

# STUDIUM FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH PARAMETRŮ LEHKÝCH VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ S PÓROVITÝM KAMENIVEM NA BÁZI SPÉKANÝCH POPÍLKŮ ■ STUDY OF THE PHYSICALLY-MECHANICAL PARAMETERS OF LIGHTWEIGHT HIGH-STRENGTH CONCRETE WITH SINTERED FLY ASH BASED POROUS AGGREGATE

Tomáš Melichar, David Procházka, Vít Černý

Současné tendence v oblasti produkce stavebních hmot i dílců směřují ke zvýšení kvality a snižování zátěže životního prostředí. Ani beton není v tomto ohledu výjimkou, naopak. S uvážením značného podílu spotřeby vyrobených stavebních materiálů v ekonomicky vyspělých zemích, zaujímá produkce betonu pro stavební konstrukce dominantní pozici. Kombinace současného trendu environmentální politiky a kvalitativních požadavků na konstrukční beton skýtá prostor pro hledání a zkoumání nových alternativ. Jednou z možností, jak zohlednit environmentální aspekty, je modifikace složení vysokopevnostních betonů při zachování jejich vysoké užitných parametrů substitucí klasického kameniva umělým na bázi spékaných popílků, čímž by také došlo k výraznému poklesu hmotnosti celé konstrukce, což souvisí s dalšími významnými problémy. Cílem prezentovaného výzkumu byl především návrh receptury lehkého vysokopevnostního betonu. Snižování objemové hmotnosti bylo dosaženo nahrazením veškerého kameniva frakce 8-16 mm a parciální substitucí kameniva frakce 4-8 mm. V rámci studia fyzikálně-mechanických parametrů byly v první fázi stanoveny základní vlastnosti (vývoj pevnostních parametrů v čase, parametry charakterizující elasticitu betonu apod.) dle normativních dokumentů souvisejících s problematikou. ■ The article deals with study of basic parameters of lightweight high-strength concrete, in which aggregate was almost fully replaced with raw material from alternative sources. Specifically, aggregate based on sintered fly ash was used. Reduction in density was achieved by the total amount substitution of the aggregate fractions of 8-16 mm and the partial substitution of the aggregate 4-8 mm fraction. Within the scope of the physical-mechanical parameters study in the first phase were set basic properties (strength development characteristics over time, elastic parameters, etc.) according to the normative documents related to the field.

## VYSOKOPEVNOSTNÍ BETONY

Vysokopevnostní beton (též označovaný HSC) je dle ČSN EN 206-1 definován jako „beton, který má pevnostní třídu v tlaku větší než C50/60 pro obyčejný a těžký beton a LC50/55 pro lehký beton“. (Nejnižší třída HSC je tedy C55/67 respektive LC55/60.) Tento druh betonu náleží mezi tzv. vysokohodnotné betony (HPC), což jsou betony, které se oproti obyčejným betonům vyznačují jednou nebo více nadprůměrnými vlastnostmi. Mezi vysokohodnotné betony dnes řadíme betony vysokopevnostní, ultravysokých pevností, samozhutitelné, vláknobetony, provzdušněné vysokohodnotné betony, lehké vysokohodnotné betony aj.

Počátky použití vysokopevnostních betonů sahají do 60. let minulého století, kdy byly testovány možnosti navýšení pevností u betonů pro stavbu výškových budov. Tyto betony se od stávajících betonů lišily tím, že kamenivo a pojivo pro jejich výrobu bylo pečlivě vybíráno. Cementy té doby měly nižší kvalitu než dnes a byly mlety na hrubší zrno. Snahou technologů tehdy bylo vytvořit co nejefektivnější křivku zrnitosti pro použité kamenivo. Důraz byl kladen na technologickou kázeň při betonáži. První používané plastifikátory

byly nepříliš účinné lignosulfonany, navíc se lišily kvalitou, což vedlo k velkým rozptylům vlastností při aplikaci. Použití prvních plastifikátorů ukázalo, že je možné snížit vodní součinitel bez významnějšího omezení zpracovatelnosti betonu, při současném navýšení jeho pevnosti. Vysokopevnostní betony na počátku 70. let vykazovaly pevnosti na hranici 60 MPa, konzistence betonů se pohybovala do 100 mm sednutí kužele. Se snahou zvýšit nízkou tekutost směsí se na konci 60. let objevily první superplastifikátory. S jejich použitím se přišlo na to, že betony s velmi nízkým vodním součinitelem získávají další zajímavé vlastnosti, např. vysokou tekutost, vysoký modul pružnosti, vyšší ohybovou pevnost, nižší permeabilitu, zlepšenou odolnost proti obrusu a hlavně lepší trvanlivost [1].

Lehký beton je dle ČSN EN 206-1 definován jako beton, který má po vysušení v sušárně objemovou hmotnost mezi 800 a 2 000 kg.m<sup>-3</sup> a je vyráběn zcela nebo jen z části z pórovitého kameniva. Lehký vysokopevnostní beton (LWH-SC) lze zařadit již mezi speciální, v současnosti však neobvyklý, typ vysokopevnostního betonu. Nízké objemové hmotnosti (pod 2 000 kg.m<sup>-3</sup>) je zde dosaženo použitím lehkého pórovitého kameniva.

Při srovnání parametrů hutného a pórovitého kameniva je zřejmé, že pórovité kamenivo nedosahuje takových pevnostních charakteristik jako klasické hutné kamenivo. Rovněž je nutné uvážit pórovitost z hlediska absorpce vody v čerstvém betonu. Tyto na první pohled horší vlastnosti oproti klasickému kamenivu mohou být vyváženy významným snížením objemové hmotnosti za současného dosažení uspokojivých pevností.

Uvědomíme-li si, že objemová hmotnost se v případě vysokopevnostních betonů s hutným kamenivem pohybuje v rozmezí cca 2 300 až 2 450 kg.m<sup>-3</sup>, kdežto u HSC s lehkým kamenivem je to nejčastěji 1 800 až 2 000 kg.m<sup>-3</sup>, je patrná významná skutečnost – dochází k poklesu hmotnosti konstrukce o cca 13 až 27 %. Dosažený výrazný hmotnostní úbytek se následně promítne v otázce ekonomické, návrhu samotné konstrukce (zmenšení průřezu nosných prvků) atd.

Problematikou lehkých vysokopevnostních betonů se zabývali četní autoři. Experimentálně bylo prokázáno, že lze vyrobit LWHSC o pevnostech vyšších než 60 MPa. Zhang a Gjorv (1990) dosáhli u betonu o objemové hmotnosti čerstvé směsi 1 865 kg.m<sup>-3</sup> pevnosti v tlaku o něco vyšší než 100 MPa stanovené na krychlích o hraně 100 mm. Nielsen a Aitcinem (1992) dosáhli po 91 dnech pevnosti 97,7 MPa u betonu objemové hmotnosti čerstvé směsi 2 085 kg.m<sup>-3</sup>. Berra a Ferrara (1990) dosáhli pevnosti 60 MPa naměřené na krychlích o hraně 150 mm o objemové hmotnosti 1 700 kg.m<sup>-3</sup>, při využití písku o nízké objemové hmotnosti. Všichni autoři se ve svých závěrech shodují, že tyto působivé výsledky mohou být dosaženy pouze s vhodným typem pórovitého kameniva.

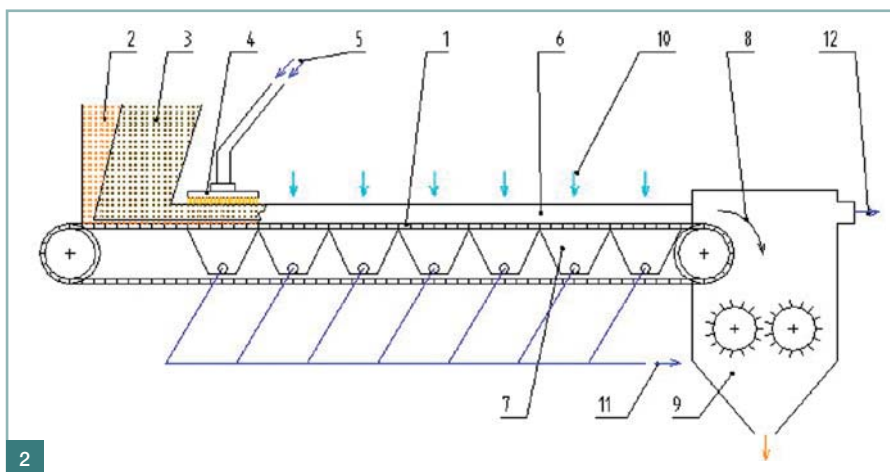


Vedle pevnostních a elastických parametrů je podstatným kritériem absorpční charakteristika užitého pórovitého kameniva. V některých případech může být užití příliš nasávkavého kameniva problematické z hlediska zpracovatelnosti směsi, přestože ostatní kvalitativní ukazatele (např. pevnost a objemová hmotnost) lehkého betonu jsou v požadovaných hodnotách. Proměnná nasávkavost u různých dávek pórovitého kameniva má pak negativní vliv na dodržení betonu garantovaných parametrů. Názory na aplikaci pórovitého kameniva v kombinaci s vodou do čerstvého betonu se různí. Převážná většina autorů preferuje předvlhčení kameniva před jeho použitím ponořením do vody. Kamenivo již neabsorbuje ze směsi další vodu, přičemž absorbovaná voda může být považována za zdroj vody pro další hydrataci v betonech s velmi nízkým vodním součinitelem, což podstatně sníží autogenní smrštění – jev označovaný jako samošetřování betonu [1].

Praktická použitelnost lehkého vysokopevnostního betonu již byla prokázána na řadě stavebních děl. Za všechny zmíníme např. projekty Sandhornøyského a Støvsetského mostu v Norsku. Při výstavbě krajních polí Sandhornøyského mostu (obr. 1, tab. 1, dokončený roku 1989) byl použit lehký vysokopevnostní beton o objemové hmotnosti 1 850 až 1 900  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a pevnosti v tlaku cca 56 MPa při sednutí kužele 200 mm.

Obr. 1 Sandhornøyský most [17] ■  
Fig. 1 Sandhornøya bridge [17]

Obr. 2 Schéma klasického aglomeračního roštu (1 – pohyblivý článkový rošt, 2 – násypka roštoviny, 3 – násypka syrové vsázky, 4 – plynová zapalovací hlava, 5 – přívod plynu a přidavného vzduchu, 6 – pevné bočnice, 7 – odtahové komory, 8 – vyklápění spečenců, 9 – kapotovaný drtič spečenců, 10 – nasávání spalovacího vzduchu, 11 – odtah spalin, 12 – odprášení drtiče) ■ Fig. 2 Scheme of classical sinter grate (1 – moving grid fin, 2 – waste agloporit hopper, 3 – raw batch hopper, 4 – gas ignition, 5 – intake of gas and additional air, 6 – solid sides, 7 – air extraction, 8 – sinter fork out, 9 – sinter crusher, 10 – intake air for combustion, 11 – flue gas, 12 – dedusting crushers)



Tab. 1 Složení lehkého vysokopevnostního betonu použitého na mostu Sandhornøya [18] ■ Tab. 1 Mixture proportions for LWHSC used on Sandhornøya bridge [18]

Složka	Množství
Cement [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	400
Křemičitý úlet [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	25
Písek [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	575
Lehké kamenivo 4 – 8 mm [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	250
Lehké kamenivo 8 – 16 mm [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	400
Voda [ $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	144
Voda z přísad [ $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	28

### POPÍLKOVÝ AGLOPORIT

Popílkový agloporit je v současnosti definován jako druh pórovitého kameniva vyráběného slinováním krátkodobým samovypalem na aglomeračních roštích. V České republice se jako suroviny pro výrobu tohoto kameniva používaly popílkové směsi z energetického průmyslu.

Nejvýhodnější suroviny pro aglomeraci obsahují jisté množství spalitelných látek, tzn. že po zapálení na roštu jsou při prosávání vzduchu schopny samy podporovat exotermickou reakci a napomáhat samovypalu samotné surovinné vsázky.

Nejsou-li spalitelné části suroviny zastoupeny v dostatečné míře, je zapotřebí do vsázky uměle přidávat palivovou slož-

ku. Za minimální obsah spalitelných látek v surovině před výpalem se považuje 5 %, naopak za maximální 12,5 % a optimální hodnota je udávána kolem 9 %. Nedostatečné množství paliva ve vsázce se následně u agloropritu projevuje nedostatečným slinutím s nadbytečným obsahem nejjemnějších podílů. Je-li spalitelných látek ve vsázce příliš mnoho, nastává po výpalu nadměrné slinutí agloropritu a dochází ke spojování jednotlivých zrn v tzv. spečence, což bývá spojeno s poklesem výkonu na roštu. Optimální obsah paliva ve výchozích surovinách a jeho rovnoměrné rozmístění je společně se zajištěním prodyšnosti vsázky hlavním problémem výroby jakostního agloropritu.

### KLASICKÝ ZPŮSOB VÝROBY NA AGLOMERAČNÍM ROŠTU

Nejběžnějším a zároveň nejčastějším způsobem vypalování agloropritu je spékání na aglomeračních roštích. Aglomerační rošty jsou pohyblivé pásy o šířce kolem 1 m a délce okolo 20 m, na kterých surovinové a předsušené sbalky prohřívají po zapálení seshora směrem dolů. Dochází tak k jejich spékání a to díky palivu (spalitelným látkám), které jsou v nich obsaženy. Vzduch, který je při tomto procesu zapotřebí, se v oblasti slinování musí neustále pomocí exhaustorů prosávat přes vrstvu sbalků a to odshora dolů (obr. 2).

Na začátku pásu je umístěn zásobník pro násyp tenké vrstvy žárovzdorného materiálu, tzv. roštoviny, pro ochranu ocelových roštnic před přímými účinky žárového pásma. Dále je umístěna násypka pro zgranulovaná syrová zrna, která umožní ukládání syrové vsázky ve zvolených vrstvách. Za násypkou syrové vsázky je plynová zapalovací hlava opatřená samostatným přívodem zemního plynu, spalovacího vzduchu, směšovačem a dalším příslušenstvím plynového hospodářství. Teplota plamene dosahuje 1 200 až 1 300 °C. Pod roštem je v místě zapalovací hlavy umístěna první odsávací komora s mírným podtlakem cca 10 až 13 kPa pro usnadnění dokonalého zapálení vrchní vrstvy vsázky. Po celé zbývající délce roštu jsou umístěny další odsávací komory se samostatně regulovatelným podtlakem, který činí cca 60 kPa, čímž se ke sbalkům přivádí vzduch v dostatečném přebytku. Žárové pásmo ve spékající se vrstvě sbalků se tím postupně přemísťuje do nižších vrstev, až se na konci roštu dosáhne maximální teploty, která se pohybuje 1 100 až 1 250 °C. V tomto místě slinovací proces končí. Prosáváním vzduchu vrstvou spékajících se sbalků se dosahuje předeřívání sbalků nacházejících se ještě pod slinující se vrstvou, ale také ochlazování již propálených sbalků v horních vrstvách. Poslední odsávací komora slinovacího roštu slouží k odsávání obvykle jen chladícího vzduchu.

### VLASTNOSTI POPÍLKOVÉHO AGLOPORITU

Vlastnosti samotného popílkového kameniva bývají vzhledem k mnoha způsobům jejich počáteční úpravy a závěrečného drcení spečence značně rozličné. Asi největší vliv má právě drcení spečenců, které může vést na jedné straně ke granulacím s téměř uzavřeným povrchem, avšak na druhé straně častěji ke kamenivu svým vzhledem podobnému škváře, jakož i k přechodným typům mezi těmito extrémy. Zrna s otevřenými póry na svém povrchu jsou méně příznivá pro zvyšování spotřeby cementu, a s tím spojené i zásadní změny vlastností betonu.

Pórovitost zrn agloropritu bývá zpravidla kolem 50 %, mezerovitost podle použitého způsobu drcení a třídění 50 až 60 %. Objemová hmotnost u agloropritového písku se po-

Tab. 2 Agloroprit z popílku elektrárny Dětmarovice (EDĚ) ■  
Tab. 2 Agglomerite from Dětmarovice power plant (EDĚ)

Základní vlastnosti	Frakce 4 – 8 mm	Frakce 8 – 16 mm
Měrná hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	2 390	2 380
<b>Sypná hmotnost</b>		
- volně sypaný [kg.m <sup>-3</sup> ]	715	685
- setřesený [kg.m <sup>-3</sup> ]	780	760
Objemová hmotnost zrn [kg.m <sup>-3</sup> ]	1 410	1 430
<b>Mezerovitost</b>		
- volně sypaného [% hm.]	48,7	52,3
- setřeseného [% hm.]	42,3	47,1
Nasákavost po 24 hod. [% hm.]	23,4	21,8
<b>Pórovitost</b>		
- zdánlivá [% hm.]	34,6	31,3
- skutečná [% hm.]	40,2	39,8
<b>Odolnost proti drcení</b>		
- vysušeného [MPa]	3,62	3,35
- nasáklého [MPa]	3,43	3,16

hybuje v rozmezí 600 až 1 050 kg.m<sup>-3</sup>, u šterkových frakcí 400 až 700 kg.m<sup>-3</sup>, u netříděného jen podrceného agloropritu potom 800 až 1 350 kg.m<sup>-3</sup>. Nasákavost bývá také velmi rozdílná, zpravidla 8 až 30 % hmotnostních. Součinitel tepelné vodivosti volně sypaného agloropritu je 0,12 až 0,16 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Pevnost ve válci u jakostnějších druhů agloropritu činí 2 až 8 N.mm<sup>-2</sup>.

### VYUŽITÍ AGLOPORITU

Použití agloropritu v ČR je zaměřeno převážně na lehké konstrukční betony. Tyto betony odpovídají svou plnou strukturou struktuře betonu s přírodním kamenivem. Zpravidla obsahují přírodní písek jako jemný podíl směsi kameniva, hrubší a hrubé podíly směsi kameniva tvoří pak zrna agloropritu. Částečné použití jemného agloropritu 0–4 mm (asi 10 % objemu kameniva) přispívá ke zvýšení pevnosti a ke snížení objemové hmotnosti betonu. Agloropritové kamenivo je totiž reaktivní na svém povrchu s hydratačními produkty cementu. Lehké konstrukční betony, ve kterých nebylo použito přírodního písku a jako jemných podílů směsi se použilo výhradně agloropritu 0–4 mm s převážným obsahem zrn do 1 mm, mají nižší pevnosti a vykazují vyšší hodnoty smršťování a dotvarování než lehké konstrukční betony s přírodním pískem.

Dále lze toto kamenivo využívat pro různé zásypy.

### VLASTNOSTI POUŽITÉHO UMĚLÉHO KAMENIVA

Pro výrobu umělého spékaného kameniva samovýpalem byl vybrán kvalitní černouhelný popílek z elektrárny Dětmarovice. Kamenivo bylo použito pro výrobu LWHSC.

Zkušební výpaly probíhaly vždy ve stejných podmínkách v laboratorní pecní soustavě, při konstantní výšce vsázky 400 mm, optimálním obsahu spalitelných látek ve vsázce 8 % hmotnostních a při stejné době zapalování 5 min. Vyrobené kamenivo bylo následně drceno, homogenizováno a tříděno do základních frakcí 0–4, 4–8 a 8–16 mm. V tab. 2 jsou uvedeny základní vlastnosti frakcí kameniva použitého pro uvažované experimenty. Pro stanovení těchto vlastností bylo využito harmonizované evropské normy ČSN EN 13055-1 (721505) – „Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty“.

Z tabulkového přehledu je patrné, že daný popílkový agloroprit nedosahuje kvalit konkurenčního keramzitového kameniva. Energetická a ekonomická náročnost technologie výroby, využívající principu samovýpalu, je však nesrovnatel-



Obr. 3 Použité pórovité kamenivo – agloporit frakce 8–16 mm  
Fig 3 Used porous aggregate – agglomerite of 8 – 16 mm fraction

ně nižší. V případě keramzitového kameniva je jako základní suroviny použit kvalitní jíl, který je následně ve formě sbalků vypalován v rotační peci při vysoké spotřebě tepelné energie. Při výrobě popílkového agloporitu samovýpalem je využito vedlejšího energetického produktu, sbalky jsou zapalovány minimálním množstvím plynu a následně vypalovány s využitím vlastního obsahu spalitelných látek.

Z hlediska vlivu popílkového kameniva na životní prostředí je nutné řešit částečně zvýšenou vyluhovatelnost těžkých kovů. Po zabudování do cementové matrice dojde k dostatečnému vyvázání škodlivin a vodný výluh vzorku betonu bez problémů vyhoví 1. třídě vyluhovatelnosti dle přílohy č. 2 vyhlášky Ministerstva životního prostředí č. 294/2005 Sb. Pro vybrané způsoby využití může být popílkový agloporit plnohodnotným konkurentem keramzitového kameniva.

### EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Primárním záměrem popsání výzkumu byl návrh receptury lehkého vysokopevnostního betonu s využitím pórovitého kameniva vyráběného samovýpalem z Dětmrovického popílku a ověření základních fyzikálně-mechanických parametrů vyrobeného betonu. Na základě získaných informací a jistých zkušeností autorů bylo navrženo několik receptur modifikovaného složení (tab. 3), u nichž byla provedena v celé míře substituce kameniva frakce 8–16 mm a parciální substituce kameniva frakce 4–8 mm. Dávky pro lehké kamenivo jsou uvedeny v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (pro srovnání s obyčejnými betony) a také v litrech (běžně se provádí objemové dávkování).

Tab. 3 Receptury lehkého vysokopevnostního betonu s agloporitem na bázi spékaného popílku elektrárny Dětmrovice (EDĚ)

Tab. 3 Light weight high-strength concrete with sintered fly ash Dětmrovice (EDĚ) based agglomerite – design of batches

Specifikace složky	Receptura – dávka jednotlivých složek			
	LWHSC-AG1	LWHSC-AG2	LWHSC-AG3	LWHSC-AG4
Cement CEM I 42,5 R [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	450	450	450	450
0 – 4 mm Žabčice [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	680	680	680	680
4 – 8 mm Olbramovice [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	140	140	140	140
Agloporit 4 – 8 mm [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]/[l]	150/167	150/167	150/167	150/167
Agloporit 8 – 16 mm [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]/[l]	490/576	490/576	490/576	490/576
Mikrosilika [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	–	–	23	45
Mikromletý vápenec [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	23	45	–	–
Superplastifikátor [% hm.]	4	6	8,3	7,0
Voda [ $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	138	132	118	127
w [-]	0,31	0,30	0,28	0,29

Pro ověření vhodnosti navržených receptur byla vyrobena tři normová zkušební tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti po 28 dnech zrání, tj. krychle o hraně 150 mm. Před přípravou zkušebních těles (tj. cca 48 h) bylo kamenivo ponecháno ve vodě. Cca 30 min před zahájením míchání bylo umístěno na perforovanou podložku, aby došlo k úniku přebytečné (volné) vody.

Na základě výsledků experimentů byla jako optimální vybrána receptura LWHSC-AG3. Po 28 dnech zrání bylo dosaženo průměrné pevnosti v tlaku 64,6 MPa. Receptury LWHSC-AG1 a LWHSC-AG2 vykazovaly hodnoty pevnosti v tlaku nižší než 56 MPa. Receptura LWHSC-AG4 se vyznačovala nejvyšší pevností v tlaku, cca 67 MPa. Při srovnání dosažených parametrů betonu vyrobeného z receptur LWHSC-AG3 a LWHSC-AG4 a samotné kompozice receptur je zřejmé, že vysoká dávka mikrosiliky v receptuře LWHSC-AG4 je pro běžnou praxi ekonomicky méně efektivní.

Na základě experimentálně podloženého výběru optimální receptury, tj. LWHSC-AG3 byla vyrobena zkušební tělesa pro následující stanovení a zkoušky:

- destrukční stanovení pevnosti v tlaku,
- závislost pevnosti v tlaku na čase do stáří 28 dní,
- destrukční stanovení pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání betonu,
- stanovení statických a dynamických modulů pružnosti v tlaku,
- závislost statických a dynamických modulů pružnosti v tlaku na čase do stáří 28 dní.

**XYPEX®**

TĚSNĚNÍ BETONU  
POMOCÍ KRYSTALIZACE

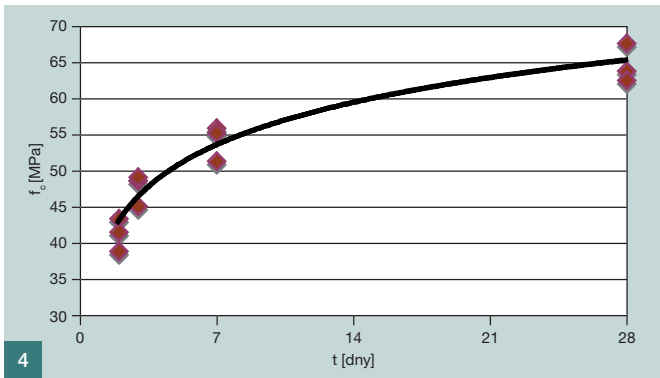
**NEKAP®**  
S.R.O.  
VÝHRADNÍ PRODEJCE MATERIÁLŮ XYPEX

Thákurova 7, 160 00 Praha 6  
tel.: +420 224 316 107  
fax: +420 224 313 212  
info@nekap.com

www.nekap.com

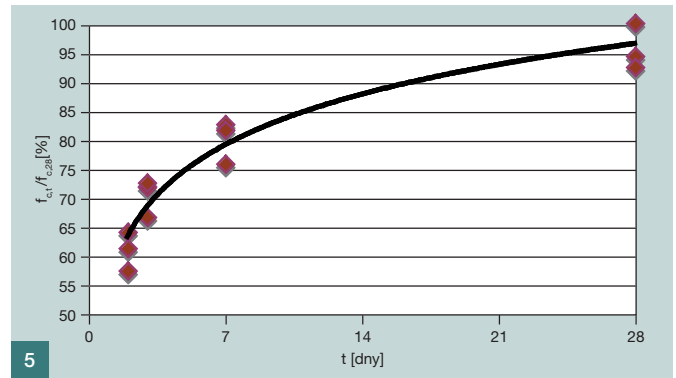
**FREEZTEQ®**

ODSTRAŇOVÁNÍ VLHKOSTI  
VE ZDIVU



Tab. 4 Parametry vysokopevnostního betonu receptury LWHSC-AG3  
 ■ Tab. 4 Parameters of high-strength concrete of LWHSC-AG3 batch

Stáří t [dny]	Pevnost v tlaku $f_{c,t}$ [MPa]	Pevnost v tahu ohybem $f_{cf,t}$ [MPa]	Statický modul pružnosti v tlaku $E_{c,t}$ [GPa]	Dynamický modul pružnosti v tlaku $E_{bu,t}$ [GPa]	Objemová hmotnost $D_{t,-3}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
2	41,3	-	20,5	33,8	1 940
3	47,6	-	21,0	33,4	1 960
7	54,1	-	24,3	38,1	1 960
28	64,6	6,2	25,6	38,2	1 980



Obr. 4 Vývoj pevnosti v tlaku v čase ■ Fig. 4 Compressive strength, development in time

Obr. 5 Vývoj poměrové pevnosti v tlaku v čase ■ Fig. 5 Ratio compressive strength, development in time

Obr. 6 Vývoj statického modulu pružnosti v tlaku v čase ■ Fig. 6 Static modulus of elasticity in compression, development in time

Obr. 7 Vývoj poměrového statického modulu pružnosti v tlaku v čase ■ Fig. 7 Ratio static modulus of elasticity in compression, development in time

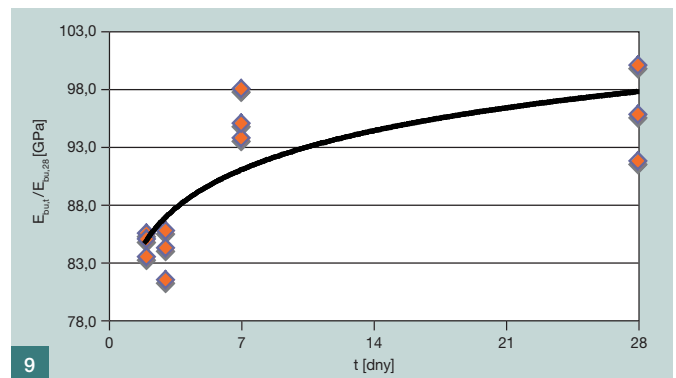
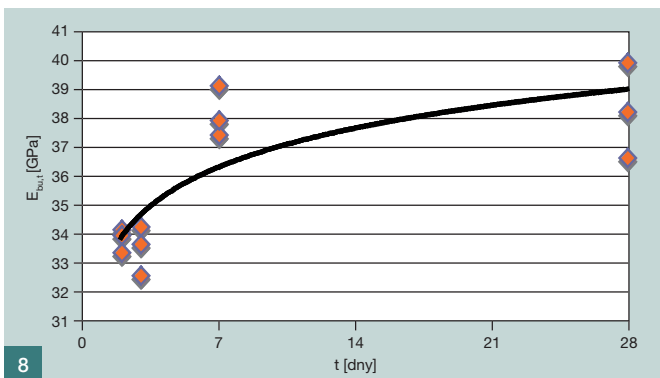
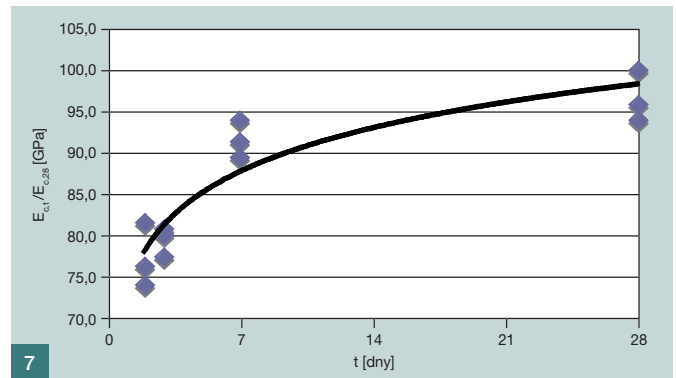
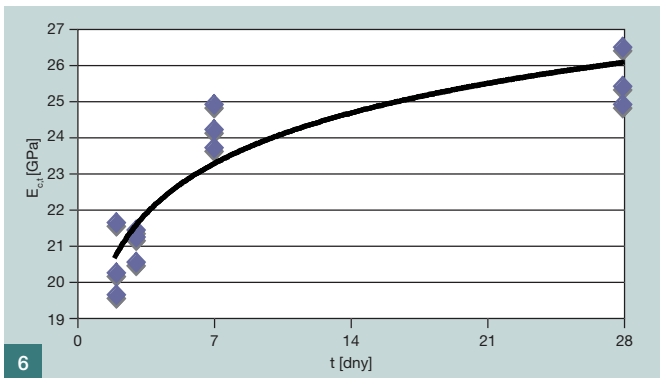
Obr. 8 Vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku v čase ■ Fig. 8 Dynamic modulus of elasticity in compression, development in time

Obr. 9 Vývoj poměrového dynamického modulu pružnosti v tlaku v čase ■ Fig. 9 Ratio dynamic modulus of elasticity in compression, development in time

Na čerstvém betonu byla stanovena konzistence sednutím a rozlitím. Hodnota sednutí kužele byla naměřena 200 mm, tedy třída S4, rozlité činilo 480 mm, tedy třída F3, což lze z hlediska praktického využití hodnotit jako běžný transportbeton. Ve stavebnictví se běžně používá transportbeton třídy konzistence S3, avšak někteří výrobci a projektanti v poslední době upřednostňují třídu S4. Z hlediska zpracovatelnosti pro běžnou praxi je tedy receptura LWHSC-AG3 použitelná.

V tab. 4 je uveden přehled průměrů dosažených hodnot s výjimkou naměřených rychlostí ultrazvukovou impulzní metodou (pro stanovení dynamických modulů pružnosti).

Při navrhování betonových resp. železobetonových konstrukcí jsou z hlediska materiálu kladeny požadavky zejména na pevnostní a pružnostní parametry betonu a s uvažováním prostředí, v němž má konstrukce fungovat, na odolnost proti působení agresivních vlivů. Protože časový horizont se projevuje v rámci finanční otázky každé výstavby, je podstatné znát vývoj pevností betonu, aby bylo docíleno co možná nejvyššího resp. nejefektivnějšího zkrácení prodlevy mezi jednotlivými etapami zhotovení stavebního díla. Z tohoto důvodu byla měřena pevnost betonu v tlaku v časových intervalech po 2, 3, 7 a 28 dnech zrání betonu (obr. 4). Z gra-



fu je patrný vývoj pevnosti v tlaku do stáří 28 dní. Závislost nejlépe vystihuje logaritmická funkce ve vztahu (1), přičemž koeficient korelace  $r$  činí 0,967.

$$f_{c,t} = 8,4822 \cdot \ln(t) + 36,916 \quad (1)$$

Koeficient korelace udává míru závislosti dvou veličin. Pro praxi použitelné odvozené rovnice lze považovat takové, u nichž  $r \geq 0,85$ . Je tedy zřejmé, že logaritmická závislost vystihuje vývoj pevnosti betonu vyrobeného z receptury LWH-SC-AG3 nejlépe a je využitelná v praxi.

Zajímavá a také podstatná je závislost poměrné pevnosti v tlaku na čase. Ta udává, kolik procent z výsledné pevnosti beton dosahuje při stáří menším než 28 dní. Jako 100% pevnost byla v tomto případě uvažována pevnost v tlaku po 28 dnech. Pomocí regresní analýzy byla vyhodnocována závislost zobrazená v grafu na obr. 5. Pomocí poměrové pevnosti lze odvodit vztahy (2) a (3), z nichž je možné pro danou recepturu stanovit 28denní pevnost v libovolném stáří do 28 dní.

Závislost nejlépe vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficient korelace činí 0,967.

$$f_{c,t} / f_{c,28} = 12,548 \cdot \ln(t) + 54,61 \quad (2)$$

Ze vztahu (2) lze odvodit funkční závislost pro stanovení predikce 28denní pevnosti v tlaku, a to v libovolném stáří do 28 dní zrání betonu. Uvedené závislosti a výpočty platí samozřejmě pouze pro recepturu LWHSC-AG3, při použití uvedených komponent receptury a normového postupu přípravy čerstvého betonu.

$$f_{c,28} = \frac{f_{c,t}}{12,548 \cdot \ln(t) + 54,61} \quad (3)$$

V rámci studia vlastností zkoumaných lehkých vysokopevnostních betonů byl stanoven vývoj statického a dynamického modulu pružnosti v tlaku do stáří 28 dní. Tyto materiálové charakteristiky jsou podstatné pro návrh betonových konstrukcí z hlediska mezních stavů.

Závislost statického modulu pružnosti v tlaku na čase vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficient korelace činí 0,920.

$$E_{c,t} = 2,0411 \cdot \ln(t) + 19,234 \quad (4)$$

Za účelem odvození predikčního vztahu byly stanoveny závislosti poměrového statického modulu pružnosti v tlaku na čase. Závislost vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficient korelace činí 0,920.

$$E_{c,t} / E_{c,28} = 7,7023 \cdot \ln(t) + 72,581 \quad (5)$$

Z rovnice (5) lze odvodit funkční závislost pro stanovení predikce 28denních statických modulů pružnosti v tlaku, a to v libovolném stáří do 28 dní zrání betonu. Uvedené závislosti a výpočty platí pouze pro recepturu LWHSC-AG3, při použití uvedených komponent receptury a normového postupu přípravy čerstvého betonu.

$$E_{c,28} = \frac{E_{c,t}}{7,7023 \cdot \ln(t) + 72,581} \quad (6)$$

Dále byl stanoven vývoj dynamického modulu pružnosti v tlaku obdobnou metodou jako v případě předchozích charakteristik. Závislost nejlépe vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficient korelace činí 0,807.

$$E_{bu,t} = 1,9578 \cdot \ln(t) + 32,431 \quad (7)$$

# SÍLA ZKUŠENOSTI

Mott MacDonald je jedna z největších mezinárodních projektových, inženýrských a poradenských společností

Mott MacDonald Praha poskytuje služby v mnoha oblastech inženýrského poradenství a projektového managementu. Jedná se o poradenské služby, zpracování studií ekonomického hodnocení, zpracování a posuzování všech stupňů projektové dokumentace, řízení a supervize projektů.

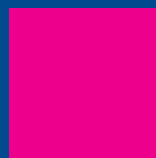
Oblasti činnosti:

- Silnice a dálnice
- Železnice
- Mosty a inženýrské konstrukce
- Tunely a podzemní stavby
- Vodní hospodářství
- Životní prostředí
- Geodetické práce
- Grafické aplikace
- Inženýring a konzultační činnost

Kontakt:

Mott MacDonald Praha  
Ing. Jiří Petrák

T + 420 221 412 800  
E [czech@mottmac.com](mailto:czech@mottmac.com)



Vývoj poměrového dynamického modulu pružnosti v tlaku v čase vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficient korelace činí 0,807.

$$E_{bu,t} / E_{bu,28} = 4,9068 \cdot \ln(t) + 81,281 \quad (8)$$

Z rovnice (8) lze odvodit funkční závislost pro stanovení predikce 28denních dynamických modulů pružnosti v tlaku a to v libovolném stáří do 28 dní zrání betonu. Uvedené závislosti a výpočty platí pouze pro recepturu LWHSC-AG3, při použití uvedených komponent receptury a normového postupu přípravy čerstvého betonu.

$$E_{bu,28} = \frac{E_{bu,t}}{4,9068 \cdot \ln(t) + 81,281} \quad (9)$$

S uvážením poměrně nízkých koeficientů korelace v případě rovnic (7) až (9) je zřejmé, že tyto vztahy je nutno brát s rezervou. Pro praktické využití nejsou použitelné a lze je tedy chápat spíše jako informativní.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem výzkumu popsaného v článku byl návrh, výroba a studium fyzikálně-mechanických parametrů lehkého vysokopevnostního betonu s využitím pórovitého kameniva na bázi spékaných popílků. Celkem byly navrženy čtyři receptury, z nichž byla na základě pevnosti v tlaku vybrána jedna optimální. Z této byla následně vyrobena zkušební tělesa (trámce 100 × 100 × 400 mm a krychle o hraně 150 mm) pro studium fyzikálně-mechanických charakteristik v čase, a to v intervalu 2 až 28 dní. Pozornost byla soustředěna na vývoj pevnosti v tlaku a statického a dynamického modulu pružnosti v tlaku. Pro pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku byly odvozeny predikční rovnice, přičemž u dynamického modulu pružnosti v tlaku nebylo dosaženo požadované minimální míry závislosti sledovaných veličin. Po 28 dnech byly dosaženy tyto průměrné parametry:

- pevnost v tlaku (na krychlích) – 64,6 MPa,
- pevnost v tahu za ohybu (tříbodový ohyb na trámcích) – 6,2 MPa,
- statický modul pružnosti v tlaku (na trámcích) – 25,6 GPa,
- dynamický modul pružnosti v tlaku (na trámcích) – 38,2 GPa,
- objemová hmotnost ztvrdlého betonu (na krychlích) – 1 980 kg.m<sup>-3</sup>.

Při porovnání hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku s běžnými betony je zřejmé, že beton vyrobený z receptury LWHSC-AG3 nedosahuje příliš vysokých hodnot. To lze přisuzovat použitému pórovitému kamenivu, jež pravděpodobně z hlediska elastických parametrů nedosahuje odpovídající kvality. Výhodou použití agloporitu na bázi spékaného popílku z elektrárny Dětmárovice je především snížení objemové hmotnosti a s tím související celkové snížení hmotnosti konstrukce cca o 15 %. Dalším pozitivem oproti běžně používanému keramzitu je skutečnost, že agloporit je vyráběn z popílků, tj. vedlejší energetický produkt a navíc samovýpalem (poměrně nenákladný výrobní proces). Zde tedy dochází k úsporám primárních surovin a energetických zdrojů. Pro srovnání – pórovité kamenivo na bázi keramzitu je vyráběno z kvalitních jíílů, které jsou následně ve formě sbalků vypalovány v rotační peci při vysoké spotřebě tepelné energie.

Závěrem lze konstatovat, že s použitím agloporitu na bázi spékaných popílků, jakožto pórovitého kameniva, je možné vyrobit lehký vysokopevnostní beton, jenž by zajisté nalezl uplatnění ve stavební praxi. Je však nutné ověřit další pod-

## Literatura:

- [1] *Aitcin P.-C.*: Vysokohodnotný beton. Z angl. orig. přeložil V. Bílek a kol., 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 str., ISBN 80-86769-39-9
- [2] *Drochytka R.*: Lehké stavební látky, 1. vydání. Brno: VUT, 1993, 124 str., ISBN 80-214-0514-7
- [3] *Kulisek K. Černý V.*: Building Materials from Energetic Wastes and Suitable ecological Ways of their Utilization. *Sovremennyy Naučnyj věstnik*, 2008(29), p. 54 – 65, ISSN 1561-6886
- [4] ČSN 73 1317 Stanovení pevnosti betonu v tlaku
- [5] ČSN 73 1370 Nedestruktivní zkoušení betonu. Společná ustanovení
- [6] ČSN 73 1371 Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu
- [7] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí
- [8] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [9] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím
- [10] ČSN EN 12350-5 Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím
- [11] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti
- [12] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [13] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles
- [14] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
- [15] ČSN EN 13055-1 Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty
- [16] ČSN ISO 6784 Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [17] URL: <[http://no.wikipedia.org/wiki/Sandhorn%C3%B8y\\_bru](http://no.wikipedia.org/wiki/Sandhorn%C3%B8y_bru)>
- [18] *Holm T. A., Bremmer T. W.*: State of the Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, US Army Corps of Engineers
- [19] Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 294/2005 Sb., příloha č. 2

statné charakteristiky betonu, které náležejí do souboru kritérií použitelnosti a uplatnitelnosti betonu ve stavebních konstrukcích. Následující etapy experimentů budou zaměřeny zejména na trvanlivost (odolnost proti vlivu mrazu, CHRL, příp. CO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub>), z doplňujících zkoušek lze zmínit hloubku průsaku tlakovou vodou, odolnost proti obrusu atd.

Příspěvek byl vytvořen v rámci výzkumného záměru MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“ a za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu FR-TI2/351 „Nové technologie vysokohodnotného pórovitého kameniva z různých druhů popílků“.

Ing. Tomáš Melichar  
tel.: 541147463, e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz



Ing. David Procházka  
tel.: 541147463, e-mail: prochazka.d@fce.vutbr.cz



Ing. Vít Černý  
tel.: 541147463, e-mail: cerny.v@fce.vutbr.cz



všichni: Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební, ÚTHD  
Veveří 95, 602 00 Brno  
[www.fce.vutbr.cz/thd](http://www.fce.vutbr.cz/thd)