

# OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – 8. MALTY S VNÚTORNÝM OŠETROVANÍM – PEVNOSTI A OBJEMOVÉ ZMENY ■ CONCRETE CURING – 8. MORTARS WITH INTERNAL CURING – STRENGTHS AND VOLUME CHANGES

Peter Briatka, Peter Makýš

V článkoch z tohto cyklu sme popísali význam ošetrovania čerstvého betónu najmä z hľadiska trvanlivosti/životnosti betónových konštrukcií. DTA analýzou cementového tmelu sme dokázali pozitívne pôsobenie vnútorného ošetrovania (IC) pri hydratácii (najmä zmesí s nízkym vodným súčiniteľom). Predstavili sme konvenčné a nové spôsoby návrhu receptúr s IC. Tiež sme odhalili rozpory medzi zaužívanými postupmi výpočtu straty vlhkosti z betónu a skutočnosťou a predstavili sme nové prístupy k výpočtu/návrhu IC. V tomto pokračovaní cyklu dokumentujeme vplyv IC na objemové zmeny a pevnosti mált. Oba parametre vstupujú v podmienkach reálnych konštrukcií do vzájomných interakcií a ovplyvňujú konštrukciu v zmysle generovania vnútorných napätí a vzniku trhlin. Všeobecnou snahou je znížiť objemové zmeny betónu na minimum. Redukuje sa tak hrozba vzniku trhlin a skracovania životnosti, najmä plošných betónových konštrukcií. ■ In the former papers of this series we described the importance of fresh concrete curing, in particular pointing out durability/lifetime of concrete structures. Using DTA analysis of cement pastes we proved a positive action of internal curing (IC) within hydration (mainly mixtures with low water-cement ratios). We presented conventional and innovative approaches to mixtures with IC design. Also gaps between conventional procedures and reality were identified when calculating water losses and we introduced brand new approaches to calculation/design of the internal curing (IC). In this part of the series, we document the influence of the IC on volume changes and strengths of mortars. Under conditions of real structures, both parameters come into mutual interactions and affect the structure in the sense of internal stresses generation and cracking. The general effort is to decrease the volume changes of the concrete down to the minimum. That way the danger of cracking and lifetime shortening is reduced, mainly for flat structures.

Cieľom skúšok na trámčekoch bolo overiť účinnosť vnútorného ošetrovania tak, ako bolo navrhnuté [33] v podmienkach takmer ideálneho ošetrovania (teplota prostredia cca. 20 °C a relatívna vlhkosť prostredia cca 98 %). V takomto prostredí nedochá-

dza k takmer žiadnej strate vlhkosti zo vzorky do okolia. Vzorky môžu podstupovať jedine samovysychanie, ktoré v konečnom dôsledku ovplyvňuje objemové zmeny a v závislosti od vodného súčiniteľa i mechanické vlastnosti betónu. Skúšky na trámčekoch, hodnotiace účinnosť navrhovaného IC pri rôznych vodných súčiniteľoch, mali preto kľúčový význam nielen pre overenie správnosti a platnosti modelu návrhu zloženia betónu, ale aj pre získanie prvých komparačných vlastností vzoriek ošetrovaných pri ideálnych podmienkach.

## PRÍPRAVA SKÚŠOK

### Použité materiály

Pre skúšky sa použil portlandský cement CEM I 42,5 N s mernou hmotnosťou 3 077 kg/m<sup>3</sup>. Chemické zmršťovanie použitého cementu bolo 7 % a jemnosť stanovená podľa Blaina 344,77 m<sup>2</sup>/kg. Začiatok tuhnutia sa podľa STN EN 1015-9 stanovil na 185,3 min, pričom koniec tuhnutia sa zistil v 254,6 min. Ako plastifikačná prísada (WRA) sa použil superplastifikátor Berament HT2 s účinnou látkou na báze polykarboxylátu.

Ako hutné kamenivo sa použilo prírodné ťažené kamenivo frakcie 0/4 (tab. 1). 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) (tab. 1).

### Receptúry

Pre overenie účinnosti navrhovaného IC na trámčekoch sa zvolili viaceré receptúry s hlavnou premennou – vodným súčiniteľom ( $w/c$ ). Vodný súčiniteľ sa navrhoval v troch variantoch s relatívne nízkymi hodnotami (0,3; 0,36 a 0,42) zabezpečujúcimi dosiahnutie stupňa hydratácie  $\alpha$  (0,83; 1 a 1).

V každom variante  $w/c$  sa overovala účinnosť vnútorného ošetrovania použitím rôznych hmotnostných dávok LWA (0 % = referenčné vzorky; 7 % a 13,2 %). Horná medzná dávka 13,2 % sa stanovila na základe návrhu vnútorného ošetrovania [33] ako dávka postačujúca na dokonalé IC tzv. uza-



vretého systému (sealed system) pri  $w/c = 0,36$ , ktorý podstupuje len samovysychanie. Presná receptúra pre každú zámes je uvedená v tab. 2.

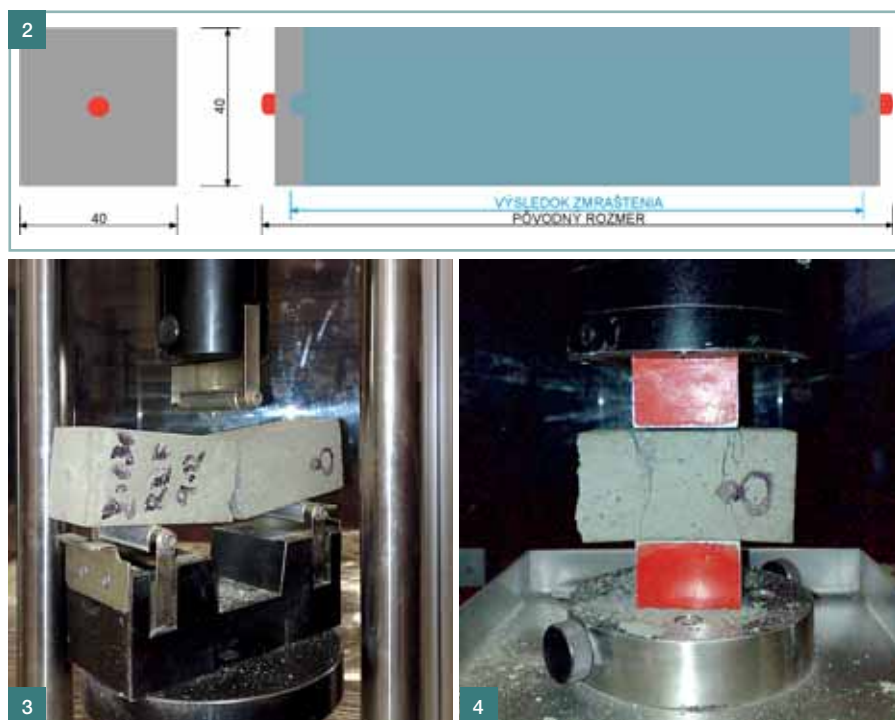
### Výroba a kondicionovanie vzoriek

Pred samotnou výrobou vzoriek sa vykonali pomocné a prípravné procesy. Jedným z nich bola príprava hutného kameniva sušením po dobu  $24 \pm 2$  h pri teplote  $110 \pm 5$  °C (podľa STN EN 1097-6). Vysušené hutné kamenivo sa uložilo v plastových uzatvárateľných nádobách tak, aby nedošlo k absorpcii vzdušnej vlhkosti. V prípade výroby vzoriek s IC sa  $24 \pm 2$  h pred miešaním do uzatvárateľnej plastovej nádoby pripravila dávka LWA (v danom pomere) spolu s celkovou dávkou zámesovej a ošetrovacej vody.

Miešanie sa vykonávalo v počítačom riadenej, tzv. maltárskej, miešačke (STN EN 196-1). Pred miešaním sa vždy dodržal rovnaký postup dávkovania.

Prvé sa nadávkovalo hutné kamenivo. Následne sa pridal cement a ručne sa premiešali. Ako posledná zložka sa pridalo nasiaknuté ľahké kamenivo (SLWA) aj s dekantovanou zámesovou vodou, do ktorej bola tesne pred miešaním pridaná WRA. Zmes sa opätovne mierne ručne premiešala. Samotné strojné miešanie sa vykonalo vždy rovnakým spôsobom – 60 s miešania pri nízkych otáčkach.

Zámes sa po miešaní naplnila do pripravených foriem (podľa prílohy A STN EN 1015-11). V závislosti od konzisten-



## EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti sa overovalo pôsobenie IC (v rôznych dávkach) na mechanické charakteristiky a objemové zmeny malty. Po odformovaní (vo veku 1 d) sa zmerali rozmery skúšobných telies a ich hmotnosti, z ktorých sa stanovila priemerná objemová hmotnosť vzoriek (receptúr). Následne sa vykonali dilatometrické skúšky trámčekov vybavených meracími kontaktmi. Trámčeky bez meracích kontaktov sa používali na stanovenie mechanických vlastností – pevnosti v ťahu za ohybu  $f_{t,fl}$  a pevnosti v tlaku  $f_c$ . Zistené mechanické vlastnosti sa s ohľadom na rôzne receptúry numericky vyjadřili ako pomerne pevnosti k objemovej hmotnosti. Počas skúšok sa zhotovilo celkovo 126 trámčekov.

### Objemové zmeny

Objemové zmeny sa merali dilatometrickou metódou podľa STN 72 2453 (princíp zachytáva obr. 2). Z každej skúšobnej vzorky sa objemové zmeny merali na 5 trámčekoch vo veku (1; 2; 3; 5; 7; 14 a 28 dní). Prvé meranie sa vykonalo prakticky ihneď po odformovaní skúšobných telies a považovalo sa za nulté meranie.

*Poznámka: Dilatometrická metóda merania objemových zmien neumožňuje zachytiť objemové zmeny uskutočnené vo veku medzi 0. a 24. h.*

### Pevnosť v ťahu pri ohybe a pevnosť v tlaku

Pevnosti v ťahu pri ohybe a v tlaku sa skúšali podľa STN EN 1015-11. Pevnosť v ťahu pri ohybe sa skúšala vždy

cie (vyplývajúcej z pomeru objemu kameniva a cementového tmelu) sa vzorky zhutnili. Referenčné vzorky sa zhutňovali na vibračnom stolíku po dobu 1 min s amplitúdou 0,6 mm. Vzorky s IC sa zhutňovali vo viacerých vrstvách ubíjaním kovovou tyčou s priemerom 40 mm. Po zhutnení vzoriek sa zahladil ich horný povrch a vo formách sa na  $24 \pm 2$  h uložili do prostredia s teplotou  $20 \pm 2$  °C a relatívnou vlhkosťou (RH)  $95 \pm 5$  % (dosiahnutá ustálená úroveň 98 %).

*Poznámka: Skúšobné telesá (5 trámčekov)*

určené na meranie objemových zmien sa opatrili kovovými meracími kontaktmi zabudovanými do foriem ešte pred ich plnením.

Po odformovaní vzoriek sa získali skúšobné telesá tvaru (tzv. maltárskych) trámčekov s rozmermi  $40 \times 40 \times 160$  mm. Trámčeky sa opätovne uložili do prostredia s teplotou  $20 \pm 2$  °C a relatívnou vlhkosťou (RH)  $98 \pm 1$  %, kde sa uchovávali ďalších 27 dní. Zmenšenie rozmerov vzoriek (na maltárske trámčeky) sa pristúpilo z kapacitných dôvodov laboratórií a vyžiadalo si prispôsobenie  $D_{max}$  (4 mm). Pomer veľkosti najmenej strany telesa ku  $D_{max}$  bol 10, čo stále vysoko prevyšovalo skúšobnícke požiadavky troj- alebo päťnásobok (podľa rôznych autorov) [7, 11].

Obr. 1 Ilustračný obrázok – jedna z trhlin stropnej dosky rodinného domu ■ Fig. 1 Illustrative figure – one of the cracks in ceiling slab of a family house

Obr. 2 Princíp dilatometrickej metódy stanovenia objemových zmien ■ Fig. 2 Principle of dilatometry method of volume changes measurement

Obr. 3 Skúška pevnosti v ťahu pri ohybe ■ Fig. 3 Test of flexural strength

Obr. 4 Skúška pevnosti v tlaku ■ Fig. 4 Test of compressive strength

Tab. 1 Vlastnosti použitého hutného a ľahkého kameniva ■

Tab. 1 Characteristics of used aggregate and lightweight aggregate

Vlastnosť	Kamenivo		
	hutné 0/4	ľahké 0/4 (M)	ľahké 0/1 (D)
Merná hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	2 510	1 070	1 700
Sypná hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	1 630	410	610
Nasiakavosť [%]	1,8	7,73	4,8
Medzerovitnosť [%]	35,06	61,68	64,12
Tvarový index [%]			

Tab. 2 Použité receptúry ■ Tab. 2 Used proportionings

Vodný súčiniteľ (w/c)	Zložka	Použitá receptúra [kg/m <sup>3</sup> ]		
		referenčný	7 % LWA	13,2 % LWA
0,3	cement	492,782	422,404	360,369
	voda	184,191	153,454	132,276
	kamenivo 0/4	1705,792	1562,75	1406,857
	WRA	1,891	1,625	1,389
	LWA 0/4 (M)	0	83,464	166,293
	LWA 0/1 (D)	0	44,202	88,068
0,36	cement	449,014	384,872	328,337
	voda	198,643	165,394	142,461
	kamenivo 0/4	1706,85	1563,588	1407,505
	WRA	1,725	1,483	1,268
	LWA 0/4 (M)	0	83,509	166,37
	LWA 0/1 (D)	0	44,226	88,108
0,42	cement	412,459	353,528	301,589
	voda	210,77	175,411	151,005
	kamenivo 0/4	1707,637	1564,211	1407,988
	WRA	1,586	1,363	1,166
	LWA 0/4 (M)	0	83,542	166,427
	LWA 0/1 (D)	0	44,243	88,139

na troch skúšobných telesách vo veku 7; 14 a 28 d. Účelom skúšky bolo primárne získanie úlomkov pre skúšky pevnosti v tlaku. Výsledky pevnosti v ťahu za ohybu sa použili ako kontrolné výsledky pre hodnotenie pevnosti v tlaku pričom sa vychádzalo z empiricky odvodeného pomeru  $f_{t_7} : f_{t_28} = 1 : 7$ .

## INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV

### Objemová hmotnosť

Náhrada určitej časti hutného kameniva ľahkým kamenivom nutne vyvoláva zmenu objemovej hmotnosti. Spôsobená je primárne nižšou mernou a synnou hmotnosťou LWA v porovnaní s hutným kamenivom (tab. 1) a sekundárne aj zmenou pomerného objemu cementového tmelu a kameniva. V praktickej stránke sa tieto dva činitele prejavujú na konzistencii (spracovateľnosti) čerstvého betónu (prípadne malty) a súvisiacej zhutiteľnosti.

Objemová hmotnosť môže byť za určitých okolností nepriamym ukazovateľom zhutiteľnosti čerstvej zmesi alebo pevnosti mladého a/alebo zatvrdnutého betónu. Pre účely tejto práce sa stanovila informatívne, a to s cieľom overenia technologickej vhodnosti navrhovaných receptúr a overenia spoľahlivosti návrhu receptúr.

Z výsledkov meraní skutočnej objemovej hmotnosti  $\rho_v$  [kg/m<sup>3</sup>] vyplynulo niekoľko kvalitatívnych čiastkových záverov.

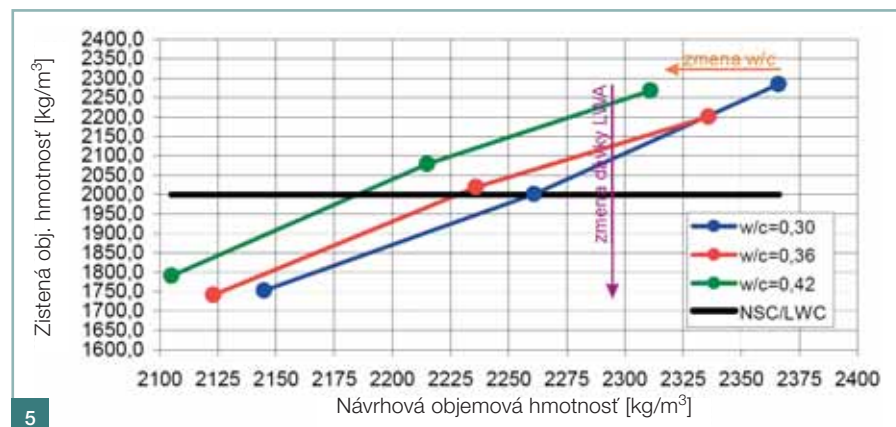
Dávka LWA (13,2 % hm.) pre úplné pokrytie straty vlhkosti na hydrataciu utesneného systému, pri zvolených frakciách 0/4 a 0/1 mm a pomere ich miešania 75 : 25 %, spôsobuje cca 15% pokles objemovej hmotnosti. Výrazný pokles objemovej hmotnosti znemožnil zatriedenie betónu (podľa STN EN 206-1) medzi konštrukčné betóny (NSC), keďže dosiahnutá objemová hmotnosť sa pohybovala výrazne pod 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Obdobné správanie sa pozorovalo aj u vzoriek s dávkou LWA 7 %.

Úmerne nižšej dávke LWA (7 %) sa prejavil aj pokles objemovej hmotnosti reprezentovaný hodnotou cca 6 %. Pokles objemovej hmotnosti je spôsobený prevažne nedostatkom cementového tmelu a nevhodnou zhutiteľnosťou v laboratórnych podmienkach. Použilo sa zhutňovanie ubíjaním. Pre takto tuhé konzistencie sa odporúča zhutňovanie vibrolisovaním, čo nevylučuje použitie zmesí v praktických aplikáciách. Za zhoršenou zhutiteľnosťou zmesí s dávkou LWA stojí jednak komplex vlastností LWA (napr.: zrnitosť, tvarové charakteristiky, jemnosť a hlavne takmer nemerateľná schopnosť fyzikálne viazať vodu na povrchu), ktoré sa v návrhu receptúry [33] zohľadnili len čiastočne alebo vôbec. V druhom rade bola zhutiteľnosť ovplyvnená pomerne nízkymi vodnými súčinitelmi.

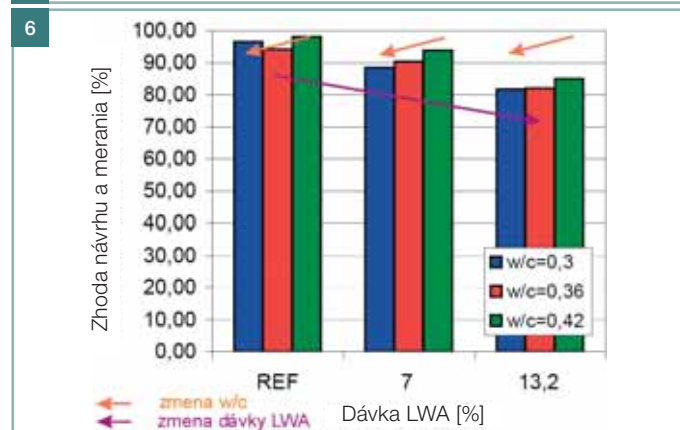
V návrhu receptúr sa vyššia dôležitosť priradila nízkym vodným súčiniteľom všeobecne potrebným pre určité stupne vplyvu prostredia, dosiahnutie vyšších pevností, zhotovenie trvanlivých konštrukcií. Rovnako vyššia dôležitosť sa v návrhu LWA priradila rovnomernosti distribúcie zrníčok LWA (zásobníkov vody) v cementovom tmele tak, aby sa vzdialenosť medzi jednotlivými zrníčkami (tzv. spacing factor) minimalizovala.

V obr. 5 je zobrazená závislosť zistenej a navrhovanej (predpokladanej) objemovej hmotnosti pri troch použitých vodných súčiniteľoch a vektory príspevkov dávky LWA a zmeny vodného súčiniteľa. V obr. 6 sú prehľadnejšie zachytené relatívne odchýlky dosiahnutých a predpokladaných objemových hmotností, resp. zhoda dosiahnutej a navrhovanej objemovej hmotnosti. Vizualným porovnaním je možné odhaliť vplyv vodného súčiniteľa, ale hlavne rozhodujúci vplyv dávky LWA.

Obr. 6 (v stĺpci referenčného betónu) dosahuje zhodu 94 až 98 %, čo indikuje, že princíp návrhu receptúry ako taký je použiteľný. Navyše objemová hmotnosť sa merala po 24hodinovom kondicionovaní pri teplote 20 °C a relatívnej vlhkosti 98 %, čo v skutočnosti umožňuje stratu vlhkosti zo vzoriek, a tým aj zmenu objemovej hmotnosti. Úpravy alebo korekcie si vyžaduje návrh receptúr s vnútorným ošetrovaním pomocou LWA. Ten sa môže v princípe upraviť viacerými možnosťami (úprava koeficientu vyplnenia, zvýšenie odhadovaného množstva vody fyzikálne viazaného na povrch LWA, úprava pomeru miešania frakcií LWA, náhrada jemných frakcií LWA za hrubšie).



5



6

Obr. 5 Porovnanie návrhových a dosiahnutých objemových hmotností ■ Fig. 5 Comparison of designed and reached bulk density

Obr. 6 Zhoda navrhovanej (predpokladanej) a dosiahnutej objemovej hmotnosti ■ Fig. 6 Match of designed (assumed) and reached bulk density

Obr. 7 Objemové zmeny  $w/c = 0,3$  pri 20 °C a RH 98 %, a) 1. až 28. deň, b) 1. až 5. deň ■ Fig. 7 Volume changes  $w/c = 0,30$  at 20 °C and RH 98 %, a) day 1-28, b) day 1-5

Obr. 8 Objemové zmeny  $w/c = 0,36$  pri 20 °C a RH 98 %, a) 1 až 28. deň, b) 1. až 5. deň ■ Fig. 8 Volume changes  $w/c = 0,36$  at 20 °C and RH 98 %, a) day 1-28, b) day 1-5

Obr. 9 Objemové zmeny  $w/c = 0,42$  pri 20 °C a RH 98 %, a) 1. až 28. deň, b) 1. až 5. deň ■ Fig. 9 Volume changes  $w/c = 0,42$  at 20 °C and RH 98 %, a) day 1-28, b) day 1-5



*Poznámka: Je potrebné zdôrazniť, že vzhľadom na použitie hutného kameniva iba frakcie 0/4 mm, akákoľvek variabilita vo vlastnostiach LWA (pri náhradne hutného kameniva) sa na vlastnostiach vzoriek prejavila vyšším účinkom, ako by tomu bolo v betóne s väčším zrnom kameniva (použitím viacerých frakcií).*

Z hľadiska objemovej hmotnosti, pri používaní jemných frakcií kameniva (hutného aj LWA), sa zo skúšok [35 a 36] vylúčila hmotnostná dávka (náhrada) 13,2 %.

**Objemové zmeny**

Skúšky objemových zmien, podľa STN 72 2453, zachytávajú len objemové zmeny odohrávajúce sa po odformovaní skúšobných telies, ktoré sa vykonalo vo veku 24 h. Z analýzy sa tým

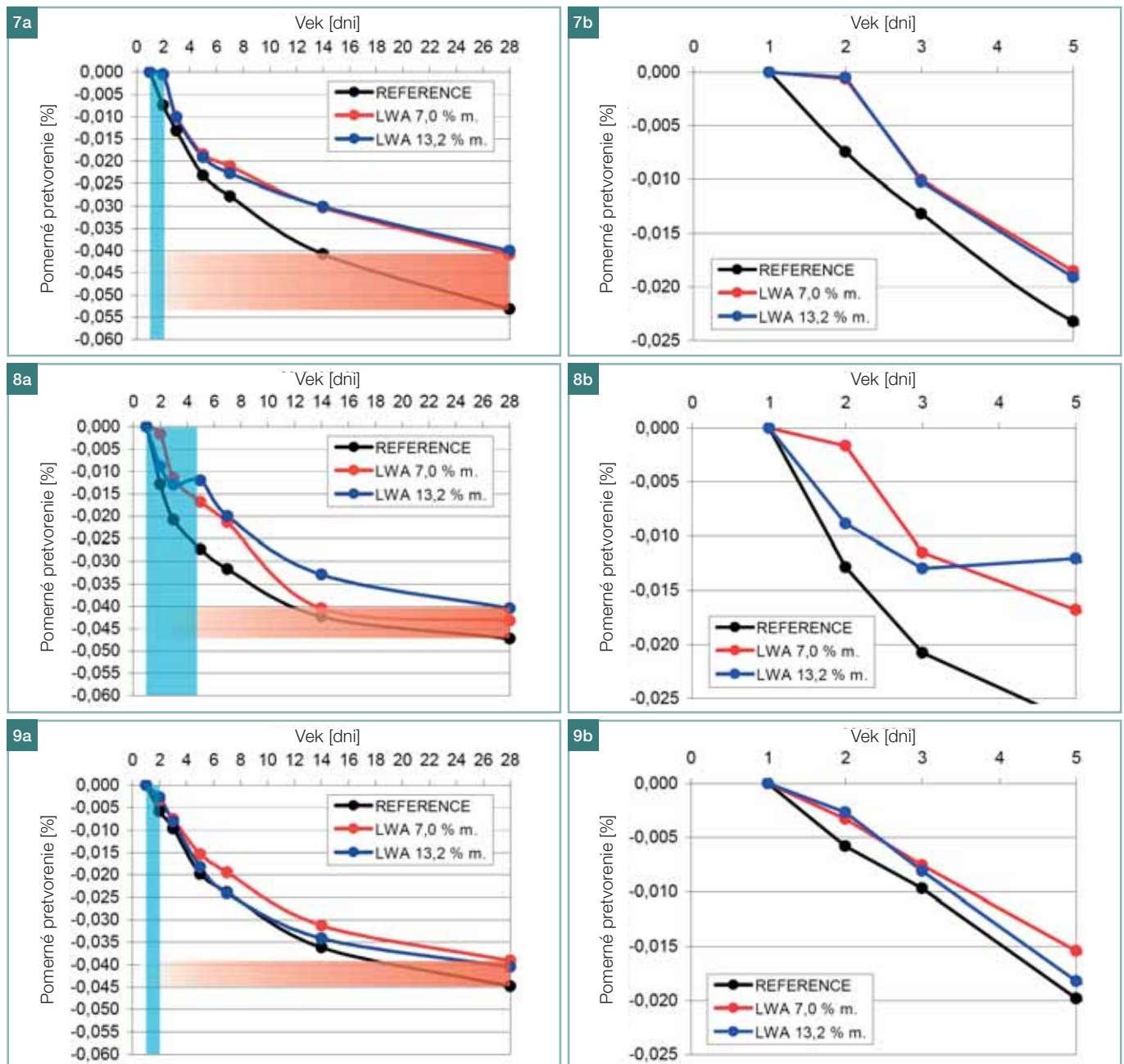
technicky vylučuje obdobie charakteristické najintenzívnejšími objemovými zmenami počas dynamickej fázy hydratácie.

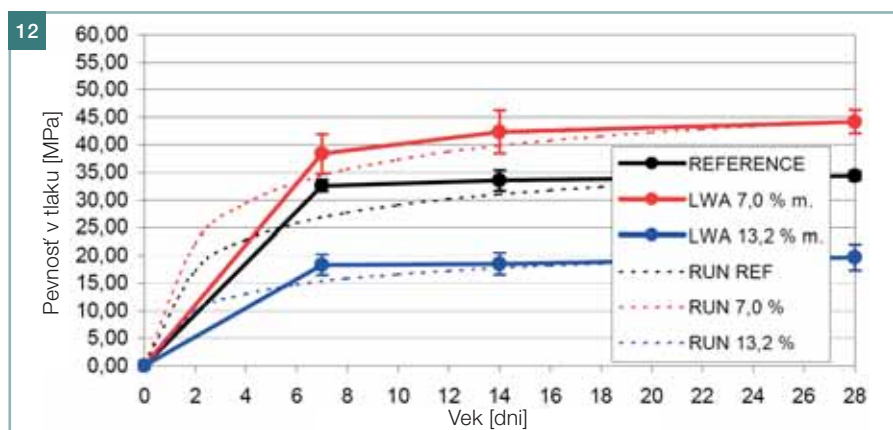
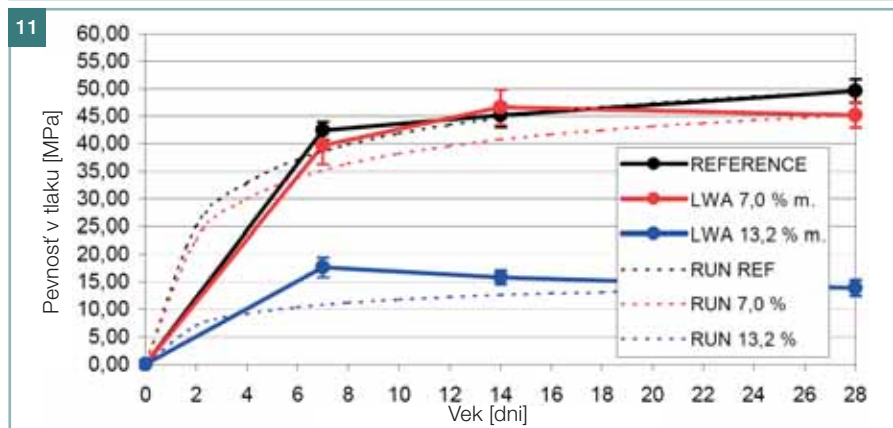
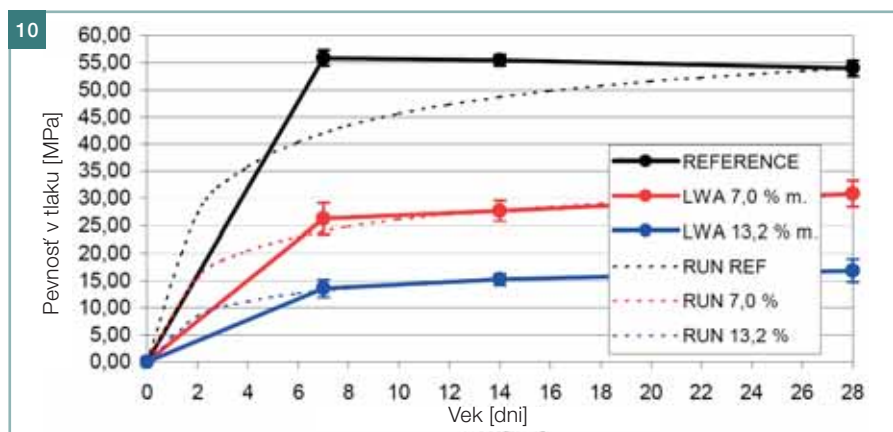
Vychádzajúc zo zistení viacerých autorov (napr. [12]) možno konštatovať, že počas prvých hodín veku betónu dochádza k objemovým zmenám, ktorých veľkosť bezpečne môže zodpovedať aj štvornásobku objemových zmien meraných týmto postupom v siedmomi dňoch veku. Výsledky týchto skúšok preto treba chápať a interpretovať ako objemové zmeny materiálu medzi vekom 1 a 28 d i napriek tomu, že výsledky skúšok (spravidla) po 90 d vykonávaných obdobným spôsobom (podľa STN 73 1320) sa interpretujú ako celkové objemové zmeny (resp. zmraštenie).

Je potrebné zdôrazniť, že ani jedna zo štandardizovaných metód nezachytáva objemové zmeny pred odformovaním skúšobných telies.

Merali sa objemové zmeny (po odformovaní) pri expozícii prostrediu  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $\text{RH } 95 \pm 5 \text{ \%}$  (dosiahnutá ustálená úroveň 98 %). Priebeh objemových zmien sa spracoval zvlášť pre varianty vodného súčiniteľa  $w/c$  (0,3; 0,36 a 0,42), ktorým zodpovedá maximálny stupeň hydratácie  $\alpha_{\text{max}}$  (0,83; 1 a 1), v tomto poradí. Pre každý variant  $w/c$  sa overoval aj účinok vnútorného ošetrovania IC na objemové zmeny.

Základnou hypotézou vo vnútornom ošetrovaní bolo, že s rastúcou dávkou LWA (7, resp. 13,2 %), a tým aj množstvom „zabudovanej“ ošetrovacej vody, budú objemové zmeny betónu kle-





Obr. 10 Meraný a predpokladaný nábeh pevnosti v tlaku vzoriek s  $w/c = 0,3$  pri 20 °C a RH 98 % ■ Fig. 10 Measured and anticipated gain in compressive strength of samples with  $w/c = 0,30$  at 20 °C and RH 98 %

Obr. 11 Meraný a predpokladaný nábeh pevnosti v tlaku vzoriek s  $w/c = 0,36$  pri 20 °C a RH 98 % ■ Fig. 11 Measured and anticipated gain in compressive strength of samples with  $w/c = 0,36$  at 20 °C and RH 98 %

Obr. 12 Meraný a predpokladaný nábeh pevnosti v tlaku vzoriek s  $w/c = 0,42$  pri 20 °C a RH 98 % ■ Fig. 12 Measured and anticipated gain in compressive strength of samples with  $w/c = 0,42$  at 20 °C and RH 98 %

Tab. 3 Prehľad meraných 28dňových stredných pevností v tlaku ■  
Tab. 3 Overview of mean values of 28-day compressive strengths

Okrajové podmienky	Dávka LWA [%]	Stredná pevnosť v tlaku [MPa]		
		$w/c = 0,3$	$w/c = 0,36$	$w/c = 0,42$
20 °C, RH 98 %	REF 0	53,93	49,59	34,36
	7	30,84	45,17	44,17
	13,2	16,84	13,94	19,67

sať. Skúšky preukázali čiastočnú pravdivosť predpokladu. Objemové zmeny idealizovane utesneného systému (20 °C a RH 98 %) možno chápať ako zmrašťovanie reálnej konštrukcie pri ideálnom ošetrovaní proti strate vlhkosti do prostredia.

Obr. 7a, b; 8a, b a 9a, b zachytávajú merané (dlhodobé 28dňové a krátkodobé 5dňové) objemové zmeny vzoriek s rôznymi dávkami LWA (0; 7 a 13,2 %) pri rôznych  $w/c$  (0,3; 0,36 a 0,42). Ako už bolo uvedené s vodným súčiniteľom súvisí maximálny stupeň hydratácie  $\alpha_{max}$  (0,83; 1 a 1), ktorý sa pri interpretácii výsledkov referenčnej vzorky (REFERENCE) s 0% dávkou LWA musí zohľadniť.

Obr. 7a, b prezentujú časový priebeh objemových zmien vzoriek s veľmi nízkym vodným súčiniteľom 0,3 ( $\alpha_{max} = 0,83$ ). Z maximálneho stupňa hydratácie je jasné, že referenčná vzorka (bez IC) nutne musí podstupovať samovyšychanie, a teda výraznejšie objemové zmeny [13]. Kvalitatívnym rozborom výsledkov sa dospelo k čiastkovým záverom, že vnútorné ošetrovanie použitím LWA (v dávkach 7 % resp. 13,2 %) spôsobilo redukcii objemových zmien (v súlade s pozorovaním [16]). Táto sa vyčíslila vo veku 28 d na cca 0,015 %. Za predpokladu, že za dokonalé IC sa považuje stav, keď sa úplne eliminujú objemové zmeny, potom je možné tvrdiť, že účinnosť IC pri týchto podmienkach sa dosiahla na úrovni približne 25 % (bez ohľadu na dávku LWA). Účinok jednotlivých dávok LWA na objemové zmeny sa nepodarilo spoľahlivo kvantifikovať.

Modrá oblasť v obrázku 7a zvyrazňuje ďalšie významné zistenie. IC spôsobuje oddialenie nástupu (začiatku) objemových zmien (v súlade s [16]), čo je výhodné z dôvodu vyšších pevností materiálu pri začiatku objemových zmien (keďže voľné obj. zmeny prakticky neexistujú). Podrobnejšie sú objemové zmeny v mladom veku betónu zachytené v obr. 7b. Je evidentné, že objemové zmeny (kontrakcia) pri vnútornom ošetrovaní nastupujú až vo veku 2 d. To znamená, že do tohto veku je IC takmer 100% účinné. Na obr. 7b (neskôr aj 8b) je vhodné vysvetliť pravdepodobné správanie vzoriek s IC vo veku nezachytenom meraním. Vzorky s dávkou LWA, v dôsledku prítomnosti ošetrovacej vody, mierne zväčšia svoj objem (pozorované aj v [15, 16, 17, 18]), kontrakciu začínajú z kladnej hodnoty pomerného pretvorenia a tempo obje-

mových zmien medzi 1. a 2. dňom vzoriek s LWA je priamoúmerné množstvu vody uvoľnenej „pri napučaní betónu“.

Obr. 8a, b prezentujú časový priebeh objemových zmien vzoriek s nízkym vodným súčiniteľom 0,36 ( $\alpha_{\max} = 1$ ). Referenčná vzorka (bez vnútorného ošetrovania) podstupuje samovysychanie, no v porovnaní s  $w/c$  0,3 (obr. 7a) sú objemové zmeny nižšie, čo je priamym dôsledkom vyššieho vodného súčiniteľa. Vnútorné ošetrovanie použitím LWA (v dávkach 7 resp. 13,2 %) spôsobilo redukciu objemových zmien. Táto sa vyčísliť vo veku 28 d na cca 0,004 a 0,007 %. Účinnosť IC, pri týchto podmienkach, sa (vo veku 28 d) dosiahla na úrovni približne 7 a 14 % (pre 7 a 13,2 % dávku LWA).

Modrá oblasť v obrázku 8a zvyrazňuje oddialenie nástupu (začiatku) objemových zmien pri dávke 13,2 %. Oddialenie je pozorovateľné v dvoch dávkach LWA rozdielne. Dávka 7 % LWA sa správa štandardne a v druhom dni veku betónu pôsobí s účinnosťou cca 85 % (menej ako v prípade  $w/c$  0,3). Mierne zníženie účinnosti je spôsobené relatívnym dostatkom vody pre hydratáciu cementu a súvisiacim rýchlejšim (nespomaleným) nábehom objemových zmien v referenčnej vzorke.

Z priebehu objemových zmien vzorky s dávkou 13,2 % (obr. 8a) možno pozorovať napučiavanie vo veku cca 5 d. Takéto neštandardné správanie (neopakované v žiadnej inej vzorke) sa vysvetľuje nehomogénnosťou distribúcie veľkosti pórov v LWA [37]. Objemové zmeny indikujú nedostatok veľkých (cca 50 až 100 nm) a prebytok malých pórov (10 až 30 nm) v LWA, pričom v treťom dni veku dôjde k dosiahnutiu hraničnej RH v cementovom tmele pre uvoľnenie vody fyzikálne viazanej v malých póroch LWA. Podrobnejší pohľad na objemové zmeny v mladom veku betónu poskytuje obr. 8b.

Obr. 9a, b prezentujú časový priebeh objemových zmien vzoriek s (pre NSC) bežným vodným súčiniteľom 0,42 ( $\alpha_{\max} = 1$ ). Referenčná vzorka (bez IC) nepodstupuje samovysychanie. Vodný súčiniteľ je plne postačujúci pre pokrytie potreby vody na dosiahnutie  $\alpha_{\max} = 1$  bez dodatočnej ošetrovacej vody. V porovnaní s  $w/c$  0,3 (obr. 7a) sú objemové zmeny nižšie a v súlade s očakávaniami podľa  $\alpha_{\max}$  sú vo veku 28 d rovnaké ako v prípade  $w/c$  0,36 (obr. 8a).

Vnútorné ošetrovanie použitím LWA (v dávkach 7, resp. 13,2 %) spôso-

bilo nevýraznú redukciu objemových zmien. Táto sa vyčísliť vo veku 28 d na cca 0,005 %. Účinnosť IC pri týchto podmienkach sa (vo veku 28 d) dosiahla na úrovni približne 10 % (pre obe dávky LWA). Zdôvodnenie nízkej účinnosti možno hľadať v dostatku vlhkosti pre hydratáciu a nevyužití alebo malom využití ošetrovacej vody z LWA. V obr. 9b možno pozorovať spomalený nábeh objemových zmien, pričom vo veku 2 d ošetrovanie pomocou dávky 7 % zabezpečilo účinnosť IC cca 45 % a pomocou dávky 13,2 % na úrovni cca 53 %.

Je zrejme, že účinnosť IC klesá s rastúcim vodným súčiniteľom (v súlade s [13]). LWA disponuje určitým potenciálom, kapacitou ošetrovacej vody, ktorú je schopné uvoľniť v určitom čase, preto je jeho pôsobenie limitované. Doba účinku skúšaného LWA závisí od okrajových podmienok expozície betónu – od intenzity straty vlhkosti a poklesu relatívnej vlhkosti cementového tmelu. Vnútorné ošetrovanie kvázi utesnených vzoriek (RH 98 %) preukázalo účinnosť v 2. dni veku betónu na úrovni približne 92; 85 a 52 % ( $w/c$  0,3; 0,36 a 0,42).

Redukciu objemových zmien v 7. dni veku, ako sa nimi zaoberal Henkensiefken a Bentz [15] nie je možné dosiahnuť použitím LWA. Zdôvodnenie sa musí hľadať v pórovej štruktúre LWA, ktorá je výrazne odlišná – distribučná krivka rozdelenia veľkosti pórov je nevhodne plochá a je posunutá do oblasti malých a stredných pórov (50 nm) [37].

Významné obmedzenie absolútnych dlhodobých objemových zmien metódou IC nie je opodstatnené očakávať, pretože IC takto neúčinkuje v prvopočiatku hydratácie, ale až v období, keď v cementovom tmele vzniknú póry veľkosti najväčších pórov LWA, t.j. najväčšie póry v cementovom tmele (s najväčším podielom kumulatívneho objemu) už vznikli a objemové zmeny z chemického a autogénneho zmršťovania sa prejavili. Hlavným použiteľným benefitom je kvázi oddialenie začiatku nábehu objemových zmien po začatí pôsobenia LWA a čas začiatku pôsobenia je možné regulovať kombináciou ošetrovacích metód.

### Pevnosť v tlaku

Pevnosť v tlaku sa stanovila postupom podľa STN EN 1015-11 na úlomkoch skúšobných telies (trámčekov). Interpretuje sa ako stredná kocko-

vá pevnosť vo veku stanovenia (7; 14 a 28 d). Skúškami sa overoval vplyv dávky LWA na mechanické vlastnosti pri rôznych vodných súčiniteľoch ( $w/c = 0,3; 0,36$  a  $0,42$ ) pri expozícii prostrediu  $20 \pm 2$  °C a RH  $95 \pm 5$  % (dosiahnutá ustálená úroveň 98 %).

Skúškami zistené stredné pevnosti v tlaku  $f_{cm}(t)$  vo veku  $t$  [MPa] sa doplnili o predpokladaný priebeh vývoja pevnosti podľa modelu prevzatého z STN EN 1992-1-1, kde vystupuje koeficient zohľadňujúci vek betónu a stredná hodnota pevnosti betónu v tlaku vo veku 28 d [MPa]. Vzťah (16) reprezentuje exponenciálny charakter nábehu pevnosti v závislosti od času  $t$  [d].

Obr. 10 zachytáva vzorky (utesnený systém) s nízkym vodným súčiniteľom 0,3 ( $\alpha_{\max} = 0,83$ ). Z časovej závislosti meraných stredných pevností v tlaku je evidentné normálne. V obr. 10 je možné pozorovať prakticky zastavenie hydratácie referenčnej vzorky v siedmom dni veku. Vysvetľuje sa to spotrebovaním všetkej zámesovej vody na hydratáciu. Naproti tomu, vzorky s určitou dávkou LWA vykazujú priebežný nárast pevností, a to v dôsledku uvoľňovania ošetrovacej vody z ich pórovej štruktúry. Možno pozorovať pokles absolútnych pevností vzoriek s LWA, ktorý je závislý od dávky LWA. Tento jav súvisí s výraznou zmenou spracovateľnosti vzoriek s LWA (pozri objemovú hmotnosť) pri použití hutného kameniva  $D_{\max}$  4 mm. Zmenená objemová hmotnosť sa podieľa na znížení pevnosti v tlaku priamo nižšou objemovou hmotnosťou a súvisiacou pevnosťou LWA, ale aj zhoršením spracovateľnosti a zvýšením medzerovitosti. Rovnaká situácia sa objavuje prakticky pri všetkých vodných súčiniteľoch s tým rozdielom, že s rastúcim  $w/c$  sa vplyv na pokles pevnosti znižuje. Pri receptúrach betónu s vyšším  $D_{\max}$  by nemalo dochádzať ku výraznej zmene spracovateľnosti.

Na obr. 11 sa ukazuje, že ošetrovanie utesneného systému 7% dávkou LWA zvýšilo 28dňovú pevnosť v tlaku na úroveň referenčnej vzorky i napriek zhoršeniu spracovateľnosti a zvýšeniu medzerovitosti (zníženiu objemovej hmotnosti). Súvisí to zrejme s relatívne nízkym vodným súčiniteľom a pozitívnym účinkom IC, ako sa pozorovalo aj v [25]. Vzorka s dávkou 13,2 % je ale natoľko medzerovitá, že zvýšenie množstva vody dostupného na hydratáciu cementu nestačí na pokrytie pevnostných strát v dôsledku prítomnos-



## Literatúra:

- [1] STN EN 1097-6 Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva, Časť 6: Stanovenie objemovej hmotnosti zrn a nasiakavosti
- [2] STN EN 1015-9 Metódy skúšania mált na murovanie. Časť 9: Stanovenie času spracovateľnosti čerstvej malty a jeho spresnenie
- [3] STN EN 196-1 Metódy skúšania cementu. Časť 1: Stanovenie pevnosti
- [4] STN EN 1015-11 Metódy skúšania mált na murovanie. Časť 11: Stanovenie pevnosti zatvrdnutej malty v ťahu pri ohybe a v tlaku
- [5] STN 72 2453 Skúška objemovej stálosti malty
- [6] STN EN 206-1 Betón. Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda
- [7] STN EN 12390-7 Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 7: Objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu
- [8] STN EN 12350-6 Skúšanie čerstvého betónu. Časť 6: Objemová hmotnosť čerstvého betónu
- [9] STN 73 1320 Stanovenie objemových zmien betónu
- [10] STN EN 1992-1-1 Eurokód 2 Navrhovanie betónových konštrukcií, Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, Národná príloha
- [11] Technicko-kvalitatívne podmienky MDPT SR, Časť 8: Cementobetónový kryt vozoviek, 2008
- [12] Sant G., Lura P., Weiss J.: Measurement of Volume Change In Cementitious Materials at Early Ages, Journal of The Transportation Research Board, No. 1979, Washington, 2006, pp: 21–29
- [13] Review of Mechanistic Understanding And Modeling And Uncertainty Analysis Methods for Predicting Cementitious Barrier Performance, CBP-TR-2009-002, Rev.0, US Department of Energy Office of Environmental Management Washington, DC, November 2009, available at: <http://cementbarriers.org/>
- [14] Mönning S.: Superabsorbent additions in concrete – applications, modelling and comparison of different internal water sources, IWB der Universität, Stuttgart, 2009
- [15] Henkensiefken R.: Internal Curing in Cementitious Systems Made Using Saturated Lightweight Aggregate, Master Thesis, Purdue University, West Lafayette, 2008
- [16] Hammer T., Bjøntegaard Ø., Sellevold E.: Internal Curing – Role of Absorbed Water in Aggregates, Spec. Publ., Vol. 218, ACI, Farmingtonhills, 2004, pp: 131–142
- [17] Jensen O., Hansen P.: Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective, Cement and Concrete Research, Vol. 31 (12), 2001, 1859–1865
- [18] Lura P., Bisschop J.: On the Origin of Eigenstresses in Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Composites, 26 (5): 445
- [19] Lura P.: Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete, Ph.D. Thesis, TU Delf, The Netherlands, 2003
- [20] Nilsen A., Monteiro P., Gjorv O.: Estimation of the Elastic Moduli of Lightweight Aggregate, Cement and Concrete Research, 25(2), 1995, pp: 276–280
- [21] Holm T.: Lightweight Concrete and Aggregates, ASTM Standard Technical Publ. 169C, 48, 2001, pp: 522–532
- [22] Jensen O., Hansen P.: Water-Entrained Cement-Based Materials. I. Principles and Theoretical Background, Cement and Concrete Research 31(5), 2001, pp: 647–654
- [23] Bremner T., Holm T.: Elastic Compatibility and the Behavior of Concrete, ACI Journal 83 (2), 1986, pp: 244–250
- [24] Neville A.: Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete, ACI Material Journal 94(1), 1997, pp: 71–74
- [25] Weber S., Reinhardt H.: A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing, Advanced Cement Based Materials 6(2), 1997, pp: 59–68
- [26] Dela B.: Eigenstresses in Hardening Concrete, Ph.D. Thesis, Dept. of Structural Engineering and Materials, TU of Denmark, Lyngby, Denmark, 2000
- [27] Powers T. C.: Physical Properties of Cement Paste, Proc. of Fourth Inter. Symp. on Chemistry of Cement, Washington 1960, pp. 577–609
- [28] Bentz D., Lura P., Roberts J.: Mixture Proportioning for Internal Curing, Concrete International, Vol. 27, No. 2, ACI, Farmington Hills, 2005
- [29] Report on Internally-Cured Concrete Using Preconditioned Absorptive Lightweight Aggregate, ACI Committee 308 and 213, ACI, Farmingtonhills, 2011, p. 36
- [30] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 1. Strata vody z betónu, Beton TKS, Vol. 10, No. 1, Beton TKS, Praha, 2010
- [31] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 2. Superabsorbčné polyméry, Beton TKS, Vol. 10, No. 2, Beton TKS, Praha, 2010
- [32] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 3. Nasiaknuté ľahké kamenivo, Beton TKS, Vol. 10, No. 3, Beton TKS, Praha, 2010
- [33] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 4. Konvenčný návrh ošetrovania pomocou ľahkého kameniva, Beton TKS, Vol. 10, No. 6, Beton TKS, Praha, 2010, pp: 40–43
- [34] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 5. Návrh receptúry čerstvého betónu s vnútorným ošetrovaním, Beton TKS, Vol. 11, No. 5, Beton TKS, Praha, 2011, pp: 36–42
- [35] Briatka P., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 6. Odparovanie vody, konvencia a skutočnosť, Beton TKS, Vol. 12, No. 6, Beton TKS, Praha, 2012
- [36] Briatka P., Janotka I., Makýš P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 7. DTA, TG a DSC overenie pôsobenia vnútorného ošetrovania, Beton TKS, Vol. 13, No. 1, Beton TKS, Praha, 2013
- [37] Briatka P., Makýš P.: Možno účinne použiť pórovité kamenivo na vnútorné ošetrovanie betónu?, Beton TKS, Vol. 11, No. 4, Beton TKS, Praha, 2011

ti LWA a súvisiacich negatívnych vplyvov. V obr. 11 (a iných) môže pôsobiť metúco zdanlivý pokles pevnosti vzorky s 13,2 % LWA medzi 7. a 28. dňom. V skutočnosti však pevnosť v rôznom veku reprezentuje hodnoty v rôznych skúšobných telesách. Zdanlivý pokles môže byť spôsobený variabilitou výsledkov, a mal by sa preto interpretovať ako zanedbateľný alebo nulový nárast pevnosti, pretože zo samotnej podstaty hydratácie nieje pokles reálny.

Obr. 12 zobrazuje vývoj pevnosti utesneného systému s vodným súčiniteľom  $w/c = 0,42$ . V tomto prípade došlo dokonca k zvýšeniu pevnosti vzoriek s LWA pri dávke 7 % nad hodnotu

ty dosahované referenčným betónom. Vzorky s dávkou LWA 13,2 % stále spôsobujú pokles pevnosti, no pokles relatívnej pevnosti vztiahnutý na referenčnú vzorku sa zmiernil, a to vplyvom zvýšenia pomeru cementového tmelu.

### ZÁVER

Náhrada časti hutného kameniva ľahkým kamenivom spôsobuje zmeny objemovej hmotnosti. Zistilo sa, že dávka LWA 13,2 % pri zvolených frakciách 0/4 a 0/1 mm a pomere ich miešania 75 : 25 %, spôsobuje cca 15% pokles objemovej hmotnosti, čo zneumožňuje zatriedenie betónu (podľa

STN EN 206-1) medzi konštrukčné betóny (NSC), keďže dosiahnutá objemová hmotnosť sa pohybovala výrazne pod 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Zhoda medzi očakávanou a meranou objemovou hmotnosťou referenčného betónu dosahuje úroveň 94 až 98 %, čo indikuje, že princíp návrhu receptúry, ako taký, je použiteľný.

Utesnené systémy s určitou náhradou hutného kameniva za LWA (7 resp. 13,2 %) sa prejavili výraznou účinnosťou najmä v mladom veku betónu. Účinnosť logicky klesá s rastúcim vodným súčiniteľom, a teda množstvom vody dostupnej k hydratácii. Účinnosť v mladom veku možno interpretovať

ako oddialenie začiatku nábehu objemových zmien, čo sa javí ako najväčšia výhoda. Pri zvolených dávkach LWA sa nezaznamenali výrazné dlhodobé redukcie objemových zmien, a to v dôsledku nie najvhodnejšej skladby pórov v zrnách LWA.

Väčšia časť objemových zmien v cementovom tmele prebehne vo veľmi mladom veku – ešte skôr ako začne IC prostredníctvom LWA pôsobiť. S ohľadom na túto skutočnosť sa odporúča navrhovať použité LWA (pri nezmenení pórovej štruktúry) najmä na vnútorné ošetrovanie v neskoršom veku betónu – napr. po 5 až 7 d resp. po dosiahnutí permeability povrchu znemožňujúcej penetráciu vody z vonkajšieho ošetrovania do jadrovej oblasti. Takéto využitie by bolo vhodné pre HSC alebo UHSC z dôvodu potenciálneho zníženia  $w/c$ , súčasného zabezpečenia  $\alpha_{\max} = 1$  a oddialenia nástupu prípadného autogénneho zmrašťovania (podľa návrhu receptúry a technológie ošetrovania) do obdobia s podstatne vyššími pevnosťami.

Vnútorné ošetrovanie použitým LWA je vhodné kombinovať s inými metódami ošetrovania. Pre dosiahnutie tzv. samoošetrovania betónu v kritickom veku je nevyhnutné použiť LWA s vhodnejšou pórovou štruktúrou (viac veľkých pórov – nad cca 100 nm).

Z hľadiska informatívnej pevnosti v tlaku betónu resp. hmoty s  $D_{\max} = 4$  mm sa dospelo k záverom poznačeným relatívne veľkou variabilitou s ohľadom na účinky dávky LWA 7 a 13,2 %. Celkový prehľad stredných 28dňových pevností vzoriek s  $D_{\max} = 4$  mm poskytuje tab. 3. Pri hodnotení sa zohľadňuje aj fakt, že pevnosť materiálu je výrazne ovplyvnená pevnosťou najslabšej zložky – LWA [20].

Ukázalo sa, že tlakové zaťaženie pôsobí na zrníčka LWA tak, že dôjde k ich rozštípeniu [23] na hranici pevnosti, ktorá je daná jednak pórovitosťou LWA, ale aj pevnosťou materiálu tvoriaceho steny pórov [21]. Rovnako sa zohľadňuje aj skutočnosť, že rastúca vlhkosť betónu spôsobuje zdanlivo nižšiu pevnosť [22], čo čiastočne vysvetľuje nižšie zdanlivé pevnosti vzoriek s LWA [19]. Mierny pokles pevností (obzvlášť pri vyšších dávkach LWA) sa pozoroval aj vo viacerých prípadových štúdiách [30], pričom však zároveň došlo k redukcii vzniku trhlin.

Prejav vplyvu prostredia (kondicionovania) na výsledné 28dňové pevnosti klesá so zvyšujúcim sa vodným súčini-

etom po dosiahnutí hodnoty približne 0,36, čo je v súlade s predpokladmi podľa viacerých autorov [27, 28, 29]. Táto skutočnosť je daná rozdeľným zámesovej vody v betóne z hľadiska viazanosti [33]. Receptúry s nižším  $w/c$  (pod 0,36) nemajú žiadnu šancu dosiahnuť maximálny stupeň hydratácie  $\alpha_{\max} = 1$ , preto logicky, s klesajúcim  $w/c$  pri konštantnej dávke LWA, sa dosiahne vyšší pomerný účinok IC na pevnosť betónu.

Naproti tomu, receptúry s  $w/c$  v intervale (0,36 až 0,42) môžu pri utesnenom systéme dosiahnuť  $\alpha_{\max} = 1$ . Keďže už majú istý potenciál dosiahnuť absolútnu hydratáciu – hornú hraničnú hodnotu, tak je zjavné, že pomerný účinok IC sa zákonite musí znížiť.

V prípade  $w/c$  vyšších ako 0,42 [27, 28] je v utesnenom systéme dostatok vody na dosiahnutie absolútnej hydratácie a účinok IC z hľadiska vyšších pevností zaniká. Tieto princípy platia za predpokladu, že návrh receptúry zohľadňuje aj určitú požadovanú konzistenciu a konštantný pomer objemu kameniva a cementového tmelu.

Výsledky pevností v tlaku preukázali potenciál LWA pôsobiť ako IC obzvlášť v utesnených systémoch. Je potrebné zdôrazniť, že návrh LWA (najmä drvených a/alebo mletých frakcií) nutne musí zohľadňovať zväčšenie špecifického povrchu, zníženie objemovej hmotnosti betónu a eliminovať zníženie pomerného množstva cementového tmelu spôsobeného zvýšením objemovej dávky kameniva (+ LWA).

Prezentované výsledky nemožno interpretovať ako závery, pretože boli získané zo vzoriek zhotovených za prijatia zjednodušujúcich predpokladov a zúžená výberu okrajových podmienok skúšok.

Publikované informácie sú čiastkovými závermi dizertačnej práce „Ošetrovanie plošných betónových konštrukcií proti strate vlhkosti“, ktorú materiálne podporili STU v Bratislave, TSÚS Bratislava, LIAS Vintířov, PCLA Ladce a BASF.

Ing. Peter Briatka, PhD.  
TSÚS

Studená 3, 821 04 Bratislava  
e-mail: briatka@tsus.sk  
briatka.p@gmail.com



Doc. Ing. Peter Makýš, PhD.

Stavebná fakulta STU  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava



# RSTAB RFEM

**Vyzkousejte naše programy  
Bezplatné zapůjčení licence**



## RSTAB 7

Program pro výpočet prutových konstrukcí



## RFEM 4

Program pro výpočet prostorových konstrukcí metodou konečných prvků



- Podpora nových evropských norem
- Různé národní přílohy
- Cena programu již od 33 450 Kč
- Česká verze včetně manuálů

**Bezplatná studentská verze**

**Demoverze zdarma ke stažení**

**www.dlupal.cz**

Ing. Software Dlubal s.r.o.  
Anglická 28, 120 00 Praha 2  
Tel.: +420 221 590 196  
Fax: +420 222 519 218  
[www.dlupal.cz](http://www.dlupal.cz)  
[info@dlupal.cz](mailto:info@dlupal.cz)

