

## LEHKÉ VYSOKOHODNOTNÉ BETONY LIGHTWEIGHT HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

MICHALA HUBERTOVÁ,  
RUDOLF HELA

*Příspěvek se zabývá poznatky z vývoje lehkých vysokohodnotných betonů, zejména lehkých samozhutnitelných betonů s možností čerpání s použitím výhradně lehkého kameniva Liapor vyráběného v České republice.*

*Research work is aimed on development of Lightweight High-Performance Concrete (LWHP), especially of Lightweight Self Compacting Concrete (LWSCC) with the use of lightweight aggregates „Liapor“ manufactured in the Czech Republic.*

V posledních letech směřuje vývoj betonu k tzv. vysokohodnotnému betonu. Zejména je možné zřetelně sledovat aplikace samozhutnitelných betonů a vysokopevnostních betonů a začínající aplikace lehkých betonů s využitím lehkého přírodního nebo umělého pórovitého kameniva. Je třeba podotknout, že vývoj nových betonů vždy stojí před problémem nedostatku adekvátních norem, návrhových směrnic a potřebných zkušeností. Z těchto důvodů je cílem této práce ověřit a aplikovat teorii pro vysokopevnostní a samozhutnitelné betony na lehké samozhutnitelné betony a dále ověřit možnost čerpatelnosti. Příspěvek popisuje zkušenosti ze sloučení těchto směrů, tedy zejména vývoje lehkých samozhutnitelných betonů při dosažení co nejvyšší pevnosti s možností čerpání.

### LEHKÝ VYSOKOHODNOTNÝ BETON

Vysokohodnotné betony (High-Performance Concrete – HPC), jak už sám název napovídá, jsou betony vyšších užitných vlastností. Jsou to betony splňující speciální kombinaci vlastností a požadavků, které nemohou být vždy dosaženy běžně používanými složkami betonu, normálním procesem mísení, ukládání a ošetřování betonu. Tzn. že na vlastnosti těchto betonů v čerstvém i zatvrdlém stavu jsou kladeny speciální požadavky. Pro čerstvý beton je určující snadné ukládání a hutnění bez segregace, sedimentace a bleedingu a pro ztvrdlý beton je pak určující kromě vysokých pevností také trvanlivost a odolnost betonu vůči agresivnímu pro-

středí, lepší dlouhodobé mechanické vlastnosti, malé smrštění, stejnorodá struktura, kvalitní povrchy atd. Přednosti vysokohodnotného betonu lze tedy vidět v jednodušším betonování vlivem zmenšení stupně vyztužení, v obecném zeštíhlení konstrukcí, a tím i snížení zatížení navazujících konstrukcí, ve výrazně vyšší odolnosti díky lepší mikrostruktúře betonu (vyšší vodotěsnost, odolnost proti mrazu a abrazi, odolnost proti chloridům, omezená rychlost karbonatace a sulfatace apod.), a tím i ve vyšší životnosti.

Co se týká lehkých betonů, jejich výhody i nevýhody jsou dobře známy. Aplikace na poli nekonstrukčního výplňového tepelně-izolačního betonu jsou běžné, ale aplikace na poli konstrukčních betonů stále čekají na širší využití. První pokusy v České republice se uskutečnily na lávkách pro pěší v Českých Budějovicích v roce 2003, které byly vyrobeny z předpjatého lehkého betonu třídy LC 30/37 o objemové hmotnosti 1800 kg/m<sup>3</sup>.

Požadavky na lehké vysokohodnotné betony (Lightweight High-Performance Concrete – LWHP) jsou shodné s požadavky na HPC, ale přibývá ještě požadavek na nízkou objemovou hmotnost nejlépe do 1800 kg/m<sup>3</sup> při dosažení co nejvyšších pevností, minimálně na úrovni C25/30. Použití pórovitého kameniva v betonech, ve kterých je požadována vysoká pevnost, se může zdát překvapivé, uvědomíme-li si důležitost pevnosti kameniva pro pevnost vysokohodnotného betonu. Nicméně snížení objemové hmotnosti betonu o pevnostech 40 až 60 MPa pod hodnotu 2000 kg/m<sup>3</sup>, lépe pod hodnotu 1800 kg/m<sup>3</sup> může znamenat značné finanční úspory vzhledem ke snížení celkové hmotnosti konstrukce. Autoři uvádějí, že lze vyrobit lehký vysokohodnotný beton o pevnostech vyšších než 50 MPa, literatura uvádí dokonce pevnosti o 100 MPa. Avšak je důležité si uvědomit, že těchto výsledků lze dosáhnout pouze s vhodným typem kameniva. V tomto článku budou dále uvedeny fyzikálně-mechanické vlastnosti právě s kamenivem Liapor [1].

### LEHKÝ SAMOZHUTNITELNÝ BETON

Lehký samozhutnitelný beton (Lightweight Self Compacting Concrete – LWSCC) je

nový vysokohodnotný stavební materiál, který spojuje známé výhody lehkého betonu a samozhutnitelného betonu (Self Compacting Concrete – SCC). Kvůli jeho příznivým fyzikálním vlastnostem, jeho nízké objemové hmotnosti a relativně vysoké pevnosti v kombinaci se znamenitou zpracovatelností, nízkou emisí hluku a snížením pracnosti během betonování může LWSCC najít širokou škálu aplikací v praxi, zvláště v produkci prefabrikovaných dílců a v oblasti rekonstrukcí starých budov, které není vhodné dále přitěžovat.

Hlavní požadavky vztahující se k reologickým vlastnostem SCC, jako vysoká míra zpracovatelnosti způsobená vysokou tekutostí a pohyblivostí při dostatečné kohezi a odolnosti proti segregaci při dopravě a ukládání a rovněž odolnost proti blokadě při betonáži hustě vyztužených prvků a prodloužená doba zpracovatelnosti se musí také aplikovat na LWSCC.

Nicméně je při návrhu betonu z lehkého kameniva Liapor nutno zohlednit určité skutečnosti, které se u obyčejných betonů nevyskytují. Významná odlišnost lehkých betonů oproti obyčejným betonům je v nasákavosti lehkého kameniva, která významně ovlivňuje chování lehkého betonu při míchání, dopravě, čerpání a ukládání. Kromě nasákavosti lehkého kameniva za atmosférického tlaku má význam i nasákavost za vysokého tlaku, kterému může být LWSCC vystaven při případném čerpání. Přídavná voda vtlačovaná do zrn při čerpání betonu je ve fázi míchání a dopravy nadbytečná, proto se musí používat účinné stabilizátory, které zabrání rozměšování čerstvého betonu. Adsorbce části vody může také vést k předčasnému tuhnutí LWSCC až k úplné ztrátě samozhutnitelnosti. Dále má lehké kamenivo výraznou tendenci k segregaci způsobené jeho nízkou objemovou hmotností s tendencí vyplavání na povrch cementového tmele. K omezení adsorbce vody pórovitým lehkým kamenivem je velmi vhodné předvlhčit kamenivo definovaným množstvím vody. Dále se musí přihlídnout k horší pohyblivosti a samozhutnitelnosti čerstvého lehkého betonu, právě kvůli jeho nižší objemové hmotnosti, která vyvolává nižší pohybovou energii.

### VLASTNOSTI ČERSTVÉHO LWSCC

V současné době ještě stále neexistuje žádná česká či evropská norma, která by přesně definovala vlastnosti a metody zkoušení samozhutnitelných betonů. V hlavních centrech vývoje těchto betonů vznikají různé směrnice, které nejsou zatím sjednoceny a zavedeny pro široké použití. Jedním z pokusů o sjednocení evropských postupů návrhu a zkoušení samozhutnitelných betonů je příručka vydaná organizací EFNARC působící na evropské úrovni při CEN, shrnující poznatky hlavně japonských a britských odborníků z oboru technologie betonu [2]. V praxi se v současné době k popsání vlastností čerstvých SCC nejčastěji používá několik dále uvedených zkušebních postupů (Tab. 1).

Při experimentálních laboratorních pracích bylo postupováno tak, že byly porovnávány receptury s použitím vysušeného kameniva Liapor (z produkce Lias Vintířov, LSM, k. s.) v sušárně při 110 °C s dodáním přídavné vody v množství 25 % z hmotnosti kameniva a stejné receptury s použitím vodou nasyceného kameniva, které bylo necháno jeden den namočené ve vodě. Před namočením byla kameniva rovněž vysušena v sušárně při 110 °C, aby byla sjednocena následně zjištěná nasákavost jednotlivých frakcí. Z tabulky 2 je patrná závislost potřebného obsahu celkové vody na druhu použitého kameniva. Její množství závisí na nasákavosti jednotlivých frakcí kameniva, která v tomto případě nebyla ovlivněna počáteční vlhkostí kameniva.

Všechny receptury LWSCC byly navrženy z lehkého kameniva s maximální frakcí 8 mm. Frakce Liaporu 8–16 mm nebyla v recepturách použita, protože v České republice není k dispozici v pevnosti dostatečné pro výrobu LWSCC. Při návrhu byla využita příměs na bázi druhotných surovin – elektrárenských popílek z elektrárny Chvaletice a Dětmárovice. Bylo použito superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátů, kterými byla korigována zpracovatelnost LWSCC v delším časovém horizontu – cca 90 min a také byl použit stabilizátor určený pro stabilizaci lehkých čerpatelných betonů. Při návrhu složení experimentálně ověřovaných záměsí byly použity různé kombinace kameniva Liapor o různých frakcích a objemových hmotnostech s využitím různých křivek zrnitosti výsledné směsi kameniva. Celkem bylo navrženo a ex-

perimentálně ověřeno čtyřicet různých receptur, které se od sebe lišily nejen reologickými vlastnostmi čerstvého betonu, ale i vlastnostmi ztvrdlého betonu.

Pro všechny ověřované záměsí byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z produkce ČMC závod Mokrý. Pro určení poměru mísení jednotlivých frakcí kameniva Liapor byly ověřovány křivky zrnitosti sestavené podle EMPA I a FULLER.

Postup míchání složek byl následující. Při použití vysušeného kameniva a přídavné vody byla po nadávkování všech frakcí kameniva do míchačky napuštěna předem vypočtená dávka přídavné vody a byla míchána po dobu 20 s. Po ovlhčení kameniva byl přidán cement, práškové přísady a příměsi a za současného míchání bylo přidáno 70 % účinné vody. Po 30 s byl přidán superplastifikátor se zbytkem účinné vody. Směs byla dále míchána po dobu minimálně 60 s, aby došlo k požadované homogenizaci a k intenzivnímu působení superplastifikátoru. Při použití předvlhčeného kameniva se po nadávkování tohoto kameniva do míchačky rovnou přidal cement a všechny práškové příměsi a přísady a další postup byl shodný s výše uvedeným.

Zajímavé jsou výsledky některých vlastností lehkého samozhutnitelného betonu po srovnání výsledků receptur s dodáním vysušeného kameniva a přídavné vody a receptur s předvlhčeným kamenivem, u kterých došlo ke zvýšení hodnot pevnosti i objemových hmotností až o 20 %.

Při ověřování reologických vlastností na souboru čtyřiceti receptur LWSCC byly

Název zkoušky	Popisovaná vlastnost
Rozliti kužele	Pohyblivost, tekutost
J – Ring	Odolnost proti blokaci
L – Box	Pohyblivost, odolnost proti blokaci a segregaci hrubých zrn kameniva
Orimet	Rychlost tečení, pohyblivost
Orimet + J – Ring	Pohyblivost, odolnost proti blokaci
V – Funnel	Pohyblivost i malt
U – Box	Pohyblivost, segregace, bleeding
Fill – Box	Odolnost proti blokaci
GTM – test	Odolnost proti segregaci

Tab. 1 Zkušební postupy pro ověřování vlastností čerstvých SCC

Tab. 1 Testing procedures used to test fresh SCC properties

Frakce kameniva	Mezní hodnoty nasáknutí [%]		Statistický průměr nasáknutí [%]
	min	max	
4-8/650	31,8	40,5	35,9
4-8/450	23,3	34,1	24,1
4-8/350	15,3	23,6	18,5
0-4/550	50,8	59,1	55,6
1-4/750	43,8	50,4	46,6

Tab. 2 Nasákavost kameniva Liapor různých frakcí po jednom dni namočení ve vodě

Tab. 2 Saturation of lightweight aggregate Liapor (water absorbed after 24 hours under water)

testovány tyto zkušební postupy – rozliti kužele, Orimet + J-Ring, L-Box, U-Box a V-Funnel. Výsledky jsou zaznamenané v tabulce 3.

Při ověřování vhodnosti využití v současné době používaných metod zkoušení konzistence čerstvých samozhutnitelných betonů jsme jako limitní použí-

Tab. 3 Statistické hodnoty reologických vlastností souboru čtyřiceti receptur lehkých samozhutnitelných betonů

Tab. 3 Statistical measured values of LWSCC rheologic properties of 40 formulations set

Metoda	Doporučené rozpětí		Konzistence		
	min	max	po namíchání	po 60 min.	po 90 min.
Rozliti (Abrams) [mm]	650	800	750	710	675
Rozliti (T50cm) [s]	2	5	4,7	6,4	7,6
J-Ring [mm]	0	10	0	6	11
Orimet [s]	1	5	7	9,2	10,5
L-Box (h2/h1)	0,8	1	1	0,95	0,93
U-Box [mm]	blíží se 0		0	3,2	11
V-Funnel (t) [s]	optimum 10s		8,9	12,5	15
V-Funnel (t5min) [s]			10,6	13,6	16,3



Obr. 1 Konzistence po 60 min. (rozlít)  
 Fig. 1 Consistency after 60 min. (Slump test)

vali hodnoty získané z literatury (Tab. 3 – doporučené rozpětí) [2]. Bylo snahou navrhnout receptury tak, aby čerstvý beton splňoval požadovaná kritéria. Z dosažených výsledků lze usoudit, že námi použité metody pro čerstvé betony jsou v principu vhodné pro stanovení konzistence LWSCC. Pouze je vhodné upravit kritéria u zkoušek (časové intervaly výtoku), kde se lehké samozhutitelné betony jeví jako pomalejší než obyčejné samozhutitelné betony, jak již bylo v úvodu popsáno. U testů J-Ring a L-Box se jedná o rozteč mezi jednotlivými pruty výztuže, jako optimální se osvědčila rozteč rovná trojnásobku velikosti maximálního zrna kameniva. Obě tyto úpravy jsou zapříčiněny objemovou hmotností, která je u betonů z lehkého kameni-

va menší a lehké betony nemají dostatečně velkou vnitřní pohybovou energii a ve srovnání s betony s přírodním kamenivem jsou mírně pomalejší a hůře protékají hustými osnovami výztuže. U zkoušek Orimet a rozlítí v čase T 50 (obr. 1) by bylo vhodné zvýšit kritéria na 0 až 10 s a u zkoušky V-Funnel zvýšit optimum na 20 s. Z tabulky je patrné, že zpracovatelnost po 90 min u některých receptur mírně přesahuje výše navržená kritéria, jelikož jsou hodnoty zvýšeny jen nepatrně. I přes podstatně nižší objemovou hmotnost splňovaly namíchané betony základní požadavek na homogenitu a rovnoměrné zhutnění v celém průřezu (obr. 2 a 3).

Při experimentálních pracích bylo zjištěno, že při hmotnostním dávkování leh-

kého kameniva Liapor nejsou jednotlivé receptury reprodukovatelné při požadavku, aby bylo dosaženo požadovaných již jednou ověřených vlastností včetně zpracovatelnosti konkrétní receptury. V případě použití lehkého kameniva je třeba věnovat vyšší pozornost stanovení skutečné objemové hmotnosti zrna, než je tomu v případě přírodního hutného kameniva, neboť odchylky od deklarovaných parametrů mohou být významnější a mohou mít vliv na skutečné složení lehkého betonu. Výrobce uvádí deklarovanou odchylku hodnot objemových hmotností lehkého kameniva až  $\pm 15\%$ . Např. je-li objemová hmotnost frakce kameniva  $1\,200\text{ kg/m}^3$  a dávka této frakce  $100\text{ kg/m}^3$  betonu, může to prakticky znamenat, že při uváděné odchylce  $\pm 15\%$  bude rozpětí dávkování v intervalu od 85 do  $115\text{ kg/m}^3$ . Pokud nelze během výroby tohoto betonu průběžně stanovovat skutečnou objemovou hmotnost lehkého kameniva, je třeba místo hmotnostního dávkování uplatnit dávkování objemové.

#### **VLASTNOSTI ZTVRDLEHO LWSCC**

U lehkého betonu platí, že čím vyšší pevnosti chceme dosáhnout, tím vyšší musí mít lehké kamenivo objemovou hmotnost. Zvýšení pevnosti můžeme dosáhnout přidávkem přírodního kameniva. Nahrazením drobného kameniva Liapor frakce 0-1D/650 za přírodní kamenivo frakce 0-1 mm se nedocílí výraznějšího zvýšení pevností ani zlepšení jiných fyzikálně mechanických vlastností. Výhod-

Obr. 2 Řez zkušební tělesem  
 Fig. 2 Cross section of the test specimen



Obr. 3 Zkušební těleso po zkoušce pevnosti betonu v tlaku  
 Fig. 3 Test specimen after compression strength test





Třída objemové hmotnosti	D 1,2-1,4	D 1,4-1,6	D 1,6-1,8
Třída pevnosti v tlaku	LC 12/13	LC 16/18	LC 25/28

Tab. 4 Objemová hmotnost a pevnost v tlaku LWSCC s použitím výhradně lehkého kameniva Liapor

Tab. 4 Dependence of resistance to pressure on volume weight of LWSCC (using entirely lightweight aggregate Liapor)

Třída objemové hmotnosti	D 1,2-1,4	D 1,4-1,6	D 1,6-2,0
Třída pevnosti v tlaku	LC 16/18 – LC 20/22	LC 20/22 – LC 30/33	LC 30/33 – LC 40/44

Tab. 5 Objemová hmotnost a pevnost v tlaku LWSCC s použitím kombinace lehkého kameniva Liapor a přírodního těžného kameniva s přidavkem ultrajemných příměsí

Tab. 5 Dependence of resistance to pressure on volume weight of LWSCC (using lightweight aggregate Liapor, natural aggregate and ultra-fine admixtures)

nější je použít přírodní kamenivo frakce 0-4 mm, kdy docílíme zvýšení pevností, zlepšení odolnosti povrchu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám i zlepšení mrazuvzdornosti. Použití přírodního kameniva frakce 4-8 mm se nejvíce jeví jako výhodné. Přidáním ultrajemných příměsí (mikrosilika, metakaolin) do lehkého betonu s maximálním zrnem 8 mm se zvýší pevnosti alepší se odolnost povrchu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. Z toho lze usoudit, že pevnost u tohoto drobnozrnného betonu vytváří hlavně cementová matrice s jemnými podíly. Lehký samozhutnitelný beton s kamenivem Liapor vykazuje dobrou mrazuvzdornost (po sto cyklech se koeficient mrazuvzdornosti pohybuje v rozmezí od 90 do 98 %), ale nevykazuje odolnost proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. Při použití lehké-

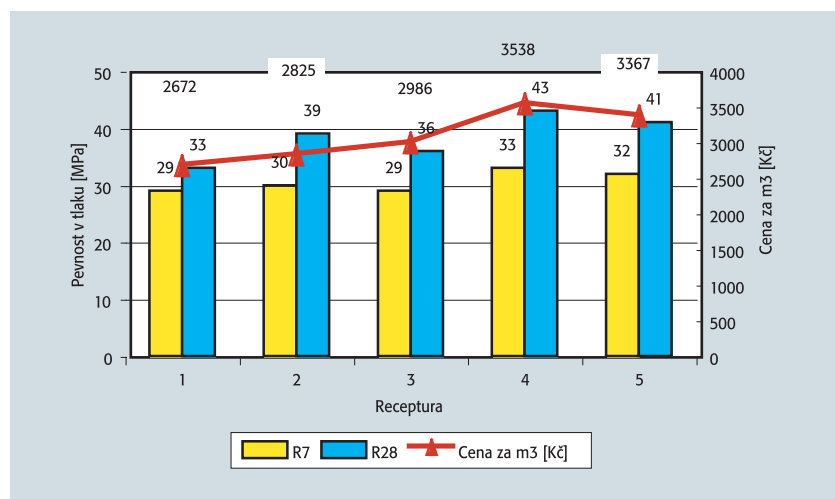
ho kameniva Liapor se dosahuje dobrých tepelných vlastností (součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 0,29 \text{ W/mK}$ ). Tyto vlastnosti se ale zhoršují přidáním přírodního kameniva ( $\lambda = 0,33$  až  $0,69 \text{ W/mK}$ ).

Na obr. 4 jsou uvedeny grafické výsledky pevností v tlaku některých vybraných receptur v porovnání s cenou surovin tohoto betonu.

Stručně shrnuto, dle získaných zkušeností lze konstatovat, že je vhodnější míchat LWSCC s předvlhčeným kamenivem Liapor. Technicky lze kamenivo předvlhčit dvěma způsoby. Buď ho nechat namočené ve vodě minimálně po dobu jednoho dne, anebo kropením na skládce nejméně po dobu dvou dní, kdy se kamenivo nasákne na cca 20 % [3]. V praxi je ovšem tento postup velmi obtížně použitelný zejména u věžových betonáren. V tomto případě je pak nutné

Obr. 4 Pevnosti v tlaku (sedmi a dvacetiosmidenní) vybraných receptur v porovnání s cenou surovin za 1 m<sup>3</sup> betonu v Kč

Fig. 4 Compression strength (after 7 and 28 day) of some formulations in comparison with a price of raw materials [Kc/m<sup>3</sup>]



velmi citlivě odhadnout množství přidávané vody s ohledem na objemovou hmotnost Liaporu, teplotu prostředí, dobu od namíchání po uložení atd. Kamenivo je nutné dávkovat objemově dle skutečné objemové hmotnosti pro dosažení deklarovaných vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Po ověření šesti nepoužívanějších metod měření reologických vlastností se došlo k závěru, že tyto metody jsou vhodné pro zkoušení lehkých samozhutnitelných betonů, jen je nutné upravit u jednotlivých metod časová kritéria dob výtoku čerstvého betonu.

Při použití lehkého kameniva do LWSCC bez přidání přírodního hutného kameniva dosáhneme pevností do třídy LC16/18 D1,3 až D1,4, při použití lehkého kameniva Liapor v kombinaci s přírodním kamenivem dosáhneme pevností do třídy LC 25/28 D1,6 až D1,8. Při použití kombinace lehkého a přírodního kameniva s dodáním kvalitních ultrajemných příměsí lze dosáhnout pevností až do třídy LC 40/44 D1,8 až D2,0.

*Příspěvek byl zpracován za přispění Výzkumného centra CIDEAS „Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí“ (1M684077001), financováno MŠMT ČR a v rámci projektu FRVŠ č.1991 „Vývoj lehkého samozhutnitelného betonu s kamenivem Liapor“.*

Literatura:

- [1] Aitcin P. C.: Vysokohodnotný beton, Praha 2005, ISBN: 80-86769-39-9
- [2] EFNARC: Self compacting concrete. Surrey United Kindom 2002, ISBN: 0-9539733-4-4
- [3] Tomis V.: Transportbetony z Liaporu – příručka technologa. Lias Vintřov, Lehký stavební materiál, k. s., 1. vydání 7/2001

Ing. Michala Hubertová  
e-mail: hubertova.m@fce.vutbr.cz  
Doc. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz  
oba: Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
Veveří 95, 602 00 Brno  
fax: 541 147 502  
www.fce.vutbr.cz

Článek byl lektorován.