

# LETNÉ BETONÁŽE – Z LABORATÓRIA DO PRAXE

*Peter Briatka<sup>1</sup>, Peter Makýš<sup>2</sup>*

Ošetrovanie betónu patrí k najzložitejším operáciám v zmysle správneho návrhu a časového plánovania obzvlášť pri pošných konštrukciách. Prinajmenšom na území Slovenska sa ošetrovanie betónu v letnom období podceňuje alebo až úplne zanedbáva. Existujú známe a overené metódy ošetrovania betónu. Rovnako existujú (povedzme) inovatívne, ktoré sa aj napriek dlhoročnému výskumu len pomaly etablujú v betonárskej praxi. V tejto práci sa predstavujú výsledky interného výskumu TSÚS v oblasti účinnosti rôznych metód ošetrovania betónu z pohľadu straty vlhkosti do okolitého prostredia a vplyvu na sekundárne ukazovatele kvalitatívnych parametrov – mechanické vlastnosti a štruktúra hydratačných produktov.

## 1 Teória

Stratu vlhkosti do okolitého prostredia možno zjednodušene považovať za odparovanie vody z povrchu betónu v priamom kontakte s okolitým prostredím. Zdanlivo statický systém je v skutočnosti dynamický. Nestacionárne vlhkosťné pole je determinované meniacim sa povrchom betónu v kontakte s okolitým prostredím, meniacou sa vlhkosťou cementového tmelu a klesajúcim vlhkosťným gradientom, rastúcou hutnosťou tuhnúceho a tvrdnúceho cementového tmelu. Časový priebeh straty vlhkosti do okolitého prostredia sa z hľadiska dynamiky rozdeľuje do troch fáz. V prvej fáze dochádza k odparovaniu tzv. vypotenej vody (bleed water) z povrchu betónu [3]. Postupne sa oblasť odparovania presúva hlbšie do cementového tmelu (fáza II). Medzi fázou I a II je dobre pozorovateľný pokles intenzity straty vlhkosti. V II. fáze sa vyprázdňujú pôvodne saturované kapiláry cementového tmelu, čo vyvolávajú kapilárne napätia prejavujúce sa v cementovom tmele. Ak medzičasom systém začne tuhnúť, vertikálne deformácie resp. kolaps systému sa obmedzí, čo začína spôsobovať generovanie všesmerných napätí. Oblasť odparovania sa presúva hlbšie do cementového tmelu (fáza III) a vplyvom zväčšujúcej sa hĺbky oblasti odparovania a rastúcej hutnosti cementového tmelu dochádza k výraznému spomaleniu odparovania [2,3].

---

<sup>1</sup> Ing. Peter Briatka, Stavebná fakulta STU a TSÚS, n.o. Bratislava, Studená 3, 82104 Bratislava  
[briatka.p@gmail.com](mailto:briatka.p@gmail.com)

<sup>2</sup> doc. Ing. Peter Makýš, PhD., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 81368 Bratislava

Všeobecne používaný model straty vlhkosti z betónu zaviedol ešte v roku 1954 Menzel. Model (vzťah 1) popisuje intenzitu odparovania vody  $E_E$  ( $\text{kg/m}^2\cdot\text{hod}$ ) z voľnej vodnej hladiny ako funkciu určujúcich činiteľov okolitého prostredia, teploty povrchu betónu  $T_C$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); teploty prostredia  $T_{AMB}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); relatívnej vlhkosti  $RH$  (%) a rýchlosti prúdenia vzduchu  $v_W$  ( $\text{km/h}$ ). Je zrejmé, že jeho platnosť sa výrazne časovo obmedzuje na krátke obdobie tesne po úprave povrchu betónovej konštrukcie kedy sa odparuje tzv. vypotená voda (bleed water) [6].

$$E_E = 5 \cdot \left( (T_C + 18)^{2.5} - \left( \frac{RH}{100} \cdot (T_{AMB} + 18)^{2.5} \right) \right) \cdot (v_W + 4) \cdot 10^{-6} \quad (\text{kg/m}^2\cdot\text{hod}) \quad (1)$$

Model je vhodný pre kalkuláciu straty vlhkosti len vo veľmi mladom veku betónu a často sa spája s plastickým zmršťovaním. V prípadnej praktickej aplikácii modelu stojí tento (zo svojej podstaty) na strane bezpečnosti. Navyše, model poskytuje iba rámcovú informáciu o tom, ako jednotlivé činitele prispievajú k strate vlhkosti z betónu. Model nezohľadňuje ani ochladzujúci efekt odparovania vody z povrchu betónu, a aj preto sa potýka s výraznou nepresnosťou, ktorá (podľa [6]) dosahuje  $\pm 25$  % pri  $E_E$  do  $1,0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{hod}$  a vo vyšších hodnotách systematicky vykazuje vyššie hodnoty o približne 50 %.

## 2 Výber metód ošetrovania

Podstatou bolo komparatívne zhodnotiť účinnosť a účelnosť vnútorného ošetrovania (IC) v porovnaní s inou, účinnou, technologicky ľahko zvládnuteľnou metódou. Pôsobenie oboch metód ošetrovania pri redukcii straty vlhkosti z betónu sa porovnávalo s referenčnými vzorkami – bez akéhokoľvek ošetrovania a vzorkami voľnej vodnej hladiny, čo malo za cieľ spresniť model straty vlhkosti.

Pri výbere metód ošetrovania sa zohľadňoval charakter záujmových betónových konštrukcií. Záujmovými konštrukciami sú najmä plošné betónové konštrukcie, alebo monolitické konštrukcie s vysokým povrchovým modulom, ktoré sú vo veľmi skorom veku odformované [1]. Význam ošetrovania sa zdôrazňuje u konštrukcií s požadovanou vysokou pevnosťou, dlhou životnosťou obzvlášť pri expozícii agresívnym vplyvom prostredia. Metódy ošetrovania majú byť účinné v redukcii vzniku trhlín. V závislosti od vodného súčiniteľa (a prípadnej kombinácii metód ošetrovania – charakteristika systému „utesnený/neutesnený“) môžu pôsobiť dvomi spôsobmi. Buď obmedzia stratu vlhkosti z betónu, a tak eliminujú zmršťovanie alebo naopak stratu vlhkosti (vo veľmi mladom veku) podporia, čím zamedzia sadaniu a tvorbe trhlín z plastického zmršťovania.

Vnútorné ošetrovanie (IC) nasiaknutým ľahkým kamenivom SLWA sa vybralo ako pomerne inovatívna, účelná, ale stále nie úplne prebádaná metóda ošetrovania [8]. Primárnou snahou bolo poskytnúť dostatok vody zo zabudovaného SLWA na hydratáciu cementu – t.j. redukovať alebo až eliminovať samovysychanie a chemické zmršťovanie. Zamýšľané použitie v (idealizovane utesnených) vysokohodnotných a vysokopevnostných betónoch sa rozšírilo o použitie v betónoch vystavených intenzívnej strate vlhkosti vo veľmi skorom veku [4]. Vnútorné ošetrovanie sa navrhuje súčasne s návrhom receptúry betónu [7]. Nesmierne dôležitý je správny návrh. V príprave vnútorného ošetrovania je umocnený správnou predikciou vplyvu okolia na čerstvý a mladý betón a súvisiaci časový odhad pôsobenia IC [9].

Konkurenčná metóda ošetrovania, na jednej strane, na strane druhej ale vhodná kombinácia pre ošetrovanie je aplikácia tekutých membrán. Tekuté membrány sú

určené na zamedzenie straty vlhkosti betónu do okolitého prostredia. Účinnosť je determinovaná rovnomernosťou nástreku a dodržaním dávkovania, pre ktoré je deklarovaná účinnosť resp. parotesnosť či difúzny odpor.

### 3 Experimentálna časť

#### 3.1 Strata vlhkosti

Meranie straty vlhkosti z betónu do okolitého prostredia sa vykonalo v klimatizačnej komore, v ktorej sa regulovali tri parametre prostredia – teplota, vlhkosť a rýchlosť prúdenia vzduchu. Strata vlhkosti sa monitorovala zmenou hmotnosti vzoriek až do veku približne 48 hodín. Pre meranie straty vlhkosti sa zvolili reálne dosiahnuteľných kombinácie okrajových podmienok simulujúce bežne dosahované parametre prostredia počas letných betonáží (tab. 1).

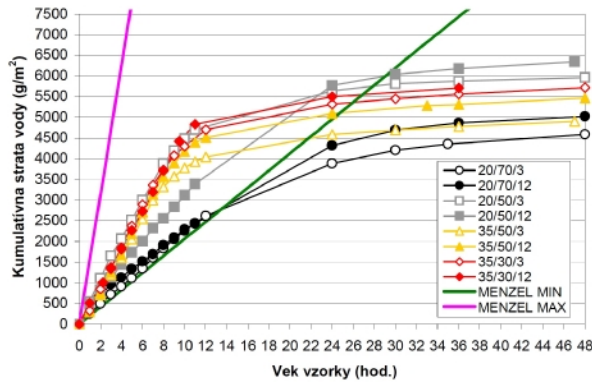
Tab. 1: Kombinácie okrajových podmienok

Číslo kombinácie	T (°C)	RH (%)	v <sub>w</sub> (km/h)
1	20	70	3
2	20	70	12
3	20	50	3
4	20	50	12
5	35	50	3
6	35	50	12
7	35	30	3
8	35	30	12

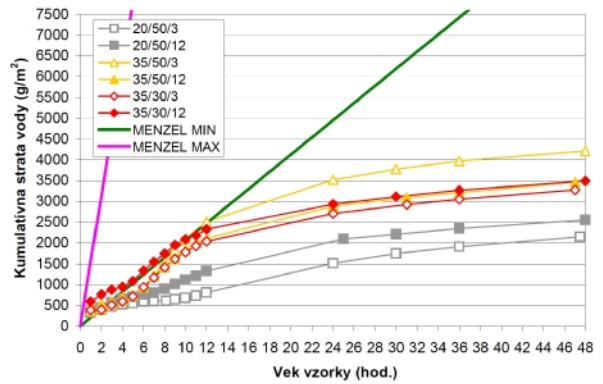
Pre skúšky sa použil betón s vodným súčiniteľom 0,42, vyrobený z portlandského cementu CEM I 42,5 N. Ako ľahké kamenivo sa s ohľadom na predchádzajúce výskumné úlohy a skúšky použilo LWA s obchodným názvom Liapor, a to vo frakciách 0/4 (M) a 0/1 (D).

Analýzou výsledkov časového priebehu straty vlhkosti zo vzoriek s rôznym ošetrovaním vystavených pôsobeniu prostredia s uvedenými kombináciami okrajových podmienok sa dospelo k viacerým záverom.

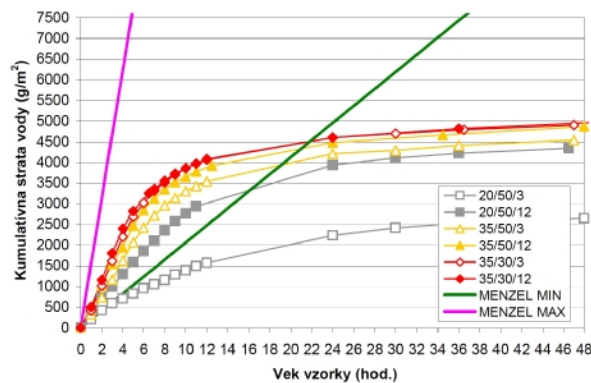
Referenčný betón bez ošetrovania podstupuje stratu vlhkosti do okolitého prostredia priamo závislú na okrajových podmienkach (T; RH a v<sub>w</sub>). V obrázku 2 sú zhrnuté kumulatívne straty vody referenčných vzoriek podľa kombinácií okrajových podmienok. Obrázok zahŕňa aj ilustračné kumulatívne krivky podľa Menzelovko modelu pre najpriaznivejšiu (MIN) a najnepriaznivejšiu kombináciu okrajových podmienok. Je evidentné, že Menzelov model má výrazne obmedzenú platnosť a je vhodný skôr pre prostredie s miernymi okrajovými podmienkami (napr. T=20 °C; RH=70 %; v<sub>w</sub>=12 km/h) a aj to len zo strednodobého hľadiska. Pri nepriaznivejších okrajových podmienkach veľmi výrazne nadhodnocuje stratu vlhkosti (čo ale je na strane „bezpečnosti“). Do veku približne 9 hodín je kumulatívny úbytok vlhkosti takmer lineárny. Neskôr sa začínajú prejavovať deformácie ovplyvnené najmä zvyškovou vlhkosťou v betóne (potenciál pre ďalšiu stratu vlhkosti) a štruktúrou betónu (daná rýchlosťou hydratácie).



Obr. 1: Kumulatívna strata vlhkosti z referenčných vzoriek pri rôznych okrajových podmienkach prostredia



Obr. 2: Kumulatívna strata vlhkosti zo vzoriek ošetrovaných membránou pri rôznych okrajových podmienkach prostredia



Obr. 3: Kumulatívna strata vlhkosti zo vzoriek s vnútorným ošetrovaním pri rôznych okrajových podmienkach prostredia

Betón ošetrovaním pomocou membrány aplikovanej nástrekom parafínovej emulzie (na približne 80 % povrchu vzoriek) tiež podstupuje stratu vlhkosti do okolitého prostredia. V prvej hodine veku, keď technicky nie je možné aplikovať nástrek, je intenzita straty vlhkosti rovnaká ako v referenčnej vzorke. Od momentu aplikácie membrány však stratu vlhkosti výrazne obmedzujú. Redukujú tým vznik ťahových napätí v cementovom tmele a prejavy zmršťovania betónu. Účinnosť je daná hrúbkou membrány (ekvivalentná difúzna hrúbka), gradientom tlakov vodnej pary v betóne a v okolitom prostredí a rovnomernosťou aplikácie nástreku resp. stupňom pokrytia povrchu membránou. Najmä v skoršom veku sa pozorovala vysoká účinnosť (obr. 3). Do veku približne niekoľko hodín sa obmedzenie straty vlhkosti (a teda účinnosť) kvantifikuje na približne 50 %. Po tomto veku sa strata vlhkosti začína štandardne riadiť rýchlosťou hydratácie a prejavujú sa účinky okolitého prostredia – hlavne teploty. Z dlhodobého hľadiska sa účinnosť membrány opticky znižuje. Spôsobené je to vyššou stratou vlhkosti z takto ošetrovaného betónu v neskoršom období – ako dôsledok dostatku voľnej vody, ktorá zostala v štruktúre betónu.

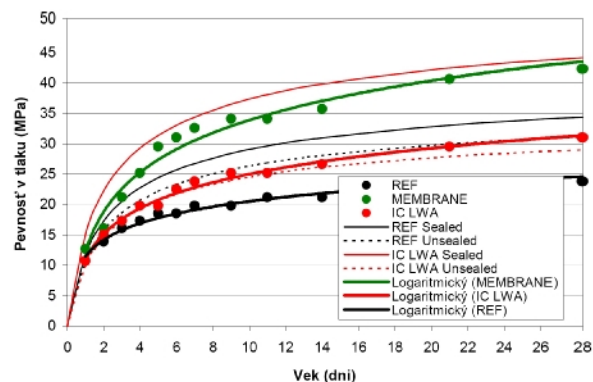
Betón s vnútorným ošetrovaním pomocou 7,0 % dávky LWA podstupuje stratu vlhkosti do okolitého prostredia priamo závislú na okrajových podmienkach ( $T$ ;  $RH$  a  $v_w$ ). V obrázku 4 sú zhrnuté kumulatívne straty vody vzoriek s IC podľa kombinácií okrajových podmienok. Účinnosť vnútorného ošetrovania spočíva vo opačnom pôsobení ako ošetrovanie membránami. LWA v betóne spôsobuje zvýšenie intenzity straty vlhkosti, avšak vlhkosť sa uvoľňuje najskôr zo saturovaných pórov LWA, čím zamedzuje generovaniu kapilárnych napätí v cementovom tmele, ku ktorým by došlo

bez pôsobenia LWA. Kumulatívna strata vlhkosti z betónu s IC taktiež obsahuje takmer lineárnu oblasť. S nepriaznivejšími okrajovými podmienkami prostredia sa táto oblasť skracuje. Prisudzuje sa to jednak veľmi vysokej intenzite straty vlhkosti (vyčerpanie kapacity ošetrovacej vody) a zároveň veľmi rýchly nábeh pevností a súvisiaceho difúzneho odporu formujúcej sa štruktúry betónu. Z dlhodobého hľadiska je strata vlhkosti nižšia, no z krátkodobého hľadiska sa dosahujú vyššie straty vlhkosti a obmedzuje sa tak hlavne plastické zmrašťovanie.

### 3.2 Pevnosť v tlaku

Nedeštruktívnu tvrdomernou metódou sa overil vplyv vyššie uvedených metód ošetrovania na pevnosť betónu v tlaku pri expozícii prostrediu (po dobu 28 dní) s teplotou  $30 \pm 2$  °C; relatívnou vlhkosťou  $40 \pm 5$  % a rýchlosťou prúdenia vzduchu 3 km/h. Pre overenie sa zvolila receptúra s vodným súčiniteľom taktiež 0,42.

Predpokladalo sa, že diferencovaná strata vlhkosti z betónu s relatívne nízkym vodným súčiniteľom pri pomerne nepriaznivých podmienkach prostredia sa prejaví na nábehu a výslednej (28 dňovej) pevnosti betónu v tlaku ako dôsledok nedostatku vlhkosti. Informatívna pevnosť v tlaku sa stanovila vo veku (t) 1; 3; 4; 5; 6; 7; 9; 11; 14; 21 a 28 dní.



Obr. 4: Pevnosť v tlaku (meraná tvrdomernou metódou vs. zistená na trámčekoch)

Preukázal sa výrazný vplyv ošetrovania proti nepriaznivým účinkom vplyvu prostredia, typického pre letné betonáže, na pevnosť betónu v tlaku. Znížená strata vlhkosti z betónu ošetrovaním pomocou aplikovanej membrány (o 20 – 50 %) sa prejavila zvýšením pevnosti v tlaku až o približne 70 % (z 24 MPa na 42 MPa) pri nezmenenej receptúre. Vnútročné ošetrovanie s dávkou 7,0 % LWA umožnilo nárast pevnosti v tlaku o približne 30 % (z 24 MPa na 31 MPa) pri mierne zníženej celkovej strate vlhkosti, navyše aj napriek zabudovaniu pórovitého kameniva s nízkou pevnosťou a zníženiu množstva cementu v zámese o cca 6 %.

### 3.3 DTA/TG + DSC Analýza

Pre overenie vplyvu IC na stupeň hydratácie utesneného systému sa zvolila receptúra s konštantným vodným súčiniteľom  $w/c=0,30$  pre referenčnú vzorku aj vzorku s IC. Vodný súčiniteľ, pri utesnenom systéme, zabezpečuje dosiahnutie teoretického stupňa hydratácie  $\alpha_{max}=0,83$ . Receptúra sa modifikovala iba v dôsledku náhrady 7,0 % hutného kameniva pomocou LWA. Vyrobita 1 referenčná zmes a 1 zmes s IC.

Aj napriek výrazne nižšiemu množstvu cementu vo vzorke s IC (dôsledok granulometrie kameniva) sa TG analýzou preukázalo, že obsah hydratačných

produktov  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{CaCO}_3$  v oboch vzorkách je približne rovnaký. Vzorka s IC dosiahla rovnaké množstvo hydratačných produktov ako referenčná vzorka, čo pri zníženom obsahu cementu nepriamo dokazuje vyšší stupeň hydratácie. Vzorka s IC obsahuje lepšie zabudovanú vodu v gélových hydratačných produktoch (CSH a CAH gél). Príčinou môže byť kontinuálny prístup zabudovanej ošetrovacej vody v LWA k hydratujúcim zrnám cementu, ktoré za týchto podmienok primárne zhydratujú na lepšie štruktúrovanú a pevnejšiu gélovú hydratovanú fázu.

Tab. 2: Porovnanie výsledkov TG analýzy oboch vzoriek

Parameter	Vzorka	
	REF (0,0 %)	LWA 7,0 %
Obsah vlhkosti do 100°C (%)	0,73	0,67
Obsah vody viazanej v hydratačných produktoch (%)	4,41	3,83
Obsah voľného $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	8,35	6,33
	TG: 2,03	TG: 1,54
Obsah $\text{CaCO}_3$ (%)	14,64	14,85
	TG: 6,64	TG: 6,53
Celková strata žihaním (%)	13,61	12,57
	TG: 13,61	TG: 12,57

#### 4 Záver

Výsledky preukazujú výrazné odchýlky všeobecne akceptovaného výpočtového modelu straty vlhkosti z betónu, ktoré sa neskôr použili pri návrhu jeho modifikácie hlavne pre účely spresnenia návrhu receptúr betónov s vnútorným ošetrovaním. Výsledky skúšok naznačujú vhodnosť použitia jednotlivých metód ošetrovania betónu. Doplnkovými skúškami sa podarilo sa rámcovo podať približný obraz o vplyve ošetrovacích metód na kvalitu hydratačných produktov a úžitkové vlastnosti betónu.

#### 5 Literatúra a súvisiace dokumenty

- [1] Briatka, P., Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – Strata vody z betónu, Stavebnícka ročenka 2010, Jaga group, Bratislava, 2009, pp:31-35.
- [2] ACI 308R-01: Guide to Curing Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2003. p:31.
- [3] Menzel, C. A.: Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete, in Proceedings, Portland Cement Association Annual Meeting, 1954, pp:130-136.
- [4] Briatka, P., Makýš, P.: Elimination of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete, In: proceedings of Junior Scientist Conference held in Vienna, April, 2010.
- [5] Henkensiefken, R., Briatka, P., Bentz, D., Nantung, T., Weiss, J.: Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures – Prewetted Lightweight Aggregate can Reduce Cracking, In: Concrete International, Vol. 32, No. 2, American Concrete Institute, Farmingtonhills, 2010.
- [6] Al-Fadhala, M., Hover, M.: Rapid evaporation from freshly cast concrete and the Gulf environment. Construction and Building Materials, 2001.
- [7] Bentz, D., Weiss, J.: Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2011, p. 94.
- [8] Briatka, P., Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu - 3. Nasiaknuté ľahké kamenivo, Beton TKS, X.r./3, Beton TKS, Praha, 2010, pp: 42-47.
- [9] Briatka, P., Makýš, P.: Možnosti použitia európskeho ľahkého kameniva na vnútorné ošetrovanie betónu, Materiály pro stavbu, XVI.r. /7, Business Media CZ, Praha, 2010, pp: 22-25.

#### 6 Pod'akovanie

Touto cestou ďakujeme za spoluprácu a podporu spoločnostiam Lias Vintířov, LSM, k.s., Považská cementáreň, a.s. Ladce a BASF Slovensko, spol. s r.o.