



## ■ Experimentálne vyšetovanie drevo-betónových nosníkov s rozptýlenou výstužou pri dlhodobom zaťažení

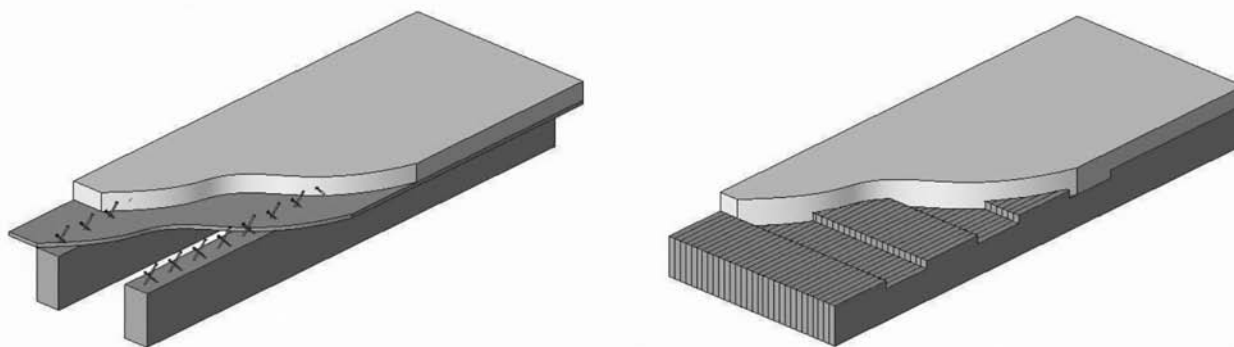
Spriahnuté drevo-betónové konštrukčné prvky sa využívajú čoraz častejšie pri tvorbe moderných drevených nosných sústav budov alebo mostov. Dôvodom sú viaceré výhodné vlastnosti spriahnutých drevo-betónových prvkov, ktorými sa dosiahne vyššia účinnosť a efektívnosť celkovej nosnej sústavy.

V súčasnosti sa využívajú viaceré drevo-betónové sústavy, ako napr. nosníková sústava, u ktorej drevené nosníky sú spriahnuté s betónovou doskou alebo dosková sústava u ktorej súvislá drevená vrstva, vytvorená z dosák ukladných na hranu vedľa seba, je spriahnutá s betónovou doskou. Spriahnutie drevenej časti s betónovou je možné realizovať rôznymi spôsobmi alebo systémom drážok vytvorených v drevenej časti alebo prostredníctvom rôznych spojovacích prvkov. Na vystuženie betónovej vrstvy, ktoré má predovšetkým zabrániť popraskaniu betónu pri zmršťovaní, sa bežne využívajú výstužné prúty a v súčasnosti sa skúmajú možnosti využívania aj oceľových vlákien formou rozptýlenej výstuže.

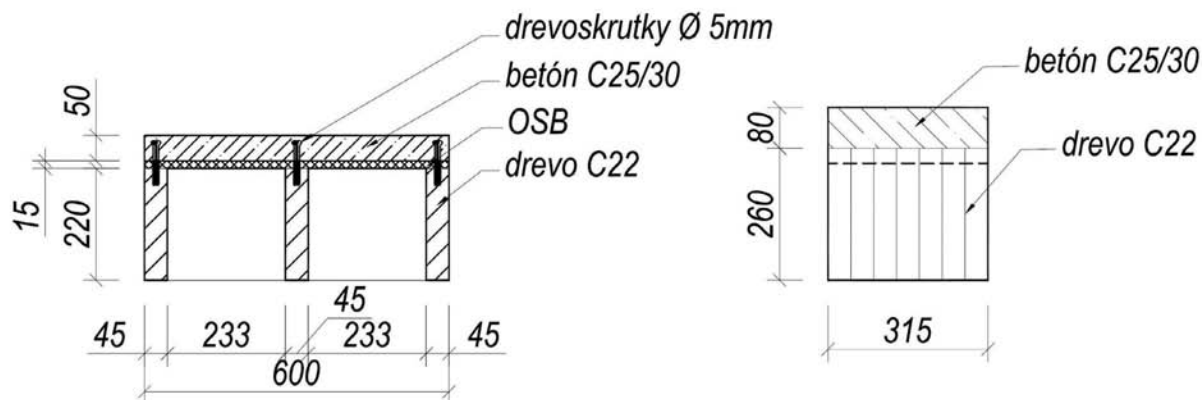
Krátkodobú odolnosť drevo-betónových prvkov je možné určiť napríklad podľa prílohy B normy STN EN 1995-1-1 Navrhovanie drevených konštrukcií výpočtom účinnej ohybovej tuhosti spriahnutých nosníkov s poddajným spriahnutím. V súčasnosti platné normové predpisy nezohľadňujú dostatočne reologické vlastnosti spriahnutých drevo-betónových prvkov, ako sú zmršťovanie prípadne napučívanie materiálov, účinok spriahnutia na súčiniteľ dotvarovania, vplyv zmien vlhkosti a teploty prostredia, preto určenie ich dlhodobého pôsobenia nemusí byť výstižné. Týmto vplyvmi sa zaoberá v súčasnosti viacero zahraničných autorov, ktorí vypracovali niekoľko zjednodušených výpočtových modelov. Na túto problematiku bol zameraný aj projekt APVT 99-05402 [4] v rámci ktorého bolo uskutočnené experimentálne a teoretické vyšetovanie spriahnutých drevo-betónových nosníkov [5] pri krátkodobom a dlhodobom zaťažení.

### Experimentálne vyšetovanie

Dlhodobé merania prebiehajú na dvoch rôznych typoch spriahnutých drevo-betónových prvkov, u ktorých drevená nosná časť je vytvorená z fošní. Jeden typ spriahnutých nosníkov (6 ks) bol vyrobený z troch samostatných drevených nosníkov – fošní, na ktorých je umiestnené stratené debnenie z OSB, vytvárajúce podklad pre tenkú monolitickú betónovú vrstvu. Na vystuženie betónovej vrstvy sme nepoužili tradičnú betonársku výstuž, ale oceľové vlákna formou rozptýlenej výstuže, čím vzniká tzv. drátkobetón. Skúšobné nosníky sú 5 000 mm dlhé a 600 mm široké. Hrúbka betónovej vrstvy je 50 mm. Spriahnutie zabezpečujú mosadzné drevoskrutky 140 × 6 mm, ktoré sú zapustené do fošní cez OSB pod uhlom 45°. Skrutki sú rozmiestnené po dĺžke fošní vo vzdialenosti 150 mm. Fošne nosníka majú rozmer 45 × 220 mm (obr. 1).



Obr.1 – Nosníková a dosková drevo-betónová sústava



Obr. 2 – Prierezy oboch typov skúšaných nosníkov

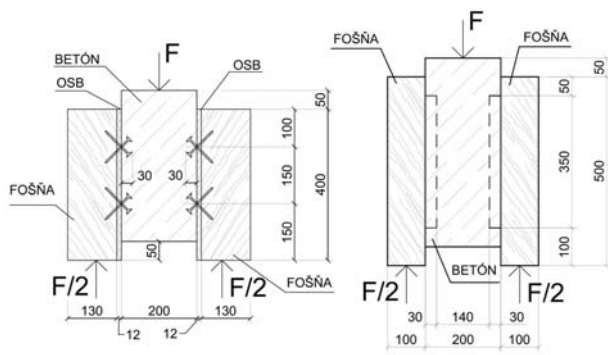


Obr. 3 – Spůsob zatažení skúšobných nosníkov

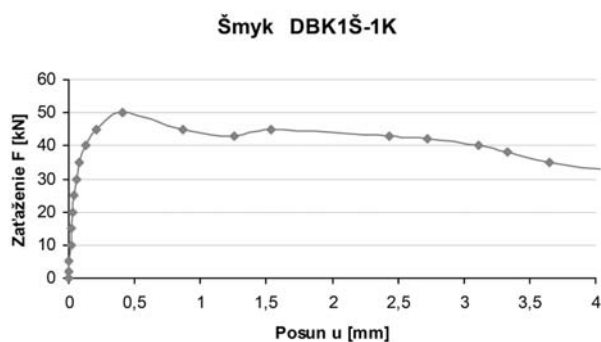
Druhý typ skúmaných spriahnutých nosníkov (6 ks) pozostáva zo súvislej lamelovej drevenej vrstvy, ktorá je vytvorená z vertikálne orientovaných foršní 45 × 260 navzájom spojených pomocou klinov. Na takto vytvorenom drevenom prvku leží betónová vrstva hrúbky 80 mm. Vzájomné spolupôsobenie drevenej časti a betónovej vrstvy je zabezpečené pomocou zárezov v drevených lamelách. Zárezy o hĺbke 30 mm a dĺžke 150 mm sú navzájom vzdialené po 350 mm.

#### Ohybová skúška

Dlhodobé statické zataženie skúšobných nosníkov je vyvolané formou dvoch diskretných silových účinkov v tretinách dĺžky nosníkov použitím betónových blokov. V prípade nosníkov typu DBK1 sú to dve sily s veľkosťou  $F = 1$  kN, u nosníkov DBK2 dve sily veľ-



Obr. 4 – Usporiadanie pretláčacej skúšky



kosti  $F = 2$  kN. Snímané sú priechyby nosníkov ručičkovými indikátormi v strede rozpätia. Priebežne sa zaznamenáva sa teplota a vlhkosť prostredia.

#### Pretláčacie skúšky

Parametre spriahnutia sme zistili tzv. pretláčacími skúškami (obr. 4). Vzorky sú navrhnuté tak aby bolo možné ich zaťažiť symetricky. Vzorky pozostávajú zo stredného betónového hranola 200 × 200 × 500 mm a z dvoch drevených prvkov 45 × 130 × 500 mm zapustených do betónovej časti. Zapustené časti foršní majú taký rozmer ako u skúšobných nosníkov ohybových skúšok. Betónové hranoly boli vyrobené z drátkobetónu pri betónovaní skúšobných nosníkov. Podobne aj drevené prvky boli vyrobené z dodávky reziva použitého na výrobu skúšobných nosníkov. Boli snímané posunutia drevených prvkov voči betónového prvku (obr. 5).

#### ZISTENIE MATERIÁLOVÝCH PARAMETROV

Všetky potrebné parametre použitého dreva a betónu sme určili na základe skúšok a sú uvedené v tab. 1 a tab. 2.

**Tab. 1 – Parametre betónovej vrstvy**

Pevnosť v tlaku	MPa	32,7
Pevnosť v ťahu pri ohybe	MPa	5,4
Modul pružnosti	MPa	30,4
Objemová hmotnosť	kg/m <sup>3</sup>	2 342
Objemová frakcia vlákien	%	0,5
Dĺžka vlákien	mm	35 (120)
Prierez vlákien	mm	1,0 × 0,2

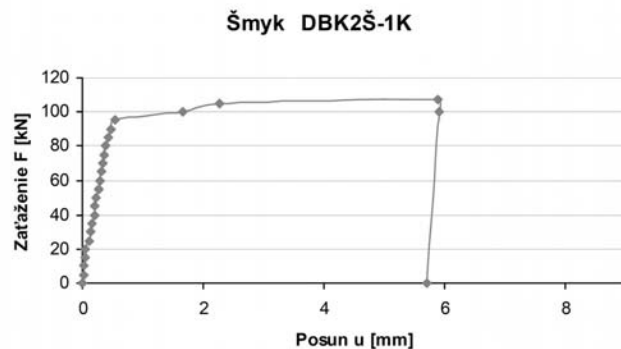
**Tab. 2 – Parametre drevenej časti**

Pevnosť v ohybe	MPa	76,3
Pevnosť v šmyku	MPa	6,66
Modul pružnosti	MPa	8 441
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	435

#### TEORETICKÁ ANALÝZA

##### Javy ovplyvňujúce dlhodobú únosnosť spriahnutých drevo-betónových prvkov

Predvídať dlhodobé správanie sa drevo-betónových spriahnutých prvkov je náročná úloha, pretože v jednotlivých materiáloch sa vyskytuje viacero navzájom ovplyvňujúcich sa časovo závislých javov. Voľnému zmršťovaniu betónu bráni drevený prierez, z toho dôvodu vzniká v betónovej časti ťahová sila a v drevenej časti tlak. Keďže tieto sily pôsobia v ťažiskách príslušných prierezov (drevo resp. betón), vzniká ohybový moment, ktorý spôsobuje prieťah



Obr. 5 – Priebehy pretláčacích skúšok



nosníka. Naproti tomu zmršťovaním dreva vzniká v betóne tlakové, v drevenom priereze ťahové napätie. Napätia od vonkajšieho zaťaženia spôsobujú dotvarovanie, čím sa uvoľňuje toto namáhanie. Dotvarovaním betónu sa napätia prenášajú do dreva, nastáva prerozdelenie napätí. Dotvarovaním dreva sa spätne zaťažuje betónový prierez. Okrem dotvarovania dreva a betónu únosnosť spriahnutých drevo-betónových konštrukcií ovplyvňuje lokálne dotvarovanie v oblasti spojovacích prvkov. Pre dlhodobé pôsobenie spriahnutia nie je možné určiť všeobecne platné vzťahy, pretože podstatne závisí od použitých spojovacích prostriedkov.

Riešiť dlhodobé pôsobenie týchto kompozitov je možné viacerými spôsobmi. Súčasné možnosti softvérových produktov poskytujú silný nástroj pre vystihnúť skutočnej odozvy spriahnutých drevo-betónových konštrukcií aplikáciou metódy konečných prvkov pomocou prúťových, plošných a objemových elementov alebo riešením zložitých diferenciálnych rovníc a algoritmov. Náročné numerické modely, ktoré vznikli spojením rôznych reologických teórií na zohľadnenie časovo závislého správania sa spriahnutých materiálov, pevnostného vývoja betónu, poddajnosti spriahovacích prostriedkov a ich vplyvu na súčiniteľ dotvarovania.

### Analytické výpočtové postupy dlhodobého pôsobenia

Na určenie dlhodobého pôsobenia spriahnutých drevo-betónových konštrukčných prvkov popri zložitých a v praxi ťažko použiteľných numerických modeloch použijeme analytické výpočtové modely, ktoré zohľadňujú viaceré z vyššie spomínaných časovo závislých vlastností prvkov. Uvedené výpočtové modely vychádzajú z rovnakého teoretického základu posúdenia ohýbaného spriahnutého drevo-betónového nosníka s poddajným spriahnutím odvodeného Möhlerom (1956).

### Vplyv poddajného spriahnutia a dotvarovania

Výpočtový model [1] zohľadňuje vplyv poddajného spriahnutia a rozdielny priebeh dotvarovania v čase prostredníctvom modifikovaných modulov pružnosti nasledovne:

$$E_{0,d,ef} = \frac{I}{I + \varphi_{d,spr}} E_{0,t=0} \text{ pre drevo,} \quad (1)$$

$$E_{b,ef} = \frac{I}{I + \varphi_{b,spr}} E_{b,t=28d} \text{ pre betón,} \quad (2)$$

kde  $\varphi_{i,spr}$  je efektívny súčiniteľ dotvarovania oboch materiálov v spriahnutom prvku, pre ktorý platí vzťah:

$$\varphi_{i,spr} = \psi_{i,s} \cdot \varphi_{i,mat} \quad (3)$$

Konečná hodnota súčiniteľa dotvarovania materiálu  $\varphi_{i,mat}$  je určená podľa príslušných noriem pre navrhovanie. Faktor zvýšenia súčiniteľa dotvarovania materiálu spriahnutím  $\psi_{i,s}$  je určený autormi štatisticky.

Vplyv zmršťovania je zohľadnený koeficientom  $C_{L,bmp}$ , ktorý upravuje efektívnu tuhosť spriahnutého nosníka podľa vzťahu:

$$(E \cdot I)_{ef,bmp} = C_{L,bmp} \cdot (E \cdot I)_{ef} \quad (4)$$

a náhradným zaťažením:

$$\rho_{bmp,d} = C_{q,bmp} \cdot \Delta \varepsilon_{bmp,d} \quad (5)$$

ktorého účinok je sčítaný s účinkami ostatného zaťaženia.

$C_{q,bmp}$  je súčiniteľ zmršťovania ako vonkajšieho zaťaženia (výpočet je uvedený v [1]),  $\Delta \varepsilon_{bmp,d} = k_z \cdot \Delta \varepsilon_{bmp,\infty}$ , kde  $k_z$  je štatisticky určená hodnota a  $\Delta \varepsilon_{bmp,\infty}$  je rozdiel pomerných pretvorení dreva a betónu v čase  $t = \infty$ .

Výpočet sa realizuje nie len pre začiatok a koniec životnosti, ale aj pre časové obdobie medzi 3. a 7. rokom, čím sa zohľadní rozdielny časový priebeh dotvarovania dreva a betónu. V tomto čase je dotvarovanie betónu takmer ukončené, zatiaľ čo drevo dosahuje približne 60 % konečných hodnôt z jeho pretvorení od dotvarovania, čo môže byť určujúci okamih pre posúdenie drevenej časti prierezu.

### Vplyv trvania zaťaženia, dotvarovania betónu

Výpočtový postup [2] je založený na sčítaní účinkov stáleho a náhodilého zaťaženia v čase. Všeobecne celkový účinok zaťaženia  $S$  (priehyb, napätie atď.) môže byť vyjadrený ako súčet účinkov od jednotlivých namáhaní podľa vzťahu:

$$S = S(g_1) + S(g_2) + S(\psi_2 q) \quad (6)$$

kde  $g_1$  je vlastná tiaž nosnej konštrukcie,  $g_2$  je ostatné stále zaťaženie a  $\psi_2 q$  je kvázi stála časť prevádzkového zaťaženia.

Účinok zaťaženia  $S(g_i)$  sa vypočíta podľa vzťahov v prílohe B normy EN 1995-1-1 pre ohýbané nosníky s poddajnými spojmi. Dotvarovanie je zohľadnené nahradením modulu pružnosti materiálov  $E$  a poklzu spojovacích prostriedkov  $K_{ser}$  v týchto vzorcach efektívnymi modulmi betónu index ( $c$ ), dreva ( $t$ ) a spojov ( $f$ ):

$$E_{c,eff}(t) = \frac{E_c(t_i)}{I + \varphi_c(t, t_i)} \quad E_{t,eff}(t) = \frac{E_t}{I + \varphi_t(t - t_i)} \quad K_{eff} = \frac{K_{ser}}{I + \varphi_f(t - t_i)} \quad (7)$$

Veličina  $t_i$  je čas, v ktorom začne pôsobiť zaťaženie, meraný od betonáže, teda  $t_i$  je napr. okamih odstránenia dočasných podpier, kedy začne pôsobiť vlastná tiaž  $g_1$ .

Priebeh súčiniteľa dotvarovania  $\varphi_c(t, t_i)$  a modulu pružnosti betónu v čase  $E_c(t_i)$  sa určí podľa Eurokódu 2. Súčasná verzia Eurokódu 5 stanovuje len konečnú hodnotu súčiniteľa dotvarovania  $\varphi_t(t - t_i)$  označená ako  $k_{def}$  v závislosti od triedy použitia. Časový priebeh autor stanovuje interpoláciou hodnôt pre rozdielne triedy trvania zaťaženia uvedených v starších verziách Eurokódu 5. Pre spojovacie prostriedky je odporúčané použiť hodnotu súčiniteľa dotvarovania  $\varphi_f(t - t_i)$  rovnú dvojnásobku tejto hodnoty pre drevo  $\varphi_t(t - t_i)$ .

### Vplyv mechanicko-sorpčného dotvarovania dreva a vplyv vlhkosti a teploty

Nižšie uvedený výpočtový postup [3] dopĺňa výpočet podľa Cecottioho zohľadnením mechanicko-sorpčného javu, zmršťovania betónu a vplyvu zmien teploty a vlhkosti prostredia. Súčiniteľ dotvarovania pre po častiach lineárny priebeh vlhkosti  $\Delta u$  [%] v časovej perióde  $\Delta t$  je daný vzťahom:

$$\varphi_t(t - t_i) = \varphi_{tc}(t - t_i) + \varphi_{tms}(t - t_i) = \left(\frac{t - t_i}{t_d}\right)^m + \varphi^\infty \left[1 - e^{-c \frac{\Delta u}{100 \Delta t} (t - t_i)}\right] \quad (8),$$

kde  $\varphi_{tc}$  je súčiniteľ dotvarovania,  $\varphi_{tms}$  je súčiniteľ mechanicko-sorpčného dotvarovania,  $t_d = 29\,500$  dní,  $m = 0,21$ ,  $\varphi^\infty = 0,7$  a  $c = 2,5$ .

Obsah vlhkosti je uvažovaný pre zjednodušenie konštantný v celom priereze a priebeh vlhkosti v čase je nahradený po častiach lineárnou krivkou s ročnou periódou, teda zmena vlhkosti je daná rozdielom maximálnej a minimálnej priemernej hodnoty vlhkosti prostredia ( $u_{\phi, max}$ ,  $u_{\phi, min}$ ) pri časovej perióde  $\Delta t = 365$  dní.

Mechanicko-sorpčné dotvarovanie sa zohľadní dosadením výrazu (8) do vzťahov (7) pre drevo, pre spojovacie prostriedky je odporúčaná hodnota súčiniteľa dotvarovania  $\varphi_f(t - t_i)$  ako dvojnásobok tejto hodnoty pre drevo  $\varphi_t(t - t_i)$ .

Účinok zmršťovania  $\varepsilon_{cs}$  sa určí podľa výpočtu uvedeného v [2] použitím substitúcie:

$$\Delta \varepsilon_n = -\Delta \varepsilon_{n,c} = -\varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cs}(t_s) \quad (9),$$

kde  $t_s$  je čas začiatku zmršťovania betónu (1–7 dní po betonáži) a  $\varepsilon_{cs}$  je zmršťovanie betónu stanovené podľa EN 1992-1-1.

Vplyv ročných  $\Delta \varepsilon_y$  a denných  $\Delta \varepsilon_d$  zmien prostredia sa určí použitím nasledujúcich substitúcií:

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_y = \alpha_{t,u} [u_\phi(t) - u_\phi(t_s)] + \alpha_{t,T} [T(t) - T(t_s)] - \alpha_{c,T} [T(t) - T(t_s)] \quad (10),$$

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_d = \alpha_{t,T} k \Delta T_d - \alpha_{c,T} \Delta T_d \quad (11).$$

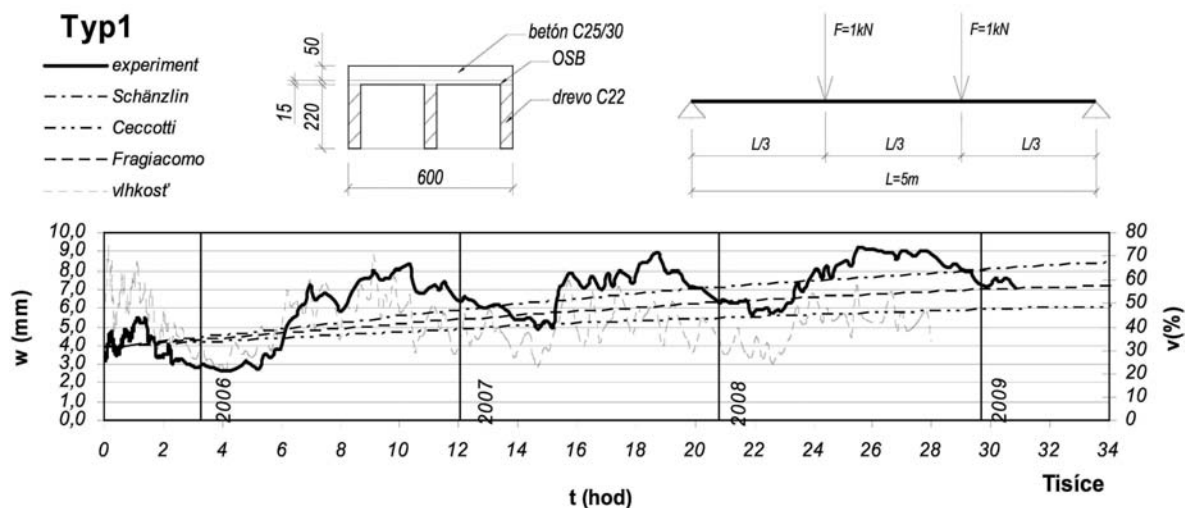
Celkový účinok zaťaženia  $S$  (priehyb, napätie atď.) je vyjadrený ako súčet účinkov od jednotlivých zaťažovacích stavov podľa vzťahu:

$$S = S(g_1) + S(g_2) + S(\psi_2 q) + S(\varepsilon_{cs}) + S(\Delta \varepsilon_y) + S(\Delta \varepsilon_d) \quad (12).$$

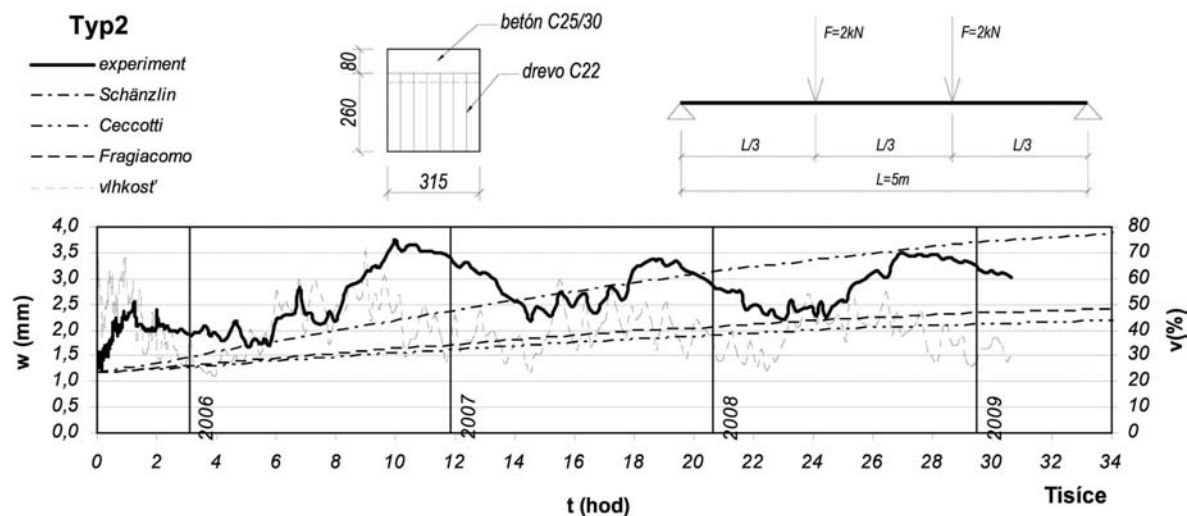
Vplyv dotvarovania a mechanicko-sorpčného dotvarovania je zohľadnený vo výrazoch  $S(g_1)$ ,  $S(g_2)$ ,  $S(\psi_2 q)$  a  $S(\varepsilon_{cs})$  použitím efektívnych modulov pružnosti (7) a súčiniteľa dotvarovania podľa vzťahu (8), výpočet účinku nepružných pretvorení od zmršťovania betónu  $S(\varepsilon_{cs})$  a vlhkočných a teplotných zmien prostredia v priebehu roka  $S(\Delta \varepsilon_y)$  a dňa  $S(\Delta \varepsilon_d)$  je uvedený v [2].

### Porovnanie teoretických a experimentálnych výsledkov

Vyššie uvedené výpočtové postupy sú porovnané s experimentálnymi výsledkami oboch typov ohýbaných nosníkov pri dlhodobom zaťažení. Na obr. 6 a 7 sú znázornené jednotlivé priebehy priehybov v strede rozpätia skúmaných nosníkov v čase  $t$ . V tabuľke č. 3 a 4 sú uvedené hodnoty okamžitých priehybov a priehybov po piatich rokoch v strede rozpätia nosníkov.



Obr. 6 – Priebeh priehybu skúšobného nosníka typu 1 v strede rozpätia v čase



Obr. 7 – Priebeh priehybu skúšobného nosníka typu 2 v strede rozpätia v čase

Tab. 3 – Priebeh nosníka typu 1 v čase

priebeh [mm]	vek konštrukcie [rok]	
	0	5
experiment	3,39	7,11
Schänzlin	3,86	8,72
Ceccotti	3,86	6,27
Fragiacomo	3,90	7,49

Tab. 4 – Priebeh nosníka typu 2 v čase

priebeh [mm]	vek konštrukcie [rok]	
	0	5
experiment	1,28	3,02
Schänzlin	1,16	4,14
Ceccotti	1,16	2,28
Fragiacomo	1,17	2,53

Z porovnania výsledkov vyplýva, že v čase do 1,5 roka sú experimentálne hodnoty vyššie ako teoretické, kým už v čase okolo 5 rokov sa experimentálne výsledky nachádzajú medzi výsledkami teoretických modelov. Rozdiely v hodnotách priehybov môžu vyplývať z rôzneho teoretického prístupu jednotlivých modelov k reologickým vlastnostiam tvoriacich častí spriahnutého prvku.

#### ZÁVER

Spolahlivé navrhovanie spriahnutých drevo-betónových konštrukčných prvkov z hľadiska dlhodobého pôsobenia si vyžaduje

taký výpočtový model, ktorý dokáže s dostatočnou presnosťou predpovedať pretvorenie spriahnutých prvkov v priebehu ich životnosti. Prezentované výpočtové modely predstavujú správne prístupy k tejto problematike, je však potrebné pokračovať v ich zdokonaľovaní prostredníctvom ďalších teoretických a experimentálnych prác.

Tento článok vznikol v rámci riešenia grantového projektu č. 1/4157/07 podporovaného VEGA MŠ.

doc. Ing. Ján Kanócz, Ph.D.,  
czc@t-zones.sk,  
Kanócz CONSULTING, a.s.i.

Ing. Viktória Bajzecerová,  
viktoria.bajzecerova@tuke.sk,  
Stavebná fakulta,  
Technická Univerzita v Košiciach

#### LITERATÚRA:

- [1] Schänzlin, J.: Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003
- [2] Fragiacom, M., Ceccotti, A.: Long-term behavior of timber-concrete composite beams I: Finite element modeling and validation, Journal of Structural Engineering, ASCE2006, 132 (1), pp. 13–22
- [3] Fragiacom, M.: Long-term behavior of timber-concrete composite beams II: Numerical analysis and simplified evaluation, Journal of Structural Engineering, ASCE 2006, 132(1), pp. 23–33
- [4] Závěrečná správa – Projekt APVT 99-05402 – Štúdium mechanických vlastností vybraných kombinovaných konštrukčných prvkov, ŠDVÚ, Bratislava, 2005
- [5] Kanócz, J., Šteller, Š., Babiak, M.: Uplatnenie drevo-betónových konštrukcií bytových a inžinierskych stavbách, Zborník z odborného seminára so zahraničnou účasťou, Dřevostavby – stavební systém budoucnosti, Volyně, ČR, 23.–24. 3. 2005, ISBN 80-86837-02-5

#### Experimental Examination of Wooden-concrete Girders with Scattered Reinforcement under Long-term Load

Composite wooden-concrete construction elements are more often used for creation of modern wooden bearing structures of buildings or bridges. The reasons are numerous suitable properties of composite wooden-concrete elements which may achieve higher performance and efficiency of the total bearing structure. Reliable designing of composite wooden-concrete construction elements from the long-term application point of view requires such computation model which can predict, with sufficient precision, modification of composite elements throughout its lifespan. Presented computation models represent the right approach to this issue; however it is necessary to continue in their improvement by means of additional theoretical and experimental works.