

materiálov, ktorý je pre krátkodobý účinok zaťaženia (t.j. bez vplyvu reologických procesov v betóne) definovaný vzťahom

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}}$$

kde E_a je modul pružnosti ocele,
 E_{cm} je sečnicový modul pružnosti betónu.

Vychádza sa z úvahy, že betónová časť prispieva k celkovej ohybovej tuhosti spriahnutého prierezu E_{ef} n_0 -krát menej ako ocelová časť. Preto sa pri výpočte prierezových charakteristík efektívneho prierezu príspevok betónovej časti redukuje pomerom modulov n_0 :

- Prierezová plocha efektívneho prierezu:

$$A_{ef} = A_a + A_c / n_0$$

- Poloha ťažiska efektívneho prierezu:

$$r_c = \frac{A_a \cdot r}{A_{ef}}, r_a = \frac{A_c / n_0 \cdot r}{A_{ef}}, r = r_c + r_a$$

- Kvadratický moment plochy efektívneho prierezu:

$$I_{y,ef} = I_{ya} + I_{yc} / n_0 + A_a \cdot r_a^2 + A_c / n_0 \cdot r_c^2 = I_{ya} + I_{yc} / n_0 + A_{ef} \cdot r_a \cdot r_c$$

Efektívne prierezové charakteristiky spriahnutého ocel'obetónového prierezu pre dlhodobé účinky zaťaženi

Betón je materiál podliehajúci dotvarovaniu, ktoré môžeme zjednodušene definovať ako nárast deformácie v čase pri dlhodobo pôsobiacom (konštantnom) zaťaženi. Tento efekt je možné matematicky opísať ako degradáciu modulu pružnosti. Zmena modulu pružnosti betónu má vplyv na efektívne prierezové charakteristiky spriahnutého prierezu, ktorých výpočet je založený na pomere modulov oboch materiálov. Vplyv dotvarovania betónu od dlhodobých zaťaženi sa teda pri výpočte normálových napätí v spriahnutom priereze zohľadní pomocou pomeru modulov n_L , ktorý je definovaný v závislosti od typu dlhodobého zaťaženi pomocou vzťahu

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t)$$

kde n_0 je pomer modulov pre krátkodobé účinky zaťaženi,

ϕ_t je súčiniteľ dotvarovania $\phi(t, t_0)$, závislý od veku betónu t v čase posúdenia,

ψ_L je násobiteľ dotvarovania závislý od typu dlhodobého zaťaženi, ktorý sa môže uvažovať hodnotou 1,1 pre stále zaťaženi, 0,55 pre primárne aj sekundárne účinky zmrašťovania a 1,5 pre účinky predpätia vyvolaného vnesenými deformáciami.

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Súčiniteľ dotvarovania $\phi(t, t_0)$ sa môže stanoviť pomocou prílohy B v STN EN 1992-1-1 zo vzťahu

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

kde ϕ_0 je teoretický súčiniteľ dotvarovania daný vzťahom

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0).$$

Koeficient ϕ_{RH} vyjadruje vplyv relatívnej vlhkosti prostredia RH (%) na hodnotu teoretického súčiniteľa dotvarovania a je daný vzťahom

$$\phi_{RH} = \begin{cases} 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} & \text{pre } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 & \text{pre } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \end{cases}$$

kde h_0 je náhradná hrúbka dosky (mm) daná vzťahom

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

A_c je plocha betónovej dosky,

u je obvod dosky vystavený atmosfére.

Koeficient $\beta(f_{cm})$ vyjadruje vplyv pevnosti betónu na hodnotu teoretického súčiniteľa dotvarovania a je definovaný vzťahom

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

kde f_{cm} je stredná 28-dňová valcová pevnosť betónu v tlaku, $f_{cm} = f_{ck} + 8,0$ (MPa).

Koeficient $\beta(t_0)$ vyjadruje vplyv veku betónu v čase začiatku pôsobenia dlhodobého zaťaženia na hodnotu teoretického súčiniteľa dotvarovania a je definovaný vzťahom

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}$$

Koeficient $\beta_c(t - t_0)$ opisuje vývoj dotvarovania v čase, ktorý je možné odhadnúť pomocou vzťahu

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right]^{-0,3}$$

Koeficient β_H závisí od relatívnej vlhkosti RH (%) a od náhradnej hrúbky dosky h_0 a je daný vzťahom

$$\beta_H = \begin{cases} 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \leq 1500 & \text{pre } f_{cm} \leq 35 \\ 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 & \text{pre } f_{cm} > 35 \end{cases}$$

Koeficienty α_1 , α_2 , α_3 zohľadňujúce pevnosť betónu sú definované nasledovne

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0.7} \quad \alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0.2} \quad \alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0.5}$$

Súčiniteľ dotvarovania pre 2. časť stálych zaťažení

Za predpokladu, že 2. časť stálych zaťažení začne pôsobiť na spriahnutú konštrukciu 1 mesiac po vybetónovaní dosky ($t_0 = 30$ dní), že most bude uvedený do prevádzky 2 mesiace (60 dní) po vybetónovaní a že plánovaná návrhová životnosť mosta je 100 rokov (36 525 dní), potom pri relatívnej vlhkosti prostredia $RH = 80\%$ bude platiť:

$$u = 2 \cdot 2,18 + 0,29 - 0,32 = 4,33 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 0,6322}{4,33} = 0,292 \text{ m}$$

$$f_{cm} = 35 + 8 = 43 \text{ MPa}$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{43}\right)^{0.7} = 0,8658 \quad \alpha_2 = \left(\frac{35}{43}\right)^{0.2} = 0,9597 \quad \alpha_3 = \left(\frac{35}{43}\right)^{0.5} = 0,9022$$

$$\phi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - 80/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{292}} \cdot 0,8658 \right] \cdot 0,9597 = 1,2101$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{43}} = 2,5620$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot 80)^{18}] \cdot 292 + 250 \cdot 0,9022 = 873,64 < 1500 \cdot 0,9022 = 1353,3$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + 30^{0,20}} = 0,4821$$

$$\phi_0 = 1,2102 \cdot 2,5620 \cdot 0,4821 = 1,4946$$

Vývoj dotvarovania:

$$\text{v čase 60 dní: } \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{60 - 30}{873,64 + 60 - 30} \right]^{0,3} = 0,3600$$

$$\text{v čase 100 rokov: } \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{36525 - 30}{873,64 + 36525 - 30} \right]^{0,3} = 0,9929$$

Výsledný súčiniteľ dotvarovania:

$$\text{v čase 60 dní: } \phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) = 1,4946 \cdot 0,3600 = 0,5381$$

$$\text{v čase 100 rokov: } \phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) = 1,4946 \cdot 0,9929 = 1,4840$$

Súčiniteľ dotvarovania pre účinky zmrašťovania betónu

Zmrašťovanie betónu je dlhodobý proces, nezávislý od pôsobiaceho zaťaženia, ktorý sa prejavuje postupným znižovaním objemu betónu v dôsledku odparovania sa zámesovej vody v procese tuhnutia a tvrdnutia betónu. Keďže oceľový nosník bráni voľnej deformácii betónovej dosky, v spriahnutom oceľobetónovom priereze vznikajú prídavné napätia. V zmysle STN EN 1994-2 sa má súčiniteľ dotvarovania od účinkov zmrašťovania betónu vypočítať za predpokladu, že zmrašťovanie začne pôsobiť od prvého dňa po vybetónovaní dosky ($t_0 = 1$ deň).

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + 1^{0,20}} = 0,9091$$

$$\phi_0 = 1,2102 \cdot 2,5620 \cdot 0,9091 = 2,8185$$

Vývoj dotvarovania:

$$\text{v čase 60 dní: } \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{60 - 1}{873,64 + 60 - 1} \right]^{0,3} = 0,4369$$

$$\text{v čase 100 rokov: } \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{36525 - 1}{873,64 + 36525 - 1} \right]^{0,3} = 0,9929$$

Výsledný súčiniteľ dotvarovania:

$$\text{v čase 60 dní: } \phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) = 2,8185 \cdot 0,4369 = 1,2313$$

$$\text{v čase 100 rokov: } \phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) = 2,8185 \cdot 0,9929 = 2,7986$$

Pomery modulov pre dlhodobé účinky zaťaženi

- pre 2. časť stálych zaťažení v čase $t = 60$ dní:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t) = 6,176 \cdot (1 + 1,1 \cdot 0,5381) = 7,960$$

- pre 2. časť stálych zaťažení v čase $t = 36\,525$ dní:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t) = 6,176 \cdot (1 + 1,1 \cdot 1,4840) = 13,162$$

- pre účinky zmrašťovania v čase $t = 60$ dní:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t) = 6,176 \cdot (1 + 0,55 \cdot 1,2313) = 8,386$$

- pre účinky zmrašťovania v čase $t = 36\,525$ dní:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \cdot \phi_t) = 6,176 \cdot (1 + 0,55 \cdot 2,7986) = 12,696$$

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Efektívne prierezové charakteristiky pre jednotlivé dlhodobé účinky zaťaženi a im zodpovedajúce pomery modulov n_L sú uvedené v tab. 1.

Zaťaženie	2. časť stálych zaťažení - g_2			Zmrašťovanie		
Vek betónu [dni]	30	60	36 525	1	60	36 525
$\phi(t, t_0)$ [-]	-	0,5381	1,4840	-	1,2313	2,7986
ψ_L [-]	-	1,1000	1,1000	-	0,5500	0,5500
$n_0 = E_a/E_{cm}$ [-]	6,1765	-	-	6,1765	-	-
$n_L = n_0 \cdot (1 + \psi_L \cdot \phi(t, t_0))$ [-]	-	7,9596	13,1623	-	8,3861	12,6961
A_a [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^2$]	43,9600	43,9600	43,9600	43,9600	43,9600	43,9600
A_c/n [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^2$]	102,3562	79,4262	48,0313	102,3562	75,3870	49,7947
$A_{ef} = A_a + A_c/n$ [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^2$]	146,3162	123,3862	91,9913	146,3162	119,3470	93,7547
r [m]	1,0554	1,0554	1,0554	1,0554	1,0554	1,0554
$r_c = A_a \cdot r / A_{ef}$ [m]	0,3171	0,3760	0,5043	0,3171	0,3887	0,4948
$r_a = A_c \cdot r / (n \cdot A_{ef})$ [m]	0,7383	0,6794	0,5510	0,7383	0,6666	0,5605
I_a [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^4$]	18,6995	18,6995	18,6995	18,6995	18,6995	18,6995
I_c/n [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^4$]	0,7173	0,5566	0,3366	0,7173	0,5283	0,3490
$A_{ef} \cdot r_c \cdot r_a$ [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^4$]	34,2527	31,5189	25,5653	34,2527	30,9285	26,0054
$I_{ef} = I_a + I_c/n + A_{ef} \cdot r_c \cdot r_a$ [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^4$]	53,6695	50,7750	44,6014	53,6695	50,1563	45,0539
z_{e1} [m]	-0,4621	-0,5210	-0,6493	-0,4621	-0,5337	-0,6398
z_{e2} [m]	-0,1721	-0,2310	-0,3593	-0,1721	-0,2437	-0,3498
z_{e3} [m]	-0,1721	-0,2310	-0,3593	-0,1721	-0,2437	-0,3498
z_{e4} [m]	1,4279	1,3690	1,2407	1,4279	1,3563	1,2502

Tabuľka 1: Efektívne prierezové charakteristiky spriahnutého prierezu

Zatriedenie prierezu oceľového nosníka v montážnom štádiu

Pre zatriedenie prierezu predpokladáme účinnú hrúbku kútových zvarov pripájajúcich pásnice a stenu oceľového nosníka rovnú polovici hrúbky steny $a_w = t_w / 2 = 6 \text{ mm}$.

Zatriedenie hornej pásnice: (uvažujeme ako rovnomerne tlačенú prečnievajúcu časť prierezu)

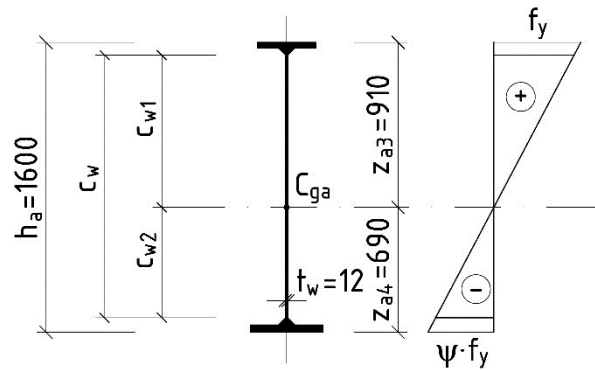
$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

$$c_f = \frac{b_f - t_w}{2} - a_w \cdot \sqrt{2} = \frac{320 - 12}{2} - 6 \cdot \sqrt{2} = 145,5 \text{ mm}$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{145,5}{30} = 4,85 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,3 \quad \Rightarrow \quad \text{trieda 1}$$

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja



Pozn.: znamienkom „+“ sú označené tlakové napätia

Obrázok 2: Zatriedenie steny ocelového nosníka

Zatriedenie steny:

Priebeh napätia v stene „I“ nosníka s nesymetrickými pásnicami (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**) zodpovedá namáhaniu steny kombináciou tlaku a ohybu. Medzná štíhlosť takto namáhanej steny je definovaná v STN EN 1993-1-1 [11] v závislosti od pomeru napätí v krajných vláknach steny:

$$\text{ak } \psi > -1: \quad \frac{c_w}{t_w} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$$

$$\text{ak } \psi \leq -1: \quad \frac{c_w}{t_w} \leq 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$$

V našom prípade pre stenu nosníka podľa obr. 2 platí:

$$c_w = b_w = h_w - 2 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 1530 - 2 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} = 1513,0 \text{ mm}$$

Pomer napätí ψ v medznom stave je priamo-úmerný pomeru vzdialeností neutrálnej osi od dolného a horného okraja steny:

$$\psi = -\frac{\psi \cdot f_y}{f_y} = -\frac{c_{w2}}{c_{w1}} = \frac{z_{a4} - t_{f2} - a_w \cdot \sqrt{2}}{z_{a3} + t_{f1} + a_w \cdot \sqrt{2}} = \frac{690 - 40 - 6 \cdot \sqrt{2}}{-910 + 30 + 6 \cdot \sqrt{2}} = -0,736 > -1,0$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{1513}{12} = 126,08 > \frac{42 \cdot 0,814}{0,67 + 0,33 \cdot (-0,736)} = 80,04 \quad \Rightarrow \text{trieda 4}$$

Zatriedenie steny ocelového nosníka do triedy 4 je založené na predpoklade, že v krajných vláknach steny je dosiahnuté maximálne tlakové napätie na úrovni medze klzu (obr. 2). Takýto predpoklad by bol náležitý pri posúdení ocelového nosníka v montážnom štádiu v MS únosnosti z hľadiska jeho odolnosti proti účinkom kombinácie zaťaženií pôsobiacich v prvej fáze výstavby mosta. Do ďalšej fázy posúdenia spriahnutého prierezu však zostávajú v ocelovom priereze len napätia od časti stálych zaťaženií pôsobiacich v prvej fáze. Z tohto hľadiska je preto výstižnejšie zatriedenie steny ocelového nosníka podľa čl. 5.5.2(9) v STN EN 1993-1-1 so

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Správne by sme mali stenu spriahnutého prierezu zatriediť s ohľadom na výsledný priebeh napätí v priereze od kombinácie zaťažení. Keďže poloha neutrálnej osi efektívneho spriahnutého prierezu stanovená pre všetky ostatné zaťaženia vstupujúce do kombinácie je z hľadiska zatriedenia prierezu priaznivejšia (bližšia k tlačnému okraju steny), je zrejmé, že takéto zatriedenie by bolo ešte priaznivejšie.

Vnútorne sily

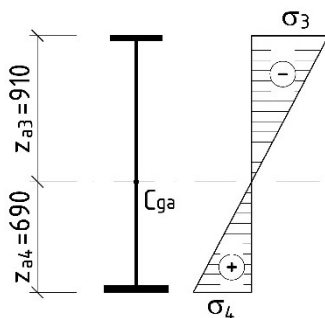
Charakteristické hodnoty ohybových momentov na krajnom nosníku:

- od 1. časti stálych zaťažení: $M_{g1,k} = 2\,467,7$ kNm
- od 2. časti stálych zaťažení: $M_{g2,k} = 1\,114,5$ kNm
- od zaťaženia dopravou: $M_{sk1a,k} = 3\,893,2$ kNm

Výpočet normálových napätí

Napätia od 1. časti stálych zaťažení g_1

Prvú časť stálych zaťažení prenáša len oceľový nosník. Napätia v oceľovom priereze sú:



$$\sigma_{g1,3} = \frac{M_{g1,k}}{I_{ya}} \cdot z_{a3} = \frac{2\,467,7 \cdot 10^{-3}}{18,700 \cdot 10^{-3}} \cdot (-0,910) = -120,14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g1,4} = \frac{M_{g1,k}}{I_{ya}} \cdot z_{a4} = \frac{2\,467,7 \cdot 10^{-3}}{18,700 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,690 = +91,01 \text{ MPa}$$

Obrázok 4: Priebeh napätí v oceľovom priereze

Overenie zatriedenia steny pre nižšiu hodnotu maximálnych tlakových napätí v krajných vláknoch steny:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{g1,k}}{I_{ya}} \cdot (z_{a3} + t_{f1} + a_w \cdot \sqrt{2}) = \frac{2\,467,7 \cdot 10^{-3}}{18,70 \cdot 10^{-3}} \cdot (-0,91 + 0,03 + 0,006 \cdot \sqrt{2}) = -115,0 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235/1,0}{115,0}} = 1,430$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{1513}{12} = 126,08 < \frac{42 \cdot 1,430}{0,67 + 0,33 \cdot (-0,736)} = 140,62 \quad \Rightarrow \text{trieda 3}$$

Oceľový nosník spĺňa podmienku pre zatriedenie do triedy 3, a teda vypočítané napätia v krajných vláknoch oceľového nosníka zostávajú v platnosti.

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Napätia od 2. časti stálych zaťažení g_2

Druhú časť stálych zaťažení prenáša spriahnutý oceľobetónový nosník. Keďže sa jedná o dlhodobu pôsobiacu zaťaženie, pri výpočte napätí v spriahnutom priereze je potrebné zohľadniť vplyv dotvarovania betónu. Na začiatku pôsobenia dlhodobého zaťaženia použijeme na výpočet normálových napätí prierezové charakteristiky rovnaké ako pre krátkodobé účinky.

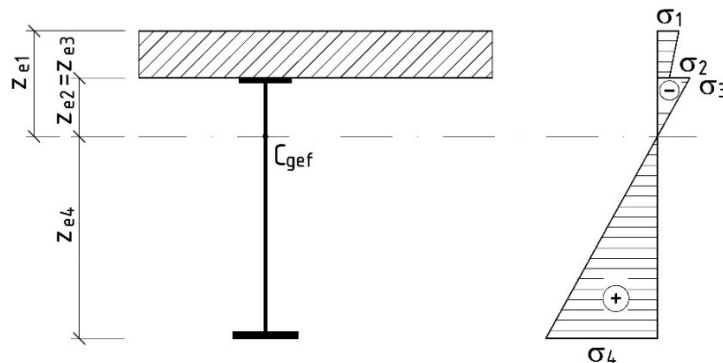
Napätia v čase začiatku pôsobenia zaťaženia ($t_0 = 30$ dní)

$$\sigma_{g2,1(30)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(30)} \cdot n_0} \cdot z_{e1(30)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{53,670 \cdot 10^{-3} \cdot 6,177} \cdot (-0,462) = -1,55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,2(30)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(30)} \cdot n_0} \cdot z_{e2(30)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{53,670 \cdot 10^{-3} \cdot 6,177} \cdot (-0,172) = -0,58 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,3(30)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(30)}} \cdot z_{e3(30)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{53,670 \cdot 10^{-3}} \cdot (-0,172) = -3,57 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,4(30)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(30)}} \cdot z_{e4(30)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{53,670 \cdot 10^{-3}} \cdot (+1,428) = +29,65 \text{ MPa}$$



Obrázok 5: Priebeh napätí v spriahnutom oceľobetónovom priereze

Napätia v čase uvedenia mostu do prevádzky ($t = 60$ dní) – zjednodušený výpočet

$$\sigma_{g2,1(60)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(60)} \cdot n_L} \cdot z_{e1(60)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{50,775 \cdot 10^{-3} \cdot 7,960} \cdot (-0,521) = -1,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,2(60)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(60)} \cdot n_L} \cdot z_{e2(60)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{50,775 \cdot 10^{-3} \cdot 7,960} \cdot (-0,231) = -0,64 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,3(60)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(60)}} \cdot z_{e3(60)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{50,775 \cdot 10^{-3}} \cdot (-0,231) = -5,07 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,4(60)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(60)}} \cdot z_{e4(60)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{50,775 \cdot 10^{-3}} \cdot (+1,369) = +30,05 \text{ MPa}$$

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Napätia na konci životnosti mosta ($t = 36\,525$ dní) – zjednodušený výpočet

$$\sigma_{g2,1(36\,525)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(36\,525)} \cdot n_L} \cdot z_{e1(36\,525)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{44,601 \cdot 10^{-3} \cdot 13,162} \cdot (-0,649) = -1,23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,2(36\,525)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(36\,525)} \cdot n_L} \cdot z_{e2(36\,525)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{44,601 \cdot 10^{-3} \cdot 13,162} \cdot (-0,359) = -0,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{g2,3(36\,525)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(36\,525)}} \cdot z_{e3(36\,525)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{44,601 \cdot 10^{-3}} \cdot (-0,359) = -8,98 \text{ MPa}$$

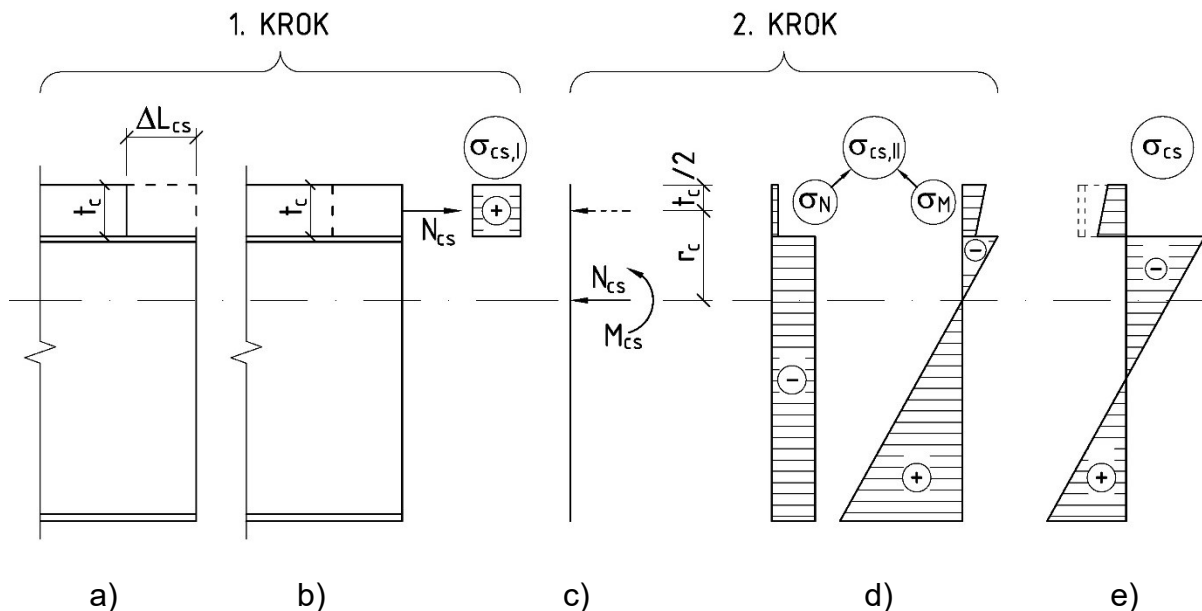
$$\sigma_{g2,4(36\,525)} = \frac{M_{g2,k}}{I_{y,ef(36\,525)}} \cdot z_{e4(36\,525)} = \frac{1\,114,5 \cdot 10^{-3}}{44,601 \cdot 10^{-3}} \cdot (+1,241) = +31,00 \text{ MPa}$$

Napätia od zmršťovania

Vplyv zmršťovania betónu je možné vypočítať pomocou „dvojkrokovej“ metódy. V prvom kroku predpokladáme, že oceľový nosník, brániaci voľnému skrúteniu betónovej dosky od účinkov zmršťovania, je dokonale tuhý. V dôsledku toho vzniknú v betónovej doske primárne normálové ťahové napätia $\sigma_{cs,I}$, rovnomerne rozdelené po hrúbke betónovej dosky (obr. 5):

$$\sigma_{cs,I}(t) = \varepsilon_{cs}(t) \cdot \frac{E_{cm}}{1 + \psi_L \cdot \phi(t, t_0)} = \varepsilon_{cs}(t) \cdot E_{cm} \cdot \frac{n_0}{n_L}$$

kde ε_{cs} je pomerné pretvorenie od zmršťovania, ktoré by v betónovej doske v čase t nastalo, ak by mu nebolo ničím bránené.



Obrázok 6: Napätosť v spriahnutom priereze od zmršťovania dosky
 a) voľné pretvorenie dosky, b) primárne ťahové napätie v doske, c) pôsobenie síl na spriahnutý prierez, d) zložky napätia, e) výsledný priebeh napätí

Napätia σ_{cs} môžu byť nahradené normálovou silou

$$N_{cs} = \sigma_{cs,l} \cdot A_c,$$

kde A_c je celková spolupôsobiaci plocha betónovej dosky (bez vplyvu šmykového ochabnutia). Proti sile N_c pôsobí vo fiktívnom podopretí rovnako veľká reakcia, ktorá po uvoľnení podopretia pôsobí v druhom kroku na spriahnutý prierez ako excentrická tlaková sila. Výsledné napätia v spriahnutom priereze získame superpozíciou napätí vypočítaných v oboch krokoch.

Celkové pomerné pretvorenie od zmrašťovania ε_{cs} je v zmysle STN EN 1992-1-1 zložené z dvoch zložiek, pomerného pretvorenia od zmrašťovania z vysychania ε_{cd} a pomerného pretvorenia od autogénneho zmrašťovania ε_{ca} :

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

Pomerné pretvorenie od zmrašťovania z vysychania v čase t vyplýva zo vzťahu

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot \varepsilon_{cd}(\infty).$$

Koeficient zohľadňujúci vývoj zmrašťovania z vysychania v čase $\beta_{ds}(t, t_s)$ sa vypočíta z výrazu

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0.04 \cdot \sqrt{h_0^3}},$$

kde t je vek betónu (v dňoch) v uvažovanom čase posúdenia a t_s je vek betónu (v dňoch) na začiatku zmrašťovania z vysychania, ktorý sa všeobecne uvažuje rovný času ošetrovania čerstvého betónu. V zmysle STN EN 1994-2 sa má predpokladať, že zmrašťovanie z vysychania začne pôsobiť od prvého dňa po vybetónovaní, tj. $t_s = 1$ deň.

Konečná hodnota pomerného pretvorenia od zmrašťovania z vysychania $\varepsilon_{cd}(\infty)$ je definovaná vzťahom

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

kde k_h je koeficient závislý od náhradnej výšky h_0 a je uvedený v tab. 2.

h_0	k_h
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Tabuľka 2: Hodnoty k_h

Základné pomerné pretvorenie od zmršťovania z vysychania $\varepsilon_{cd,0}$ je definované vzťahom

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH},$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - (RH/100)^3 \right],$$

kde f_{cm} je stredná hodnota pevnosti v tlaku (MPa) $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa, $f_{cm,0} = 10$ MPa, RH je relatívna vlhkosť ovzdušia a súčinitele α_{ds1} , α_{ds2} závislé od typu cementu môžu byť uvažované hodnotami:

- pre cement triedy S: $\alpha_{ds1} = 3$, $\alpha_{ds2} = 0,13$
- pre cement triedy N: $\alpha_{ds1} = 4$, $\alpha_{ds2} = 0,12$
- pre cement triedy R: $\alpha_{ds1} = 6$, $\alpha_{ds3} = 0,11$

Pomerné pretvorenie od autogénneho zmršťovania ε_{ca} je definované vzťahom

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty),$$

kde koeficient zohľadňujúci vývoj autogénneho zmršťovania v čase $\beta_{as}(t)$ sa vypočíta z výrazu

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2\sqrt{t}}$$

a konečná hodnota pomerného pretvorenia od autogénneho zmršťovania $\varepsilon_{ca,\infty}$ je daná výrazom

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

Pomerné pretvorenie od zmršťovania z vysychania:

V našom prípade budeme v súlade STN EN 1994-2 predpokladať, že zmršťovanie začne pôsobiť na spriahnutý nosník od prvého dňa po vybetónovaní ($t_s = 1$ deň) a použitý bude cement triedy N. Pri relatívnej vlhkosti prostredia $RH = 80\%$ platí:

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - (RH/100)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - 0,8^3 \right] = 0,7564$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{\left(-0,12 \cdot \frac{43}{10} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 0,7564 = 0,0002533$$

$$\beta_{ds}(60,1) = \frac{60 - 1}{(60 - 1) + 0,04 \cdot \sqrt{292^3}} = 0,22815$$

$$\beta_{ds}(36\,525,1) = \frac{36\,525 - 1}{(36\,525 - 1) + 0,04 \cdot \sqrt{292^3}} = 0,99456$$

$$h_0 = 292 \text{ mm} \Rightarrow k_h = 0,758 \Rightarrow \varepsilon_{cd}(\infty) = 0,758 \cdot 0,0002533 = 0,000192$$

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

$$\varepsilon_{cd}(60) = 0,22815 \cdot 0,000192 = 0,0000438$$

$$\varepsilon_{cd}(365250) = 0,99457 \cdot 0,000192 = 0,0001909$$

Pomerné pretvorenie od autogénneho zmrašťovania:

$$\beta_{as}(60) = 1 - e^{-0,2\sqrt{60}} = 0,78758$$

$$\beta_{as}(36\ 525) = 1 - e^{-0,2\sqrt{36\ 525}} = 1,00000$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (35 - 10) \cdot 10^{-6} = 0,0000625$$

$$\varepsilon_{ca}(60) = 0,78758 \cdot 0,0000625 = 0,0000492$$

$$\varepsilon_{ca}(36525) = 1,0 \cdot 0,0000625 = 0,0000625$$

Výsledné pretvorenie od zmrašťovania, ktoré by v betóne nastalo:

v čase 60 dní: $\varepsilon_{cs}(60) = 0,0000438 + 0,0000492 = 0,0000930$

v čase 100 rokov: $\varepsilon_{cs}(36525) = 0,0001909 + 0,0000625 = 0,0002534$

Napätia v čase uvedenia mostu do prevádzky ($t = 60$ dní)

Primárne ťahové normálové napätie v betónovej doske:

$$\sigma_{cs,l}(60) = \varepsilon_{cs}(60) \cdot E_{cm} \cdot \frac{n_0}{n_{L(60)}} = 0,0000930 \cdot 34\ 000 \cdot \frac{6,177}{8,386} = 2,33 \text{ MPa}$$

Zodpovedajúca tlaková normálová sila pôsobiaca na spriahnutý prierez:

$$N_{cs} = -2,33 \cdot 0,6322 = -1472,74 \text{ kN}$$

Moment od excentricity normálovej sily N_{cs} :

$$M_{cs} = -N_{cs} \cdot r_c = 1472,74 \cdot 0,389 = 572,51 \text{ kNm}$$

Výsledné napätia v spriahnutom priereze od zmrašťovania sú:

$$\sigma_{cs1} = \sigma_{cs,l} + \frac{1}{n_L} \cdot \left(\frac{N_{cs}}{A_{ef}} + \frac{M_{cs}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e1} \right) = 2,33 + \frac{1}{8,386} \cdot \left(\frac{-1472,74}{119,347} + \frac{572,51}{50,156} \cdot (-0,534) \right) = +0,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs2} = \sigma_{cs,l} + \frac{1}{n_L} \cdot \left(\frac{N_{cs}}{A_{ef}} + \frac{M_{cs}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e2} \right) = 2,33 + \frac{1}{8,386} \cdot \left(\frac{-1472,74}{119,347} + \frac{572,51}{50,156} \cdot (-0,244) \right) = +0,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs3} = \frac{N_{cs}}{A_{ef}} + \frac{M_{cs}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e3} = \frac{-1472,74}{119,347} + \frac{572,51}{50,156} \cdot (-0,244) = -15,12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs4} = \frac{N_{cs}}{A_{ef}} + \frac{M_{cs}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e4} = \frac{-1472,74}{119,347} + \frac{572,51}{50,156} \cdot (+1,356) = +3,14 \text{ MPa}$$

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Napätia na konci životnosti mostu ($t = 36\,525$ dní)

Primárne ťahové normálové napätie v betónovej doske:

$$\sigma_{cs}(36\,525) = \varepsilon_{cs,l}(36\,525) \cdot E_{cm} \cdot \frac{n_0}{n_{L(36\,525)}} = 0,0002534 \cdot 34\,000 \cdot \frac{6,177}{12,696} = 4,19 \text{ MPa}$$

Zodpovedajúca tlaková normálová sila a moment pôsobiace na spriahnutý prierez:

$$N_{cs} = -4,19 \cdot 0,6322 = -2650,28 \text{ kN}$$

$$M_{cs} = -N_{cs} \cdot r_c = 2650,28 \cdot 0,495 = 1311,49 \text{ kNm}$$

Výsledné napätia v spriahnutom priereze od zmrašťovania sú:

$$\sigma_{cs1} = 4,19 + \frac{1}{12,696} \cdot \left(\frac{-2650,28}{93,755} + \frac{1311,49}{45,054} \cdot (-0,640) \right) = +0,50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs2} = 4,19 + \frac{1}{12,696} \cdot \left(\frac{-2650,28}{93,755} + \frac{1311,49}{45,054} \cdot (-0,350) \right) = +1,16 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs3} = \frac{-2650,28}{93,755} + \frac{1311,49}{45,054} \cdot (-0,350) = -38,45 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cs4} = \frac{-2650,28}{93,755} + \frac{1311,49}{45,054} \cdot (+1,250) = +8,12 \text{ MPa}$$

Napätia od premenného zaťaženia dopravou

Skupina dopravných zaťažení „sk1a“ predstavuje krátkodobé zaťaženie, pri ktorom sa neprejaví vplyv dotvarovania betónu. Normálové napätia od tohto zaťaženia sú teda nezávislé od času posúdenia a ich veľkosť je:

$$\sigma_{sk1a,1} = \frac{M_{sk1a,k}}{I_{y,ef} \cdot n_0} \cdot z_{e1} = \frac{3893,20}{53,670 \cdot 6,176} \cdot (-0,462) = -5,43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sk1a,2} = \frac{M_{sk1a,k}}{I_{y,ef} \cdot n_0} \cdot z_{e2} = \frac{3893,20}{53,670 \cdot 6,176} \cdot (-0,172) = -2,02 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sk1a,3} = \frac{M_{sk1a,k}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e3} = \frac{3893,20}{53,670} \cdot (-0,172) = -12,48 \text{ MPa}$$

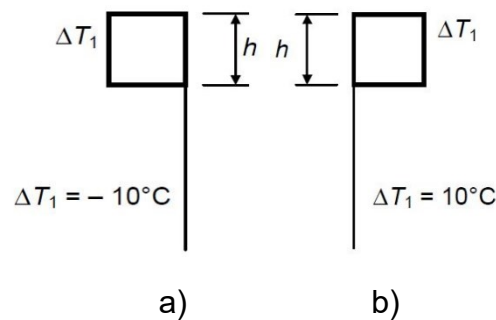
$$\sigma_{sk1a,4} = \frac{M_{sk1a,k}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e4} = \frac{3893,20}{53,670} \cdot (+1,428) = +103,58 \text{ MPa}$$

Napätia od teplotných zmien

Zaťaženia spôsobené účinkami teplotných zmien sú pojednávané v STN EN 1991-1-5. Ide o krátkodobé účinky, ktoré sú všeobecne charakterizované zložkou rovnomernej teploty a zložkami teplotného spádu.

Rozsah zmien rovnomernej zložky teploty mosta sa uplatní predovšetkým pri návrhu ložísk a dilatačných zariadení, ktoré musia tento účinok umožniť, aby nedošlo k vzniku nežiadúcej napätosti v konštrukcii. V prípade teplotného spádu sa obvykle uvažuje len so zvislou zložkou. V prípade spriahnutých ocelobetónových mostov je možné v bežných prípadoch uvažovať zjednodušený teplotný spád podľa obr. 7.

Nerovnomerná zmena teploty po výške spriahnutého prierezu spôsobí nerovnomerné dĺžkové pretvorenia zodpovedajúcich častí prierezu. Chladnejšia časť prierezu pri náhlom oteplení bráni voľnému predĺženiu teplejšej časti, resp. naopak, teplejšia časť bráni voľnému skráteniu chladnejšej časti pri náhlom ochladení. Výsledkom toho sú pozdĺžne normálové napätia. Vypočítame ich opäť v dvoch krokoch, podobne ako napätia od zmrašťovania betónu.



Obrázok 7: Zjednodušené teplotné spády pre spriahnuté nosné konštrukcie mostov
 a) pre ochladzovanie, b) pre ohrievanie (*h* je hrúbka dosky)

V prípade **nerovnomerného ochladenia** spriahnutého prierezu charakterizovaného teplotným spádom podľa obr. 7a vzniknú v prvom kroku v betónovej doske primárne ťahové napätia priamo úmerné veľkosti pomerného pretvorenia, ktoré by nastalo, ak by nebolo bránené skráteniu dosky fiktívnym podopretím:

$$\sigma_{\Delta T} = -\varepsilon_{\Delta T} \cdot E_{cm} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_{cm} = -10 \cdot 10^{-6} \cdot (-10) \cdot 34\,000 = 3,40 \text{ MPa.}$$

V druhom kroku po uvoľnení fiktívneho podopretia pôsobí na spriahnutý prierez zodpovedajúca tlaková normálová sila

$$N_{\Delta T} = -\sigma_{\Delta T} \cdot A_c = -3,40 \cdot 0,6322 = -2149,48 \text{ kN}$$

kde A_c je, podobne ako pri výpočte napätí od zmrašťovania, celková spolupôsobiaci plocha betónovej dosky (bez vplyvu šmykového ochabnutia). Excentricky pôsobiaci sila $N_{\Delta T}$ vyvodí ohybový moment:

$$M_{\Delta T} = -N_{\Delta T} \cdot r_c = 2149,48 \cdot 0,317 = 681,56 \text{ kNm}$$

Výsledné napätia v spriahnutom priereze od ochladenia betónovej dosky teda sú:

$$\sigma_{\Delta T1} = \sigma_{\Delta T} + \frac{1}{n_0} \cdot \left(\frac{N_{\Delta T}}{A_{ef}} + \frac{M_{\Delta T}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e1} \right) = 3,40 + \frac{1}{6,176} \cdot \left(\frac{-2149,48}{146,316} + \frac{681,56}{53,670} \cdot (-0,462) \right) = +0,07 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\Delta T2} = \sigma_{\Delta T} + \frac{1}{n_0} \cdot \left(\frac{N_{\Delta T}}{A_{ef}} + \frac{M_{\Delta T}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e2} \right) = 3,40 + \frac{1}{6,176} \cdot \left(\frac{-2149,48}{146,316} + \frac{681,56}{53,670} \cdot (-0,172) \right) = +0,67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\Delta T3} = \frac{N_{\Delta T}}{A_{ef}} + \frac{M_{\Delta T}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e3} = \frac{-2149,48}{146,316} + \frac{681,56}{53,670} \cdot (-0,172) = -16,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\Delta T4} = \frac{N_{\Delta T}}{A_{ef}} + \frac{M_{\Delta T}}{I_{y,ef}} \cdot z_{e4} = \frac{-2149,48}{146,316} + \frac{681,56}{53,670} \cdot (+1,428) = +3,44 \text{ MPa}$$

Normálové napätia od účinkov **nerovnomerného oteplenia** s teplotným spádom na obr. 7b budú rovnako veľké, len s opačným znamienkom ako v prípade ochladenia.

Posúdenie normálových napätí v priereze

Výsledné napätia získame superpozíciou napätí od všetkých zaťažení. Keďže sú uvažované dva premenné krátkodobé účinky zaťaženia, vyčíslime napätia pre charakteristickú kombináciu zaťaženia so zaťažením dopravou ako dominantným zaťažením a zaťažením účinkami teploty ako sprievodným zaťažením, pre ktoré sa uplatní súčiniteľ kombinácie zaťaženia $\psi_0 = 0,6$. výpočet a posúdenie normálových napätí v krajných vláknoch prierezu sú uvedené v **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..**

Zaťaženia		Napätia od jednotlivých zaťažení (MPa)							
		V čase 60 dní				V čase 36 525 dní			
		σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
1. časť stálych zaťažení	σ_{g1}	0,00	0,00	-120,14	91,01	0,00	0,00	-120,14	91,01
2. časť stálych zaťažení	σ_{g2}	-1,34	-0,69	-6,36	30,39	-1,13	-0,71	-10,67	31,42
Zmrašťovanie	σ_{cs}	0,13	0,53	-15,12	3,14	0,50	1,16	-38,45	8,12
Zaťaženie dopravou	σ_{sk1a}	-5,43	-2,02	-12,48	103,58	-5,43	-2,02	-12,48	103,58
Teplota - ochladenie	$\sigma_{\Delta T-}$	0,07	0,67	-16,88	3,44	0,07	0,67	-16,88	3,44
Teplota - oteplenie	$\sigma_{\Delta T+}$	-0,07	-0,67	16,88	-3,44	-0,07	-0,67	16,88	-3,44
$(g_1+g_2+cs+sk1a+\psi_0 \cdot \Delta T_-)$	$\sigma_{x,Ed}$	-6,59	-1,78	-164,23	230,19	-6,02	-1,17	-191,87	236,20
$(g_1+g_2+cs+sk1a+\psi_0 \cdot \Delta T_+)$	$\sigma_{x,Ed}$	-6,67	-2,58	-143,98	226,06	-6,10	-1,97	-171,61	232,07
Pevnosť materiálu	f_{ck}, f_y	35,00	35,00	355,00	355,00	35,00	35,00	355,00	355,00

Tabuľka 3: Posúdenie normálových napätí

Z tabuľky je zrejmé, že **prierez spriahnutého oceľobetónového nosníka vyhovuje**.

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja