

# Ľahké kamenivo vhodné aj na vnútorné ošetrovanie betónu?

Betón je materiál citlivý na okrajové podmienky okolitého prostredia. Jeho potenciálne úžitkové vlastnosti možno dosiahnuť, ak sú splnené za striktné požiadavky na teplotu, relatívnu vlhkosť a rýchlosť prúdenia vzduchu počas zrenia a správne realizovaného ošetrovania povrchu. Okrem klasického spôsobu ošetrovania povrchu zrejúceho betónu existuje nový koncept, založený na prísune vody z nasiaknutého ľahkého kameniva, ktoré sa nachádza v hydratujúcom cementovom tmele, teda priamo vnútri betónu.

Nový koncept ošetrovania betónu predstavili pred približne 20 rokmi v USA. V európskych krajinách sa tento koncept uplatňuje v obmedzenom rozsahu.

Ošetrovacia voda sa v prípade vnútorného ošetrovania pridáva do betónu počas miešania. Aby sa predišlo zvyšovaniu vodného súčiniteľa ( $w/c$ ), ošetrovacia voda nesmie byť voľná, ale musí byť viazaná na určitý nosič (médium). Nosič musí mať vhodnú pórovitosť, nasiakavosť a zrnitosť, čo je dôležité na správnu distribúciu v čerstvej zmesi. V zásade musí byť schopný vodu nasiaknuť a následne ju pri strate vlhkosti cementového tmelu vzhľadom na vonkajšie alebo vnútorné vysychanie primerane uvoľňovať. S klesajúcou relatívnou vlhkosťou (pôvodne úplne saturovaného) cementového tmelu spôsobenou autogénnou spotrebou vody na hydratáciu, ako aj vystavením podmienkam okolitého prostredia ( $RH$ ,  $T$ , rýchlosť vetra  $v_w$ ) [5] sa začínajú póry nosiča vyprázdňovať. Tak sa generujú kapilárne napätia  $P_{CAP}$  (Pa), ktoré postupne stúpajú.

S rastúcim  $P_{CAP}$  (klesajúca  $RH$ ) sa polomer vyprázdňovaných pórov  $r_{CAP}$  (m) znižuje. Inak povedané, voda sa najskôr vyprázdňuje z pórov s najväčším polomerom až po najmenší polomer (obr. 1) [8]. Pri zohľadnení faktu, že póry nosiča sú väčšie ako póry cementového tmelu, možno dospieť k záveru, že cementový tmel zostáva saturovaný a ošetrovanie funguje.

## Používané nosiče

V súčasnosti sa používajú dva prevládajúce typy nosičov. Prvý funguje na princípe jemnej látky nazývanej superabsorbčné polyméry (SAP), ktorá môže zväčšiť svoj objem približne desaťkrát. Keď SAP nasiakne vodu, veľkosť častíc možno merať v milimetroch, čo po ich vyprázdnení spôsobí zvýšenie makropórovitosti cementového tmelu, a tým aj odolnosti proti striedavému zmrazovaniu a rozmrazovaniu. Druhým typom nosiča je umelé kamenivo na báze expandovanej bridlice (všeobecne ílovitých hornín) s nízkou objemovou hmotnosťou, vysokou pórovitosťou a pevnou kostrou – ľahké kamenivo (LWA). Použitím ľahkého kameniva možno vďaka redukcii pórovitosti cementového tmelu (na rozdiel od SAP) a udržiavaniu nízkeho vodného súčiniteľa  $w/c$  a rastúceho  $\alpha$  (stupňa hydratácie) vytvárať hutné betónové konštrukcie s vysokou pevnosťou.

Metódu vnútorného ošetrovania sa odporúča použiť pri výstavbe veľkých plošných betónových konštrukcií s vyššími požadovanými pevnosťami [2, 5]. Pri realizácii týchto konštrukcií sa zvyčajne súčasne stretávajú najnepriaznivejšie podmienky. Konštrukciu nie je možné ochraňovať proti strate vody vo veľmi skorom veku betónu. Tempo straty vody závisí od  $RH$ ,  $T$  a  $v_w$  a v neposlednom rade od slnečného žiarenia a jeho absorpcie povrchom konštrukcie [5]. Ak sa vnútorné ošetrovanie navrhne na

preklenutie obdobia veľmi skorého veku betónu, začne betón po uplynutí kritického času samovysychať a strácať tak vodu potrebnú na dokončenie prebiehajúcej hydratácie. To môže viesť k jej zastaveniu, keďže povrchová vrstva betónu je príliš hutná (nedostatočne permeabilná) na to, aby umožnila ošetrovacej vode z povrchu penetrovať do jadrovej oblasti [1, 2, 5, 9]. Vnútorné ošetrovanie sa preto, na rozdiel od konvenčných metód, musí navrhnuť ešte pred miešaním betónu. Na to však treba poznať správanie konkrétneho nasiaknutého ľahkého kameniva (SLWA) v zmysle straty (uvoľňovania) vlhkosti.

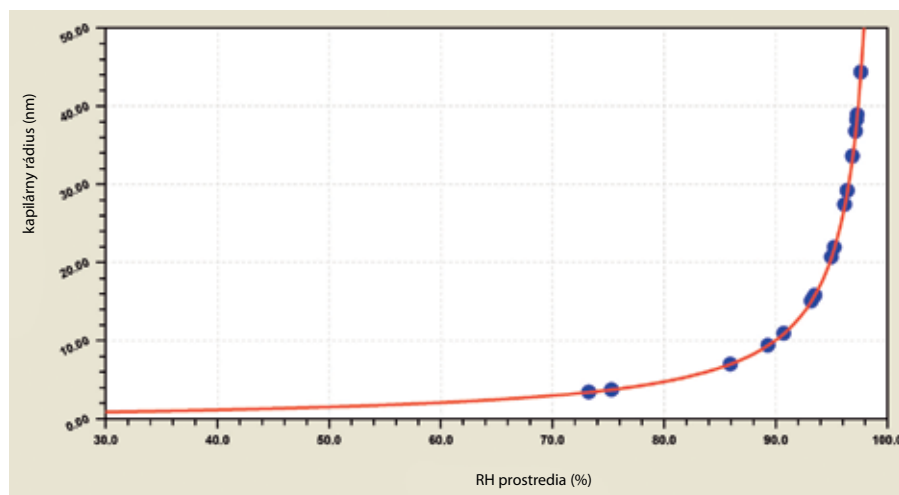
## Správanie nasiaknutého ľahkého kameniva

Desorpcia (voda skutočne dostupná na ošetrovanie) SLWA je kľúčová vlastnosť v zmysle schopnosti nasiaknutého ľahkého kameniva dodávať vodu vysychajúceho cementového tmelu prostredníctvom jej satia kapilárnym napätím väčším ako  $P_{CAP}$  zo saturovaných pórov SLWA [9, 10]. Pravdepodobný model desorpcie možno odvodiť od čiar zrnitosti každej frakcie a podľa  $RH$  prostredia, ktorému sa vystavia pripravené vzorky. Týmto spôsobom možno zhodnotiť aj vhodnosť každej vzorky (frakcie) ľahkého kameniva na zamýšľané použitie s ohľadom na konkrétne podmienky prostredia alebo aspoň posúdiť potrebu doplnkových ošetrovacích metód.

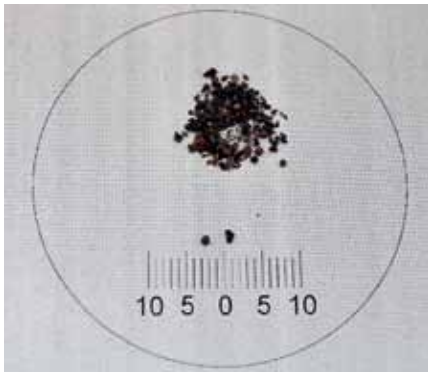
V rámci experimentov sa skúšali vlastnosti materiálu, ako sú sypaná hmotnosť, objemová hmotnosť, zrnitosť a 24-hodinová nasiakavosť.

## Overenie vlastností ľahkého kameniva používaného v Európe

Na overenie vlastností ľahkého kameniva, ktorý sa vykoná v laboratóriu, sa použilo umelé ľahké kamenivo Liapor vyrábané v rotačných peciach expandovaním z bridlice pri teplote 1 090 až 1 200 °C s prirodzene spečeným povrchom. Pri výbere sa špeciálna pozornosť venovala pórovému systému kameniva, a to v zmysle otvorený versus uzavretý pórový systém. Pórový systém je ovplyvnený technológiou výroby, respektíve mletím produktu v záverečnej fáze. Takisto sa zväžila jemnosť každej



Obr. 1 Polomer kapilár ako funkcia RH



Obr. 2 Frakcia 0/1 mm



Obr. 3 Frakcia 0/4 mm



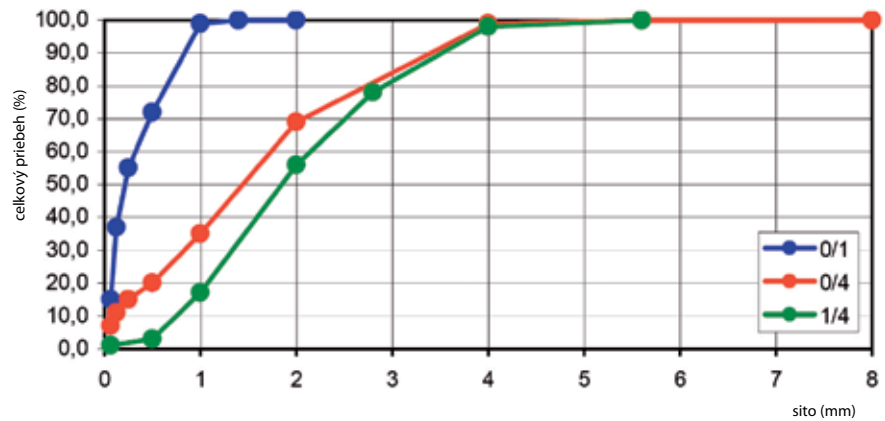
Obr. 4 Frakcia 1/4 mm

frakcie i sypná a objemová hmotnosť, ako aj dvojhodinová nasiakavosť. Neopomenuli sa ani charakteristiky súvisiace so životnosťou finálnej betónovej konštrukcie, napríklad maximálny obsah chloridov, maximálny celkový obsah síry alebo odolnosť proti alkalicko-kremičitej reakcii (ASR).

Vybrali sa tri frakcie ľahkého kameniva označené (v súlade s STN EN 12620 [11] a STN EN 13055-1 [12]) ako frakcie priemeru najmenšieho zrna (otvoru sita) a najväčšieho zrna (obr. 2 až 4).

### Doplnkové skúšky

Na doplnenie sa v súlade s STN EN 1097-3 [13] a STN EN 1097-6 [14] vykonali skúšky sypnej a objemovej hmotnosti. Čiary zrnitosti vybraných frakcií sa stanovili postupom podľa STN EN 933-1 [15]. Počas fázy týchto doplnkových skúšok sa zistila aj nasiakavosť podľa STN EN 1097-6 [14]. Výsledky a materiálové charakteristiky sú zhrnuté v tab. 1 a na obr. 5.



Obr. 5 Čiary zrnitosti skúšobných vzoriek

Tab. 1 Zhrnutie výsledkov doplnkových skúšok

Vlastnosť (jednotka)	0/1	0/4	1/4
Sypná hmotnosť (kg/m <sup>3</sup> )	610	410	760
Objemová hmotnosť (kg/m <sup>3</sup> )	1690	1090	1210
Nasiakavosť (%)	4,73	7,16	14,39

### Príprava vzoriek

Vzorky použité na meranie desorpcie sa nechali počas 24 hodín a pri teplote  $20 \pm 2$  °C jednotlivo nasiaknuť vodou. Po  $24 \pm 2$  hodinách sa prebytočná voda vyliala a kamenivo sa povrchovo vysušilo papierovými utierkami. Následne sa okrúhle plastové misky naplnili SLWA a pripravili sa skúšobné vzorky s hmotnosťou 20 až 25 g.

Vykonali sa tri skúšky na troch rôznych súboroch vzoriek. V jednom súbore sa nachádzalo osem skúšobných vzoriek (misiiek) každej z troch frakcií, teda spolu 24 vzoriek.

### Skúšobný postup

Prípravené vzorky sa uložili do provízornej komory s regulovaným prostredím (konštantná RH, T a zanedbateľná rýchlosť prúdenia vzduchu  $v_w$ ). Prostredie vnútri komory sa regulovalo jednoduchým princípom rovnovážneho stavu izolovanej sústavy. Izolovanú sústavu predstavovala otvorená vodná hladina a vzduch nad ňou. Po nejakom čase sa medzi nimi dosiahol rovnovážny stav RH 100%. Regulácia vlhkosti sa uskutočňovala miernym prúdením vzduchu do komory cez nastaviteľnú (a nakalibrovanú) škáru v hornej časti komory. Skúšobné vzorky sa pravidelne vážili. Pri zaznamenaní nulového úbytku hmotnosti (nedošlo k strate vody – vzorka nebola ďalej schopná uvoľniť vlhkosť pri daných podmienkach) sa pristúpilo k zníženiu RH v komore. Zaznamenalo sa osem rovnovážnych stavov. Počas posledného merania sa vzorky vystavili veľmi suchému prostrediu (pod 30 %) za použitia silikagélu.

### Výsledky

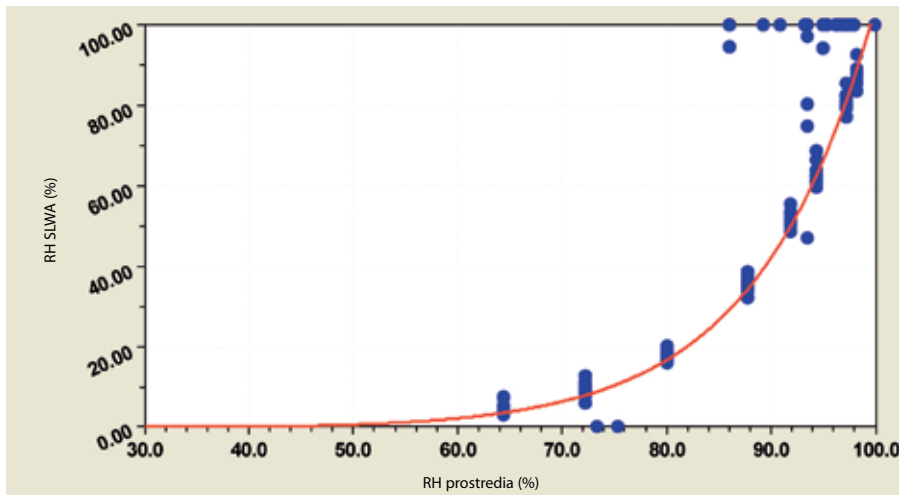
Spolu sa vykonali skúšky, ktoré trvali približne 70 dní. Odkúšalo sa 72 vzoriek (24 z každej frakcie), čo dokopy dalo 696 hodnôt na analyzovanie (232 pri každej frakcii).

### Desorpcia

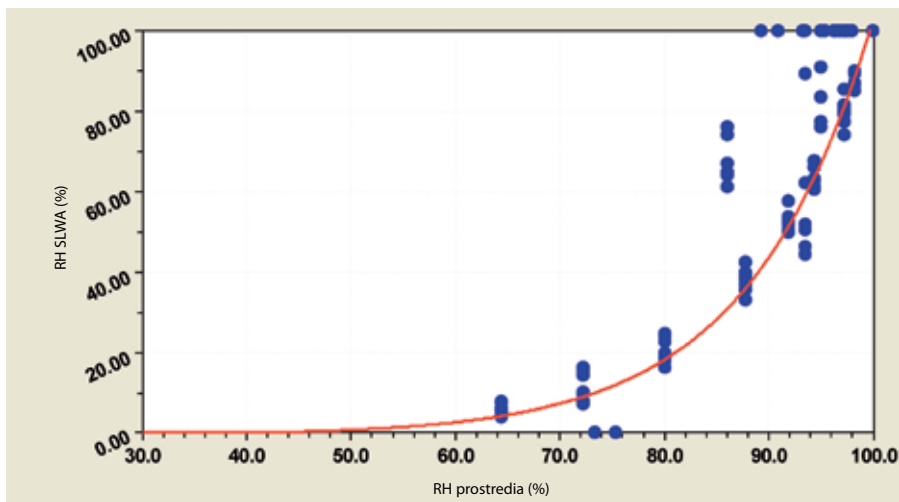
Desorpciu (stratu vlhkosti) nasiaknutého ľahkého kameniva možno vidieť na obr. 6 až 8. Grafy priebehu desorpcie sú v zhode s očakávaniami, pretože hnacou silou desorpcie je prevažne RH prostredia, s ktorým sa nasiaknuté ľahké kamenivo snaží dosiahnuť rovnovážny stav. Funkcia opisujúca všetky desorpčné krivky získané pri konštantných teplotách a rýchlosti vetra musí byť určitou variáciou mocninového modelu. Z grafov vidieť, že vlhkosť vzoriek sa blíži k nule pri RH asi 40 %, čo sa označuje ako kritický bod (zodpovedajúce  $P_{CAP}$  je približne 125 MPa), v ktorom kapilárne menisky kolabujú, pretože polomer vyprázdňovaných kapilár dosahuje asi 1,1556 nm (veľkosť trochmolekúl vody) [8, 10]. To znamená, že funkcia desorpcie môže byť definovaná len pre interval RH (40%; 100%). Zistilo sa, že medzi výsledkami sú mierne rozdiely, ktoré s najväčšou pravdepodobnosťou možno pripísať zrnitosti (hlavne mernému povrchu) ľahkého kameniva, ktorá ovplyvňuje celú škálu jeho vlastností. Dokonalé povrchové vysušenie zrn frakcií s otvorenou pórovou štruktúrou je prakticky nemožné. To vedie k vyššiemu počiatkovému obsahu vody v nasiaknutom ľahkom kamenive. V niektorých prípadoch o viac ako 5 %. S týmto zistením súvisí ďalšie pozorovanie strmosti desorpčných kriviek. Krivky desorpcie jemnejších frakcií sú strmšie, no všetky sa pretínajú približne v jednom bode zodpovedajúcom RH prostredia 97 %. To indikuje, že pri 97-percentnom RH prostredia sa na povrchu ľahkého kameniva nenachádza žiadna fyzikálne viazaná voda.

### Výsledky skúšok

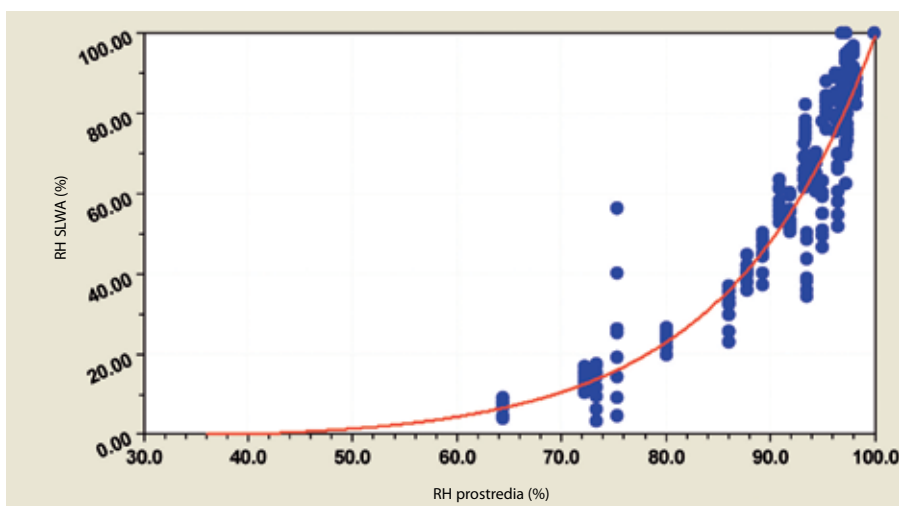
Z pohľadu vhodnosti na vnútorné ošetrovanie nie je možné jednoznačne stanoviť vhodnosť frakcií ľahkého kameniva. Pri



Obr. 6 Desorpčná krivka – frakcia 0/1



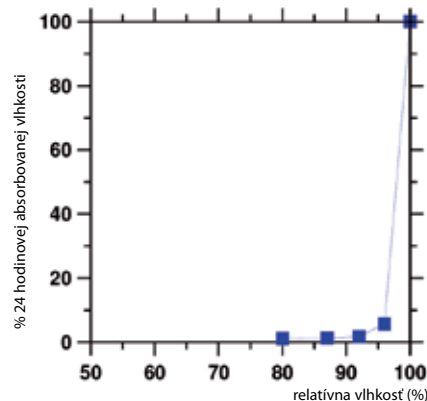
Obr. 7 Desorpčná krivka – frakcia 0/4



Obr. 8 Desorpčná krivka – frakcia 1/4

porovnaní desorpčných kriviek skúšaných frakcií ľahkého kameniva (Liapor) s prezentovanou na obr. 9 možno vidieť uvoľňovanie vody z pórov ľahkého kameniva v neskoršom čase (pri nižších RH). Tým by sa mohli vytvoriť dutiny v cementovom tmele a vyvolaním poruchy cementovej matrice následným rastúcim kapilárnym napätím.

Na druhej strane oddialenie začiatku uvoľňovania vody z ľahkého kameniva znamená, že väčšie množstvo vody bude dostupné v cementovom tmele v neskoršom čase. Na obr. 12 možno vidieť, že testované ľahké kamenivo má príliš málo veľkých pórov (účinných vo veľmi skorom veku betónu).



Obr. 9 Desorpčná krivka SLWA [7, 8]

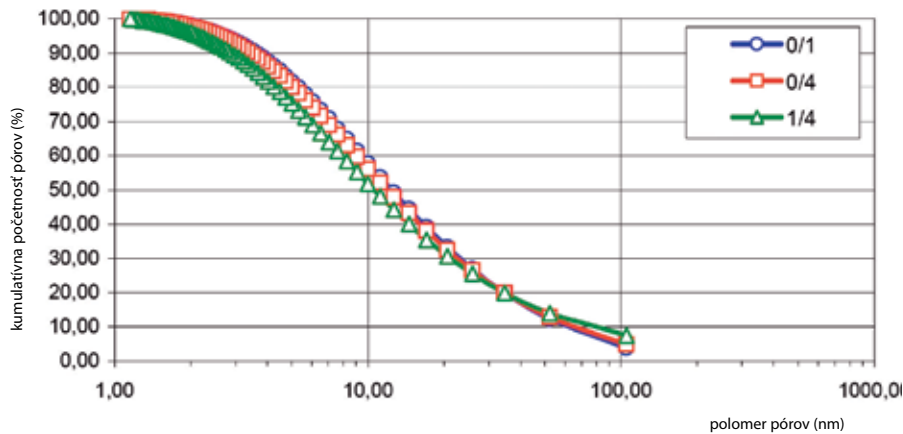


Obr. 10 Pórová štruktúra ľahkého kameniva (USA)

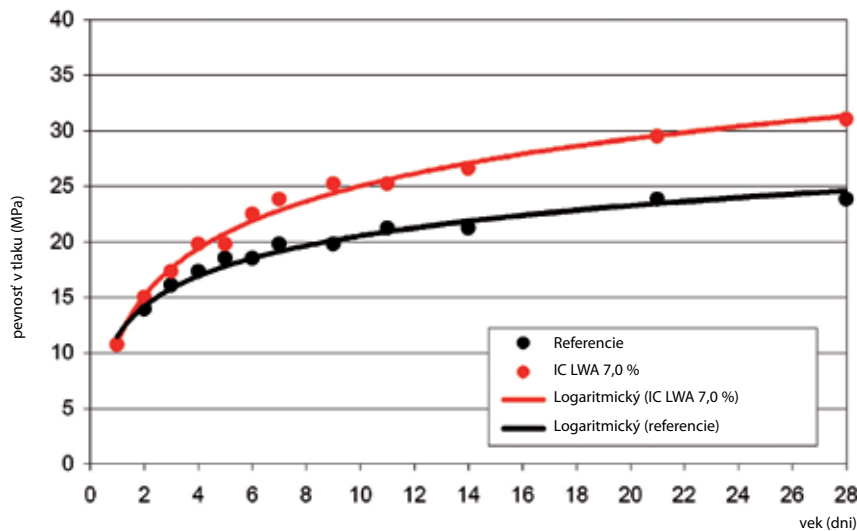


Obr. 11 Zrná ľahkého kameniva Liapor (vľavo uzavretá štruktúra, vpravo otvorená štruktúra)

Navyše na obr. 11 (v porovnaní s obr. 10) možno pozorovať charakter a distribúciu pórov v ľahkom kamenive. Zatiaľ čo ľahké kamenivo na obr. 10 má evidentne otvorenú štruktúru, ľahké kamenivo na obr. 11 má pórovú štruktúru uzavretú (frakcia 1/4). Pri porovnaní dvoch zrníčok ľahkého kameniva na obr. 10 možno na ľavom pozorovať úplne uzavretú pórovú štruktúru, kým na pravom sú aspoň náznaky otvorenia pórovej štruktúry. Podľa množstva viditeľne veľkých pórov a úzkych driekov kapilár možno usudzovať, že merané hodnoty sú poznačené takzvanou falošnou pórovitosťou. To je jav, keď nie je možné zmerať množstvo veľkých pórov práve v dôsledku prítomnosti úzkych kapilár a veľké póry sa zaznamenajú až pri prekročení  $P_{CAP}$  zodpovedajúceho týmto kapiláram Na obr. 12 možno vidieť, že približne len 50 % pórov má polomer väčší ako 10 nm (zodpovedá  $RH_{AMB}$  asi 90 %). Zvolené ľahké kamenivo s vysokou pravdepodobnosťou nie je vhodné na vnútorné ošetrovanie vo veľmi sko-



Obr. 12 Kumulatívna početnosť pórov podľa polomeru



Obr. 13 Overenie účinnosti vnútorného ošetrovania pri dávke 7,0 % LWA prostredníctvom vplyvu na pevnosť betónu v tlaku pri pôsobení prostredia s teplotou 30 °C, RH 40 % a rýchlosti vzduchu 3 km/h

rom veku betónu, ale mohlo by byť veľmi účinné, ak by začalo pôsobiť napríklad po 24 hodinách, dovtedy by sa betón ošetroval iným spôsobom. Tu treba poznamenať, že iné spôsoby (konvenčného) ošetrovania, napríklad kropenie či generovanie hmly, sú vhodnejšie práve v tomto štádiu zretia betónu, pretože hutnosť betón s časom rapídne rastie.

## Záver

Ľahké kamenivo dostupné na európskom trhu vykazuje podobné správanie ako kamenivo používané v USA. Skúškami sa však zistili výrazné rozdiely v meraných absolútnych hodnotách, respektíve v strmosti desorpčných kriviek, ktorá reprezentuje tempo straty vlhkosti. V porovnaní s ľahkým kamenivom používaným v USA, Liapor preukázal pomalšiu desorpciu. To indikuje výrazný rozdiel v distribučnej funkcii veľkosti pórov ľahkého kameniva, v dôsledku čoho sa zhoršuje funkčnosť vnútorného ošetrovania vo veľmi skorom veku betónu. Aj napriek tomuto miernemu nedostatku možno Liapor efektívne využívať na vnútorné ošetrovanie (obr. 13). Pôsobením vnútorné-

ho ošetrovania pomocou 7,0 % dávky Liaporu sa zvýšila pevnosť betónu v tlaku približne o 30 %.

Účinnosť vnútorného ošetrovania sa za posledných 6 rokov overovala aj viacerými praktickými aplikáciami (najmä v USA). Jednou z nich bola betonáž mostovky Bartell Road (obr. 14). Pri tejto konkrétnej aplikácii sa dosiahlo neželané zníženie pevnosti v tlaku po 7 dňoch, no po 28 dňoch sa zaznamenal 15-percentný nárast v porovnaní s referenčným betónom. Referenčný betón sa použil na chodníky a zvodidlá.



Obr. 14 Liatie betónu s vnútorným ošetrovaním pri budovaní Bartell Road v New Yorku [16]

Zatiaľ čo pri obhliadkach po 1 a 3 rokoch sa vo vozovke zistila len jedna úzka trhlinka, v chodníkoch a zvodidlách sa vytvoril štandardný vzor širokých trhlín [16].

TEXT: Ing. Peter Briatka

doc. Ing. Peter Makýš

OBRÁZKY a FOTO: autori

Ing. Peter Briatka je doktorandom na stavebnej fakulte STU v Bratislave a výskumným pracovníkom TSÚS, n. o., v Bratislave.

Doc. Ing. Peter Makýš, PhD. pôsobí na Katedre technológie stavieb Stavebnej fakulty v Bratislave.

Recenzoval doc. Ing. Ivan Juríček, PhD., ktorý pôsobí na Katedre technológie stavieb Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

## Literatúra

- 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, ACI, 2010.
- Briatka, P.: Internal Curing of Concrete using Lightweight Aggregate, In: proceedings of conference Design, Preparation and Execution of Constructions, held in Bratislava, March 2010.
- Briatka, P. – Makýš, P.: Elimination of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete, In: proceedings of Junior Scientist Conference held in Vienna, April, 2010.
- Briatka, P.: Reduction of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Pavements and Elimination of Maintenance Expanses, In: proceedings of The Young European Arena of Research, Forum of European National Highway Research Laboratories, 2010.
- Briatka, P. – Makýš, P.: Fresh Concrete Curing – Part 1: Water Loss from Concrete, In: Beton T.K.S., Vol. 10, No. 1, Beton TKS, Prague, 2010.
- Wittmann, F. H.: On the Action of Capillary Pressure in Fresh Concrete, In: Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 1, 1976.
- Henkensiefken, R.: Internal Curing in Cementitious Systems Made Using Saturated Lightweight Aggregate, Master Thesis, Purdue University, West Lafayette, 2008.
- Radlinska, A. et. al.: Shrinkage Mitigation Strategies in Cementitious Systems: A Closer Look at Differences in Sealed and Unsealed Behavior, In: Journal of the Transportation Research Board, Washington, 2008.
- Lura, P.: Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete, PhD. Thesis, Delf University, Delf, 2003.
- Adamson, A.W. – Gast, A. P.: Physical Chemistry of Surfaces, 6th Ed. Wiley-Interscience, New York, 1997.
- STN EN 12620 + A1: 2008: Kamenivo do betónu.
- STN EN 13055-1: 2004: Ľahké kamenivo. Časť 1: Ľahké kamenivo do betónu, malty a injektážnej malty.
- STN EN 1097-3: 2002: Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva. Časť 3: Stanovenie sypnej hmotnosti a medzervitosti.
- STN EN 1097-6: 2003: Skúšky na stanovenie mechanických a fyzikálnych vlastností kameniva. Časť 6: Stanovenie objemovej hmotnosti zŕn a nasiakavosti.
- STN EN 933-1: 2002: Skúšky na stanovenie geometrických charakteristík kameniva. Časť 1: Stanovenie zrnitosti. Sítový rozbor.
- Bentz, D. – Weiss, J.: Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review, NIST, Gaithersburg, 2011, p: 82.