

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

$$\sigma_{c4,\Delta p} = \frac{189,34 \text{ kN} \cdot 39,2 \text{ cm}}{102060 \text{ cm}^3} + \frac{189,34 \text{ kN}}{3926,8 \text{ cm}^2} = 0,121 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

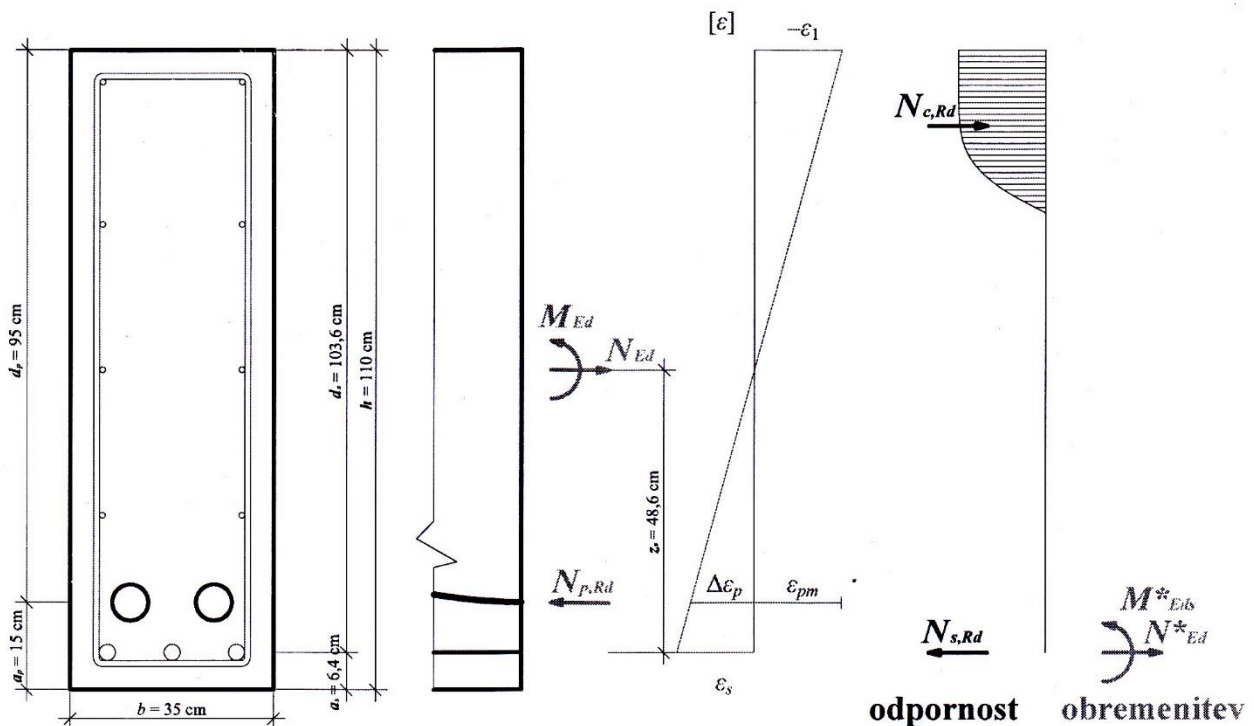
Preglednica 1 *Sile in napetosti v kabljih*

	Sila	Napetost
Začetni čas	$P_{m0} = 2098,7 \text{ kN}$	$\sigma_{pm0} = 127,24 \text{ kN/cm}^2$
Izguba	$-\Delta P_{c+s+r} = -189,34 \text{ kN}$	$-\Delta \sigma_{c+s+r} = -11,48 \text{ kN/cm}^2$
Končni čas	$P_{mco} = 1909,36 \text{ kN}$	$\sigma_{pmco} = 115,76 \text{ kN/cm}^2$

1.9 Dimenzioniranje

1.9.1 Osno upogibna obremenitev

1.9.1.1 Mejno stanje nosilnosti



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

Skupna deformacija v kablju je

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pm} + \Delta\varepsilon_p,$$

pri čemer je

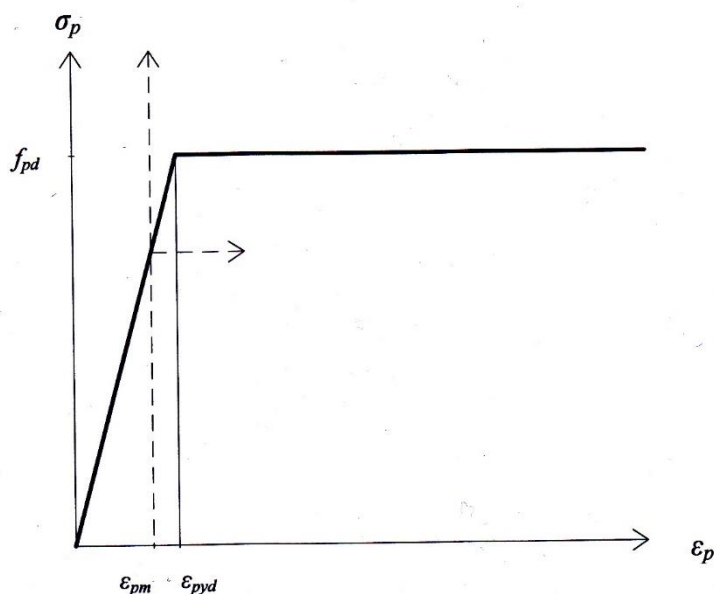
ε_{pm} ... deformacija osnovnega prednapetja,

BK 2016/17 ✓

$$\varepsilon_{pm} \cong \frac{\sigma_{pm\infty}}{E_p} = \frac{127,24 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{19500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 6,53\text{‰}, \quad \checkmark$$

$\Delta\varepsilon_p$... 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

$$\varepsilon_p \geq \varepsilon_{pyd} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{136,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{19500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 7,00\text{‰},$$

je napetost v kablilih

$$\sigma_p = f_{pd} = 136,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

in sila

$$N_{p,Rd} = A_p \cdot \sigma_p = 16,49 \text{cm}^2 \cdot 136,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 2251,7 \text{kN}.$$

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

$$\Delta\varepsilon_{p,potr} = \varepsilon_{pyd} - \varepsilon_{pm} = 7,00\text{‰} - 6,53\text{‰} = 0,48\text{‰}.$$

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

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

$$N_{Ed}^* = 0 \text{ kN} - 2251,7 \text{ kN} = -2251,7 \text{ kN},$$

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

$$M_{Eds}^* = (308,2 \text{ kNm} + 560,0 \text{ kNm}) \cdot 1,35 + 480,0 \text{ kNm} \cdot 1,50 = 1892,1 \text{ kNm},$$

$$M_{Eds}^* = 1892,1 \text{ kNm} - 0 \cdot \left(\frac{110 \text{ cm}}{2} - 6,4 \text{ cm} \right) + 2251,7 \text{ kN} \cdot (103,6 \text{ cm} - 95 \text{ cm}) = 2085,7 \text{ kNm}.$$

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

$$k_d = \frac{M_{Eds}^*}{f_{cd} \cdot b \cdot d_s^2} = \frac{2085,7 \text{ kNm}}{2,67 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 35 \text{ cm} \cdot (103,6 \text{ cm})^2} = 0,208.$$

Izberem $\varepsilon_s / -\varepsilon_1 = 8/3,5\% \rightarrow k_d = 0,215, k_s = 1,145.$

Količina potrebne mehke armature je

$$A_s = k_s \cdot \frac{M_{Eds}^*}{d_s \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}^*}{\sigma_s} = 1,145 \cdot \frac{2085,7 \text{ kNm}}{103,6 \text{ cm} \cdot 43,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} - \frac{2251,7 \text{ kN}}{43,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,23 \text{ cm}^2.$$

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

Sprememba deformacije v kabljih je

$$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{d_s} \cdot (d_s - d_p) = 8\% + \frac{-3,5\% - 8\%}{103,6 \text{ cm}} \cdot (103,6 \text{ cm} - 95 \text{ cm}) = 7,0\%.$$

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

$$\Delta \varepsilon_p = 7,0\% > \Delta \varepsilon_{p, \text{potr}} = 0,48\%.$$

Izberem $2\phi 14 \text{ mm} \dots A_{s, \text{dej}} = 3,08 \text{ cm}^2.$

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)

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

in

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

Pri tem sta pri naknadno napetih in povezanih kabljih $r_{\text{sup}} = 1,10$ in $r_{\text{inf}} = 0,90$. Zaradi preglednosti v računskem primeru upoštevamo $r_{\text{sup}} = r_{\text{inf}} = 1,00$, kar pomeni, da v vseh dokazih upoštevamo enako silo $P_{k, \text{sup}} = P_{k, \text{inf}} = P_{m, t}(x)$. 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 – kablji

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

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 tlačin 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

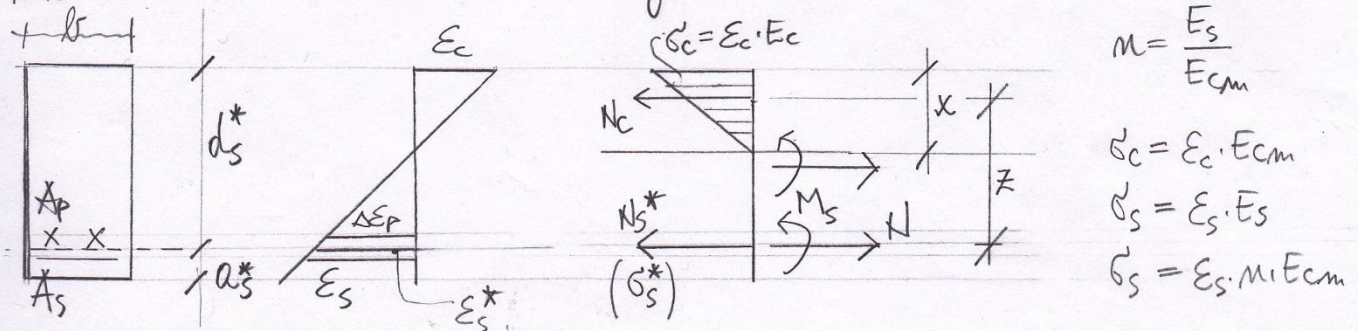
$$\sigma_{cl} > f_{ctm}$$

izključimo natezno področje betona pri računu nosilnosti.

1.9.2 Strižna obremenitev v mejnem stanju nosilnosti

1.9.3 Najmanjša vzdolžna armatura

Karakteristične obtežne kombinacije:



$$m = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

$$\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_{cm}$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot m \cdot E_{cm}$$

Uporabimo pogoje:

$$\begin{aligned} \sum N = 0: N - N_s^* - N_c &= 0 \rightarrow N = \sigma_s^* \cdot A_s^* + \frac{\sigma_c \cdot k_x \cdot b \cdot d_s^*}{2} \\ \sum M = 0: M_s + N_c \cdot z &= 0 \rightarrow M_s = - \frac{\sigma_c \cdot k_x \cdot k_z \cdot b \cdot d_s^{*2}}{2} \end{aligned} \left. \begin{array}{l} \sigma_s^*, \sigma_c \\ \varepsilon_s^*, \varepsilon_c \end{array} \right\} \rightarrow \text{izračun}$$

A_s^*, d_s^*, N_s^* in modusovni vpliv loka in neobtežene armature

$$k_x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_s^*} = \frac{\sigma_c}{\sigma_c - \sigma_s^*/m} ; k_z = \frac{z}{d_s^*} = 1 - \frac{k_x}{3}$$

Obremenitev: M_s - moment iz fiktivnemu težišču skupne armature
 N - osna sile v prečnem ($N > 0$ poteg)

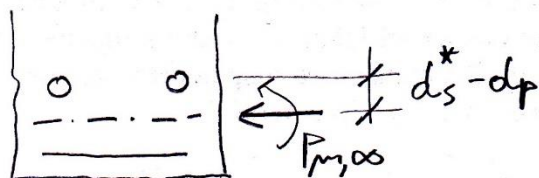
Kot osnovo izračuna mežna armatura:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{19500}{20000} = 0,975$$

$$A_s^* = A_s + \frac{E_p}{E_s} \cdot A_p = 3,1 + 0,975 \cdot 16,49 = 19,18 \text{ cm}^2$$

$$d_s^* = \frac{A_s \cdot d_s + \frac{E_p}{E_s} \cdot A_p \cdot d_p}{A_s^*} = \frac{3,1 \cdot 103,6 + 0,975 \cdot 16,49 \cdot 95}{19,18} = 96,4 \text{ cm}$$

Moment iz konstituiranemu težišču armature:



$$M_s = M_{g1} + M_{g2} + M_q + P_{m,\infty} (d_s^* - d_p) =$$

$$= 308,2 + 560,0 + 480 + 1909,36 (96,4 - 95) = 1374,9 \text{ kNm}$$

$$N = -P_{m,\infty} = -1909,36 \text{ kN}$$

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
$d_s^* \rightarrow d=$	96,4 cm
$d_s^* \rightarrow A_s=$	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	->
$d_s^* \rightarrow \text{Sig.s=}$	2,009 kN/cm ²	->

Deformacije:

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

Navodila:

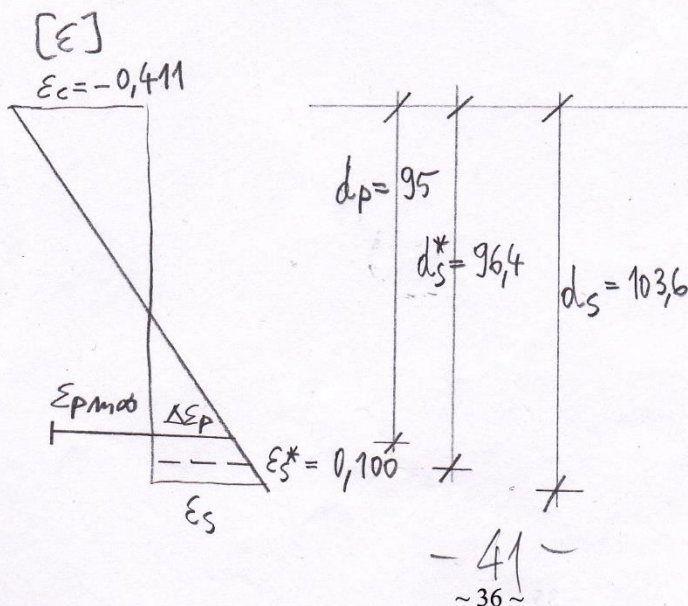
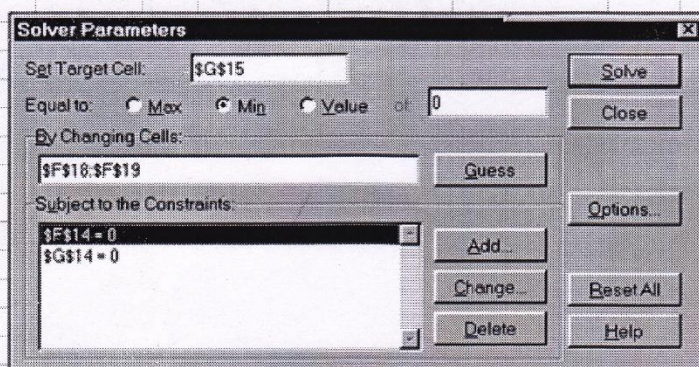
Vpiši podatke v rumena polja in poženi SOLVER (Tools/Solver)

Izjemoma se lahko vpisuje tudi v polji Sig.c in Sig.s kjer podamo začetna približna 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:



Armature:

$$\varepsilon_s = -0,411 + (0,100 + 0,411) \cdot \frac{ds}{ds^*} = -0,411 + (0,100 + 0,411) \cdot \frac{103,6}{96,4} = 0,138 \%$$

$$\rightarrow \sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s = 0,138 \cdot 10^{-3} \cdot 20000 = 2,76 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_s = 2,76 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 0,80 f_{yk} = 0,8 \cdot 50 = 40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \checkmark$$

Kobli:

$$\Delta \varepsilon_p = -0,411 + (0,100 + 0,411) \cdot \frac{dp}{ds^*} = -0,411 + (0,100 + 0,411) \cdot \frac{95}{96,4} = 0,093 \%$$

$$\varepsilon_{pmax} = \frac{P_{max}}{A_p E_p} = \frac{1909,36}{16,49 \cdot 19500} = 5,94 \%$$

$$\rightarrow \varepsilon_p = \varepsilon_{pmax} + \Delta \varepsilon_p = 5,94 + 0,093 = 6,03 \%$$

$$\sigma_p = \varepsilon_p \cdot E_p = 6,03 \cdot 10^{-3} \cdot 19500 = 117,59 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 0,75 f_{pk} = 0,75 \cdot 177 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 132,75 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \checkmark$$

Beton:

$$|G_c| = \left| -1,437 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \right| < 0,6 f_{ctk} = 0,6 \cdot 4,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 2,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \checkmark$$

glej računalniški izpis!

Te poposte in mondermo delno obteženo /subtrucijo
labilno delano > superpozicijo nepelosti zori di posouleni
vplivov ne homogeneen pueru izročunomih in
točkah 1.7.1, 1.7.2, 1.7.3 in 1.8.5
→ glej naslednjo shemo (preglednica)

Za pogosto in navidezno stalno obtežno kombinacijo lahko seštejemo napetosti zaradi posameznih vplivov na homogenem prerezu (velja superpozicija), izračunanih v točkah 1.7 in 1.8.

Preglednica: normalne napetosti zaradi posameznih vplivov [kN/cm²]

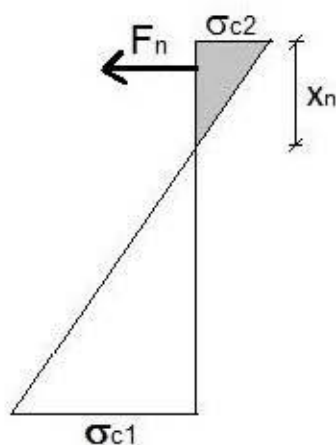
Št.	Obtežba oz. kombinacija	σ_{c1}	σ_{c2}	σ_{c4}	σ_{cp}
1	g_1+p_0	-1,355	0,229 *	-1,139	$\sigma_{pm0} = 127,24$
2	g_2	0,768	-0,784	0,556	$0,556 \cdot \alpha_p = 3,10$
3	$\psi_2 \cdot q$	0,198	-0,202	0,143	$0,143 \cdot \alpha_p = 0,79$
4	$\psi_1 \cdot q$	$0,198 \cdot \frac{0,5}{0,3} = 0,330$	-0,337	0,238	1,33
5	Δp	0,149	-0,055	0,121	$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = -11,48$
6	Navidezno stalna obtežna kombinacija $t=\infty$ (1, 2, 3, 5)	-0,240	-0,812 **	-0,319	119,7
7	Navidezno stalna obtežna kombinacija $t=t_0$ (1, 2, 3)	-0,389	-0,757	-0,440	131,1
8	Pogosta obtežna kombinacija $t=\infty$ (1, 2, 4, 5)	-0,108 ***	-0,947	-0,224	120,2

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{19500}{3500} = 5,57$$

* faza prednapenjanja (začasno stanje):

Zgoraj se pojavijo nategi: $\sigma_{c2} = 0,229 \text{ kN/cm}^2 \leq f_{ctm} = 0,35 \text{ kN/cm}^2$

Kljub temu, da so napetosti $\sigma_{c2} \leq f_{ctm}(t_0)$, betonu ne pripišemo natezne nosilnosti → rezultanto nateznih napetosti pokrijemo z mehko armaturo.



$$x_n = \frac{\sigma_{c2}}{\sigma_{c2} + \sigma_{c1}} \cdot h = \frac{0,229}{0,229 + 1,355} \cdot 110 = 15,9 \text{ cm}$$

$$F_n = \frac{x_n \cdot b \cdot \sigma_{c2}}{2} = \frac{15,9 \cdot 35 \cdot 0,229}{2} = 63,7 \text{ kN}$$

$$\sigma_s \leq 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_s = \frac{F_n}{\sigma_s} = \frac{63,7}{40} = 1,6 \text{ cm}^2 \rightarrow 2\emptyset 14 (A_s = 3,1 \text{ cm}^2)$$

$$\text{mesto rezultante: } \frac{x_n}{3} = \frac{15,9}{3} = 5,3 \text{ cm} - \text{od vrha}$$

preverba zadostnosti krovnega sloja:

$$c_{nom} + \varnothing_s + \frac{\varnothing}{2} = c_{nom} + \varnothing_s + \frac{\varnothing}{2} = 57 \text{ mm} \cong \frac{x_n}{3} = 53 \text{ mm}$$

** navidezno stalna obtežba po izvršenih izgubah:

$$|\sigma_{c2}| = \left| -0,812 \frac{kN}{cm^2} \right| \leq 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 4,0 = 1,80 \frac{kN}{cm^2}$$

V primeru, da je $t = t_0$ - različen od 28 dni, izvedemo dodatno kontrolo v začetnem času $t = t_0$.

*** pogosta kombinacija obtežnih primerov:

Za razred izpostavljenosti XD1 mora biti, pri pogosti obtežni kombinaciji obtežnih primerov, izpolnjen pogoj dekompresije (glede na ta pogoj smo v točki 1.5 določili potrebno kabelsko silo $P_{m\infty}$):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{c1} &= -0,108 \frac{kN}{cm^2} \leq 0 \\ \sigma_{c2} &= -0,947 \frac{kN}{cm^2} \leq 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{cel prečni prerez je v tlaku -} \\ \text{pogoj dekompresije je izpolnjen!}$$

1.9.1.2.2 Kontrola razpok

Razpoke je potrebno dokazati pri Pogosti kombinaciji obtežbe. V vaji smo izhajali, pri določitvi sile $P_{m\infty}$, iz pogoja dekompresije pri Pogosti obtežni kombinaciji. → razpok NI, saj je cel prečni prerez v tlaku!

V splošnem: Bolj neugodno je končno stanje, ko sila v kablilih pade na vrednost $P_{m\infty}$.

Razpoke moramo v splošnem dokazati za obtežbe:

- Prednapetje: $P_{m\infty}$

- Pogosta obtežna kombinacija: $g_1 + g_2 + \psi_1 \cdot q$