekompresija
OPOMBA 1: Za razreda izpostavljenosti X0, XC1 širina razpok ne vpliva na trajnost, navedena omejitev širine razpok je določena za zagotavljanje sprejemljivega videza. Če glede videza ni nobenih zahtev, se lahko ta omejitev ublaži.		
OPOMBA 2: Za te razrede izpostavljenosti je treba pri navidezno stalni kombinaciji obtežbe dodatno zagotoviti stanje dekompresije.		

Kontrolna točka za račun napetosti je:

⑤ - 2,5 cm pod spodnjim robom cevi za prednapenjanje.

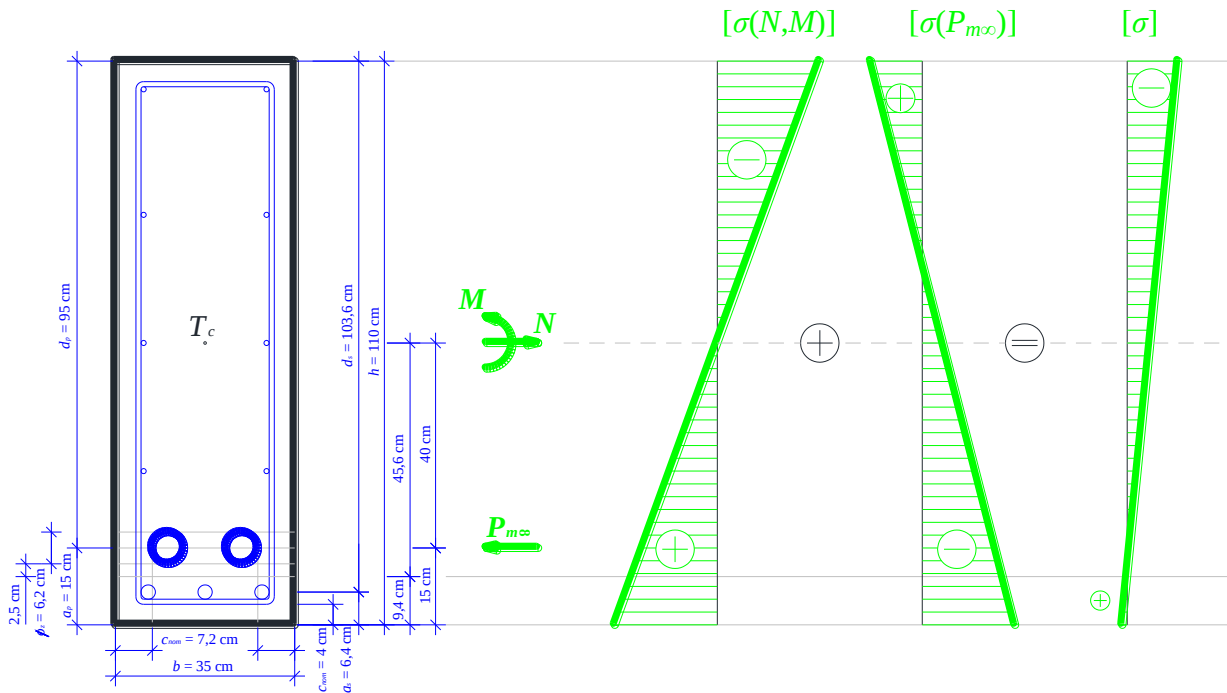
Da bo izpolnjen pogoj dekompresije, opravimo kontrolo napetosti na oddaljenosti

$$\bar{z}_5 = 15\text{cm} - \frac{6,2\text{cm}}{2} - 2,5\text{cm} = 9,4\text{cm}$$

od spodnjega roba betonskega prereza.

Ker še ne poznamo prereza kablov in klasične armature, uporabimo za račun napetosti karakteristike homogenega prečnega prereza

$$\sigma_{c,5} = \frac{N}{A_{xb}} + \frac{M}{W_{y5b}} - \frac{P_{m\infty}}{A_{xb}} - \frac{P_{m\infty} \cdot z_{cp}}{W_{y5b}} = \frac{N}{A_{xb}} + \frac{M}{W_{y5b}} - P_{m\infty} \left(\frac{1}{A_{xb}} + \frac{z_{cp}}{W_{y5b}} \right) = 0.$$



Slika 4 Napetosti v prečnem prerezu prednapetega betonskega nosilca.

V našem primeru je $N = 0$ in

$$\sigma_{c5} = \frac{M}{W_{y5b}} - P_{m\infty} \left(\frac{1}{A_{xb}} - \frac{z_{cp}}{W_{y5b}} \right) = 0.$$

Potrebna kabelska sila je

$$P_{m\infty} = \frac{M}{W_{y5b} \cdot \left(\frac{1}{A_{xb}} + \frac{z_{cp}}{W_{y5b}} \right)} = \frac{M_{g+\psi 1q}}{\frac{W_{y5b}}{A_{xb}} + z_{cp}}.$$

Projektni upogibni moment pri pogosti kombinaciji obtežbe je

$$M_{Ed} = M_{Ed,g} + M_{Ed,\psi 1q} = M_{g+\psi 1q} = \frac{(g_1 + g_2) \cdot l^2}{8} + \psi_1 \cdot \frac{q \cdot l^2}{8},$$

$$M_{Ed} =$$

Karakteristike homogenega prečnega prereza so

- površina

$$A_{xb} = b \cdot h =$$

- vztrajnostni moment

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

- oddaljenost težišča prednapete armature od težišča

$$z_{cp} = \frac{h}{2} - a_p =$$

- oddaljenost točke ⑤ od težišča

$$z_5 = \frac{h}{2} - \left(a_p - \frac{\phi_z}{2} - 2,5\text{cm} \right) =$$

- odpornostni moment na točko ⑤

$$W_{y5b} = \frac{I_{yb}}{z_5} =$$

Potrebna kabelska sila je

$$P_{m\infty} =$$

Ocenimo, da so izgube zaradi reologije 15%

$$P_{m0} \cdot (1 - 0,15) = P_{m\infty}$$

Začetna sila prednapetja je

$$P_{m0} = \frac{P_{m\infty}}{1 - 0,15} =$$

5.10.3 Sila prednapetja

- (1)P Srednja vrednost sile prednapetja $P_{m,t}(x)$ na oddaljenosti x (ali dolžini loka) od poteznega konca kabla je enaka največji sili prednapetja P_{max} , ki se vnese na poteznem koncu kabla, zmanjšani za trenutne izgube in časovno odvisne izgube (glej spodaj). Vse izgube se upoštevajo z njihovimi absolutnimi vrednostmi.

- (2) Vrednost začetne sile prednapetja $P_{m0}(x)$ (v času $t = t_0$), ki deluje na beton takoj po napenjanju in sidranju (naknadno napenjanje) ali po prenosu prednapetja na beton (predhodno napenjanje) in je dobljena tako, da se od napenjalne sile P_{max} odštejejo trenutne izgube $\Delta P_t(x)$, ne sme preseči naslednje vrednosti:

$$P_{m0}(x) = A_p \cdot \sigma_{pm0}(x) \quad (5.43)$$

kjer je:

$\sigma_{pm0}(x)$ napetost kabla neposredno po napenjanju ali vnosu sile prednapetja

$$\sigma_{pm0}(x) = \min \{ k_7 \cdot f_{pk}, k_8 \cdot f_{p0,1k} \}$$

OPOMBA: Vrednosti k_7 in k_8 , ki se uporabljata v določeni državi, se lahko najdeti v njenem nacionalnem dodatku.

Priporočeni vrednosti sta: k_7 je 0,75 in k_8 je 0,85.

- (3) Pri določanju trenutnih izgub je treba pri predhodnem in naknadnem napenjanju upoštevati naslednje trenutne vplive (glej 5.10.4 in 5.10.5):

- izgube zaradi elastične deformacije betona ΔP_{el} ,
- izgube zaradi kratkotrajne relaksacije ΔP_r ,
- izgube zaradi trenja $\Delta P_{\mu}(x)$,
- izgube zaradi zdrsa v sidrni glavi ΔP_{sl} .

- (4) Srednjo vrednost sile prednapetja $P_{m,t}(x)$ v času $t > t_0$ je treba določiti glede na način prednapenjanja. Poleg trenutnih izgub, ki so navedene v (3), je treba upoštevati še časovno odvisne izgube prednapetja $\Delta P_{c+s+r}(x)$ (glej 5.10.6), ki so posledica lezenja in krčenja betona ter dolgotrajne relaksacije prednapetega jekla $P_{m,t}(x) = P_{m0}(x) - \Delta P_{c+s+r}(x)$.

Dovoljene začetne napetosti v kablilih so manjše ali enake manjši izmed vrednosti

$$\sigma_{pm0} \leq \min \begin{cases} 0,75 \cdot f_{pk} = \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} = \end{cases}$$

Potrebni prerez kablov je

$$A_{xp} = \frac{P_{m0}}{\sigma_{pm0}} =$$

Vrv 7 ϕ 5 mm ima prečni prerez $A_{xp1} = 1,374 \text{ cm}^2$. Potrebujemo

$$n = \frac{A_{xp}}{A_{xp1}} =$$

Izberemo $n =$, pri čemer je dejanski prečni prerez kablov $A_{p,dej} =$ cm^2 in začetna napetost

$$\sigma_{pm0} = \frac{P_{m0}}{A_{xp,dej}} =$$

Na podlagi prečnega prereza brez klasične armature in ocenjenih izgub sile prednapetja 15% izberemo

2×6 vrvi $7\phi 5 \text{ mm}$ v dveh ceveh $\phi_n / \phi_z = 55 / 62 \text{ mm}$.

Sila P_{m0} je sila v kablju v merodajnem prerezu takoj po napenjanju. Sila $P_{m\infty}$ je sila v kablju v merodajnem prerezu, ko se izvršijo vse reološke izgube. Sila P_{m0} oziroma sila $P_{m\infty}$ je dosežena takrat, ko je konstrukcija obtežena z lastno težo g_1 in se aktivira ob napenjanju kablov.

Razen izgub zaradi reologije moramo pri naknadnem napenjanju upoštevati še izgube

- izgube zaradi elastične deformacije betona ΔP_{el} ,
- izgube zaradi kratkotrajne relaksacije ΔP_r ,
- izgube zaradi trenja $\Delta P_{\mu}(x)$,
- izgube zaradi zdrsa v sidrni glavi ΔP_{sl}

in začetna sila prednapetja je

$$P_{m0} = P_0 - \Delta P_{sl} - \Delta P_{el} - \Delta P_r - \Delta P_{\mu}(x),$$

pri čemer so

P_0 ... začetna sila na mestu napenjanja,

ΔP_{sl} ... izguba sile prednapetja zaradi zdrsa v napenjalni glavi,

ΔP_{el} ... izguba sile prednapetja zaradi skrčka betona med napenjanjem,

ΔP_r ... izguba sile prednapetja zaradi kratkotrajne relaksacije jekla,

$\Delta P_{\mu}(x)$... izguba sile prednapetja zaradi trenja.

Izguba sile prednapetja zaradi zdrsa v napenjalni glavi je odvisna od sistema napenjanja. Zdrs v napenjalni glavi Δl_{sl} je podatek proizvajalca opreme za napenjanje glave. Deformacija je

$$\Delta \varepsilon_{sl} = \frac{\Delta l_{sl}}{l},$$

padec napetosti

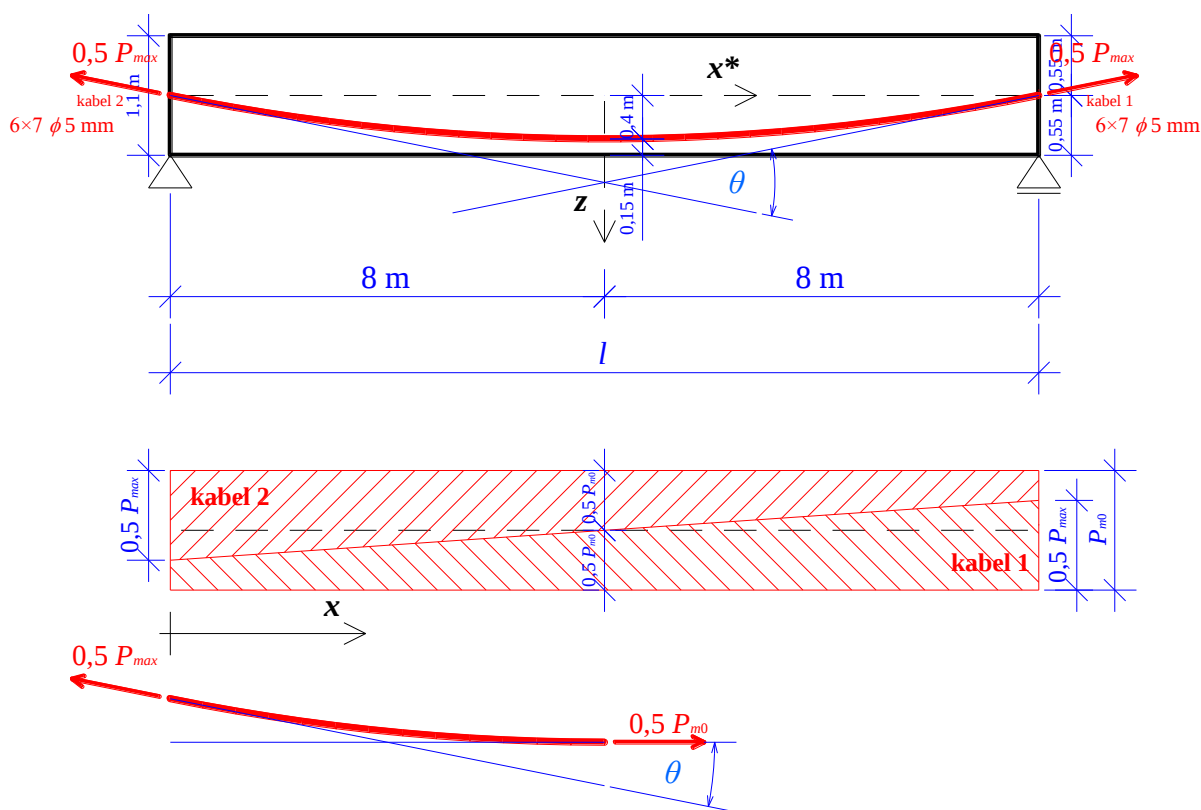
$$\Delta\sigma_{sl} = \Delta\varepsilon_{sl} \cdot E_p \text{ in sila}$$

$$\Delta P_{sl} = \Delta\sigma_{sl} \cdot A_p.$$

Izguba sile prednapetja se izvede tudi zaradi skrčka betona med napenjanjem. Pri naknadnem napenjanju je pomembno, kako napenjamo kable.

Upoštevanje izgube sile prednapetja zaradi kratkotrajne relaksacije jekla je pomembno pri naknadnem prednapenjanju.

V našem primeru privzamemo napenjanje z dveh strani hkrati. Vrvi v eni cevi napenjamo z ene strani, vrvi v drugi cevi pa hkrati z druge. S tem se izognemo izgubam zaradi skrčka betona, $\Delta P_{el}=0$, in dosežemo po vsej dolžini približno konstantno silo prednapetja. Izguba sile prednapetja zaradi zdrsa v napenjalni glavi je enaka nič.



Slika 5 Potek kableske linije v prednapetem betonskem nosilcu in sila prednapetja.

Izgube sile prednapetja zaradi trenja so

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot (\theta + k \cdot x)}),$$

pri čemer so

P_{max} ... začetna sila na mestu napenjanja,

θ ... vsota kotov med dvema točkama, med katerima računamo padec sile zaradi trenja,

μ ... koeficient trenja,

k ... nenamerna neravnost kablov.

5.10.5 Izgube zaradi trenja

- (1) Izgube zaradi trenja $\Delta P_{\mu}(x)$ v naknadno napetih kablilih se lahko ocenijo z izrazom (5.45):

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max} \left(1 - e^{-\mu(\theta + kx)} \right) \quad (5.45)$$

kjer so:

- θ vsota kotnih premikov na razdalji x (ne glede na smer in predznak)
- μ koeficient trenja med kablom in cevjo
- k nenameren kotni premik notranjih kablov (na enoto dolžine)
- x oddaljenost vzdolž kabla od mesta, na katerem je sila prednapetja enaka $P_{\max}$ (sila na poteznem koncu kabla med napenjanjem)

Vrednosti μ in k sta navedeni v ustreznem evropskem tehničnem soglasju. Vrednost μ je odvisna od lastnosti površine kablov in cevi, prisotnosti rje, raztezka kabla in oblike kabla.

Vrednost koeficienta k , s katerim se upošteva nenameren kotni pomik, je odvisna od kakovosti opaža, medsebojne razdalje podpor kablov, vrste uporabljenih zaščitnih cevi ali kanalov in od stopnje vibriranja pri betoniranju.

- (2) Če v evropskem tehničnem soglasju za μ manjkajo ustrezni podatki, se lahko pri uporabi izraza (5.45) zanj privzamejo vrednosti, navedene v preglednici 5.1.
- (3) Če v evropskem tehničnem soglasju ni ustreznih podatkov za k , se predpostavi, da so vrednosti nenamernega kotnega premika notranjih kablov v splošnem v območju $0,005 < k < 0,01$ na meter.
- (4) Pri zunanjih kablilih se lahko izgube prednapetja zaradi nenamernih kotih premikov zanemarijo.

Preglednica 5. 1: Koeficienti trenja μ naknadno napetih notranjih kablov in nepovezanih zunanjih kablov

	Notranji kabli ¹⁾	Zunanji nepovezani kabli			
		Jeklene cevi/ nenamazane	HDPE cevi/ nenamazane	Jeklene cevi/ namazane	HDPE cevi/ namazane
Hladno vlečena žica	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Vrv	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Negladka (rebrasta) palica	0,65	-	-	-	-
Gladka okrogla palica	0,33	-	-	-	-

¹⁾ Za kable, ki zapolnijo približno polovico cevi.

OPOMBA: HDPE – polietilen z veliko gostoto

Preglednica 5.1: Koeficienti trenja μ naknadno napetih notranjih kablov in nepovezanih zunanjih kablov

	Notranji kabli ¹⁾	Zunanji nepovezani kabli			
		Jeklene cevi/ nenamazane	HDPE cevi/ nenamazane	Jeklene cevi/ namazane	HDPE cevi/ namazane
Hladno vlečena žica	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Vrv	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Negladka (rebrasta) palica	0,65	-	-	-	-
Gladka okrogla palica	0,33	-	-	-	-

¹⁾ Za kable, ki zapolnijo približno polovico cevi.

OPOMBA: HDPE – polietilen z veliko gostoto

S kolikšno silo moramo potegniti na mestu napenjanja en kabel, da bo v sredini nosilca v tem kablju sila zaradi prednapenjanja enaka $0,5 \cdot P_{m0}$?

$$\frac{P_{m0}}{2} = \frac{P_{\max}}{2} - \Delta P_{\mu}(x) = \frac{P_{\max}}{2} - \frac{P_{\max}}{2} \cdot (1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) = \frac{P_{\max}}{2} \cdot e^{-\mu(\theta + kx)},$$

$$P_{m0} = P_{\max} \cdot e^{-\mu(\theta + kx)},$$

$$x = 0 \quad \dots \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = z'(x^* = -8\text{m}) =$$

$$\alpha_1 =$$

$$x = \frac{l}{2} \quad \dots \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = z'(x^* = 0\text{m}) =$$

$$\alpha_2 =$$

$$\theta = \alpha_1 - \alpha_2 =$$

iz preglednice 5.1 odčitamo

$$\mu = 0,19,$$

$$k = 0,0075,$$

$$P_{\max} = P_{m0} \cdot e^{\mu \cdot (\theta + k \cdot x)} =$$

Ker so vrednosti ΔP_r , ΔP_{sl} in ΔP_{el} enake nič, je $P_{\max}$ dvakratna sila na mestu vpenjanja. Največja napetost v kablju na mestu vpenjanja je

$$\sigma_{p,\max} = \frac{\frac{P_{\max}}{2}}{\frac{A_{p,dej}}{2}} =$$

5.10.2.1 Največja sila prednapetja

(1)P Sila, ki deluje na kabl $P_{\max}$ (to je sila na poteznem koncu kabla med napenjanjem), ne sme prekoračiti naslednje vrednosti:

$$P_{\max} = A_p \cdot \sigma_{p,\max}$$

kjer sta:

A_p prerez kabla

$\sigma_{p,\max}$ največja upoštevana napetost kabla = $\min \{ k_1 \cdot f_{pk} ; k_2 \cdot f_{p0,1k} \}$

OPOMBA: Vrednosti k_1 in k_2 , ki se uporabljata v določeni državi, se lahko najdejo v njenem nacionalnem dodatku. Priporočeni vrednosti sta $k_1 = 0,8$ in $k_2 = 0,9$.

(2) Prekoračitev največje dovoljene napetosti v kablju je dovoljena, če napenjalka omogoča merjenje sile z natančnostjo $\pm 5 \%$ končne vrednosti sile prednapetja. V takih primerih se lahko največja sila prednapetja $P_{\max}$ poveča na $k_3 \cdot f_{p0,1k}$ (npr. zaradi pojava nepričakovano velikega trenja pri prednapenjanju dolgih elementov).

OPOMBA: Vrednost k_3 , ki se uporablja v določeni državi, se lahko najde v njenem nacionalnem dodatku. Priporočena vrednost je 0,95.

Največje napetosti v kablju na napenjalni glavi so omejene

$$\sigma_{p,\max} \leq \min \begin{cases} 0,80 \cdot f_{pk} = \\ 0,90 \cdot f_{p0,1k} = \end{cases}$$

Največja napetost v kablju na mestu vpenjanja je manjša od dovoljene

$$\sigma_{p,\max} =$$

1.6 Geometrijske karakteristike prečnega prereza

Geometrijske karakteristike računamo za

- bruto prečni prerez ali homogen prečni prerez, kar je precej grob približek,
- neto prečni prerez ali dejanski prečni prerez betona, kjer upoštevamo dejanski prečni prerez betona brez prečnega prereza kablov,
- idealni prečni prerez, kjer upoštevamo dejanski prečni prerez z različnimi togostnimi lastnostmi,
- neto prečni prerez betona s klasično mehko armaturo, kjer upoštevamo dejanski prečni prerez betona brez prečnega prereza armature,
- idealni prečni prerez s klasično mehko armaturo, kjer upoštevamo dejanski prečni prerez z različnimi togostnimi lastnostmi.

V obravnavanem primeru bomo uporabili karakteristike prečnega prereza, pri katerih bomo zanemarili vpliv klasične mehke armature.

Bruto prečni prerez

- površina

$$A_{xb} = b \cdot h =$$

- statični moment na zgornji rob prečnega prereza

$$S_{y2b} = A_{xb} \cdot \frac{h}{2} =$$

- vztrajnostni moment na zgornji rob prečnega prereza

$$I_{y2b} = \frac{b \cdot h^3}{12} + A_{xb} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 =$$

Del prečnega prereza – cevi kablov

- površina

$$A_{xd} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} =$$

- statični moment na zgornji rob prečnega prereza

$$S_{y2d} = A_{xd} \cdot d_p =$$

- vztrajnostni moment na zgornji rob prečnega prereza

$$I_{y2d} = S_{y2d} \cdot d_p =$$

Neto prečni prerez - beton

- površina

$$A_{xn} = A_{xb} - A_{xd} =$$

- statični moment na zgornji rob prečnega prereza

$$S_{y2n} = S_{y2b} - S_{y2d} =$$

- vztrajnostni moment na zgornji rob prečnega prereza

$$I_{y2n} = I_{y2b} - I_{y2d} =$$

- oddaljenost težišča od zgornjega roba prečnega prereza

$$c_n = \frac{S_{y2n}}{A_{xn}} =$$

- vztrajnostni moment na težišče prečnega prereza

$$I_n = I_{y2n} - A_{xn} \cdot c_n^2 =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ①

$$W_{y1n} = \frac{I_n}{h - c_n} =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ②

$$W_{y2n} = \frac{I_n}{c_n} =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ④

$$W_{y4n} = \frac{I_n}{d_p - c_n} =$$

Del prečnega prereza – kabli

- površina

$$A_{xp} =$$

- statični moment na zgornji rob prečnega prereza

$$S_{y2p} = A_{xp} \cdot d_p =$$

- vztrajnostni moment na zgornji rob prečnega prereza

$$I_{y2p} = S_{y2p} \cdot d_p =$$

Idealni prečni prerez – beton + kabli

Kabli so zainjecirani, zato izhajamo iz bruto prereza.

- površina

$$A_{xi} = A_{xb} + \left(\frac{E_p}{E_{cm}} - 1 \right) \cdot A_{xp} =$$

- statični moment na zgornji rob prečnega prereza

$$S_{y2i} = S_{y2b} + \left(\frac{E_p}{E_{cm}} - 1 \right) \cdot S_{y2p} =$$

- vztrajnostni moment na zgornji rob prečnega prereza

$$I_{y2i} = I_{y2b} + \left(\frac{E_p}{E_{cm}} - 1 \right) \cdot I_{y2p} =$$

- oddaljenost težišča od zgornjega robu prečnega prereza

$$c_i = \frac{S_{y2i}}{A_{xi}} =$$

- vztrajnostni moment na težišče prečnega prereza

$$I_i = I_{y2i} - A_{xi} \cdot c_i^2 =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ①

$$W_{y1i} = \frac{I_i}{h - c_i} =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ②

$$W_{y2i} = \frac{I_i}{c_i} =$$

- odpornostni moment prečnega prereza v točki ④

$$W_{y4i} = \frac{I_i}{d_p - c_i} =$$

$$\sigma_{c2,g1+p0} = -\frac{M_{g1} + M_{p0}}{W_{y2n}} + \frac{N_{g1} + N_{p0}}{A_{xn}},$$

$$\sigma_{c2,g1+p0} =$$

$$\sigma_{c4,g1+p0} = \frac{M_{g1} + M_{p0}}{W_{y4n}} + \frac{N_{g1} + N_{p0}}{A_{xn}},$$

$$\sigma_{c4,g1+p0} =$$

1.7.2 Preostala stalna obtežba

Preostala stalna obtežba deluje na napet in zainjeciran prerez, zato upoštevamo karakteristike idealnega prereza.

Upogibni moment zaradi preostale stalne obtežbe je

$$M_{g2} =$$

osna sila zaradi preostale stalne obtežbe je

$$N_{g2} = 0.$$

Napetosti zaradi preostale stalne obtežbe so

$$\sigma_{c1,g2} = \frac{M_{g2}}{W_{y1i}} + \frac{N_{g2}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c1,g2} =$$

$$\sigma_{c2,g2} = -\frac{M_{g2}}{W_{y2i}} + \frac{N_{g2}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c2,g2} =$$

$$\sigma_{c4,g2} = \frac{M_{g2}}{W_{y4i}} + \frac{N_{g2}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c4,g2} =$$

1.7.3 Navidezno stalni del koristne obtežbe

Navidezno stalni del koristne obtežbe $\psi_2 \cdot q$ deluje na napet in zainjeciran prerez, zato upoštevamo karakteristike idealnega prereza.

Upogibni moment zaradi navidezno stalne koristne obtežbe je

$$M_{\psi 2 \cdot q} =$$

osna sila zaradi navidezno stalne koristne obtežbe je

$$N_{\psi 2 \cdot q} = 0.$$

Napetosti zaradi preostale stalne obtežbe so

$$\sigma_{c1, \psi 2 \cdot q} = \frac{M_{\psi 2 \cdot q}}{W_{y1i}} + \frac{N_{\psi 2 \cdot q}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c1, \psi 2 \cdot q} =$$

$$\sigma_{c2, \psi 2 \cdot q} = -\frac{M_{\psi 2 \cdot q}}{W_{y2i}} + \frac{N_{\psi 2 \cdot q}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c2, \psi 2 \cdot q} =$$

$$\sigma_{c4, \psi 2 \cdot q} = \frac{M_{\psi 2 \cdot q}}{W_{y4i}} + \frac{N_{\psi 2 \cdot q}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c4, \psi 2 \cdot q} =$$

1.8 Račun izgub zaradi reologije – krčenje in lezenje betona ter relaksacija jekla za prednapenjanje

Nazivna velikost prereza h_0 je

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_{xc}}{u} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + 2 \cdot h},$$

pri čemer je

u ... del obsega elementa, ki je v stiku z ozračjem.

1.8.1 Končna deformacija zaradi krčenja betona

Ko je starost betona dovolj velika, se v elementu izvedejo deformacije, ki so praktično enake končnim

$$t \rightarrow \infty$$

$$\varepsilon_{cs, \infty} = \varepsilon_{cd, \infty} + \varepsilon_{ca, \infty},$$

pri čemer je

$\varepsilon_{cd, \infty}$... del končne deformacije krčenja zaradi sušenja,

$\varepsilon_{ca, \infty}$... del končne deformacije krčenja zaradi avtogenega krčenja,

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0},$$

$\varepsilon_{cd,0}$... nazivna vrednost neoviranega krčenja zaradi sušenja, podana v preglednici 3.2,

k_h ... koeficient, podan v preglednici 3.3,

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 \cdot (f_{ck} [\text{MPa}] - 10) \cdot 10^{-6}.$$

Preglednica 3.2: Nazivne vrednosti neoviranega krčenja betona iz cementa CEM razreda N zaradi sušenja $\varepsilon_{cd,0}$ (v ‰)

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relativna vlažnost (v ‰)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

Preglednica 3.3: Vrednosti za k_h

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Iz preglednic odčitamo

$$k_h(h_0 = 300\text{mm}) =$$

$$\varepsilon_{cd,0}(C40/50, RH = 80\%) =$$

in izračunamo

$$\varepsilon_{cd,\infty} =$$

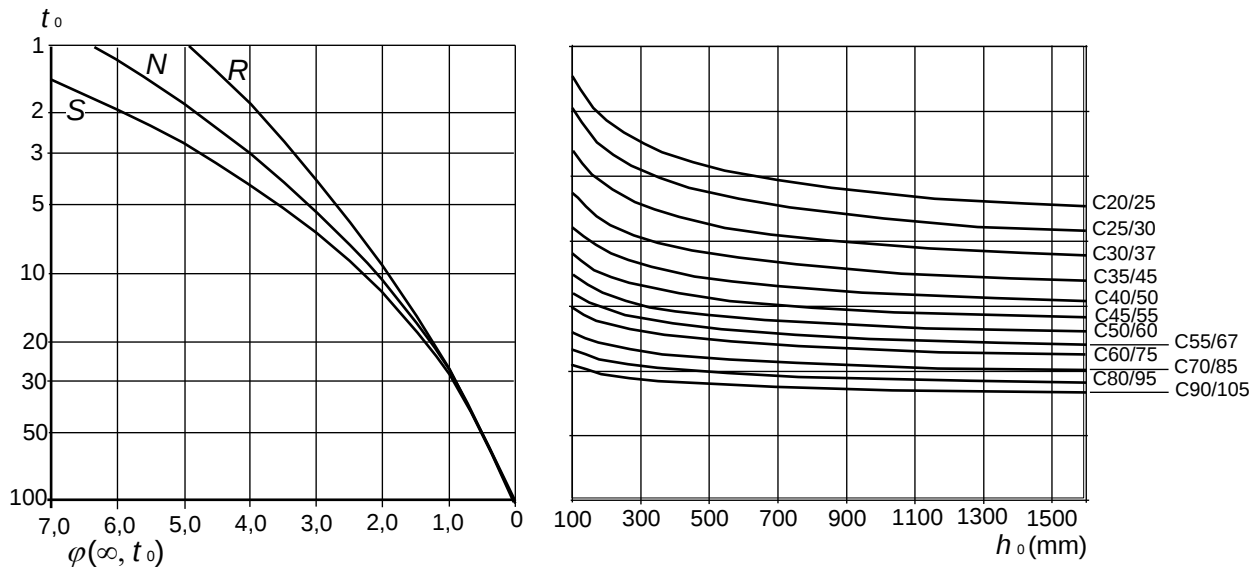
$$\varepsilon_{ca,\infty} =$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} = \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} =$$

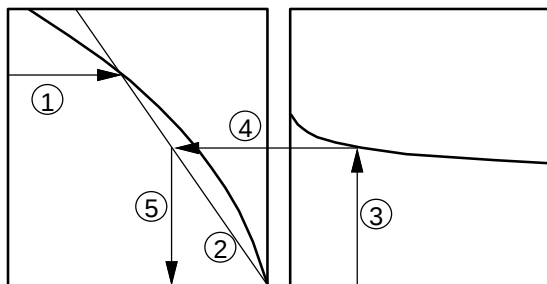
1.8.2 Končni koeficient lezenja betona

Starost betona ob napenjanju je $t_0 = 28$ dni.

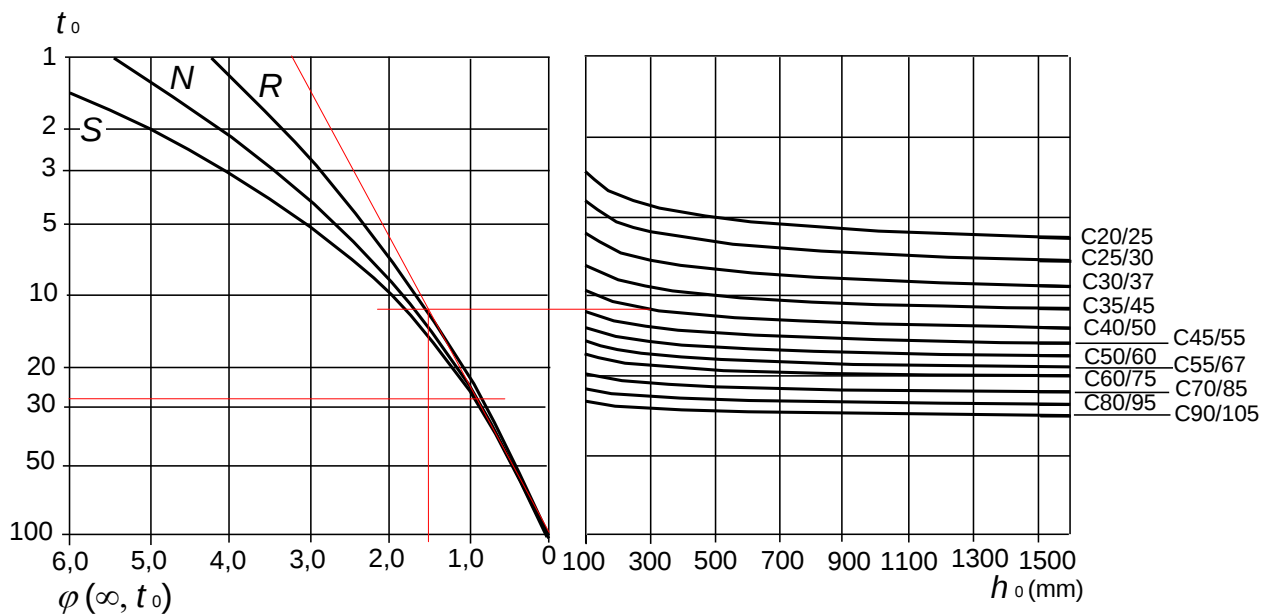
Približno vrednost končnega koeficienta lezenja φ , za relativno vlažnost okolice $RH = 80\%$, trdnostni razred betona C40/50, razred cementa N, $t_0 = 28$ dni in nazivno velikost prereza $h_0 = 300$ mm, odčitamo iz slike 3.1b v Evrokodu 2.



a) suho notranje okolje – relativna vlažnost RH = 50 %



OPOMBA: – presečišče med črtama 4 in 5 je lahko tudi nad točko 1,
– za $t_0 > 100$ je dovolj natančno, če se privzame, da je $t_0 = 100$ (in se uporabi tangenta)



b) zunanje okolje – relativna vlažnost RH = 80 %

Slika 7 Način določanja koeficienta lezenja $\varphi(\infty, t_0)$ betona v običajnih pogojih okolja.

Odčitamo $\varphi(\infty, t_0) = \varphi(\infty, 28 \text{ dni}) =$

1.8.3 Trdnost betona v času napenjanja kablov

Čas napenjanja kablov je $t_0 = 28$ dni. Tlačna trdnost betona je

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 40 \text{ MPa} + 8 \text{ MPa} = 48 \text{ MPa}.$$

V primeru, ko kable napenjamo pri betonih mlajših od 28 dni, določimo tlačno trdnost betona v času napenjanja kablov z izrazoma 3.1 in 3.2, podanima v Evrokodu 2, natezno trdnost betona pa z izrazom 3.4.

Tlačna trdnost

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (3.1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (3.2)$$

Natezna trdnost

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha f_{ctm} \quad (3.4)$$

1.8.4 Poenostavljen račun določitve končnih izgub sile prednapetja zaradi lezenja, krčenja in relaksacije pri delovanju trajne obtežbe

Ko je starost betona dovolj velika, se v kablilih sila prednapetja zmanjša za

$$t \rightarrow \infty,$$

$$t_0 = 28 \text{ dni},$$

$$\Delta P_{c+s+r} = A_{xp} \cdot \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_{xp} \cdot \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{xp}}{A_{xc}} \cdot \left(1 + \frac{A_{xc}}{I_{yc}} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]},$$

pri čemer so

$\Delta \sigma_{p,c+s+r}$... absolutna vrednost spremembe napetosti v kablilih na mestu x v času t zaradi lezenja, krčenja in relaksacije,

ε_{cs} ... absolutna vrednost ocenjene deformacije krčenja,

E_p ... modul elastičnosti prednapetega jekla,

$E_p = 19500 \text{ kN/cm}^2$ (za vrvi, 3.3.3 (9)),

E_{cm} ... modul elastičnosti betona,

$E_{cm} = 3500 \text{ kN/cm}^2$ (preglednica 3.1),

$\Delta \sigma_{pr}$... absolutna vrednost spremembe napetosti v kablilih na mestu x v času t zaradi relaksacije prednapetega jekla, določena za začetno napetost v kablilih zaradi začetnega prednapetja in navidezno stalnega vpliva

$$\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 \cdot Q),$$

$\phi(t, t_0)$... koeficient lezenja v času t pri nastopu obtežbe v času t_0 ,

$\sigma_{c,QP}$... napetost betona ob kablh zaradi stalne obtežbe, začetnega prednapetja in drugih ustreznih navidezno stalnih vplivov.

Vrednost $\sigma_{c,QP}$ je, odvisno od stanja obravnavane konstrukcije, lahko učinek delne lastne teže in začetnega prednapetja ali učinek polne navidezno stalne kombinacije vplivov ($\sigma_c(G+P_{m0}+\psi_2\cdot Q)$).

V obravnavanem primeru imamo naknadno prednapetje. Nimamo ločenih napetosti za vpliv prednapetja in lastne teže. Ko je prerez obremenjen s silo P_{m0} , deluje tudi lastna teža. Upoštevamo tudi navidezno stalni del koristne obtežbe $\psi_2\cdot q$. Tako dobimo

$$\sigma_{c,QP} = \sigma_{c4,g1+p0} + \sigma_{c4,g2} + \sigma_{c4,\psi_2\cdot q},$$

A_{xp} ... prerez vseh prednapetih kablov na mestu x ,

A_{xc} ... ploščina betonskega prereza (groba ocena izgub),

$$A_{xc} = b \cdot h =$$

I_{yc} ... vztrajnostni moment betonskega prereza,

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

z_{cp} ... razdalja med težiščem betonskega prereza in težiščem kablov,

$$z_{cp} = \frac{h}{2} - a_p =$$

Napetost je enaka

$$\sigma_{c,QP} = .$$

Izgube zaradi relaksacije prednapetega jekla

Evrokodu 2 obravnava tri razrede relaksacije

razred 1: žice in vrvi – normalna relaksacija,

razred 2: žice in vrvi – nizka relaksacija,

razred 3: vroče valjane in poboljšane palice.

Imamo vrvi z nizko stopnjo relaksacije v razredu 2. Vrednost tisoč urne relaksacije ρ_{1000} je podana v certifikatu kablov, če ne, lahko privzamemo, da je 8% v razredu 1, 2,5% v razredu 2 in 4% v razredu 3. V obravnavanem primeru, v razredu prednapete armature 2, privzamemo tisoč urno relaksacijo $\rho_{1000} = 2,5\%$.

Izgube zaradi relaksacije $\Delta\sigma_{pr}$ določimo

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

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

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

pri čemer so

$\Delta\sigma_{pr}$... absolutna vrednost izgube prednapetja zaradi relaksacije,

σ_{pi} ... absolutna vrednost začetnega prednapetja pri naknadnem napenjanju, $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$, oziroma največja natezna napetost kabla pri predhodnem napenjanju, zmanjšana za takojšnje izgube, ki se izvršijo med postopkom napenjanja,

t ... čas po napenjanju, izražen v urah,

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}},$$

f_{pk} ... karakteristična natezna trdnost jekla za prednapenjanje,

ρ_{1000} ... vrednost izgube zaradi relaksacije v % pri povprečni temperaturi 20°C, 1000 ur po napenjanju.

Končne vrednosti izgube prednapetja zaradi relaksacije lahko ocenimo z upoštevanjem časa $t = 500000$ ur, kar je približno 57 let.

V obravnavanem primeru je

$$\mu = \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} =$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} =$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} =$$

$$\Delta\sigma_{pr} =$$

1.8.5 Izgube sile prednapetja zaradi reologije

Skupne reološke izgube so

$$\Delta\sigma_{c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(\infty, t_0) \cdot \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \frac{A_{xp}}{A_{xc}} \cdot \left(1 + \frac{A_{xc}}{I_{yc}} \cdot z_{cp}^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(\infty, t_0)]},$$

$$\Delta\sigma_{c+s+r} =$$

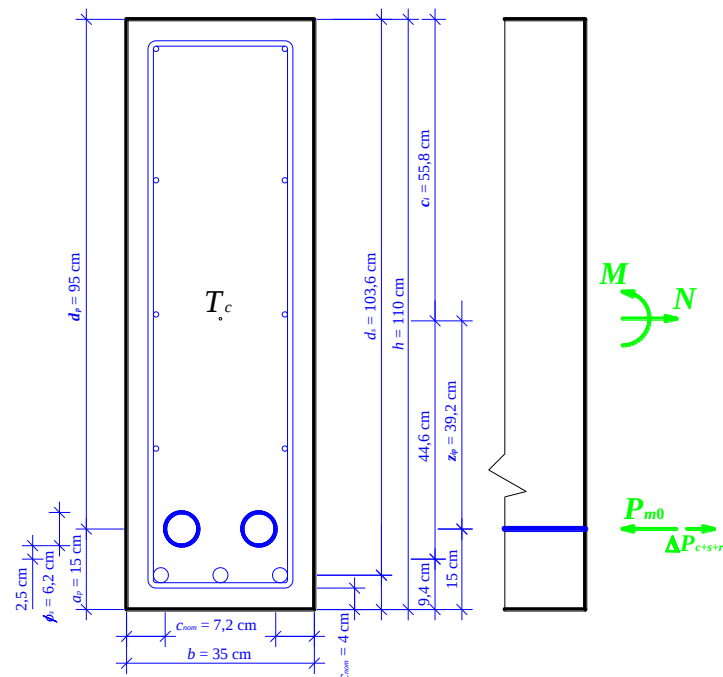
$$\Delta P_{c+s+r} = A_{xp} \cdot \Delta \sigma_{c+s+r} =$$

Padec sile prednapetja zaradi reoloških izgub je $\Delta P_{c+s+r} =$

Izguba sile prednapetja je

$$\frac{\Delta P_{c+s+r}}{P_{m0}} =$$

Ocenili smo, da bo izguba sile prednapetja 15%. Ker so izgube manjše od predvidenih, lahko nadaljujemo račun.



Slika 8 Padec sile prednapetja v kablju.

Oddaljenost težišča kablov od težišča idealnega prereza je

$$z_{ip} = d_p - c_i =$$

Napetosti v kontrolnih točkah zaradi spremembe sile v kablju na idealnem prerezu

$$\sigma_{c1,\Delta p} = \frac{\Delta P_{c+s+r} \cdot z_{i,p}}{W_{y1i}} + \frac{\Delta P_{c+s+r}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c1,\Delta p} =$$

$$\sigma_{c2,\Delta p} = -\frac{\Delta P_{c+s+r} \cdot z_{i,p}}{W_{y2i}} + \frac{\Delta P_{c+s+r}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c2,\Delta p} =$$

$$\sigma_{c4,\Delta p} = \frac{\Delta P_{c+s+r} \cdot z_{i,p}}{W_{y4i}} + \frac{\Delta P_{c+s+r}}{A_{xi}},$$

$$\sigma_{c4,\Delta p} =$$

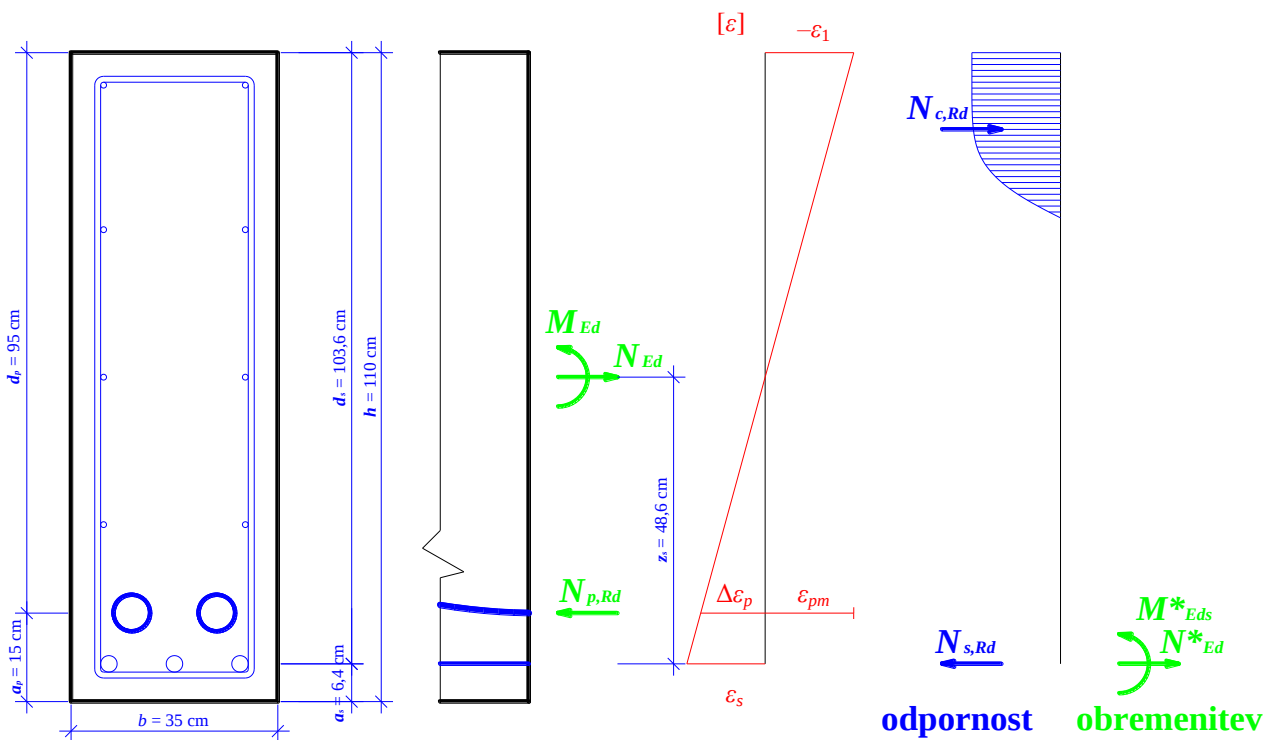
Preglednica 1 Sile in napetosti v kabljih

	Sila	Napetost
Začetni čas	$P_{m0} =$	$\sigma_{pm0} =$
Izguba	$-\Delta P_{c+s+r} =$	$-\Delta \sigma_{c+s+r} =$
Končni čas	$P_{m\infty} =$	$\sigma_{pm\infty} =$

1.9 Dimenzioniranje

1.9.1 Oso upogibna obremenitev

1.9.1.1 Mejno stanje nosilnosti



Slika 9 Deformacijsko in napetostno stanje v prečnem prerezu nosilca na sredini.

Skupna deformacija v kabljih je

$$\epsilon_p = \epsilon_{pm} + \Delta \epsilon_p,$$

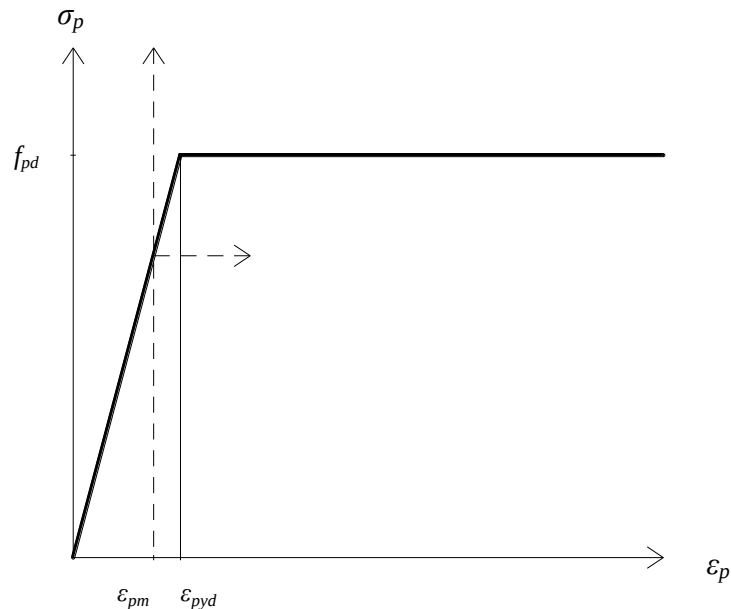
pri čemer je

ϵ_{pm} ... deformacija osnovnega prednapetja,

$$\varepsilon_{pm} \cong \frac{\sigma_{pmo}}{E_p} =$$

$\Delta\varepsilon_p$... prirastek deformacije za prehod v mejno stanje nosilnosti.

Prerez kablov A_p je znan. Določiti moramo še prerez mehke armature A_s .



Slika 10 Delovni diagram jekla za prednapenjanje.

Če je deformacija v kablilih

$$\varepsilon_p \geq \varepsilon_{pyd} = \frac{f_{pd}}{E_p} =$$

je napetost v kablilih

$$\sigma_p = f_{pd} =$$

in sila

$$N_{p,Rd} = A_p \cdot \sigma_p =$$

Potrebna sprememba deformacije, da v kablilih nastopi polna sila, je

$$\Delta\varepsilon_{p,potr} = \varepsilon_{pyd} - \varepsilon_{pm} =$$

Sile $N_{p,Rd}$, N_{Ed} in M_{Ed} združimo v nadomestno obremenitev N_{Ed}^* in M_{Eds}^* , ki deluje v težišču natezne armature A_s

$$N_{Ed}^* = N_{Ed} - N_{p,Rd}$$

$$N_{Ed}^* =$$

$$M_{Eds}^* = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s + N_{p,Rd} \cdot (d_s - d_p) = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_s \right) + N_{p,Rd} \cdot (d_s - d_p),$$

$$M_{Ed} = (M_{g1} + M_{g2}) \cdot \gamma_g + M_q \cdot \gamma_q =$$

$$M_{Eds}^* =$$

Račun nadaljujemo kot pri dimenzioniranju betonskih prerezov, armiranih z mehko armaturo.

$$k_d = \frac{M_{Eds}^*}{f_{cd} \cdot b \cdot d_s^2} =$$

Izberem $\varepsilon_s / -\varepsilon_1 =$

Količina potrebne mehke armature je

$$A_s = k_s \cdot \frac{M_{Eds}^*}{d_s \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}^*}{\sigma_s} =$$

Opomba: V primeru, ko je $A_s < 0$ že sami kabli zadoščajo za prevzem mejne obtežbe v MSN.

Sprememba deformacije v kablilih je

$$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{d_s} \cdot (d_s - d_p) =$$

Predpostavljeni $N_{p,Rd}$ je pravilen, ker velja

$$\Delta \varepsilon_p = > \Delta \varepsilon_{p,potr} =$$

Izberem $\phi \dots A_{s,dej} =$

1.9.1.2 Mejno stanje uporabnosti

1.9.1.2.1 Kontrola napetosti

Pri računskih dokazih uporabnosti se možna odstopanja sile prednapetja upoštevata z dvema karakterističnima vrednostima (poglavje 5.10.9)

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{m,t}(x)$$

in

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{m,t}(x).$$

Pri tem sta pri naknadno napetih in povezanih kablilih $r_{sup} = 1,10$ in $r_{inf} = 0,90$. Zaradi preglednosti v računskem primeru upoštevamo $r_{sup} = r_{inf} = 1,00$, kar pomeni, da v vseh dokazih upoštevamo enako silo $P_{k,sup} = P_{k,inf} = P_{m,t}(x)$. Po SIST EN 1992-1-1 se enaki vrednosti r_{sup} in r_{inf} upoštevata v primerih, ko so pri napenjanju izvedene ustrezne meritve, kot na primer neposredno merjenje prednapetja.

Pri karakteristični obtežni kombinaciji so v našem primeru največji tlaki zgoraj in največji nategi spodaj.

Pri karakteristični obtežni kombinaciji moramo zadostiti pogojem (poglavje 7.2)

- za preprečitev vzdolžnih razpok, če ne bodo izvedeni drugi ukrepi, kot je na primer objetje s prečno armaturo, stremeni, je napetost v betonu

$$\sigma_c \leq 0,6 \cdot f_{ck},$$

- za omejevanje trajnih razpok s preprečevanjem nepovratnih deformacij je napetost v mehki armaturi

$$\sigma_s \leq 0,8 \cdot f_{yk},$$

- za omejevanje trajnih razpok s preprečevanjem nepovratnih deformacij je napetost v prednapeti armaturi – kablilih

$$\sigma_p \leq 0,75 \cdot f_{pk}.$$

Pri navidezno stalni obtežni kombinaciji moramo za omejevanje lezenja, da lahko upoštevamo linearno teorijo lezenja, zadostiti pogoju

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck}.$$

Pri pogosti obtežni kombinaciji in navidezno stalni obtežni kombinaciji je v našem primeru izpolnjen pogoj dekompresije. Celoten prerez je tlaččen in napetosti lahko določimo s superpozicijo vplivov v homogenem prerezu. Pri karakteristični obtežni kombinaciji so v spodnjem delu prereza natezne napetosti. Če največja natezna napetost preseže natezno trdnost betona

$$\sigma_{c1} > f_{ctm},$$

izključimo natezno področje betona pri računu nosilnosti.

Uporabimo ustrezno pripravljeno preglednico v programu Excel, PREDN.XLS

Račun napetosti - linearni zakoni sig-eps - izključitev nateznega betona

Podatki:

N=	-1909,36 kN
Ms=	1374,9 kNm
b=	35 cm
d=	96,4 cm
As=	19,18 cm ²
Es=	20000 kN/cm ²
Ec=	3500 kN/cm ²

Rezultati:

n=Es/Ec=	5,7143	
kx=	0.8034	
kz=	0,7322	
	N (kN)	M (kNm)
Obremenitev	-1909,36	1374,90
Odpornost	-1909,36	1374,90
Napaka	0,00	0,00
Kv. napake	3,673E-17	1,32106E-18
Vsota kv.nap.=		3.80552E-17

N-osna sila (+Nateg)
Ms-moment k armaturi
d-statična višina

Napetosti:

Sig,c=	-1,437 kN/cm ²
Sig,s=	2,009 kN/cm ²

Deformacije:

Eps,c=	-0,411 prom.
Eps,s=	0,100 prom.

Navodila:

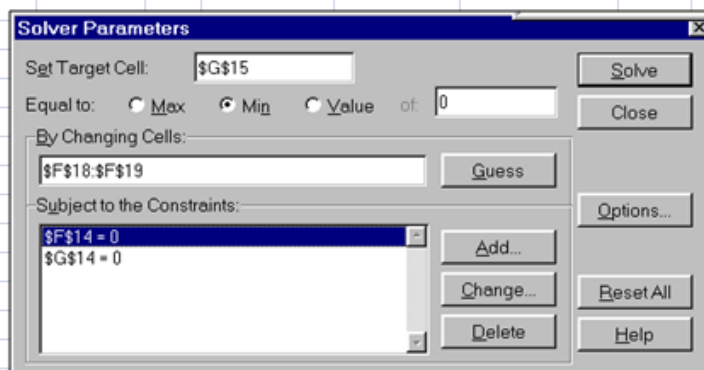
Vpiši podatke v rumena polja in poženi SOLVER (Tools/Solver)

Izjemoma se lahko vpisuje tudi v polji Sig,c in Sig,s kjer podamo začetna približka napetosti.

Za začetni približek se ponavadi obneseta vrednosti Sig,c=-1 in Sig,s=0.

Če je napaka relativno velika, je potrebno večkrat pognati solver Solver, s tem, da vsakič obdržiš predlagano rešitev.

Da bo Solver pravilno deloval mora okno izgledati takole:



Uporabimo ustrezno pripravljeno preglednico v programu Excel, PREDN.XLS

Račun napetosti - linearni zakoni sig-eps - izključitev nateznega betona

Podatki:

N=	-1909,36 kN
Ms=	1374,9 kNm
b=	35 cm
d=	96,4 cm
As=	19,18 cm ²
Es=	20000 kN/cm ²
Ec=	3500 kN/cm ²

Rezultati:

n=Es/Ec=	5,7143
kx=	0,8034
kz=	0,7322
N (kN)	M (kNm)
Obremenitev	-1909,36 1374,90
Odpornost	-1909,36 1374,90
Napaka	0,00 0,00
Kv. napake	3,673E-17 1,32106E-18
Vsota kv.nap.=	3,80552E-17

N-osna sila (+Nateg)

Ms-moment k armaturi

d-statična višina

Napetosti:

Sig.c=	-1,437 kN/cm ²
Sig.s=	2,009 kN/cm ²

Deformacije:

Eps.c=	-0,411 prom.
Eps.s=	0,100 prom.

Navodila:

Vpiši podatke v rumena polja in poženi SOLVER (Tools/Solver)

Izjemoma se lahko piše tudi v polji Sig.c in Sig.s kjer podamo začetna približna napetosti.

Za začetni približek se ponavadi obnese vrednosti Sig.c=-1 in Sig.s=0.

Če je napaka relativno velika, je potrebno večkrat pognati solver Solver, s tem, da vsakič obdržiš predlagano rešitev.

Da bo Solver pravilno deloval mora okno izgledati takole:

