

# BETONY NA BÁZI ALUMOSILIKÁTOVÝCH POLYMERŮ

## CONCRETE ON THE ALUMOSILICATE POLYMERS BASIS

Rostislav Šulc, Tomáš Strnad, František Škvára,  
Pavel Svoboda, Lubomír Kopecký, Vít Šmilauer,  
Lenka Myšková, Zdeněk Bittnar

Betony na bázi alumosilikátových polymerů (POP betony) lze připravit alkalickou aktivací elektrárenského hnědouhelného popílku. Příprava je možná krátkodobým ohřevem čerstvé POP betonové směsi (cca 80 °C) nebo ponecháním betonové směsi volnému tuhnutí při teplotě 20 °C. POP betony připravené krátkodobým ohřevem dosahují po přípravě pevností, které jsou srovnatelné s pevnostmi betonů na bázi PC. POP betony vykazují podstatně vyšší odolnost vůči působení agresivního prostředí než betony z PC. ■ **Concretes on the basis of the alumosilicate polymer (POP concrete) can be prepared by alkali activation of waste brown coal fly ash. The preparation is possible by using a short-term heating of the concrete mix (to 80 °C) or by allowing the mix to harden spontaneously at 20 °C. The POP concretes prepared by short-time heating attain high strength values after their preparation; the values are comparable to those characterizing POP concretes obtained on the basis of PC. The POP concretes exhibit much better resistance to the corrosive action of the environment as compared with those prepared on the basis of PC.**



### In memoriam

Článek je věnován památce pana Josefa Doležala, předního českého betonářského odborníka, který se velmi zasloužil o výzkum a vývoj betonů na bázi alumosilikátových polymerů.

Při působení silně alkalického prostředí (hydroxidy, křemičitany) na alumosilikátové látky typu cementářského slínku, strusky, popílků či tepelně-aktivovaných kaolinitických látek vznikají nové materiály alumosilikátové polymery (geopolymery), jejichž základem je dvoj až trojrozměrná struktura Si-O-Al. Těmto novým materiálům je věnována značná pozornost, např. na sympoziích [1 až 7]. Naše předcházející práce [8] v oblasti alumosilikátových polymerů na bázi českého hnědouhelného popílku se soustředily na mikrostrukturu a vlastnosti kaší a malt. V literatuře nacházíme zatím jen málo údajů o vlastnostech betonů na bázi alumosilikátových polymerů [9, 10, 11]. Vlastnostem betonů na bázi alumosilikátových polymerů [12 a13] je věnována tato studie.

### EXPERIMENTY

V práci byly použity odpadní hnědouhelné elektrárenské popílky (Česká republika) s měrným povrchem 210 až 300 m<sup>2</sup>/kg (Blaine), jejichž chemické složení je uvedeno v tab. 1. Roz-

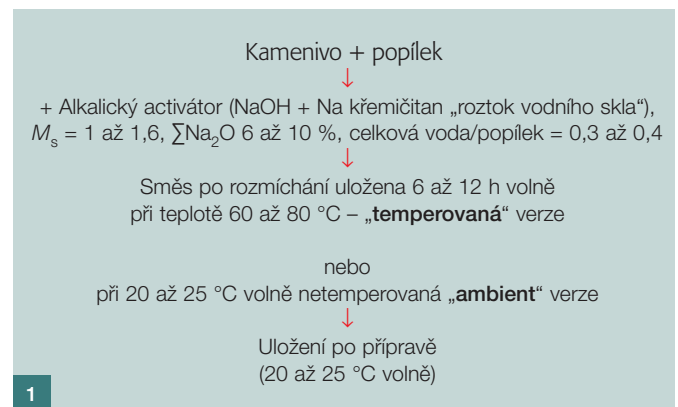
díly v chemickém složení jednotlivých popílků byly ±5 % rel. Struktura a složení českých popílků byla diskutována v dřívější práci [8].

Beton s alumosilikátovým polymerním pojivem na popílkové surovinové bázi (dále jen POP beton<sup>1</sup>) byl připravován míšením popílku a dalších přísad s roztokem alkalického aktivátoru a kameniva frakce 0–4 mm Dobříň, frakce 4–8 mm Zbraslav, frakce 8–16 mm Zbraslav (obr. 1).

Poměr SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O (modul M<sub>S</sub>) v alkalickém aktivátoru byl upravován přidávkem NaOH k vodnímu sklu na hodnoty v rozmezí M<sub>S</sub> = 1 až 1,6. Celková koncentrace alkalického aktivátoru byla v rozmezí 6 až 10 % Na<sub>2</sub>O hmotnosti popílku. Pro urychlení procesu polymerace byly při přípravě POP betonů v některých případech použity další chemické přísady. V experimentech byly připravovány POP betony s vodním součinitelem (hmotnostní poměr voda/popílek) 0,3 až 0,4.

Po zamíchání (cca. 2 až 5 min) byla připravena směs plněná do forem 100 × 100 × 100 mm a 100 × 100 × 500 mm a zpracována vibrací po dobu 2 až 4 min. POP betony byly připravovány s různým obsahem popílku v rozmezí 200 až 700 kg/m<sup>3</sup> betonu.

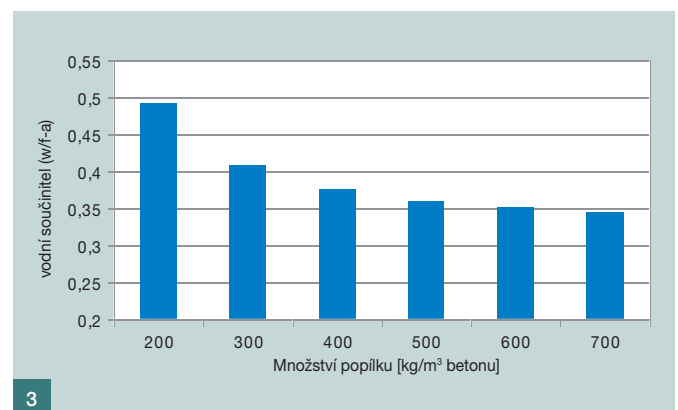
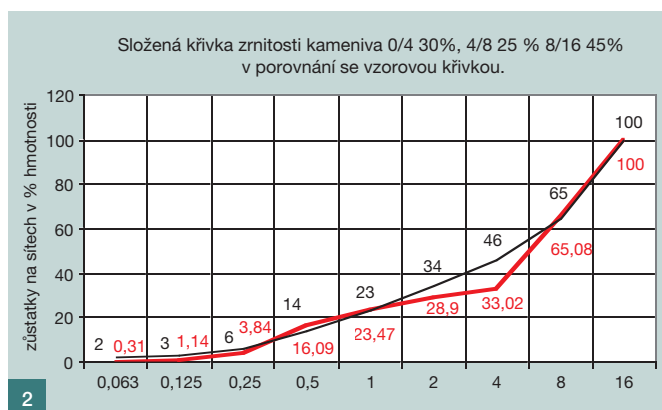
<sup>1</sup> POP beton je registrovaná ochranná známka č. 346592



Obr. 1 Postup přípravy POP betonu ■ Fig. 1 Procedure used for the preparation of POP concrete

Obr. 2 Křivka zrnitosti kameniva pro POP beton ■ Fig. 2 Spline aggregate gradation for POP concrete

Obr. 3 Vodní součinitel POP betonů v závislosti na obsahu popílku ve směsi při sednutí kužele cca 150 mm ■ Fig. 3 Water to fly ash vs. fly ash content in POP concrete mixture at same workability (150 mm slump test)





Tab. 1 Chemické složení použitých odpadních hnědouhelných elektrárenských popílků (Česká republika) ■  
Tab.1 Chemical composition of used waste brown coal fly ash (Czech Republic)

Složka	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
obsah v popílků [hm. %]	53,79	32,97	5,51	1,84	0,92	0,46	1,76	0,37	2,1	0,15

Vodní součinitel (hmotnostní poměr vody k popílků) byl zvolen tak, aby zpracovatelnost směsi byla přibližně stejná (sednutí kužele cca 150 mm).

Tělesa po přípravě POP betonu tvrdla (proces polymerace) za různých podmínek. Ve verzi „**temperovaný**“ byla tělesa podrobena tepelnému procesu za „suchých podmínek“, kdy byla umístěna v sušárně při teplotě 60 až 90 °C (v otevřené atmosféře) po dobu 6 až 12 h. Při postupu ve verzi „**ambient**“ byla ponechána „volnému“ tvrdnutí při teplotě 20 až 25 °C.

Tělesa připravená v obou verzích byla uložena po přípravě na vzduchu v prostředí 40 až 50% R.H. do doby stanovení pevností. Pevnosti v tlaku byly stanoveny po 2, 7 a 28 dnech resp. po 90, 360 dnech. Některé vzorky byly po přípravě uloženy v roztocích Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (44 g/dm<sup>3</sup>), MgSO<sub>4</sub> (5 g/dm<sup>3</sup>) a NaCl (164 g/dm<sup>3</sup>) a byl sledován časový průběh pevností a změny hmotnosti.

Při dalším postupu byla zkušební tělesa ihned po zpracování do forem uložena při teplotě -20 °C. Po 7 dnech byla tato tělesa odformována a opět uložena při teplotě -20 °C.

Na lomových plochách úlomků po destrukčních zkouškách pevností byla studována mikrostruktura rastrovacím elektronovým mikroskopem, kde na vybraných místech byla prováděna analýza ED spektrometrem.

### Reologické vlastnosti

Reologické vlastnosti čerstvého POP betonu nejsou stejné jako reologické vlastnosti betonů z portlandského cemen-

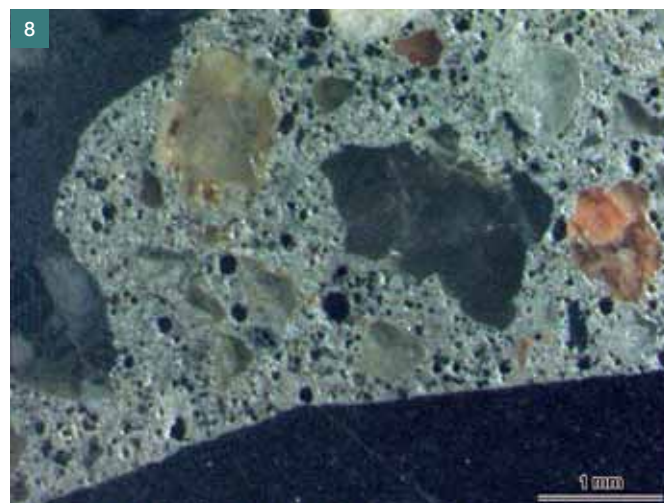
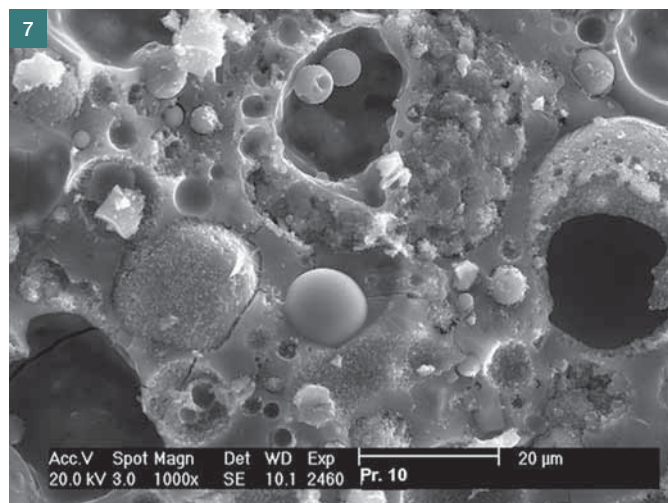
tu. POP beton má charakter lepivé směsi, která se při vibraci částečně ztekutí. Z toho vyplývá prodloužená doba při vibračním i jiném zpracování betonů a velmi citlivě navrhované skládání plniva, tedy pevných složek směsi – kameniva (obr. 2).

I přes vysokou lepivost čerstvého POP betonu dochází při vyšším vodním součiniteli ke gravitační segregaci hrubých a těžších zrn kameniva (obr. 4). K tomuto stavu dochází nejen při intenzivním dynamickém zpracování vibrací, ale i pouhým volným uložením čerstvého POP betonu (obr. 5 a 6). Pro dosažení optimálních výsledků postačuje obsah 300 kg popílků na 1 m<sup>3</sup> POP betonu. Při vysoké dávce popílků lze připravit POP beton s nízkým obsahem vody beze ztráty akceptovatelné zpracovatelnosti.

U POP betonů (obr. 7) byla zjištěna relativně vysoká pórovitost (až 50 %) bez ohledu na charakter podmínek přípravy. Jsou zde přítomny uzavřené kulové póry, které byly vytvořeny rozpuštěním původních částic popílků resp. zavlečením vzduchu při přípravě. Ve hmotě POP betonu jsou přítomny zbytky původních částic popílků, na nichž je patrný vliv postupného rozpouštění.

### Mechanické vlastnosti

Pevnosti POP betonů (i kaší, malt) mají po přípravě vzestupný charakter v rozmezí 2 až 360 dnů (obr. 9). Hodnoty pevností v tlaku POP betonů se pohybují podle podmínek přípravy a složení v rozmezí 15 až 70 MPa po 28 dnech.



Obr. 4 Charakter čerstvého POP betonu | Fig. 4 Character of the fresh POP concrete

Obr. 5 Správně navržená POP betonová směs, stejnoměrné rozložení kameniva | Fig. 5 Correctly composed mix, uniform distribution of the aggregate

Obr. 6 Špatně navržená POP betonová směs, segregace kameniva a odmišení malty na povrchu | Fig. 6 Incorrect mix, aggregate segregation and the mortar displaced towards the surface

Obr. 7 Pórovitý charakter POP betonu, prostor mezi kamenivem (lomová plocha, SEM) | Fig. 7 Porous character of POP concrete, interface polymer-aggregate (SEM)

Obr. 8 Pórovitý charakter POP betonu (nábrus, optický mikroskop) | Fig. 8 Porous character of POP concrete (polished section, optical microscope)

Obr. 9 Časový vývoj pevností POP betonů ve verzi „temperovaný“ a ve verzi „ambient“, dávka popílku 400 kg/m<sup>3</sup> | Fig. 9 Compressive strength of “tempered” and “ambient” POP concrete vs. time (fly ash content in the mixture 400 kg/m<sup>3</sup>)

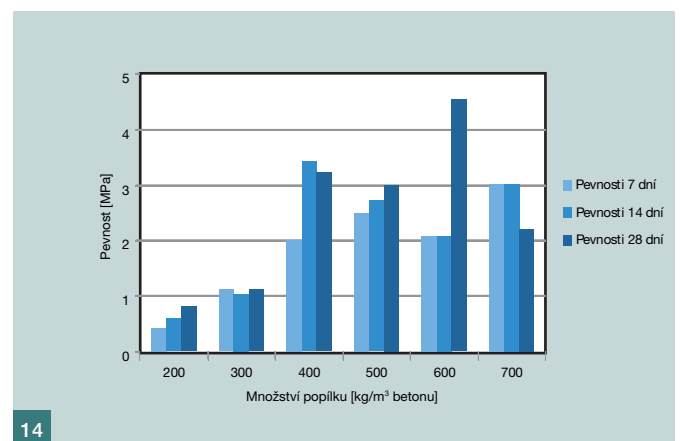
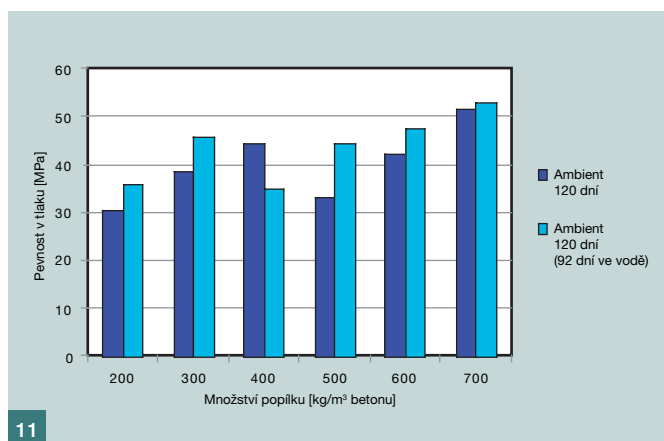
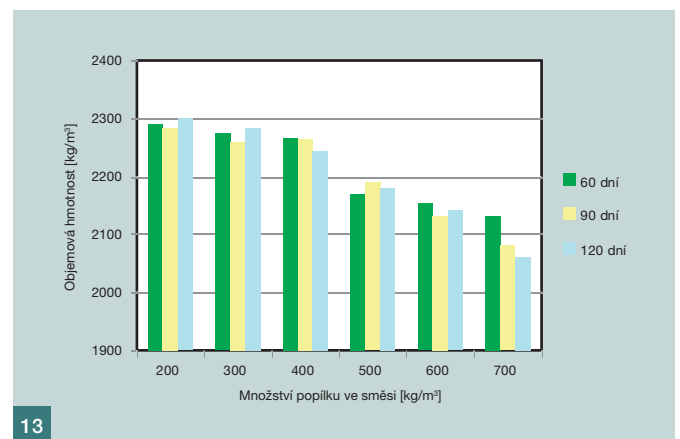
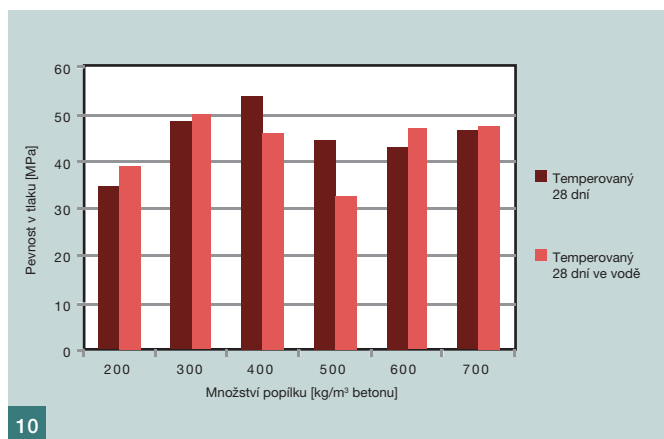
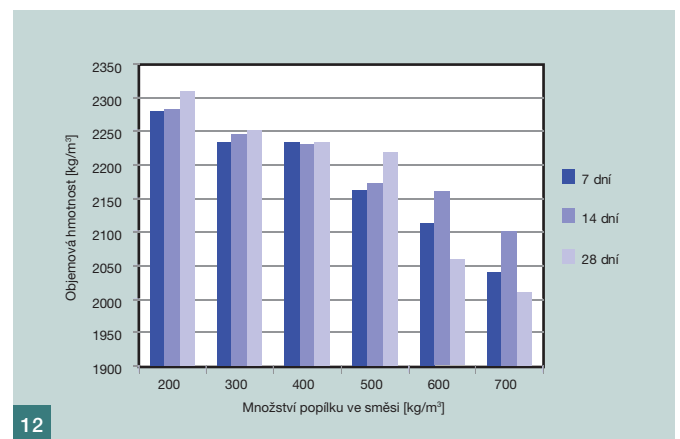
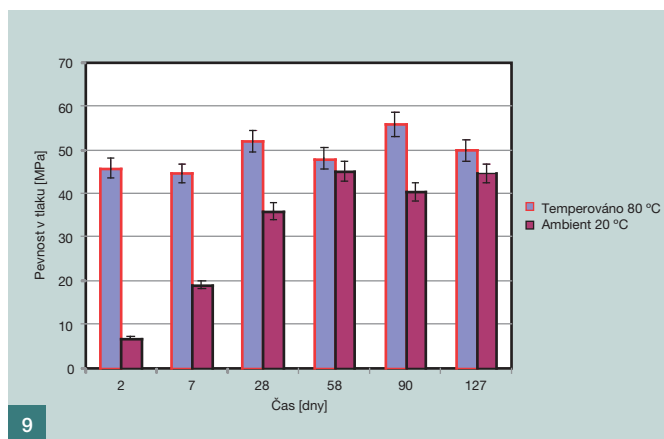
Obr. 10 Závislost pevností POP betonů (verze „temperovaný“) na obsahu popílku | Fig. 10 Compressive strength of “tempered” POP concrete

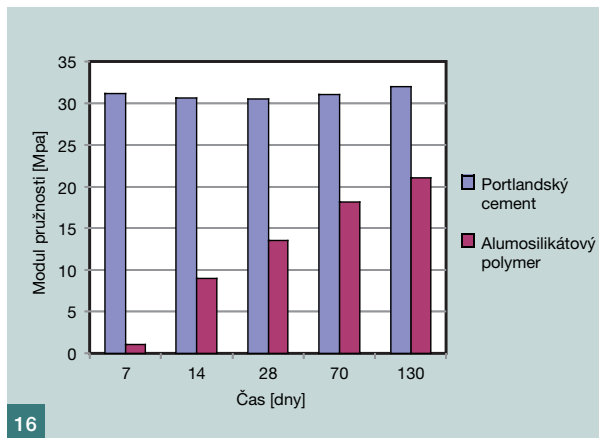
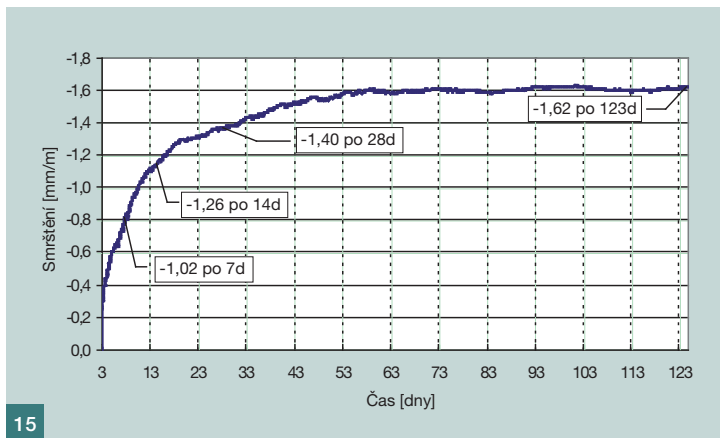
Obr. 11 Závislost pevností POP betonů (verze „ambient“) na obsahu popílku při uložení na suchu, a při uložení ve vodě | Fig. 11 Compressive strength of “ambient” POP concrete

Obr. 12 Objemová hmotnost POP betonů („temperovaný“) v závislosti na obsahu popílku | Fig. 12 Density of POP concrete (“tempered”)

Obr. 13 Objemová hmotnost POP betonů („ambient“) v závislosti na obsahu popílku | Fig. 13 Density of POP concrete (“ambient”)

Obr. 14 Pevnost POP betonu při uložení v -20 °C v závislosti na obsahu popílku | Fig. 14 Compressive strength of POP concrete, at -20 °C





Na obr. 10 a 11 je vidět rozdíl v rychlosti vývoje pevností u verzí „temperovaný“ a „ambient“. POP betony připravované ve verzi „temperovaný“ dosahují po přípravě vysokých pevností srovnatelných s pevnostmi betonů z portlandského cementu. Vývoj pevností ve verzi „ambient“ je výrazně pozvolnější, avšak po cca 60 dnech dosahují pevností prakticky stejných jako u verze „temperovaný“. Pozvolný vývoj pevností u verze „ambient“ je dán malou reaktivností českého hnědouhelného popílku. U obou verzí byl nalezen další velmi pozvolný vzrůst pevností v souladu s údaji publikovanými o dlouhodobých pevnostech betonů [9, 10, 11]. Poměr pevnosti v tlaku a tahu za ohybu u POP betonů je přibližně 10 : 5,5 (u betonů z portlandského cementu je v rozmezí 10 : 1 až 10 : 1,5).

Objemová hmotnost POP betonů je nižší než u betonů z portlandského cementu.

POP beton na bázi alumosilikátových polymerů má na rozdíl od betonů z portlandského cementu schopnost tuhnutí a tvrdnutí za nízkých teplot (obr. 14), i když dosažené pevnosti jsou relativně nízké.

Smrštění vysycháním u POP betonů připravených krátkodobým ohřevem („temperovaný“) je malé a v souladu s hodnotami 0,01 až 0,02 % uvedenými v [6, 10].

U POP betonů volně tuhoucích („ambient“) je smrštění vyšší než u betonů z portlandského cementu (obr. 15). Hodnota smrštění u tohoto typu přípravy POP betonu je opět v souladu s údaji v [6, 10]. Smrštění u POP betonu typu „ambient“ z počátku narůstá a později se stabilizuje. Doba cca 50 dnů, kdy je dosažena stabilizovaná hodnota smrštění, odpovídá době, kdy jsou dosaženy pevnosti odpovídající typu „temperovaný“. V tomto časovém horizontu je zřejmě ukončen proces polymerace (tvrdnutí) u POP betonu typu „ambient“.

Běžný cementový beton vyrobený např. z cementu třídy 52,5 R vykazuje při stáří 7 až 130 dní od výroby přibližně

Obr. 15 Smrštění vysycháním POP betonů „ambient“ v závislosti na čase ■ Fig. 15 Shrinkage of POP concrete (“ambient”)

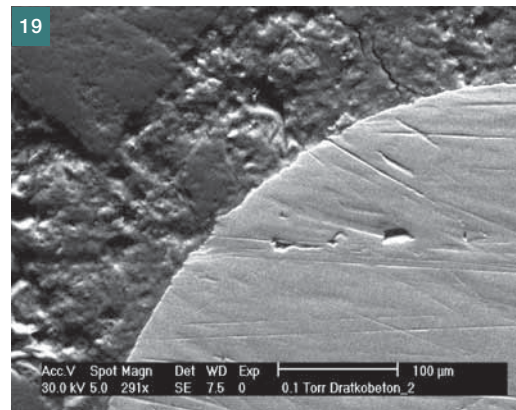
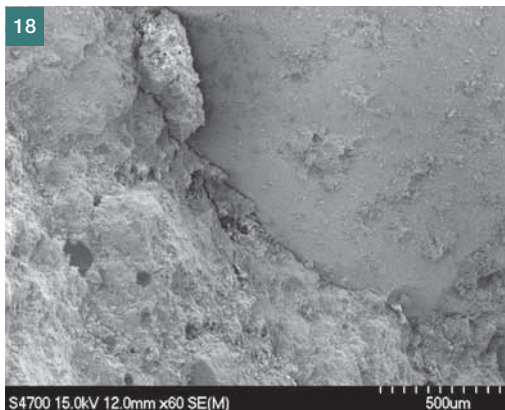
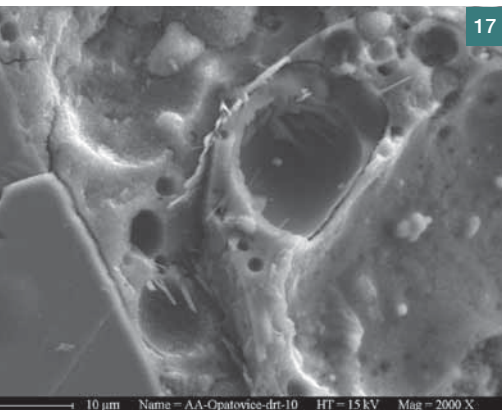
Obr. 16 Závislost modulu pružnosti POP betonu na čase ■ Fig. 16 Modulus of elasticity vs. time

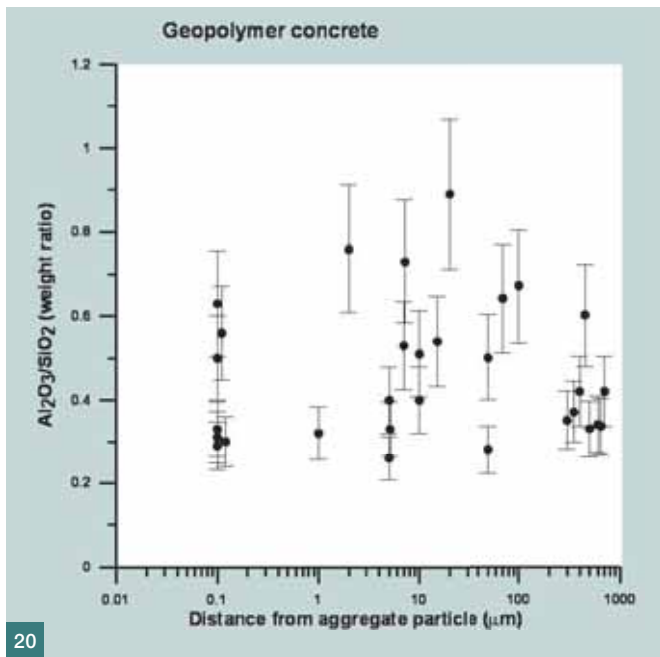
konstantní hodnoty modulu pružnosti. Naproti tomu POP beton je charakteristický pozvolným nárůstem pevnosti (obr. 16), a tedy i modulu pružnosti.

### Rozhraní POP beton – kamenivo (výztuž)

U betonu na bázi portlandského cementu existuje přechodová vrstva mezi zrnem kameniva a zatvrdlým cementem [14, 15]. Tato vrstva je 20 až 100 μm silná a má rozdílnou mikrostrukturu a složení od zatvrdlého cementu. Je bohatší v obsahu Ca(OH)<sub>2</sub> a ettringitu. Podél částic kameniva jsou často orientované částice Ca(OH)<sub>2</sub>. Pórovitost přechodové vrstvy je větší než pórovitost zatvrdlého cementu a byl nalezen gradient pórovitosti, který má směrem od částice kameniva klesající charakter.

Charakter rozhraní v POP betonu mezi pojivem (alumosilikátový polymer) a kamenivem je zcela odlišný. Nebyla nalezena přítomnost přechodové zóny a to jak morfologicky, tak i přímým měřením složení pojiva (alumosilikátového polymeru) v okolí kameniva a ocelové mikrovýztuže (obr. 17, 18 a 19). Na obr. 20 jsou zobrazeny poměry Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> v závislosti na vzdálenosti od částice kameniva. V rámci experimentálních chyb (heterogenní charakter POP betonů) lze říci, že nedochází k výrazným změnám složení pojiva (alumosilikátového polymeru) v těsné blízkosti kameniva, jako je tomu u portlandského cementu. Zcela analogický charakter má v POP betonu rozhraní ocelová mikrovýztuž – alumosilikátový polymer.





20

### Výkvěty

POP betony mají při uložení ve vlhkém prostředí tendenci ke tvorbě výkvětů. Příčiny vzniku výkvětů byly diskutovány v [8]. Výkvěty na povrchu betonů jsou tvořeny alkalickými uhličitany  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ , resp.  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (při užití draselných aktivátorů).

### Odolnost POP betonu vůči agresivnímu prostředí

Mrazuvzdornost POP betonů byla sledována 150 cykly zmrazování a rozmrazování v prostředí vody. Během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů v prostředí vody se hmotnost těles prakticky neměnila (změna hmotnosti byla po 150 cyklech +0,1 až +0,15 % hm.). Po 150 cyklech nejsou viditelné poruchy či deformace (obr. 23). Pevnosti po 150 zmrazovacích cyklech se snížily přibližně na 70 % pevností vzorků po 28 dnech bez zkoušek mrazuvzdornosti.

POP betony dlouhodobě uložené v prostředí roztoků síranů (Na, Mg) odolávají korozi bez známek poškození vzorků (obr. 24). I po 720 dnech nepřetržitého uložení v agresivních roztocích nejsou znatelné poruchy těles. Rozměry vzorků po celou dobu experimentu byly beze změny a bez známek jakékoli expanze známé při působení síranů na materiály připravené z portlandského cementu. Průnik síranových iontů do hmoty betonu (měřený na SEM kolmo směrem od plochy styku s roztokem síranů) má klesající trend a koncentrace síranů ve hmotě je velmi nízká (obr. 24). Pouze při korozi roztokem  $\text{MgSO}_4$  byl nalezen na povrchu bílý reakč-

Obr. 17 POP beton – rozhraní pojivo (alumosilikátový polymer) – kamenivo (vápenec), lomová plocha, SEM ■ Fig. 17 POP concrete, interface aluminosilicate polymer – aggregate (limestone), SEM

Obr. 18 POP beton – rozhraní pojivo (alumosilikátový polymer) – kamenivo (Zbraslav), lomová plocha, SEM ■ Fig. 18 POP concrete, interface aluminosilicate polymer – aggregate (Zbraslav), SEM

Obr. 19 POP beton – rozhraní ocelová mikrovýztuž – pojivo (alumosilikátový polymer, nábrus, SEM) ■ Fig. 19 POP concrete, interface aluminosilicate polymer – steel microreinforcement (polished surface, SEM)

Obr. 20 Závislost poměru  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  na vzdálenosti od zrna kameniva v POP betonu ■ Fig. 20 Dependence of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -to- $\text{SiO}_2$  ratio on the distance from the aggregate grain in a aluminosilicate polymer POP concrete

Obr. 21 Charakter výkvětu ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ) na povrchu POP betonu, sodný aktivátor ■ Fig. 21 Efflorescence on surface of POP concrete ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ )

Obr. 22 Charakter výkvětu ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) na povrchu betonu, draselný aktivátor ■ Fig. 22 Efflorescence on surface of POP concrete ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ )

Obr. 23 POP beton po 150 zmrazovacích cyklech ■ Fig. 23 POP concrete after 150 freeze-thaw cycles

ní produkt amorfního charakteru. Tento produkt je pravděpodobně hlinitokřemičitan hořečnatý. U POP betonů nejsou splněny podmínky (přítomnost C-A-H fází) pro vznik expanzivních produktů typu ettringitu, a proto odolávají vlivu síranových roztoků.

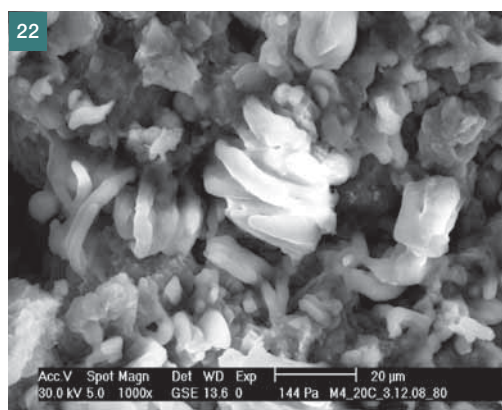
POP betony dlouhodobě uložené v prostředí roztoku NaCl odolávají korozi bez známek poškození vzorků. Při uložení v roztoku NaCl rostly pevnosti v tlaku po celou dobu měření (720 dnů) a dosahují hodnot až 70 MPa. Průnik chloridových iontů do hmoty POP betonu (měřený kolmo směrem od plochy styku s roztokem chloridů) má klesající trend a koncentrace chloridů ve hmotě je nízká (obr. 24). Při uložení v roztoku NaCl nebyly nalezeny na povrchu POP betonů prakticky žádné korozní produkty.

Alkalie přítomné ve hmotě POP betonu ( $\text{Na}^+$ ) mohou potenciálně reagovat s aktivním  $\text{SiO}_2$  v kamenivu za vzniku expanzivního křemičito-alkalického gelu. Pro vznik těchto expanzivních gelů v POP betonech nejsou splněny okolnosti, jež vedou k tomuto jevu u portlandského cementu s aktivním kamenivem. Je to především absence C-S-H gelu a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v POP betonu. Dosavadní výsledky [16, 17] ukazují, že k tvorbě expanzivních produktů při alkalicko-křemičité reakci materiálů typu POP betonu nedochází. Je třeba zdůraznit, že je však k dispozici málo experimentálních výsledků k vyvrácení či potvrzení alkalicko-křemičité reakce v POP betonu.

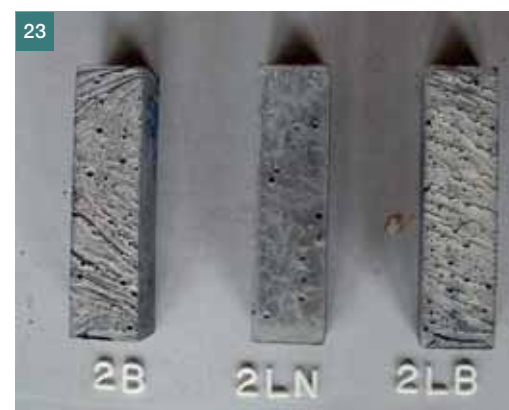
POP beton odolává působení vyšších teplot bez rozpa-



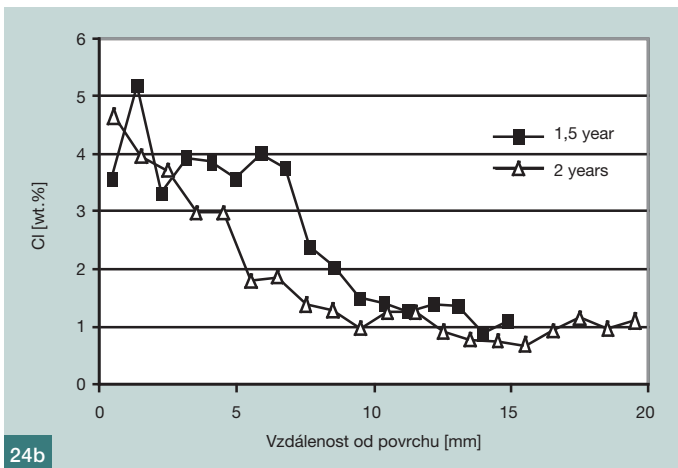
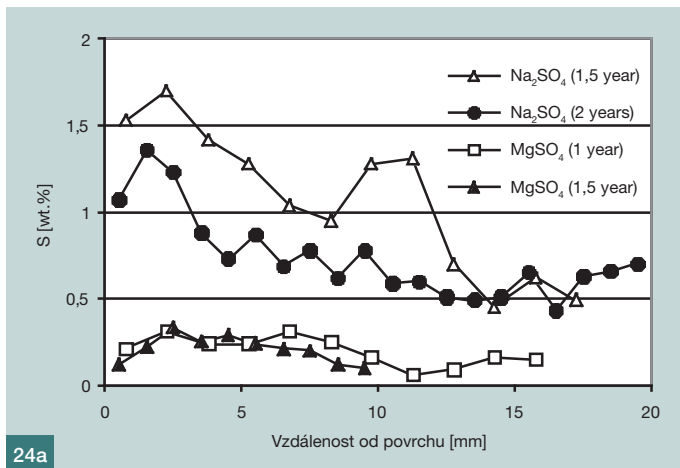
21



22



23



du (obr. 26) na rozdíl od betonu z portlandského cementu. Zbytkové pevnosti POP betonů po výpalu na teploty do 600 až 700 °C jsou podstatně vyšší než pevnosti betonů z portlandského cementu. Vlastnosti aluminosilikátových polymerních materiálů při vyšších teplotách byly diskutovány v [18]. POP betony (a další materiály na bázi aluminosilikátových polymerů) mohou fixovat toxické látky, zejména těžké kovy, např. Zn a Pb, jak bylo ukázáno v [8, 19]. Při úpravě technologie přípravy lze fixovat i toxický Cr<sup>6+</sup>.

### SROVNÁNÍ PC A POP BETONŮ

V POP betonech je pojivem anorganický aluminosilikátový polymer, který lze označit jako N-A-S-H fázi, na rozdíl od PC betonů, kde hlavní pojivovou fází je C-S-H. Ve hmotě POP betonu nejsou přítomny další fáze typické pro PC beton jako je Ca(OH)<sub>2</sub> – portlandit, C-A-H fáze, ettringit resp. hydrogranáty. Struktura N-A-S-H fáze není doposud plně popsána.

Reologické vlastnosti čerstvého POP betonu nejsou stejné jako reologické vlastnosti PC betonů. POP beton má spíše charakter lepidivé směsi.

Hodnoty pevností v tlaku POP betonů se pohybují podle podmínek přípravy a složení v rozmezí 15 až 70 MPa po 28 dnech a jsou srovnatelné s pevnostmi PC betonů. Při přípravě POP betonů typu „temperovaný“ lze dosáhnout 28denních pevností PC betonů ihned po krátkodobém ohřevu. Při přípravě POP betonů typu „ambient“ (na bázi českého hnědouhelného popílku) je tvrdnutí výrazně pomalejší než u PC betonů. Pevnosti POP betonů typu „temperovaný“ dávají možnost přípravy prefabrikovaných stavebních hmot.

Smrštění při vysychání POP betonů typu „temperovaný“ je velmi nízké, zatímco u POP betonu typu „ambient“ jsou hodnoty smrštění vyšší než u PC betonu.

POP betony mají výrazně vyšší odolnost vůči působení agresivního prostředí (zejména roztoků síranů) než PC beto-

Obr. 24 Průnik síranových (jako S) a chloridových iontů do hmoty POP betonu ■ Fig. 24 Penetration of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (measured as S) and Cl- in POP concrete (1.5 years in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> solution), point analysis

Obr. 25 POP beton po 600 dnech uložení v roztocích solí; a) roztok Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, b) roztok NaCl, c) roztok MgSO<sub>4</sub> ■ Fig. 25 POP concrete after 600 days in salt solutions, a) NaCl, b) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, c) MgSO<sub>4</sub>

Obr. 26 Charakter POP betonu po výpalu na 650 °C ■ Fig. 26 POP concrete after firing (600 °C)



ny. Odolnost POP betonů vůči působení chloridů dává možnost zvýšené ochrany výztuže, než je tomu u PC betonů.

POP beton odolává působení vyšších teplot lépe než PC beton. Zbytkové pevnosti POP betonů po výpalu jsou podstatně vyšší než pevnosti betonů z portlandského cementu.

POP betony mají větší tendenci k tvorbě výkvětů než PC betony.

POP beton, resp. analogické materiály (kaše, malty) dávají možnost fixace toxických látek.

POP betony představují potenciální možnost ekologického využití anorganických odpadů, kdy existuje řada kombinací složení využívající princip alkalické aktivace.

## Literatura:

- [1] Proc. of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> conf. "Slag alkaline cements and concrete", Kiev (1978, 1985, 1989, 1994, 1999)
- [2] Proc. of the 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. "Geopolymere '99", St. Quentin (1999)
- [3] Proc. of the World Congress "Geopolymers 2005" St. Quentin (2005)
- [4] Proc. of the GGC2005 Intern. Workshop on Geopolymer and Geopolymer Concrete, Perth (2005)
- [5] Proc. of the 12th Intern. Ceramics Congress, part H, Montecatini Terme, Italy, June 2010
- [6] Geopolymers, Structure, processing, properties and industrial applications, Ed. J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, WP Ltd. Cambridge (2009)
- [7] *Davidovičs, J.*: Geopolymer, Chemistry and Applications, Inst. Geopolymère, St. Quentin (2008)
- [8] *Škvára F., Kopecký L., Šmilauer V., Bittnar Z.*: „Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash“, J. Hazard. Mater. J., Vol. 168, (2009), pp. 711–720
- [9] *Hardjito D., Rangan B. V.*: „Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete“, Research Report GC 1, FE Curtin TU, Perth, Australia (2005)
- [10] *Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D. M. J., Rangan B. V.*: „On the development of fly ash-based geopolymer concrete“, ACI Mater. J., Vol. 101, (2004), pp. 67–472
- [11] *Wallah S. E., Hardjito D., Sumajouw D. M. J., Rangan B. V.*: „Geopolymer concrete: a key for better long-term performance and durability“, Proc. ICFRC Inter. Conf. on Fiber Composites, High performance Concrete and Smart Materials, Chennai, India, pp. 527–539 (2004)
- [12] *Strnad T.*: „Properties of the materials on alkali activated fly ash“, PhD Thesis, ČVUT Praha (2010)
- [13] *Šulc R.*: „Concrete on the alkali activated fly ash“, PhD Thesis, ČVUT Praha (2011)
- [14] *Diamond S.*: „The microstructure of cement paste in concrete“, Proc. 8th Int. Congr. Chem. Cement, Rio de Janeiro, 1986, pp. 122–147
- [15] *Maso J. C.*: „The bond between aggregate and hydrated cement paste“, Proc. 8th Int. Congr. Chem. Cement, Rio de Janeiro, 1986, pp. 378–380
- [16] *Li, Ke-Liang; Huang, Guo-Hong; Jiang, Lin-Hua; Cai, Yue-Bo; Chen, Jian; Ding, Jian-Tong*: „Study on abilities of mineral admixtures and geopolymer to restrain ASR“, Key Engineering Materials, Vol. 302-303, Issue Environmental Ecology and Technology of Concrete pp. 248–254 (2006)
- [17] *Long, Fu-mei; Hu, Ming-yu; Ding, Zai-tao; Nie, Zhi-jian*: „Study on fly ash geopolymer material and its properties“ Nanchang Daxue Xuebao, Gongkeban, 28, (2) pp. 173–176 (2006)
- [18] *Škvára F., Kopecký L., Myšková L., Šmilauer V., Alberovská L., Vinšová L.*: „Aluminosilicate polymers – influence of temperatures 20–1000 °C, efflorescences“ Ceramics-Silikáty 53 (2009), pp. 276–282
- [19] *Minaříková M., Škvára F.*: „Fixation of heavy metals in geopolymeric materials based on brown coal fly ash“, Ceramic-Silikáty 30, pp. 200–207 (2006)
- [20] Internetový portál: [www.geopolymers.net](http://www.geopolymers.net)

POP betony představují potenciální stavební materiál, který má ve srovnání s PC betony výrazně nižší bilanci emisí CO<sub>2</sub> spojených s výrobou jeho složek.

Pro využití POP betonů na bázi popílků je nezbytný další výzkum, zejména stanovení dlouhodobých vlastností (v časovém horizontu let) a zkoušky v reálném měřítku s přípravou velkých záměsů a velkých těles.

Tato práce byla řešena jako součást výzkumného záměru MSM 6046137302 „Příprava a výzkum funkčních materiálů a materiálových technologií s využitím mikro- a nanoskopických metod“ a grantu GAČR 103/08/1639 „Mikrostruktura anorganických aluminosilikátových polymerů“.

Doc. RNDr. František Škvára, DrSc.

e-mail: [skvaraf@vscht.cz](mailto:skvaraf@vscht.cz)

Lenka Myšková

e-mail: [lenka.myskova@vscht.cz](mailto:lenka.myskova@vscht.cz)

oba: Ústav skla a keramiky

Fakulta chemické technologie VŠCHT v Praze  
Technická 5, 166 28 Praha 6

Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

e-mail: [rostislav.sulc@fsv.cvut.cz](mailto:rostislav.sulc@fsv.cvut.cz)

Katedra technologie staveb



Doc. Ing. Pavel Svoboda, CSc.

e-mail: [pavel.svoboda@fsv.cvut.cz](mailto:pavel.svoboda@fsv.cvut.cz)

Katedra technologie staveb



Doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D.

e-mail: [smilauer@cml.fsv.cvut.cz](mailto:smilauer@cml.fsv.cvut.cz)

Katedra mechaniky

Prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.

Katedra mechaniky

všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



Ing. Tomáš Strnad, Ph.D.

Katedra technologie staveb



Ing. Lubomír Kopecký, Ph.D.

e-mail: [lubomir.kopecky@fsv.cvut.cz](mailto:lubomir.kopecky@fsv.cvut.cz)

Katedra mechaniky



Text článku byl posouzen odbornými lektory.

# JORDAHL®

# PFEIFER

# H BAU TECHNIK

## ... řešení pro Vaši stavbu

### Systemy kotvení, spojování, vyztužení, izolace, odhlučnění, lanových a tyčových konstrukcí.



JORDAHL & PFEIFER Stavební technika, s.r.o.  
Bavorská 856/14, 155 00 Praha 5  
Tel. +420 272 700 701 info@jpcz.cz www.jpcz.cz