

# NÁVRH A REALIZÁCIA DUTÉHO PREDPÄTÉHO BETÓNOVÉHO STOŽIARU

Milan Chandoga (1)  
Martin Moravčík (2)  
Matúš Orlovský, Peter Ivan (3)

## Abstrakt

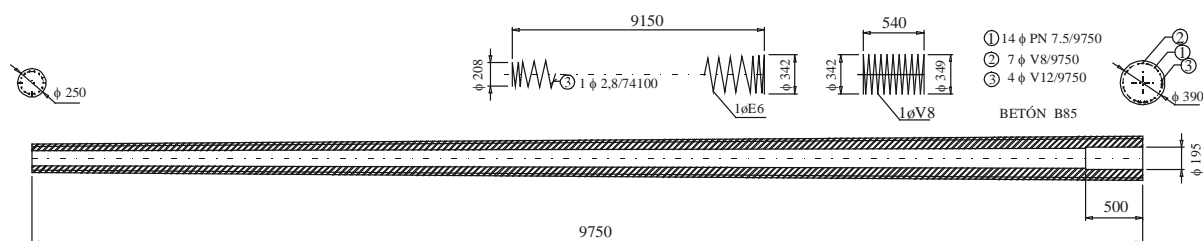
Článok sa zaoberá návrhom, realizáciou a experimentálnym overením únosnosti a pretvorenia predpäťého betónového stožiaru pre trakčné vedenie. Stožiar je dutý, kónického tvaru, s kruhovým prierezom a meniacim sa polomerom po výške. Navrhované stožiare boli určené pre výšky od 9,0 m do 14 m. Požiadavka investora na realizáciu takýchto stožiarov pre trakčné vedenie vychádzala z návrhu prierezu s bezpečnosťou 1,4 a vzhľadom k určenému vrcholovému ťahu bola limitujúcou hodnotou deformácia vo vrchole stožiaru udávaná ako 1,5 % nadzemnej výšky.

## 1. Úvod do problematiky a popis stožiaru a technológie

Na základe požiadavky objednávateľa bola vypracovaná štúdia pre návrh predpäťých dutých betónových stožiarov. Uvedené betónové prvky budú slúžiť ako stožiare pre trakčné vedenie.

Základnou úlohou celej štúdie bolo navrhnúť optimálne parametre jednotlivých prierezov a vystuženia resp. predpätia pre daný kónický tvar stožiaru. Pre tento účel boli vytypované charakteristické stožiare pre nadzemné výšky od 8,5 m po 14,0 m odstupňované po 0,5 m. Ako ďalšie vstupné údaje boli k dispozícii hodnoty vrcholových ťahov pre jednotlivé dĺžky (typy) stožiarov.

Podrobná analýza ako aj experimentálne overenie bolo vykonané na stožiaru pre nadzemnú výšku 9,5 m, a s celkovou dĺžkou 9,75 m. Hrúbka steny je premenlivá, s nasledovnými parametrami - vo vrchole 60 mm, v päte 100 mm. Stožiar je vyrobený z monolitického vopred predpäťého betónu triedy B 80. Navrhnuté boli predpínacie jednotky z drôtu PN 7,5 mm/1670 MPa, v počte 14 ks, rovnomerne rozmiestnené po obvode prierezu. Dispozičná schéma tvaru a vystuženie stožiaru pre celkovú dĺžku 9,75 m je na obr. 1.



Obr. 1 Výkres tvaru a vystuženia riešeného stožiaru.

- (1) Doc. Ing., CSc., SvF STU Bratislava, KBKaM, Radlinského 11, Bratislava, PROJSTAR PK s.r.o.  
(2) Ing., PhD., SvF ŽU Žilina, KSKM, Komenského 52, 010 26 Žilina,  
(3) Ing. ELV PRODUKT a.s., Nitrianska 3, 903 12 Senec.

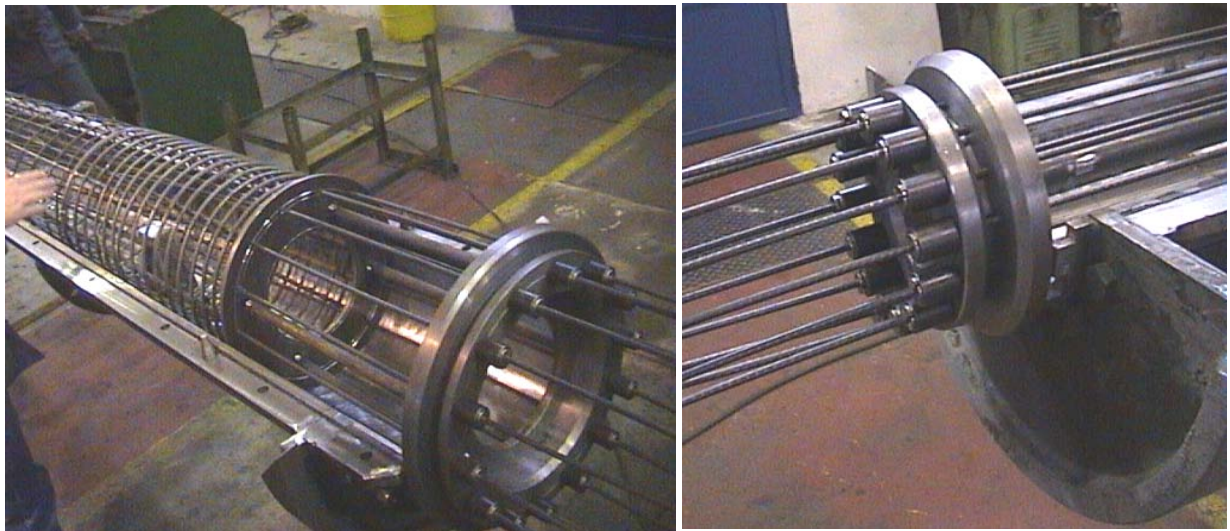
Stožiar je vyrobený technológiou odstredovania z vopred predpäťého betónu triedy B85. Pevnosť betónu po 28 dňoch 89,8 MPa bola dosiahnutá vďaka nasledovnému zloženiu :

- cement CEM I 42,5R, kamenivo frakcie 0-4, 8-16,
- Mikrosilika,
- Hyperplastifikátor BERAMENT HT1;

Teplota betónu po zamiešaní 20,2 °C; Objem zámesu 0,68m<sup>3</sup>. Konzistencia (sadanie kužeľa) 160mm –po zamiešaní, 130 mm – po 15 min., 90 mm – po 30 min., 60 mm - po 60 min. Priemerná pevnosť v tlaku po 1 dni 50,5 MPa.

Na predpätie stožiara boli použité predpínacie drôty PNØ7,5mm/1670MPa, ktoré sú kotvené v individuálnych kotvičkách PAUL A30-22. Ako priečna výstuž bola navrhnutá skrutkovica z ocele  $\phi$  E 6 mm, a v päte stožiara umiestnená skrutkovica z  $\phi$  E 8 mm na dĺžke 540 mm.

Samonosná oceľová forma je vyrobená z dvoch dielov. Silnostenná oceľová kónická rúra spolu s pozdĺžnymi výstuhami, je navrhnutá na prenos celkovej predpínacej sily 840 kN. Na oboch koncoch formy sa nachádzajú masívne oceľové čelá, ktoré plnia funkciu roznášacích dosiek pre systém jednolanových kotvičiek, pozri obr. 2.



Obr. 2 Pohľad na predkotvenú predpínaciu výstuž a čelo formy

Pred ukladaním betónovej zmesi sa všetka predpínacia výstuž napne na cca. 5-10% aby sa dosiahlo jej napriamenie. V tomto štádiu prenáša silu len dolná časť formy. Po uložení betónu (pozri obr. 3) sa forma uzavrie a dokončí sa napínanie predpínacej výstuže. Na napínanie predpínacej výstuže sme použili zariadenie PAUL TENSA SM 200kN, s upraveným úchytým blokom pre drôt priemeru 6-9 mm (pozri obr.4). Okrem sily bolo kontrolované aj predĺženie. Vzhľadom na špecifické vlastnosti betónu bolo potrebné zvládnuť napínanie vo veľmi krátkom čase, cca. 25 min. Samotné odstredovanie betónu trvalo 7 min. Uvoľnenie predpätia rozrezaním drôtov a odformovanie prvku sa uskutočnilo po 46 hodinách od odstredovania. Vlastná výroba prvku od začiatku armovacích prác až po odstredovanie trvala 2 hodiny 10 minút.



Obr. 3 Betonáž stĺpu



Obr. 4 Napínanie drôtov lisom PAUL  
TENZA SM 200 kN

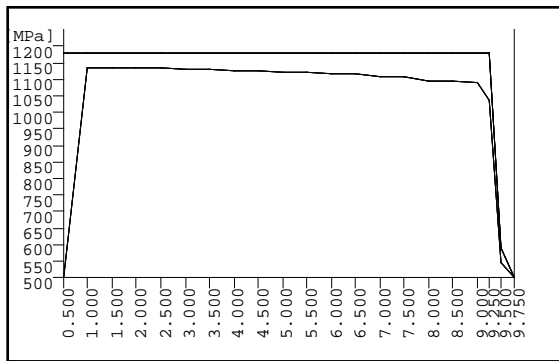
## 2. Výpočtový model a numerická analýza

Návrh a posúdenie parametrov stožiaru vychádzali zo základnej podmienky limitného priehybu vo vrchole stožiaru, ktorý bol objednávateľom stanovený ako 1,5 % nadzemnej výšky. Potrebný počet drôtov (lán pre ďalšie typy stožiarov), typ a predpínacia sila boli odvodené z podmienky plného predpätia v kritických prierezoch prvku na konci životnosti, teda s uvažovaním dlhodobých strát predpätia. Snahou bolo teda zamedziť vzniku trhlin v betóne a následnému zväčšeniu deformácie a rovnako celkovému zvýšeniu odolnosti a trvanlivosti stožiaru.

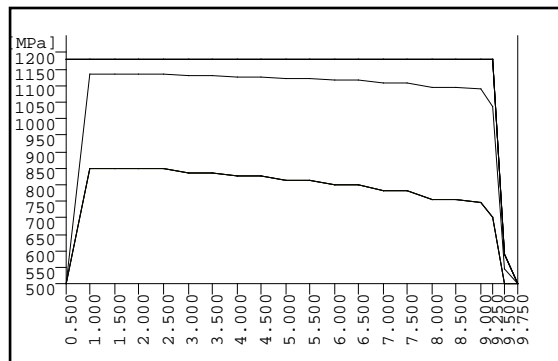
Rozhodujúce zaťaženie pre daný typ stožiaru predstavovalo zaťaženie vrcholovým ťahom s hodnotou 6,7 kN, ktoré nahrádzalo účinky reálneho prevádzkového zaťaženia a statického vetra so súčiniteľom zaťaženia 1,4. Statická analýza bola vykonaná na báze konečných prvkov s využitím výpočtového systému NEXIS a jeho modulov pre analýzu predpätých konštrukcií. Úloha bola rozdelená do dvoch fáz. Najprv ako rovinná úloha na 1D elementoch s po dĺžke premenným prierezom, pre stanovenie deformácií a globálnych účinkov predpätia, so zohľadnením fáz realizácie prvku. V druhej fáze bola úloha riešená na priestorovom škupinovom modeli konštrukcie.

Skutočný priebeh predpínacej sily so zahrnutím krátkodobých strát predpätia (krátkodobá relaxácia ocele) a dlhodobých strát (zvyšková relaxácia ocele, zmrašťovanie, dotvarovanie betónu) po dĺžke stožiaru dokumentuje obr. 5. Časová os bola volená nasledovne : zavedenie predpätia – 5 dní od vybetónovania, začiatok pôsobenia prevádzkového zaťaženia 1 mesiac, koniec prevádzky cca 30 rokov.

Charakteristické veličiny, ako sú moment na medzi vzniku trhliny  $M_{cr}$  a moment na medzi únosnosti  $M_u$  v štádiu prvku pri zaťažovacej skúške (krátkodobé) a v štádiu na konci životnosti (dlhodobé) boli riešené podľa normy [1], vzťahy (1), (2). Poloha neutrálnej osi v medznom bola určená interpoláciou.



a) krátkodobé straty



b) dlhodobé straty

Obr. 5 Priebeh predpínacej sily po dĺžke prvku

$$M_{cr} = \left[ \frac{\gamma_p \cdot N_p}{A_i} + \left( \frac{\gamma_p \cdot N_p \cdot e_p}{J_i} \right) \cdot y_d - \gamma_{bg} \cdot R_{btm} \right] \cdot \left( \frac{J_i}{y_d} \right) \quad (1)$$

$$M_u + N_{pd} \cdot e_{pd} = \Delta N_p \cdot e_{pd} + N_b \cdot e_b \quad (2)$$

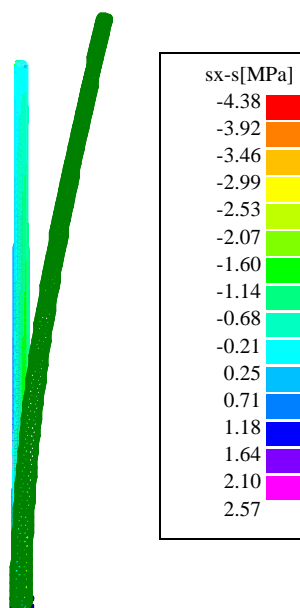
Uvedené hodnoty typických momentov a charakteristické deformácie – okamžitá deformácia  $f_{st}$ , ako aj dlhodobá deformácia  $f_{lt}$  sú uvedené v tab. 1.

Tabuľka 1. Výsledné statické veličiny

Účinky zaťaženia (veličiny)	Vrcholový ťah prev. [kN]	Prevádzkový moment [kNm]	$M_{cr}$ [kNm]	Extrémny moment [kNm]	$M_u$ [kNm]	$f_{st}$ [mm]	$f_{lt}$ [mm]
krátkodobé	6,70	61,31	72,77	85,83	105,80	48,70	
dlhodobé	6,70	61,31	63,30	85,83	89,66		134,90

Pri výpočte dotvarovania a zmršťovania sa zohľadnila priemerná relatívna vlhkosť okolitého prostredia (0,7) a veľkosti prvku. Dotvarovanie, zmršťovanie a účinky stárnutia sú analyzované podľa [1]. Metoda použitá pre výpočet dotvarovania je založená na predpoklade linearity medzi napätím a pretvorením, čo zaisťuje platnosť princípu lineárnej superpozície.

Návrh priečnej výstuže – skrutkovice, obr. 1, vychádzal z elastickej analýzy napätí v priečnom smere na škrupinovej konštrukcii modelovanej 2D plošnými prvkami. Priebeh deformácie a priečných napätí je na, obr. 6.



Obr. 6 Priebeh normálových napätí v priečnom smere

### 3. Experimentálna skúška stožiaru

Uvedený prototyp stožiaru bol následne experimentálne odskúšaný na lámacej stoličnici u objednávateľa. Zaťažovacia skúška bola vykonaná na stožiaru po 1 mesiaci od jeho vyhotovenia, pričom sa sledovalo pretvorenie stožiaru, vznik a rozvoj trhlín ako aj jeho ohybová únosnosť. Stožiar sa testoval vo vodorovnej polohe. V mieste kotvenia bol stožiar nasadený na oceľový trn dĺžky 47 cm. V mieste pôsobenia vrcholovej sily (10 cm od vrcholu) bol prvok namáhaný postupne ťahovou silou po prírastkoch zaťaženia cca 1,5 kN až do jeho porušenia.

Prvá trhlinka bola pozorovaná pri hodnote zaťaženia 6,8 kN, avšak vznikla zo spodnej strany päty stožiaru, v mieste kotvenia, čo bolo spôsobené do značnej miery nedokonalou tesnosťou priestoru medzi kotevným trnom a stožiarom, obr.7. Prvá ohybová trhlinka, obr. 8 vznikla v mieste votknutia (max. M - cca 46 cm od päty) pri zaťažení 8,1 kN, teda odpovedajúcej momentu 74,12 kN, čo korešponduje s vypočítanou hodnotou v tab. 1. Poloha trhliny s jej šírkou je vyznačená na obrázku.



Obr. 7. Trhlinka v kotvení



Obr. 8. Prvá ohybová trhlinka

Ďalšie trhliny sa rozširovali hlavne v päte stožiaru, v mieste kotvenia. Porušenie únosnosti stožiaru nastalo pri sile cca 16 kN, čo odpovedá ohybovému momentu 146,4 kNm. Strata únosnosti nastala rozdrvením betónu v mieste max. M, teda v oblasti 30 – 50 cm od päty stožiaru.

#### **4. Záver**

Statické posúdenie globálnej únosnosti a pretvorenia konštrukcie ako aj experimentálna skúška potvrdili výpočtové predpoklady. Základná podmienka návrhu tvaru a vystuženia stožiaru bola splnená. Hodnota krátkodobej deformácie 48,70 mm a dlhodobej deformácie 134,90 mm, tab.1 je menšia ako bola požadovaná objednávateľom, teda pretvorenie v korune stožiaru rovné max. 1,5 % nadzemnej výšky, čo je 138,75 mm. Experimentálna skúška potvrdila priebeh vypočítaných krátkodobých deformácií do prekročenia úrovne medze vzniku trhlín.

Ako kritické miesto sa javí lokálne porušovanie betónu v okolí výstuže v mieste ukotvenia stožiaru na oceľovom výstupku. Z dôvodu zabezpečenia vyššej trvanlivosti a bezpečnosti konštrukcie v reálnych bude vhodné zmenšiť stúpanie závitů v spodnej časti prvku, na dĺžke cca 500 mm a rovnako zabezpečiť dokonalé votknutie stožiaru do základu.

#### **Literatúra :**

- [1] STN 73 1201 : Navrhovanie betónových konštrukcií. ÚNM Praha, 1986.
- [2] CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Thelford, 1990.
- [3] Moravčík, M : Správa k statickému výpočtu predpäťých stožiarov, Žilina, Január 2002