

NÁVRH RADIÁLNÍHO PŘEDPĚTÍ ZTUŽUJÍCÍCH PRESTENCŮ HYPERBOLICKÝCH KONSTRUKCÍ

*Aleš Pražák, **

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
ales.prazak@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek, který se zakládá z postupu a výsledků disertační práce, řeší návrh radiálního předpětí ztužujících částí konstrukce rotačního hyperboloidu, čímž jsou konstrukce tahového komínu chladicích věží s přirozeným tahem. Tento postup se však dá použít i pro válcové konstrukce, například technologických nádrží čističek odpadních vod. Posudky řešené v této části práce se zakládají na konstrukčních detailech navržených v předešlých etapách výzkumu. Jedná se o půdorysné a výškové vedení kabelů předpínací výztuže, jejich půdorysné rozdělení z důvodu zachování velikosti chtěné předpínací síly a detail kotevních oblastí z důvodu minimalizace ztrát radiálního předpětí v těchto místech. Takto navržené předpětí je nyní posuzováno z důvodu vznikajících ztrát radiálního předpětí, dotvarování a smršťování betonu a dle výsledků je opět optimalizován původní návrh předpětí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chladicí věž • Radiální předpětí • Ztráty předpětí • Dotvarování • Smršťování

ABSTRACT

This paper is based on the progress and results of the dissertation thesis, is solved design of post-tensioned radial reinforcement of reinforcement parts hyperbolic structures. Mainly they are structures of natural draft cooling towers, but a similar design can be used for technological tanks of wastewater treatment plant. Assessments solved in this part of research are based on design details proposed in the previous stages of the research. It is mainly about floor and elevation design of prestress cables, their floor radial distribution and details of anchor areas, to minimize losses of prestressing and maintain the desired prestressing force. This prestressing design being solved nowadays, due to prestressing losses, creep and shrinkage.

KEYWORDS

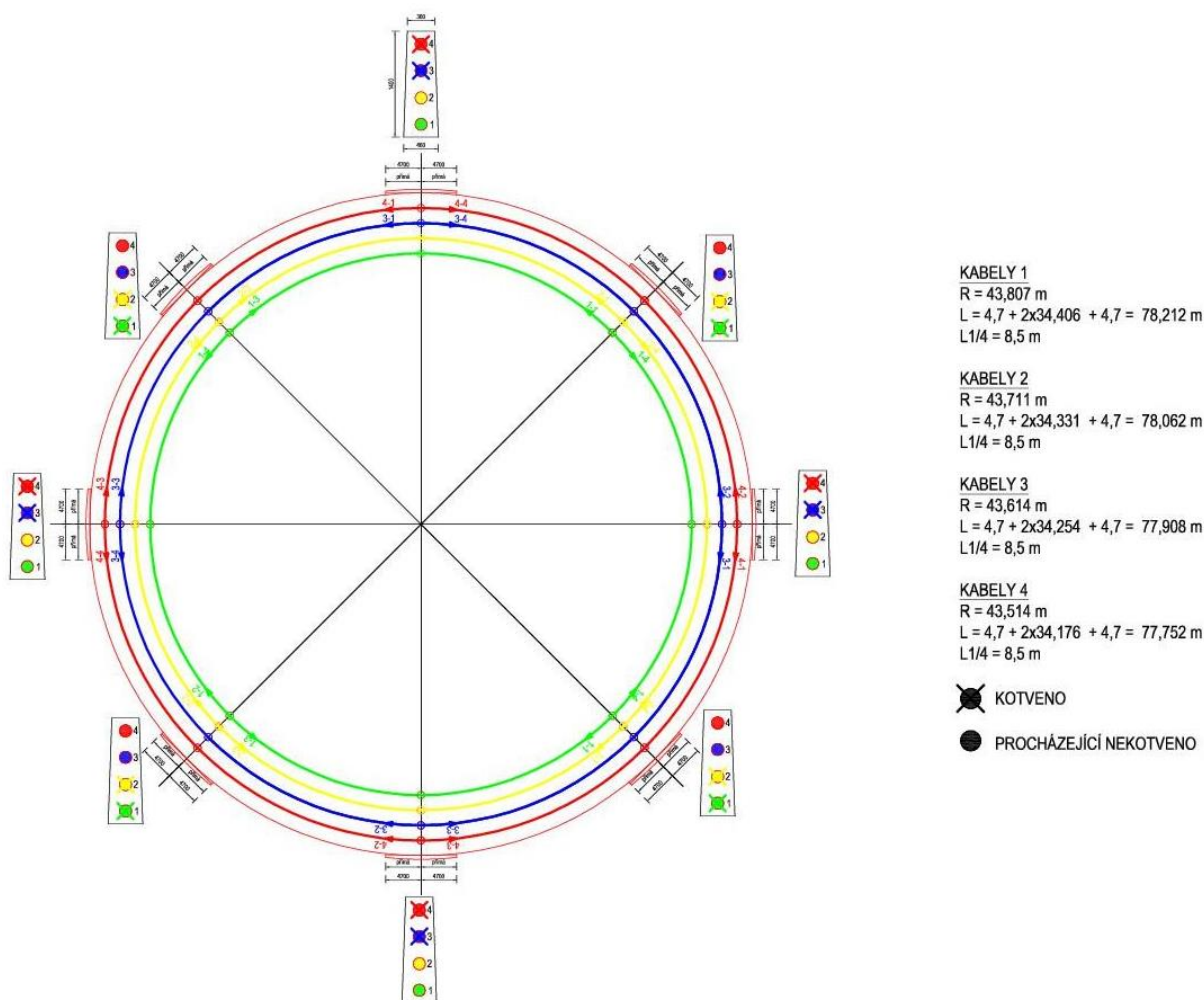
Cooling tower • Radial prestress • Prestressing losses • Creep • Shrinkage

1. ÚVOD

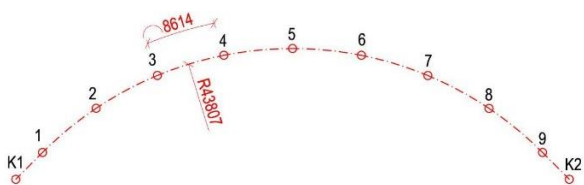
V rámci disertační práce, je prováděna analýza exponovaných konstrukcí skořepinových konstrukcí, čímž jsou hlavně ztužující prstence, z nichž nejvíce zatížený je spodní ztužující prsteneček, tedy návodní křídlo tahového komínu konstrukce chladicí věže s přirozeným tahem. U návodního křídla těchto specifických skořepinových konstrukcí je v tomto výzkumu zkoumáno využití radiálního předpětí pro možnou optimalizaci návrhu této exponované části konstrukce chladicí věže. Tento článek se přímo zaměřuje na posouzení navrženého předpětí v předešlých fázích výzkumu z pohledu minimalizování ztrát radiálního předpětí v součinnosti s dotvarováním a smršťováním betonu. Dle výsledků je následně optimalizován návrh půdorysného a výškového vedení předpínacích kabelů radiálního předpětí a jeho půdorysného rozdělení s ohledem na minimalizování vznikajících ztrát. Podobně je upraven návrh oblasti kotev předpětí.

2. NÁVRH RADIÁLNÍHO PŘEDPĚTÍ

V rámci výzkumu je prozatím řešeno předpětí pouze v druhém betonážním prstenci od vetknutí stojek chladicí věže. Po výšce betonážního taktu, který má výšku 1,40 m, jsou uvažovány čtyři 19ti lanové kabely. Půdorysně je prsteneček konstrukce chladicí věže v řešené výšce rozdělen na osminy. Kabely střídavě prochází přes 2/8. V každé 1/8 prochází vždy 50% kabelů a 50% je kotveno. Půdorysný a výškový průběh kabelů můžeme vidět na Obrázku 1. Takto navržené kabely v jednotlivých výškách, jejichž délky jsou vidět právě na Obrázku 1 jsou následně rozděleny na deset dílů. Z těchto deseti délek je první a poslední půdorysně přímá od kotvy k dosažení křivosti dle střednice stěny v dané výšce vedení kabelu. Zbylých osm délek je stejně dlouhých, se stejnou křivostí. Tyto body se pro kabely vedené v jednotlivých výškách půdorysně překrývají. Jedná se o kontrolní body ve kterých bude kontrolováno chování předpínacích kabelů z čehož bude vycházet celkové předpětí, které je nutné pro efektivnost takové optimalizace takto štíhlé konstrukce. V rámci práce jsou posuzovány jednotlivé ztráty předpětí spolu s reologickým chováním betonu v daném místě. V kotevních oblastech je křížení předpínacích kabelů jedné výšky řešeno výškově tak, aby bylo minimalizován vznik nechtěných vnitřních sil.



obrázek 1: Schéma půdorysného vedení a rozdělení předpínacích kabelů.



Obrázek 2: Schéma půdorysného rozdělení jednoho kabelu.

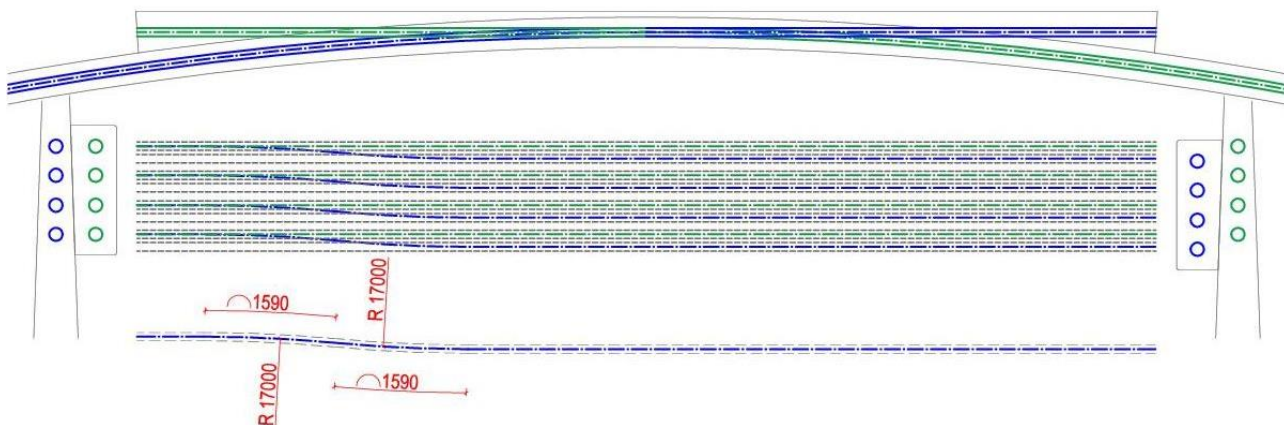
2.1. Vedení předpínací výztuže – kotevní oblasti

V místě kotevních oblastí je nutné vedení předpínacích kabelů půdorysně a výškově křížit. Křížení musí být navrženo tak, aby vznikaly co nejmenší ohybové momenty, které by redukovaly čtěnou předpínací sílu v procházejících kabelech. I přes to, že se jedná o ztuzující prstevce, celé konstrukce tahového komínu chladicí věže, je konstrukce v tomto místě velmi štíhlá a návrh křížení předpínací výztuže není snadný, hlavně z konstrukčních důvodů. Návrh křížení je znázorněn na Obrázku č. 3, kde je znázorněno křížení kabelů v jednotlivých výškách. Tvar a rozměry náliček pro umístění kotev předpínací

výztuže nebyly zatím nijak detailně řešeny, pouze konstrukčními zásadami. Byl navržen asi nejjednodušší a nejefektivnější způsob křížení v tomto exponovaném místě. V kotevních náličkách jsou kabely předpínací výztuže vedeny půdorysně přímo, aby se redukovaly ztráty vznikající v opačně zakřiveném oblouku než je střednice stěny tahového komínu, i přes vznik dalších ohybových momentů v těchto místech.

3. ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ

Pro výše uvedené půdorysné a výškové vedení kabelů jsou následně posuzovány a kontrolovány krátkodobé a dlouhodobé ztráty předpětí spolu s vlivem dotvarování a smršťování betonu. Pro krátkodobé ztráty jsou posuzovány ztráty třením a pokluz v kotvě. Pro navržený čas spuštění do provozu a navrhovaný konec životnosti konstrukce jsou posuzovány jako dlouhodobé ztráty relaxací předpínací výztuže a ztráty dotvarováním a smršťováním betonu.



Obrázek 3: Půdorysné a výškové křížení kabelů v kotvěni oblasti.

3.1. Krátkodobé ztráty

Pro posudek krátkodobých ztrát navrhovaných předpínacích kabelů byly pro prvotní návrhy zvoleny okamžité ztráty třením a pokluzu v kotvě.

Pro výpočet ztrát předpínací výztuže třením je jako vstupní parametr úhlová změna a délka jednotlivých délek kabelu, ve kterých se mění jeho křivost nebo jako v našem případě, kdy se jedná o rozdělení kontrolními body. V tabulce 1 vidíme ztráty vznikající od tření na námi navrženém půdorysném vedení kabelů předpínací výztuže z obou stran.

Tabulka 1: Krátkodobé ztráty – ztráty třením.

| BOD | ÚHLOVÁ ZMĚNA [°] | ÚHLOVÁ ZMĚNA [rad] | DĚLKA "L" [m] | $\Delta\sigma_{p,1-1}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,1-2}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,1}$ [MPa] | Ztráty [%] |
|-----|------------------|--------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|
| K1 | 0,0000 | 0,0000 | 0 | 0,00 | -193,53 | -193,53 | 13,78429 |
| 1 | 0,0000 | 0,0000 | 4,7 | -12,48 | -497,82 | -497,82 | 35,45704 |
| 2 | 11,2481 | 0,1963 | 13,3 | -85,16 | -447,88 | -447,88 | 31,90042 |
| 3 | 22,4961 | 0,3926 | 21,9 | -154,04 | -395,20 | -395,20 | 28,14781 |
| 4 | 33,7442 | 0,5889 | 30,5 | -219,32 | -339,61 | -339,61 | 24,18842 |
| 5 | 45,0000 | 0,7854 | 39,0 | -281,07 | -281,07 | -281,07 | 20,01928 |
| 6 | 56,2558 | 0,9818 | 47,6 | -339,61 | -219,32 | -339,61 | 24,18842 |
| 7 | 67,5039 | 1,1782 | 56,2 | -395,20 | -154,04 | -395,20 | 28,14781 |
| 8 | 78,7519 | 1,3745 | 64,8 | -447,88 | -85,16 | -447,88 | 31,90042 |
| 9 | 90,0000 | 1,5708 | 73,4 | -497,82 | -12,48 | -497,82 | 35,45704 |
| K2 | 0,0000 | 0,0000 | 78,1 | -193,53 | 0,00 | -193,53 | 13,78429 |

Další okamžitou posuzovanou ztrátou předpínací výztuže je ztráta pokluzem v kotvě. Zde se na začátku výpočtu zavede předpoklad, kde by mělo dojít k vymizení ztráty pokluzem (např. v oblouku č.1, čímž je myšleno v našem případě mezi body 1-2 z Obrázku č. 2) a následně je proveden výpočet ztrát z obou stran předpínacího kabelu. V tabulce 2 vidíme vznikající ztráty předpínací výztuže od pokluzu v kotvě pro půdorysné vedení zvoleného kabelu.

Tabulka 2: Krátkodobé ztráty – pokluz v kotvě.

| BOD | 1 - strana | | | | 2 - strana | | | |
|-----|-------------------------|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------|------------------------|---------------------|
| | ÚHLOVÁ ZMĚNA alfa [rad] | DĚLKA [m] | $\Delta\alpha$ [rad/m] | ZMĚNA NAPĚTÍ [MPa] | ÚHLOVÁ ZMĚNA alfa [rad] | DĚLKA [m] | $\Delta\alpha$ [rad/m] | ZMĚNA NAPĚTÍ [MPa] |
| K1 | - | - | - | -175,20 | - | - | - | 0,00 |
| 1 | 0,00000 | 4,70 | 0,00000 | p_1 2,665 -150,15 | 0,00000 | 4,70 | 0,00000 | p_2 2,665 0,00 |
| 2 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 |
| 3 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_2 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_2 8,730 0,00 |
| 4 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 |
| 5 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 |
| 6 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 |
| 7 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 |
| 8 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_2 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_2 8,730 0,00 |
| 9 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 0,00 | 0,19632 | 8,60 | 0,02283 | p_1 8,730 -150,15 |
| K2 | 0,00000 | 4,70 | 0,00000 | p_1 2,665 0,00 | 0,00000 | 4,70 | 0,00000 | p_2 2,665 -175,20 |

V tabulce 3 již vidíme výsledné vzniklé ztráty po zvolených krátkodobých ztrátách předpínací výztuže.

Tabulka 3: Krátkodobé ztráty – celkové ztráty.

| BOD | $\Delta\sigma_{p,1,i}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,2,i}$ [MPa] | $\sigma_{p,0,max}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,0}$ [MPa] | μ [-] |
|-----|------------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------|
| K1 | -193,53 | -175,20 | 1404,00 | 1035,26 | 0,58 |
| 1 | -497,82 | -150,15 | 1404,00 | 756,03 | 0,43 |
| 2 | -447,88 | 0,00 | 1404,00 | 956,12 | 0,54 |
| 3 | -395,20 | 0,00 | 1404,00 | 1008,80 | 0,57 |
| 4 | -339,61 | 0,00 | 1404,00 | 1064,39 | 0,60 |
| 5 | -281,07 | 0,00 | 1404,00 | 1122,93 | 0,63 |
| 6 | -339,61 | 0,00 | 1404,00 | 1064,39 | 0,60 |
| 7 | -395,20 | 0,00 | 1404,00 | 1008,80 | 0,57 |
| 8 | -447,88 | 0,00 | 1404,00 | 956,12 | 0,54 |
| 9 | -497,82 | -150,15 | 1404,00 | 756,03 | 0,43 |
| K2 | -193,53 | -175,20 | 1404,00 | 1035,26 | 0,58 |

3.2. Dlouhodobé ztráty

Dále jsou posuzovány a kontrolovány ztráty, jejichž vznik a vývoj není okamžitý po předepnutí. Jeden z těchto jevů je relaxace předpínací výztuže, která je kromě času závislá i na úrovni vneseného napětí do předpínací výztuže.

Tabulka 4: Dlouhodobé ztráty – ztráta relaxací.

| | 100 let | 5 min | 100 dní | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $\Delta\sigma_{p,r}$ kapacita [MPa] | $\Delta\sigma_{p,r}$ korekce [MPa] | $\Delta\sigma_{p,r}^{100}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,3}^{100}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,3}^{100}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,3}^{100}$ [MPa] |
| -24,23 | 0,19 | -4,60 | -4,41 | -24,04 | |
| -8,78 | 0,01 | -0,89 | -0,88 | -8,77 | |
| -18,35 | 0,08 | -2,91 | -2,83 | -18,26 | |
| -22,09 | 0,14 | -3,95 | -3,80 | -21,95 | |
| -26,80 | 0,25 | -5,43 | -5,18 | -26,55 | |
| -32,74 | 0,45 | -7,57 | -7,12 | -32,29 | |
| -26,80 | 0,25 | -5,43 | -5,18 | -26,55 | |
| -22,09 | 0,14 | -3,95 | -3,80 | -21,95 | |
| -18,35 | 0,08 | -2,91 | -2,83 | -18,26 | |
| -8,78 | 0,01 | -0,89 | -0,88 | -8,77 | |
| -24,23 | 0,19 | -4,60 | -4,41 | -24,04 | |

V tabulce 5 můžeme vidět ztráty na předpínací výztuži po relaxaci, ale také velikost zbylé předpínací síly v daném kabelu.

V následující tabulce (Tabulka 6) jsou vypočteny ztráty od dotvarování a smršťování betonu. V důsledku dotvarování dochází k nárůstu deformací tlačeneho prvku. V důsledku smršťování betonu dochází ke zkrácení betonového prvku jako celku. Tedy důsledkem obou jevů je zkrácení prvku i

soudržné předpínací výztuže. Zkrácení předpínací výztuže vyvolá snížení jejího napětí.

Ztráta relaxací předpínací výztuže, ztráta dotvarováním a smršťováním se vzájemně ovlivňují.

Pro výpočet ztrát předpínací výztuže byl zde částečně využit program od pana Doc. Vráblíka C&S, který vychází z modelu B3.

Tabulka 5: Dlouhodobé ztráty – po relaxaci kabelu.

| BOD | $\Delta\sigma_{p,1,i}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,2,i}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,3(100\text{ dní}),i}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,3(100\text{ let}),i}$ [MPa] | $\sigma_{p,0,\text{max}}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,0(100\text{ dní}),i}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,0(100\text{ let}),i}$ [MPa] | $N_{p,0(100\text{ dní})}$ [kN] | $N_{p,0(100\text{ let})}$ [kN] |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|---|---|------------------------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| K1 | -193,53 | -175,20 | -4,41 | -24,04 | 1404,00 | 1030,86 | 1011,22 | 2937,94 | 2881,98 |
| 1 | -497,82 | -150,15 | -0,88 | -8,77 | 1404,00 | 755,16 | 747,26 | 2152,19 | 2129,68 |
| 2 | -447,88 | 0,00 | -2,83 | -18,26 | 1404,00 | 953,29 | 937,85 | 2716,88 | 2672,88 |
| 3 | -395,20 | 0,00 | -3,80 | -21,95 | 1404,00 | 1005,00 | 986,85 | 2864,25 | 2812,53 |
| 4 | -339,61 | 0,00 | -5,18 | -26,55 | 1404,00 | 1059,22 | 1037,85 | 3018,77 | 2957,86 |
| 5 | -281,07 | 0,00 | -7,12 | -32,29 | 1404,00 | 1115,81 | 1090,64 | 3180,05 | 3108,32 |
| 6 | -339,61 | 0,00 | -5,18 | -26,55 | 1404,00 | 1059,22 | 1037,85 | 3018,77 | 2957,86 |
| 7 | -395,20 | 0,00 | -3,80 | -21,95 | 1404,00 | 1005,00 | 986,85 | 2864,25 | 2812,53 |
| 8 | -447,88 | 0,00 | -2,83 | -18,26 | 1404,00 | 953,29 | 937,85 | 2716,88 | 2672,88 |
| 9 | -497,82 | -150,15 | -0,88 | -8,77 | 1404,00 | 755,16 | 747,26 | 2152,19 | 2129,68 |
| K2 | -193,53 | -175,20 | -4,41 | -24,04 | 1404,00 | 1030,86 | 1011,22 | 2937,94 | 2881,98 |

Tabulka 6: Dlouhodobé ztráty – dotvarování a smršťování

| BOD | A1 | A2 | B | C | A1+B+C | A2+B+C | DOTVAROVÁNÍ | | SMRŠŤOVÁNÍ | | NA KONCI ŽIVOTNOSTI | |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|---|--|--|--|--|---------------------------|----------------------|
| | $N_{p,0}/A_i$ (100 DNÍ) [MPa] | $N_{p,0}/A_i$ (100 LET) [MPa] | $N_{p,0} * e_{p,i}^2 / l_{y,i}$ [MPa] | $N_{p,0} * e_{p,i} / l_{y,i}$ [MPa] | σ_{cp}^{g+p} (100 DNÍ) [MPa] | σ_{cp}^{g+p} (100 LET) [MPa] | $\Delta\sigma_{p,4}^{100\text{ dní}}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,4}^{100\text{ let}}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,5}^{100\text{ dní}}$ [MPa] | $\Delta\sigma_{p,5}^{100\text{ let}}$ [MPa] | $\sigma_{p,\infty}$ [MPa] | $N_{p,\infty}$ [MPa] |
| K1 | -5,216 | -5,116 | -12,73 | 1,13 | -16,81 | -16,71 | -129,62 | -425,53 | -13,49 | -85,14 | 500,56 | 1,427 |
| 1 | -3,821 | -3,781 | -9,32 | 1,13 | -12,01 | -11,97 | -92,62 | -304,84 | | | 357,28 | 1,018 |
| 2 | -4,823 | -4,745 | -11,77 | 1,13 | -15,46 | -15,38 | -119,21 | -391,69 | | | 461,03 | 1,314 |
| 3 | -5,085 | -4,993 | -12,41 | 1,13 | -16,36 | -16,27 | -126,15 | -414,26 | | | 487,46 | 1,389 |
| 4 | -5,359 | -5,251 | -13,08 | 1,13 | -17,30 | -17,20 | -133,43 | -437,88 | | | 514,83 | 1,467 |
| 5 | -5,645 | -5,518 | -13,78 | 1,13 | -18,29 | -18,16 | -141,03 | -462,47 | | | 543,03 | 1,548 |
| 6 | -5,359 | -5,251 | -13,08 | 1,13 | -17,30 | -17,20 | -133,43 | -437,88 | | | 514,83 | 1,467 |
| 7 | -5,085 | -4,993 | -12,41 | 1,13 | -16,36 | -16,27 | -126,15 | -414,26 | | | 487,46 | 1,389 |
| 8 | -4,823 | -4,745 | -11,77 | 1,13 | -15,46 | -15,38 | -119,21 | -391,69 | | | 461,03 | 1,314 |
| 9 | -3,821 | -3,781 | -9,32 | 1,13 | -12,01 | -11,97 | -92,62 | -304,84 | | | 357,28 | 1,018 |
| K2 | -5,216 | -5,116 | -12,73 | 1,13 | -16,81 | -16,71 | -129,62 | -425,53 | 500,56 | 1,427 | | |

4. ZÁVĚR

Zatím získaná data jsou podkladem pro následnou úpravu půdorysného a výškového trasování jednotlivých kabelů předpínací výztuže. Ztráty na návrzích jsou nyní ještě velmi vysoké. Jednou z možností při ponechání geometrie vedení kabelů předpínací výztuže by mohlo být použití lan s nízkou relaxací nebo dále omezit ztráty relaxací podržením napětí při předpínání. Další možností je půdorysné rozdělení na menší díly, s kratšími délkami kabelů a použití nesoudržné výztuže, čímž by se ovšem částečně snížily příčné účinky předpětí.