

# VLIV KOMBINACE VYSOKOTEPLNÍHO POPÍLKU A INERTNÍCH PŘÍMĚSÍ NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY BETONOVÉHO KOMPOZITU

## INFLUENCE OF A COMBINATION OF HIGH-TEMPERATURE FLY ASH AND INERT ADDITIVES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS OF A CONCRETE COMPOSITE

Milan Meruňka, Martin Ťažký, Rudolf Hela

**Článek se zabývá možností využít kombinaci vysokoteplotního úletového popílku a inertních příměsí pro dosažení maximální hutnosti cementové matrice v suchém stavu. Snížení mezerovitosti cementové matrice by mělo v důsledku nejen zvýšit trvanlivost betonového kompozitu, ale také zlepšit jeho fyzikálně-mechanické parametry.**

The article explores possibilities for an exploitation of combinations of high temperature pulverised fly ash and inert additives with the aim to reach the maximum density of the cement matrix in its dry state. The decrease in porosity of the matrix should lead not only to an increase of durability of the concrete composite but also to an improvement in its physical-mechanical parameters.

### Současnost

Používání vysokoteplotního úletového popílku do betonů se v moderní technologii betonu stalo již běžnou záležitostí nejen z důvodu pozitivního ovlivnění vybraných parametrů betonové směsi v čerstvém stavu (zlepšení reologie, rozvolnění hydratační reakce, snížení rizika vzniku smršťovacích trhlin) [1], [2] či zatvrdlém stavu (dosažení vyšších pevností ve stáří 60 dnů a déle vlivem pucolánové reakce) [3], ale také z ekonomického hlediska. S postupnou změnou technologie spalování tuhých fosilních paliv a stále častější aplikací selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku [4] je však na trhu stále citelnější deficit tohoto druhu aktivní příměsí. Proto je nutné hledat možná řešení či alternativy optimalizace složení betonové směsi, resp. možnosti snížení množství vysokoteplotního úletového popílku v betonovém kompozitu při zachování technických parametrů a ekonomické výhodnosti.

Jedním z možných řešení by se mohla jevit kombinace vysokoteplotního úletového popílku s inertní příměsí v optimálním poměru zajišťujícím maximální hutnost cementové matrice v suchém stavu [5].

Inertní příměsí jsou dle ČSN EN 206+A1 [6] látky, které vzhledem ke svému chemickému či mineralogickému složení netuhnou či netvrdnou ani po přidání tzv. budiče. Většinou se jedná o látky, jejichž úkolem je zvýšit hutnost cementové matrice a modifikovat reologické vlastnosti betonu (zlepšit čerpatelnost či snížit riziko odlučivosti vody z betonu, tzv. bleedingu). Ačkoliv se mezi inertní příměsí řadí dle normy i mikromletý vápenec, v rámci mnoha experimentů byla prokázána tzv. skrytá aktivita vápenců [7], [8], [9]. Mezi další pozitiva tohoto druhu příměsí se dá zařadit povrchová adsorpce vody. Ta je závislá zejména na měrném povrchu, který je dán jemností mletí. Obecně lze proto konstatovat, že se přidáním mikromletého vápence do

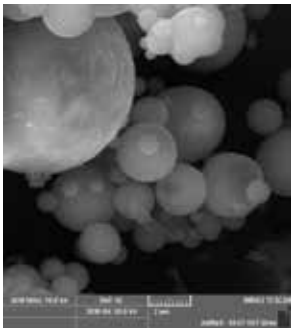
betonové směsi snižuje riziko odlučivosti vody z betonu [10].

Další surovinou řadící se mezi inertní látky jsou kamenné odprašky (filler, moučka). Jedná se o jemné kamenné podíly vzniklé v lomech při drcení kameniva. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,125 mm a jejich další vlastnosti jsou závislé na petrografickém druhu drcené suroviny. Nejen z důvodu velkého měrného povrchu, ale také z důvodu nepravidelného, ostrohranného tvaru zrn je pak nutné při výrobě betonu použít vyšší množství záměsové vody. To však v konečném důsledku může zhoršit fyzikálně-mechanické parametry a zároveň zvýšit riziko segregace kameniva či množství odloučené vody z betonové směsi [11].

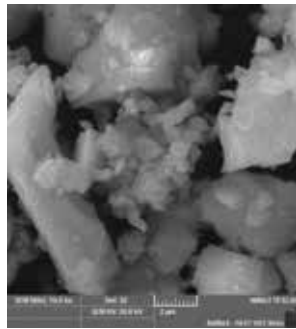
### Experimentální část

#### Optimalizace dávkování

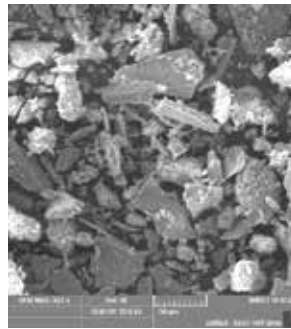
Aby bylo možné provést správný návrh betonové směsi a určit poměr



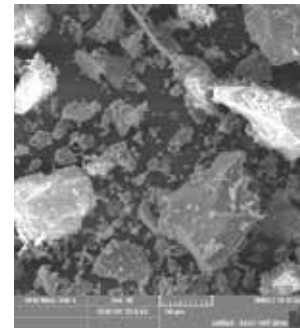
1a



1b



1c



1d

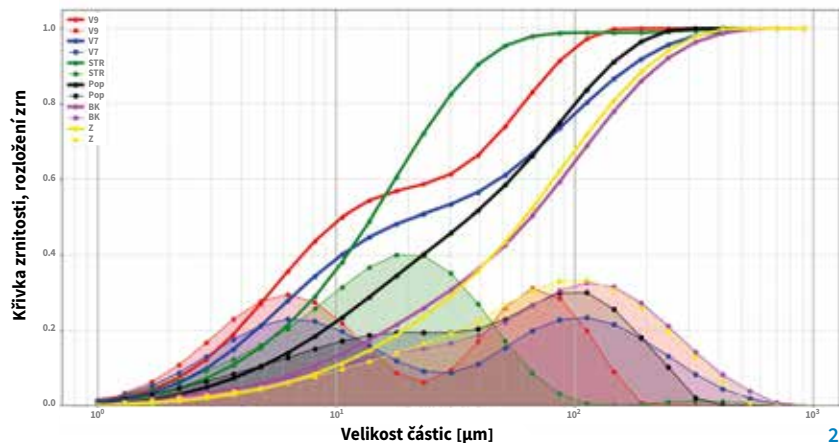
optimálního mísení, bylo nutné jednotlivé vstupní suroviny pečlivě analyzovat. Vysokoteplotní úletový popílek byl použit z tepelné elektrárny v Dětmarovicích (POP), z inertních příměsí byly vybrány mikromleté vápence společnosti Carmeuse Mokrá číslo 7 (VÁP 7) a 9 (VÁP 9), které se vzájemně lišily jemností mletí, a dva kamenné fillery z různých lokalit – z lomů Zárubka (ZÁR) a Bílý Kámen (BK). Na obr. 1a až 1d je zachycena morfologie zrn jednotlivých vstupních příměsí za použití skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

Nejdůležitějším parametrem pro navržený způsob optimalizace dávkování příměsí byla granulometrie jednotlivých vstupních příměsí, na jejímž základě byl stanoven jejich optimální poměr mísení s cílem dosáhnout maximální hutnosti jemných složek v suchém stavu (tab. 1). Dosažení maximální hutnosti betonového kompozitu by mělo vést ke zvýšení jeho trvanlivosti. Vlivem nižší porozity by mělo docházet k nižšímu průniku chloridových iontů, které způsobují korozi výztuže, do struktury betonu či k nižšímu průniku  $\text{CO}_2$  způsobujícího karbonatci betonu. Zvýšení hutnosti cementové matrice vede zároveň i ke snížení pórovitosti kompozitu či tranzitních zón, což by se mělo pozitivně projevit na fyzikálně-mechanických parametrech betonu a zlepšení jeho trvanlivosti při cyklickém zmrazování za přítomnosti vody či CHRL. V konečném důsledku by se optimální kombinace příměsí mohla jevit výhodná nejen z ekologického, ale také z ekonomického hlediska, neboť v důsledku zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů by mohlo dojít ke snížení dávek cementu.

Pro dosažení maximální hutnosti cementové matrice byl použit speciální

**1** Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu: a) vysokoteplotní úletový popílek Dětmarovice, b) mikromletý vápenc 7 z lokality Mokrá, c) kamenný filler Zárubka, d) kamenný filler Bílý Kámen  
**2** Křivky zrnitosti a rozložení velikosti zrn použitých příměsí

**1** Scanning Electron Microscopy image: a) high-temperature fly ash Dětmarovice, b) micronized limestone 7 from the Mokrá locality, c) stone filler Zárubka, d) stone filler Bílý Kámen  
**2** Grain-size curves and particle size distribution of the additives used



2

**Tab. 1** Vstupní parametry použitých příměsí  
**Tab. 1** Input parameters of additives used

Receptura	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK
měrná hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2 250	2 770	2 750	2 780	2 680
měrný povrch [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	2 900	3 120	4 490	2 320	3 350

algoritmus, který na základě granulometrie jednotlivých surovin dokázal stanovit nevhodnější objemový poměr mísení příměsí pro získání co nejnižší mezerovitosti této kombinace. V případě, kdy nebyl nalezen optimální poměr, jak je tomu např. při kombinaci mikromletého vápence 7 a vysokoteplotního popílku, byl zvolen objemový poměr mísení 50 % : 50 %. Nenalezení optimálního poměru mísení mikromletého vápence 7 a vysokoteplotního popílku je dáno jejich podobnou granulometrií. Výrazně blízká vzájemná granulometrie má za následek, že jakékoliv mísení těchto surovin obecně zhoršuje

mezerovitost směsi, která by byla nejnižší při použití pouze jednoho druhu příměsí. Veškeré objemové dávkování příměsí v použitých kombinacích a vypočtená mezerovitost, potažmo maximální hutnosti tohoto systému jsou znázorněny v grafech na obr. 3a až 3d a pro přehlednost jsou uvedeny také v tab. 2.

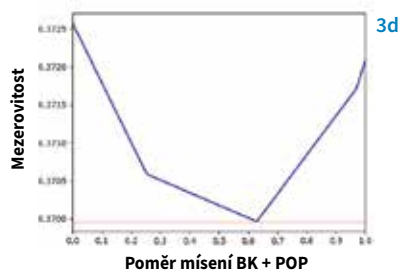
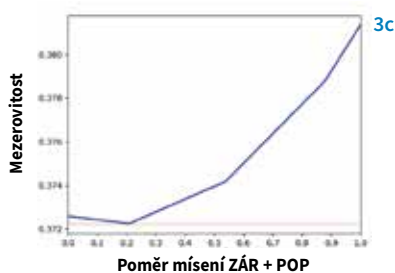
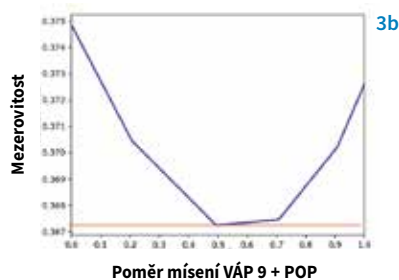
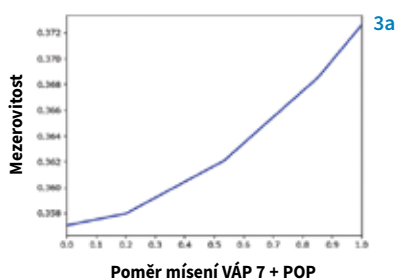
### Návrh složení betonového kompozitu

V rámci experimentální části bylo navrženo devět receptur betonů pevnostní třídy C30/37. Pět receptur obsahovalo pouze jeden druh příměsí a zbývající čtyři receptury kombinaci

**Tab. 2** Objemový poměr mísení příměsí pro dosažení maximální hutnosti v suchém stavu

Tab. 2 Volumetric proportions of additives required to achieve the maximum dry density

Druh a množství příměsí [% obj.]	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK	Maximální hutnost [%]	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> /g]
POP + VÁP 7	50	50	—	—	—	63,82	2 440	2 980
POP + VÁP 9	51	—	49	—	—	63,28	2 500	3 690
POP + ZÁR	80	—	—	20	—	63,02	2 350	2 790
POP + BK	36	—	—	—	64	62,72	2 350	3 190



**3** Optimální poměr mísení vysokoteplotního popílku: a) s mikromletým vápencem 7, b) s mikromletým vápencem 9, c) s kamenným fillerem Zárubka, d) s kamenným fillerem Bílý Kámen **4** Stanovení konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele **5** Výroba zkušebních těles **6** Navržená křivka zrnitosti veškerých betonových receptur **7** Fyzikálně-mechanické parametry jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní **8** Vodotlačná stolice pro stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou **9** Průnik tlakové vody do zkušebního tělesa

**3** Optimum mixing ratio of the high-temperature fly ash: a) with micronized limestone 7, b) with micronized limestone 9, c) with mineral filler Zárubka, d) with mineral filler Bílý Kámen **4** Determination of the consistency of fresh concrete by the slump test **5** Production of test specimens **6** Grain-size curve adopted for all the concrete mix designs **7** Physical-mechanical parameters of specific mix designs at the ages of 7, 28 and 90 days **8** Water pressure bench for determination of the depth of penetration by pressurized water **9** Penetration of pressurized water into a test specimen

4



5



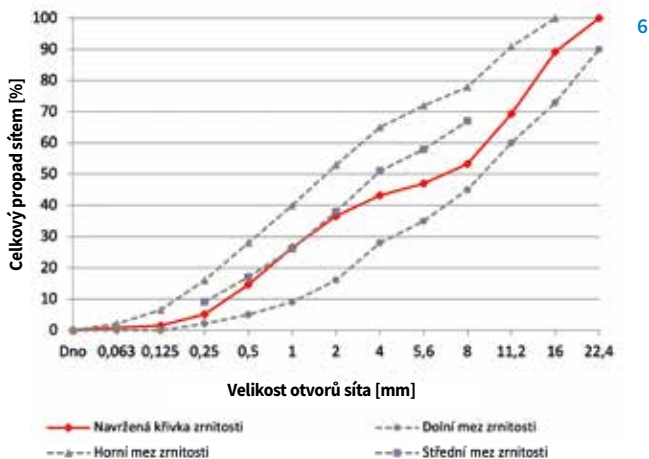
vysokoteplotního úletového popílku a inertní příměsí v poměru stanoveném výpočtovým algoritmem. Pro všechny receptury byl použit CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá a jeho množství v jednotlivých recepturách bylo upraveno tak, aby byla při shodné konzistenci dosažena přibližně srovnatelná pevnost betonového kompozitu po 28 dnech. Po dobu zrání byla všechna tělesa uložena ve vodě o teplotě  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  v souladu s ČSN EN 12390-2 [12]. U směsí obsahujících pouze jeden druh inertní příměsí byl obsah cementu  $315\text{ kg/m}^3$ , ve zbývajících recepturách byla zvolena dávka  $300\text{ kg/m}^3$ . Množství příměsí v recepturách bez jejich vzájemné kombinace bylo  $120\text{ kg/m}^3$ . Následná kombinace inertní příměsí s vysokoteplotním popílkem probíhala dle tab. 2. Aby se zamezilo ovlivnění mechanických parametrů vlivem rozdílné skladby směsi kameniva, byla pro veškeré receptury navržena shodná křivka zrnitosti směsi kameniva znázorněná v grafu na obr. 6. Z důvodu lepší orientace polohy navržené křivky jsou ve stejném grafu znázorněny hranice zrnitosti vycházející z TKP 18 ČR [13]. Pro dosažení shodné konzistence všech receptur, stanovené metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [14], s hodnotou cca 180 mm v čase 5 min se množství záměšové vody v betonové směsi pohybovalo v rozmezí  $173\text{ až }180\text{ l/m}^3$  a množství superplastifikační přísady Mapei Dynamon SX 14 v rozmezí 0,8 až 1,2 % k celkové hmotnosti cementu a příměsí ve směsi.

### Stanovení pevnosti betonu v tlaku

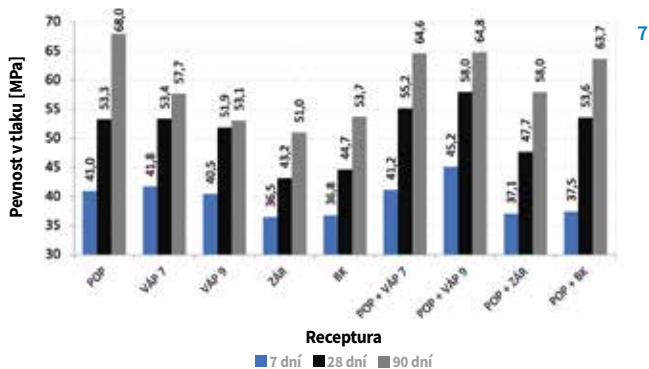
Z každé receptury byly vyrobeny betonové krychle o hraně 150 mm, na kterých byla ve stáří 7, 28 a 90 dní stanovena objemová hmotnost betonu dle ČSN EN 12390-7 [15] a pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [16] (obr. 7).

Po sedmi dnech normového zrání vykazovala nejvyšší pevnost betonu v tlaku (45,2 MPa) receptura s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9. To může být zapříčiněno právě obsahem mikromletého vápence 9, který se, ač je klasifikován jako inertní příměs, vyznačuje skrytou aktivitou.





6



7



8



9

Nejvyšší pevnost v tlaku po 28 dnech zrání (58 MPa) vykazovala opět betonová směs s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9. Nejnižší pevnost betonu v tlaku po 28 dnech zrání (43,2 MPa) vykazovala směs s příměsí kamenného filleru z lokality Zárubka. Tato směs navíc vlivem špatného tvarového indexu a vysokého měrného povrchu zrn kamenného filleru vyžadovala pro dosažení požadované konzistence jednu z nejvyšších dávek záměsové vody i superplastifikační přísady. Při porovnání pevností betonu v tlaku u receptur s obsahem pouze jedné inertní příměsi a směsí s kombinací inertní příměsi a vysokoteplotního popílku v optimálním poměru mísení došlo k pozitivnímu ovlivnění pevnosti v tlaku téměř ve všech případech, což vypovídá o pozitivním vlivu vyšší hutnosti jemných částic v suchém stavu.

Po 90 dnech zrání vykazovala nejvyšší pevnost betonu v tlaku (68 MPa) receptura obsahující pouze vysokoteplotní popílek. Velmi dobré

pevnosti betonu v tlaku vykazovaly také betony s kombinací vysokoteplotního úletového popílku s mikromletým vápencem 7 i 9. Je nutné zdůraznit, že těchto pevností bylo dosaženo s téměř poloviční dávkou vysokoteplotního úletového popílku ve směsi. Receptury obsahující pouze mikromletý vápence 7 či 9 vykazovaly nižší pevnosti v tlaku. Nejnižší pevnost betonu v tlaku (51 MPa) vykazovala receptura obsahující pouze kamenný filler z lokality Zárubka.

### Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou a nasákovosti betonu

Pro přesnější stanovení vlivu kombinace vysokoteplotního úletového popílku s inertními příměsí byla zkušební tělesa podrobena ve stáří 7, 28 a 90 dnů zkoušce pro stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou. Z pohledu evropských harmonizovaných norem se nejčastěji využívá metoda dle ČSN EN 12390-8 [17], při které na zkušební těleso působí tlak vodního sloupce 500 kPa po dobu

72 h. Další používané metody pro stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou se mohou řídit technicko-kvalitativními podmínkami příslušných subjektů. Mezi takové metody lze zařadit např. zkoušku tlakovou vodou dle TKP ŘVC ČR [18] se stupněm vodotěsnosti označeným HV a příslušným číslem (2, 4, 8, 12) značícím desetinásobek nejvyššího vodního tlaku v MPa. S ohledem na aplikaci vyššího tlakového namáhání, které napomůže k důkladnějšímu zhodnocení odolnosti betonů vůči působení tlakové vody, byla pro náš experiment zvolena metoda dle TKP ŘVC ČR se stupněm vodotěsnosti HV8. Výsledky měření jsou zobrazeny v grafech na obr. 10 a 11.

Bylo potvrzeno, že s přibývajícím dobou zrání betonové směsi dochází k vytváření mikrostruktury betonu díky vzniku nových hydratačních novotvarů a CSH gelů, což v důsledku snižuje hloubku průsaku tlakovou vodou.

Při porovnání hloubky průsaku u receptur obsahujících pouze jednu

příměs a receptur s kombinací příměsí došlo k největší redukci průsaku u betonových směsí s kombinací popílku a kamenných fillerů. Obě tyto receptury vykazovaly shodnou hodnotu průsaku tlakovou vodou 5 mm po 90 dnech zrání, kdežto receptura obsahující pouze kamenný filler z lokality Zárubka vykazovala po 90 dnech zrání hodnotu průsaku

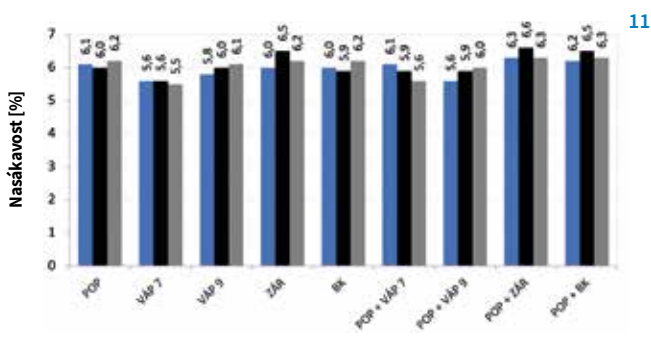
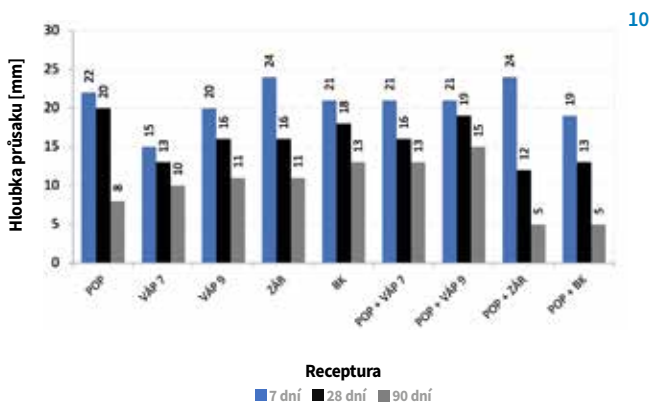
tlakovou vodou 11 mm a receptura s kamenným fillerem z lokality Bílý Kámen vykazovala hodnotu průsaku tlakovou vodou po 90 dnech zrání 13 mm. Kombinace kamenných fillerů s vysokoteplotním popílkem by se z tohoto hlediska dala považovat za výhodnou.

Obecně je možno konstatovat, že veškeré receptury již po sedmi dnech

zrání vykazovaly z pohledu kritéria pro HV8 vyhovující hodnotu a hloubka průsaku tlakovou vodou byla po 28 dnech velice nízká. Lze proto říci, že ani zvýšená hodnota vodonáročnosti a nutnost vyšších dávek záměsové vody např. u kamenných fillerů nebyly překážkou pro výrobu betonů s vysokým stupněm odolnosti proti průsaku tlakovou vodou.

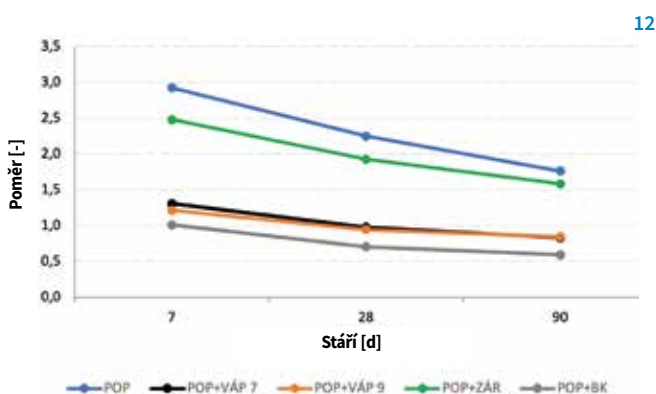
Zdroje:

- [1] LIGUO, M., YUNSHENG, Z. Study on the Effect of Fly Ash or Silica Fume to Hydration Heat of Cement. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, 250–253:4001–4004. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.4001. ISSN 1662-8985.
- [2] SAHA, A. K. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*. 2018, Vol. 28, Issue 1, pp. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>. ISSN 2468-2039.
- [3] APONTE, D. F., BARRA, M., VÁZQUEZ, E. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, Vol. 30, pp. 537–546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.026>.
- [4] HELA, R., TĀŽKÝ, M., OSUSKÁ, L. Properties of high temperature fly ashes after application SNCR technology from the concrete producers point of view. In: *EuroCoalAsh 2019*. Dundee: University of Dundee, 2019. S. 157–164. ISBN 9780957326323.
- [5] TĀŽKÝ, M., HELA, R. Development of structural concrete with fly ash – Mixing of different particle-size fractions of fly ash and cement. *Fly ash: Properties, Analysis and Performance*. New York, USA: Nova Publisher, Inc., 2017. S. 219–236. ISBN 978-1-5361-0516-2.
- [6] ČSN EN 206+A1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [7] TĀHNÍK, V., NEČAS, R., KUBÁTOVÁ, D. *Vápenec jako základní kámen maltovin* [online]. Dostupné z: [s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf)
- [8] OEY, T., KUMAR, A., NEITHALATH, N., SANT, G., SCHERER, G. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. *Journal of the American Ceramic Society*. 2013, Vol. 96, pp. 1978–1990. DOI: 10.1111/jace.12264.
- [9] MOHAMED, A. R., ELSALAMAWY, M., RAGAB, M. Modeling the influence of limestone addition on cement hydration. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2015, Vol. 54, Issue 1, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.004>. ISSN 1110-0168.
- [10] TĀŽKÝ, M., HELA, R. High-Performance Concretes Intended for Deep Foundations of Constructions. *Civil Engineering and Architecture*. 2020, roč. 8, č. 2, s. 46–54. ISSN: 2332-1091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.004>. ISSN 1110-0168.
- [11] MERUŇKA, M. *Analýza objemových změn cementových kompozitů s ohledem na optimalizaci dávkování jemných složek*. Brno, 2020. 118 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [12] ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [13] TKP 18 ČR. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty*. Praha: Ministerstvo dopravy – odbor pozemních komunikací, 2016.
- [14] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sedimentů*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [15] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [16] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [17] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Opr. 1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [18] TKP RVC ČR. *Technické kvalitativní podmínky staveb RVC ČR: Kapitola 1: Provádění betonových konstrukcí*. 3. vydání. Praha: Česká republika – Ředitelství vodních cest ČR, 2017.
- [19] ČSN 731316. *Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínivosti betonu*. Praha: ÚNMZ, 04/1990 – 11/2003.



**10** Hloubka průsaku tlakovou vodou jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní **11** Nasákavost jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní **12** Poměr hmotnosti vysokoteplotního úletového popílku v receptuře a pevnosti v tlaku betonového kompozitu

**10** Depth of penetration by pressurized water of specific mix designs at the ages of 7, 28 and 90 days **11** Absorbency of specific mix designs at the ages of 7, 28 and 90 days **12** Proportion of the mass of high-temperature fly ash in the mix design and the compressive strength of the concrete composite



Dále byla stanovena nasákavost betonu dle ČSN 73 1316 [19]. S přibývajícím časem zrání dochází vlivem pucolánové aktivity ke vzniku CSH gelů, což by mělo v důsledku způsobit hutnější mikrostrukturu kompozitu a ve spojení s vyšší hutností jemných částic v suchém stavu i jeho nižší nasákavost. Tato zkouška ovšem neprokázala jednoznačnou souvislost s danou úvahou, neboť nebyl potvrzen jednoznačný vliv kombinace příměsí a hutnější mikrostruktury kompozitu na nasákavost betonu (obr. 11).

### Celkové zhodnocení

Vhodná kombinace aktivní příměsí s příměsí inertními se z hlediska dosažení obdobných fyzikálně-mechanických parametrů porovnávaných směrů jeví jako velice zajímavá. Zda by se jejich kombinace jevila výhodně i z ekonomického hlediska, je možné sledovat v grafu na obr. 12, kde je zobrazen poměr hmotnosti vysokoteplotního úletového popílku a pevnosti v tlaku betonového kompozitu pro jednotlivé receptury. Vzhledem ke zvyšující se poptávce po tomto druhu aktivní příměsí a jeho nedostatku způsobeného přechodem na ekologičtější variantu spalování se dá očekávat postupné zvyšování ceny této komodity. Proto by se menší množství vysokoteplotního úletového popílku ve směsi mělo pozitivně projevit na nižších nákladech na vstupní suroviny. Obsah cementu v porovnávaných recepturách je konstantní a použité příměsí jsou vyjma vysokoteplotního úletového popílku z normativního hlediska považovány za inertní. Pevnost betonu v tlaku by tedy měla být primárně ovlivněna dávkou vysokoteplotního úletového popílku obsaženého v dané receptuře.

V případě betonů obsahujících pouze vysokoteplotní úletový popílek je poměr celkové hmotnosti vysokoteplotního úletového popílku a pevnosti v tlaku betonového kompozitu nejvyšší. Vysoké dávky a nikterak výrazně lepší fyzikálně-mechanické parametry po 90 dnech zrání (v porovnání s kombinací tohoto druhu aktivní příměsí např. s mikromletými vápenci) by mohly svědčit o nepříliš

efektivním využívání vysokoteplotního úletového popílku. V důsledku vytvrzování betonového kompozitu a intenzivní pucolánové reakci lze pozorovat, ostatně jako u všech receptur, snižující se trend dané křivky z důvodu zvyšování pevnosti v tlaku. Při kombinaci vysokoteplotního úletového popílku s mikromletými vápenci či kamenným fillerem z lokality Bílý Kámen vychází v důsledku nižší dávky aktivní příměsí k dosažení nižšího poměru, což by mohlo svědčit o efektivnějším využití vysokoteplotního úletového popílku. Z těchto výsledků je zřejmé, že i výrazně nižší dávka vysokoteplotního popílku v kompozitu ve vhodné kombinaci s inertní příměsí dokáže velmi výrazně napomoci efektivnímu využití jeho pucolánových vlastností. Tyto výsledky poukazují na možný směr moderního návrhu betonové směsi s optimálním využitím všech pozitiv jednotlivých druhů příměsí. Z grafu na obr. 12 je dále jasně patrný vliv množství vysokoteplotního popílku ve směsi na vypočtený poměr v delším časovém horizontu. Směs pouze s vysokoteplotním popílkem (POP) a směs s přidavkem kamenného filleru Zárubka (POP + ZÁR) dosahují značně výraznější směrnice poklesu vypočteného poměru v čase. Pro technologii betonu se jako velmi přínosné jeví rovněž pozitivní ovlivnění krátkodobých pevností betonů obsahujících vysokoteplotní popílek společně s přidáním inertní příměsí v optimálním poměru. Právě tato pozitiva jsou nejzřetelnější při použití mikromletých vápenců, u nichž se zřejmě projevuje dříve popsaná skrytá aktivita.

Pro praxi lze velký přínos sledovat rovněž v bezproblémovém využití kamenných odprašků při jejich vhodné kombinaci s vysokoteplotním úletovým popílkem, kdy vysokoteplotní úletový popílek díky své vhodné morfologii zrn částečně eliminuje zvýšenou vodonáročnost kamenných odprašků. Využití odprašků pro výrobu betonů není stále příliš rozšířeno, ačkoliv se jejich produkce díky odtahu prachu během drcení suroviny v lomech v souvislosti se zvyšujícími se nároky na čistotu provozu stále zvyšuje.

### Závěr

Na základě získaných výsledků je možné konstatovat, že vhodnou kombinací vysokoteplotního úletového popílku a inertní příměsí se dá dosáhnout velice zajímavých fyzikálně-mechanických či trvanlivostních parametrů betonového kompozitu. U směsí s kombinací tohoto druhu aktivní příměsí s mikromletými vápenci bylo v porovnání se směsí obsahující pouze vysokoteplotní úletový popílek dosaženo dokonce vyšších pevností betonu v tlaku po 28 dnech zrání, a to i při zachování stejné dávky portlandského cementu. V době, kdy je na trhu zvýšená poptávka a klesající nabídka vysokoteplotního úletového popílku, se kombinace příměsí a zvýšení efektivnosti jejich využívání mohou jevit jako jedno z možných alternativních řešení.

Cílem kombinace vysokoteplotního úletového popílku s inertními příměsí je maximalizovat efektivnost jeho využívání, což přináší nespočet kladných aspektů. V případě kombinace v optimálním poměru dochází k významnému zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů při poloviční dávce aktivní příměsí (vysokoteplotního úletového popílku).

V další fázi experimentu by mohla následovat úprava složení dané receptury s nižší dávkou cementu při zachování fyzikálně-mechanických parametrů, což by vedlo ke snížení celkových nákladů na vstupní suroviny betonové směsi.

*Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. FAST-J-20-6386 Vývoj vysoceodolných betonů pro prostředí XA vyrobených za použití úletových popílků.*



Ing. Milan Meruňka  
merunka.m@fce.vutbr.cz



Ing. Martin Ťažký  
tazky.m@fce.vutbr.cz



prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
hela.r@fce.vutbr.cz

všichni:  
Fakulta stavební VUT v Brně  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Článek byl posouzen odborným lektorem.  
The article was reviewed.