

VÝVOJ KONSTRUKČNÍCH BETONŮ S ELEKTRÁRENSKÝMI POPÍLKÝ ■ DEVELOPMENT OF STRUCTURAL CONCRETE WITH FLY ASH

Martin Ťažký, Rudolf Hela,
Tomáš Ťažký

Článek pojednává o zefektivnění využití vysokoteplotního úletového popílku pro výrobu betonových směsí. Provedené výzkumy poukázaly na pozitivní vliv dávkování popílku s přihlédnutím ke granulometrii použitého cementu a popílku vedoucí k zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů těchto betonů v porovnání s běžnými popílkovými betony. Článek vznikl v návaznosti na výzkum provedený v rámci bakalářské práce, který byl dále rozšířen. Tato bakalářská práce byla oceněna ČBS jako Vynikající bakalářská práce 2014 v kategorii technologie betonu. [1]

■ The article discusses better usage of fly ash for preparation of concrete mixtures. These studies have shown positive impact of dosage of fly ash according granulometry of cement and fly ash. The concrete prepared according to this method has better mechanical and physical parameters compared with traditional concretes with fly ash. The article was written as continuation to the research of a bachelor's thesis and it's widening. This bachelor's thesis was awarded the ČBS 2014 Best bachelor's thesis in the concrete technology category [1].

VYSOKOTEPLTNÍ ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK – OBECNĚ

Použití vysokoteplotního elektrárenského popílku jako přísady pro výrobu betonu je známo prakticky již od 60. let minulého století. Základní betonářská norma ČSN EN 206 vysokoteplotní popílek charakterizuje jako přísadu typu II, tedy přísadu mající pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti [2]. Použití popílku jako přísady, kterou je možno nahradit jisté množství dávky cementu, je však poměrně mladou záležitostí. Je tedy stále otázkou výzkumu, do jaké míry lze popílek tímto způsobem využívat a jak jeho využití dále zefektivnit.

Snaha o maximalizování využití vysokoteplotního popílku je poháněna vysokou produkcí této suroviny v celosvětovém měřítku. V České republice se roční produkce úletového elektrárenského popílku stabilizovala přibližně na 6,2 mil t [3].

Zpracování druhotných surovin sebou přináší však nejen pozitivní envi-

ronmentální a ekonomický aspekt, ale u těchto surovin je taktéž třeba počítat s řadou úskalí, na která není možno při použití v betonech zapomenout.

Budeme-li používat pro výrobu betonu právě vysokoteplotní úletový popílek, je na prvním místě třeba zmínit výrazně nižší rychlost hydratačních reakcí oproti klasickému portlandskému cementu. Všeobecně lze říci, že počáteční pevnosti popílkových betonů jsou vždy nižší v porovnání s betony s plnou dávkou portlandského cementu, často je tomu tak i po 28 dnech zrání [4]. Úkolem této práce je vyzkoušet, v jakém množství je možno popílek jako částečnou náhradu cementu použít. Hledání optimálního množství popílku poté můžeme nazývat jako tzv. optimalizaci dávkování popílku pro výrobu betonu.

Vysokoteplotní popílek je příměsí typu II, tzn. aktivní pucolánová složka. Z hlediska pucolanity vysokoteplotního popílku je důležitá zejména reaktivní amorfni forma SiO_2 [5]. Po chemické stránce se pucolanita projevuje za jistých podmínek tvorbou C-S-H gelů, které jsou prakticky shodné s hydratačními produkty vznikajícími při hydrataci portlandského cementu. Podstatou tvorby těchto gelů je reakce amorfniho SiO_2 z vysokoteplotního popílku ve vodném prostředí s hydroxidem vápenatým ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), který vzniká zejména jako vedlejší produkt hydratace alitu (C_3S) a belitu (C_2S). Pro úplné využití použitého vysokoteplotního popílku jako pucolánové příměsi je tedy třeba dostatečné množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Zbylý popílek nezúčastněný pucolánové reakce v betonu zastává funkci mikroplniva a lze jej tedy charakterizovat jako příměs typu I [6].

Běžná praxe dávkování popílku jako částečné náhrady cementu se však řídí převážně již provedenými zkouškami a zkušenostmi s daným typem popílku a pohybuje se v rozmezí zhruba 10 až 25 % z hmotnosti cementu. Množství, kterým lze nahradit jistou část dávky cementu, je poté dále zohledněno dle konceptu *k*-hodnoty, jež je zavedená v již zmíněné betonářské normě ČSN EN 206 [2]. A právě v tomto ohledu se naskýtá prostor pro optimalizaci dávkování popílku.

OPTIMALIZACE DÁVKOVÁNÍ VYSOKOTEPLTNÍHO POPÍLKU

Jako optimalizace dávkování byla touto prací navržena metodika pracující s granulometrií popílku jako příměsi a cementu. Vízí je dosažení maximální hutnosti suché směsi cementu s popílkem, popřípadě dalšími látkami. Maximální hutnost jemných složek v betonové směsi vede k zlepšení vlastnosti betonu zejména v zatvrdlém stavu ve dvou liniích.

První pozitivní ovlivnění lze spatřit v dosažení minimální mezerovitosti cementové pasty, což velice pozitivně působí na pevnostní i trvanlivostní charakteristiky betonu. V tomto ohledu lze tedy na aplikovaný popílek nahlížet taktéž jako na mikroplnivo.

V druhé linii je vliv spatřován ve vzniklé velmi jemné a husté síti C-S-H gelů, která dále vyplňuje strukturu cementové pasty, a tím je dále snižována její pórovitost i pórovitost tranzitních zón mezi zrny kameniva a cementovým kamenem. Nezhdyratovaná část popílku nadále působí jako mikroplnivo.

Je však nutné zmínit taktéž pozitivní vliv vysokoteplotního popílku na reologii čerstvého betonu. Optimalizovaná dávka popílku přinese zlepšení mechanicko-fyzikálních parametrů zatvrdlého betonu, k čemuž přispěje taktéž menší dávka záměsové vody, právě díky zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu popílkem.

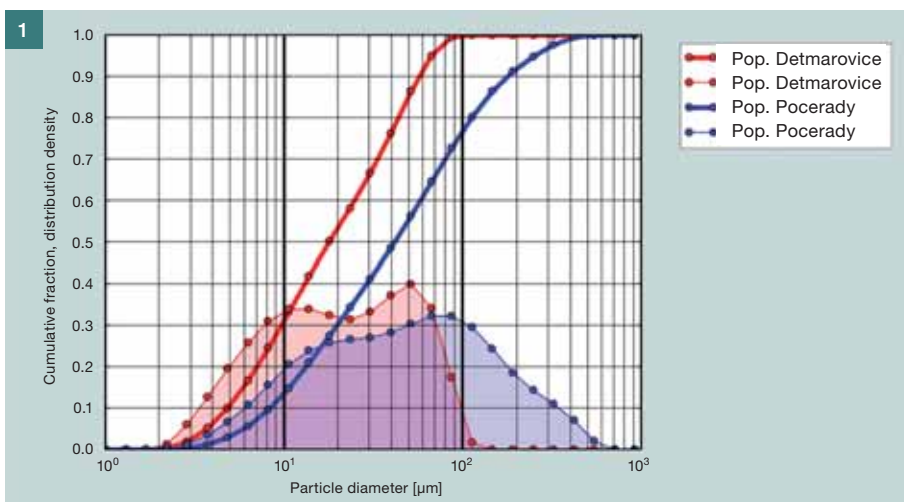
Samotná aplikace a optimalizované dávkování popílku se může řídit vzájemnou diferencí granulometrie použitého popílku a cementu tak, aby byl nalezen optimální vzájemný poměr vedoucí k maximální hutnosti těchto složek v suchém stavu společně. Běžně je poté dávkováno až okolo 40 % popílku sloužícího jako náhrada cementu, aniž by bylo dosaženo horších pevnostních a trvanlivostních charakteristik po delším časovém intervalu zrání oproti běžným betonům. Prokázaný pozitivní vliv této metodiky sebou přináší i silný ekologický a ekonomický aspekt.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Metodika práce

Pro ověření výše posaných závěrů optimalizace bylo připraveno několik betonových směsí dvou pevnostních tříd

Obr. 1 Křivky zrnitosti a rozložení zrn popílků Dětmarovice a Počerady
 Fig. 1 Granulometric curves and distribution of fly ash grains of Detmarovice and Pocerady samples



Obr. 2 Křivky mezerovitosti směsí popílků Dětmarovice a Počerady a CEM I 42,5 R, výstup použitého sw
 Fig. 2 Curves of void content of mixtures of Detmarovice and Pocerady fly ash with CEM I 42.5 R, output of used sw

na pomezí vysokopevnostních betonů, pevnostní třídy C40/50 a C50/60. Pro porovnání byl pro každou pevnostní třídu betonu vyroben referenční vzorek s použitím plné dávky cementu (z produkce společnosti Cemex Czech Republic) třídy CEM I 42,5 R. Optimalizace dávkování byla provedena pro černouhelný popílek z černouhelné tepelné elektrárny Dětmarovice a pro hnědouhelný popílek z produkce elektrárny Počerady.

U každé pevnostní třídy byly taktéž připraveny vzorky dle běžné metodiky návrhu složení betonu s užitím popílku. U pevnostní třídy C40/50 bylo dávkováno v obou případech 20 % popílku z hmotnosti cementu a u třídy C50/60 bylo dávkováno 17 % popílku z hmotnosti cementu. Před samotnou optimalizací byla stanovená pomocí pyknometrické metody měrná hmotnost cementu a obou popílků, přičemž zjištěná měrná hmotnost sloužila pro přepočet objemových procent dávky popílku na procenta hmotnostní. Samotný granulometrický rozbor cementu a obou použitých popílků byl proveden pomocí laserové metody. Pro ná-

zornost jsou přiloženy křivky zrnitosti obou druhů popílků (obr. 1).

Na základě analýzy popílků a cementu bylo stanoveno optimální množství popílku pro směs s cementem. Optimalizace byla řízena pomocí softwaru vycházejícího z práce T. Reschkeho: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefugeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Optimální dávka černouhelného popílku Dětmarovice s daným cementem byla stanovena na 36 % z objemu pojivových složek a hnědouhelného popílku na 43 % z objemu pojivových složek (obr. 2).

Jako plastifikační přísady bylo použito superplastifikátoru na bázi akrylových polymerů, přičemž bylo pro všechny vyrobené směsi použito stejného procentuálního dávkování, které bylo vztaheno k celkovému obsahu pojivových složek, tedy cementu a popílku. Pro ověření plastifikačního účinku popílku byla stanovena konzistence S3 všech připravených směsí okolo 150 mm sedimentní kužele, dle ČSN EN 12350-2. Aby bylo dosaženo předepsaného stupně konzistence u všech směsí, byla měněna dávka záměsové vody. Konzisten-

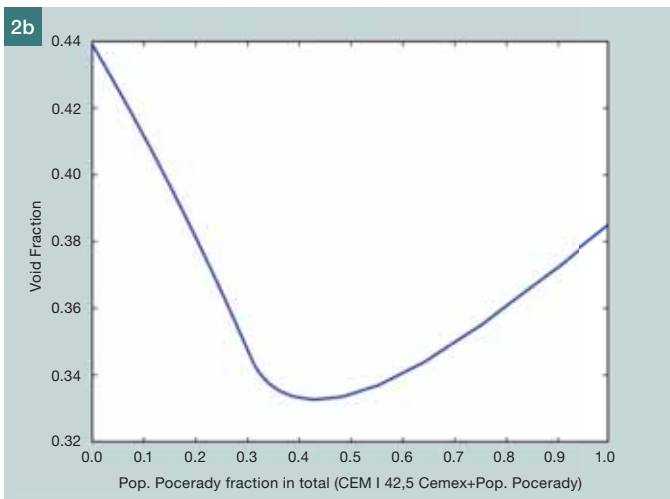
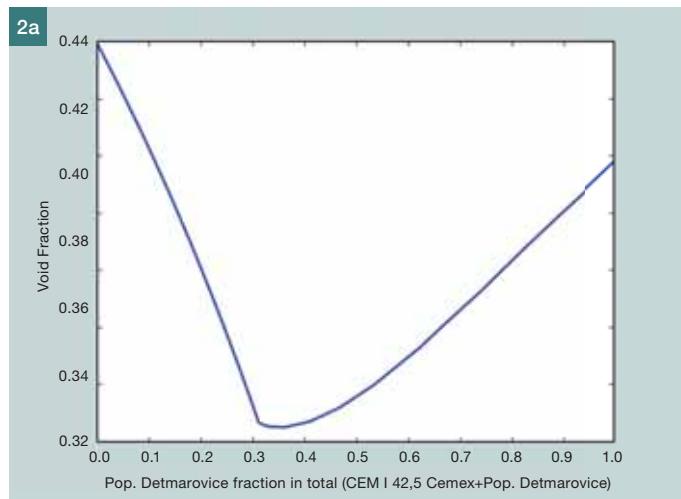
ce čerstvé betonové směsi se zkušela v čase do 90 min od zamíchání, v rozestupech po 30 min pomocí alternativní metody, zkoušky rozlitem, dle ČSN EN 12350-5.

Ověření pozitivního dopadu optimalizace bylo sledováno na pevnostních charakteristikách zatvrdlého betonu, konkrétně byla ověřována krychelná pevnost v tlaku a statický modul pružnosti betonu. Pevnostní charakteristiky zatvrdlého betonu byly sledovány po 7, 28, 60, 90 a 360 dnech normového zrání. Pro značení vyrobených vzorků je dále v práci použito počátečních písmen druhů popílků ve spojení s císelným označením hmotnostního podílu popílku z hmotnosti cementu, popřípadě zkratky OPT značící optimalizovanou dávku.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Čerstvý beton

Prakticky u všech provedených zkušek jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu lze spatřit pozitivní vliv optimalizace dávkování popílku. Dle předpokladu byl patrný plastifikační účinek obou druhů



Obr. 3 Vývoj konzistence v čase,

a) beton C40/50, B) beton C50/60

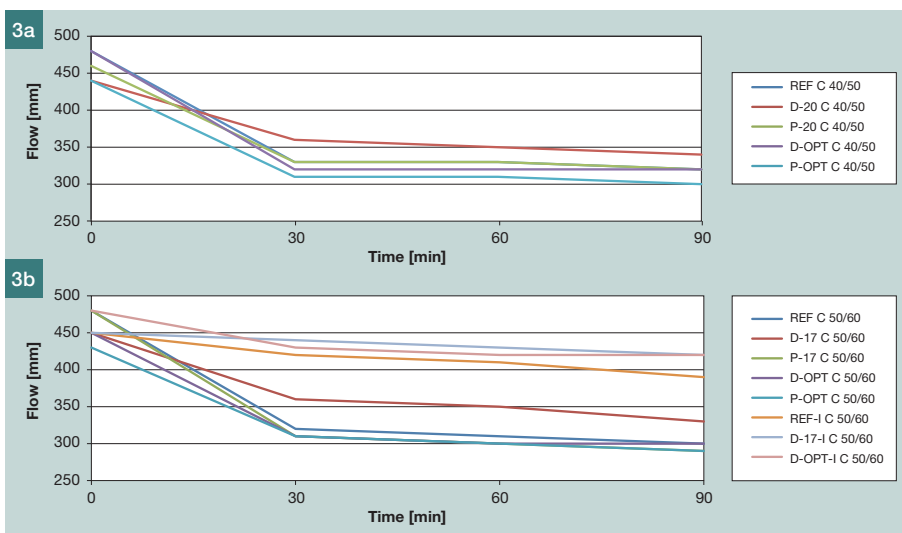
Fig. 3 Dependence of consistency on the time elapsed from mixing, a) C40/50 concrete, b) C50/60 concrete

Obr. 4 Vyjádření pevnosti jednotlivých záměsí v tlaku vzhledem k referenční směsi pro každou pevnostní třídu, a) C40/50, b) C50/60

Fig. 4 Compressive strengths of individual mixtures related to reference mixture for each strength class, a) C40/50, b) C50/60

Obr. 5 Vyjádření statického modulu pružnosti jednotlivých záměsí v tlaku vzhledem k referenční směsi pro každou pevnostní třídu

Fig. 5 Static elasticity modulus of compression of individual mixtures related to reference mixture for each strength class



popílků, což se projevilo na snížení potřebné dávky záměsové vody pro dosažení požadované stejné konzistence. Vývoj konzistence čerstvého betonu v čase je patrný z přiložených grafů (obr. 3).

Je třeba podotknout, že díky plastifikačnímu účinku popílků bylo možno snížit množství záměsové vody u směsí s optimalizovanou dávkou popílků o cca 15 l na 1 m³ betonu oproti směsi s obvyklou dávkou popílků.

Jak je patrné z obou grafů (obr. 3) zobrazujících závislost konzistence na době od zamíchání směsi, u obou

pevnostních tříd došlo s použitím původně navržené plastifikační přísady již po 30 min k ztrátě požadované konzistence. Proto byla u pevnostní třídy C50/60 vyzkoušena jiná plastifikační přísada. Tato přísada byla na bázi směsi lignosulfonanu a multikarboxylátu. V grafu na obr. 3b jsou receptury s touto přísadou v označení doplněny písmenem I. Působení této přísady eliminovalo nechtěnou ztrátu konzistence v čase. Je zřejmé, že ztráta konzistence v čase je velmi závislá na kompatibilitě použitého druhu plastifikační přísady, cementu a popílků, kdy se

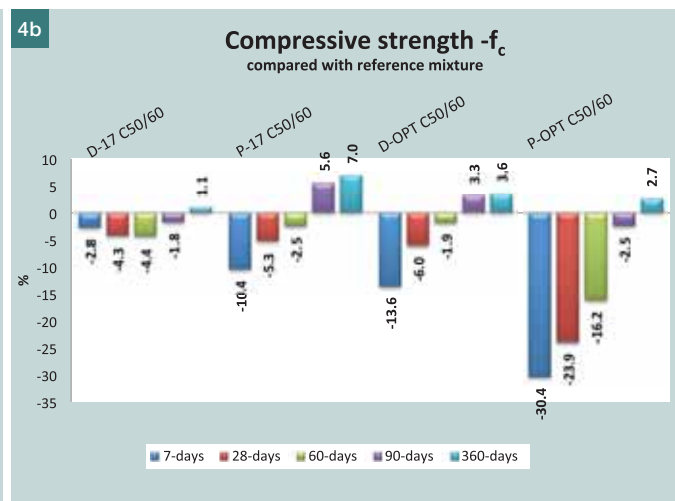
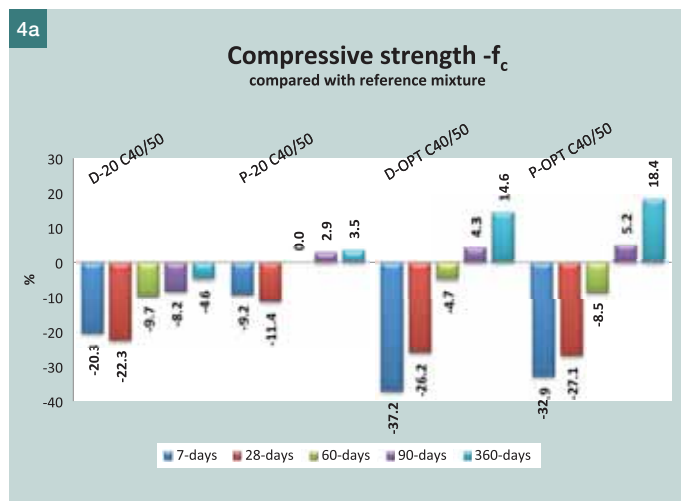
projevuje zřejmý vliv celkového obsahu alkálií.

Zatvrdlý beton

Pro posouzení optimalizace dávek popílků jsou nejzásadnější fyzikálně-mechanické parametry zatvrdlého betonu, a to v delším časovém úseku zrání. Z provedených zkoušek pevnosti betonu v tlaku lze však konstatovat, že betony, pro jejichž výrobu bylo užito optimalizované dávky vysokoteplotního popílků, s rostoucí dobou zrání nejenže dosahují stejných pevností jako beton referenční, či betony s klasickou dáv-

Tab. 1 Nárůst či pokles [%] sledovaného parametru v porovnání s referenční směsí | Tab. 1 Increase or decrease of characteristics compared with reference mixture [%]

Stáří [d]	7	28	60	90	360
Označení směsi	Rozdíl pevnosti betonu v tlaku [%]				
D-20 C40/50	-20,3	-22,3	-9,7	-8,2	-4,6
P-20 C40/50	-9,2	-11,4	0	2,9	3,5
D-OPT C40/50	-37,2	-26,2	-4,7	4,3	14,6
P-OPT C40/50	-32,9	-27,1	-8,5	5,2	18,4
Označení směsi	Rozdíl modulu pružnosti betonu v tlaku [%]				
D-17 C50/60	-2,8	-4,3	-4,4	-1,8	1,1
P-17 C50/60	-10,4	-5,3	-2,5	5,6	7
D-OPT C50/60	-13,6	-6	-1,9	3,3	3,6
P-OPT C50/60	-30,4	-23,9	-16,2	-2,5	2,7



Literatura:

- [1] *Žažký M.*: Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky, Brno, 2014, 91 s., 5 s. příl., Bakalářská práce, Fakulta stavební VUT v Brně, Ústav technologie stavebních hmot a dílců
- [2] ČSN EN 206 Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Praha, ÚNMZ, 2014
- [3] *Šmilauer V., Zobal O., Bittnar Z., Hela R., Snop R., Donát R.*: Využití úletových popílků pro betonáž masivních konstrukcí, Beton TKS 2/2014: Technologie – Beton v extrémních podmínkách, roč. 14, s. 60–65
- [4] *Pytlík P.*: Technologie betonu, Brno, VUT v Brně, CERM, 1994, ISBN 8085867079
- [5] *Thomas M. D. A., Shehata M. H., Shashiprakash S. G., Hopkins D. S., Cail K.*: Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, Cement and Concrete Research, 1999, Vol. 29, pp. 1207–1214, ISSN 0008-884
- [6] *Hela R. a kol.*: Příručka Popílek v betonu: Základy výroby a použití, 2. přeprac. vyd., Brno, Praha: ČEZ Energetické produkty, s. r. o., 2013, s. 28, ISBN 978-80-260-4226-6
- [7] *Hela R., Bodnárová L., Maršalová J.*: Fly Ashes Thermal Modification and their Utilization in Concrete, In Fibre Concrete and High Performance Concrete 2003, System-based Vision for Strategic and Creative Design, Roma, 2003, Vols 1-3, p. 1649–1652, ISBN 90-5809-599-1
- [8] *Bodnárová L., Jarolím T., Válek J., Brožovský J., Hela R.*: Selected Properties of Cementitious Composites with Portland Cements and Blended Portland Cements in Extreme Conditions, Sustainable development of urban and rural areas, Applied Mechanics and Materials, Vol. 507, pp. 443–448, 2014, 3rd Intern. Conf. on CE
- [9] *Frýzová R.*: Fázové složení elektrárenských popílků: Kvantitativní stanovení vybraných minerálů, Brno, 2012, Rešerše k tématu diplomové práce, Přírodovědecká fakulta MU, Ústav geologických věd
- [10] ASTM C 618 – 12a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, USA: ASTM International is a member of CrossRef

kou popílku, ale v některých případech tyto pevnosti překonávají.

Při pohledu na přiložené grafy a tabulku pevnosti v tlaku je patrný počáteční pokles pevnosti takto navržených betonů. Je však třeba vyhodnotit fakt, že tyto betony i přes výrazně převyšující dávku popílku oproti klasickému návrhu dosahují již po 28 d prakticky stejných hodnot pevnosti (obr. 4, tab. 1). Bylo prokázáno, že optimální dávka popílku, je-li dodrženo pravidlo maximální hutnosti suché směsi cementu a popílku, nezaznamenala ani po 28 d zrání téměř žádný pevnostní propad v porovnání s běžnou dávkou popílku. Z výsledků lze taktéž vypočítat, že pro obě pevnostní třídy vykazuje lepší hodnoty optimalizovaná dávka popílku černouhelného, což je dáno jeho vhodnějším chemickým složením, větší jemností znamenající vyšší měrný povrch a reaktivnost ve srovnání s dávkou optimalizovaného množství popílku hnědouhelného.

Obdobný trend vývinu pevnostních charakteristik jako u pevnosti v tlaku je možno pozorovat také u výsledků sta-

tických modulů pružnosti, kde však ani jedním vzorkem betonu s popílkem nebyly překonány hodnoty betonů referenčních. Pozoruhodný je taktéž nárůst modulů pružnosti u optimalizovaných směsí mezi 7. a 28. dnem zrání. Přiložené grafy opět zobrazují procentuální pokles nebo nárůst sledovaného parametru v porovnání s referenční směsí (obr. 5).

ZÁVĚR

Dosažené výsledky potvrzují možnost optimalizovat dávky popílků ve vztahu ke konkrétnímu typu použitého cementu s cílem minimalizovat mezerovitost těchto směsí jak v suchém stavu, tak následně snížit pórovitost v zatvrdlém cementovém kameni. Současně lze výrazně zvýšit dávky popílků, při pozitivním vlivu na zpracovatelnost čerstvého betonu bez negativních dopadů na pevnosti betonu v tlaku i v relativně krátkém čase zrání – 28 d. Jak lze pozorovat nejsou ani relativně vysoké dávky popílku, okolo 40 % z objemu cementu, překážkou pro výrobu vysokopevnostních betonů.

Otázkou pro další studium je prozkoumat podrobněji trvanlivosti těchto betonů v různých stupních agresivních prostředí a pokusit se ještě více zefektivnit jejich využití, například optimalizací s dalším typem příměsí. Efektivnější využitelnost popílku sebou přináší vysoký ekonomický a environmentální potenciál.

Uvedené výsledky byly získány za podpory a řešení projektu MPO ČR FR – TI 4/582.

Bc. Martin Žažký

e-mail: tazkym@study.fce.vutbr.cz



prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz



oba: ÚTHD

Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 95, 602 00 Brno

Ing. Tomáš Žažký

Cemex Czech Republic, s. r. o.

Siemensova 2716/2, 155 00 Praha 5

e-mail: tomas.tazky@cemex.com

