

Těsnicí vlastnosti základkových směsí

Ing. Jan Kostka, Mgr. Petr Otipka, Ing. Jiří Lukš, Ph.D.

VŠB – Technická univerzita Ostrava, hanzi.kostej@centrum.cz, petr.otipka@vsb.cz, jiri.luks@vsb.cz

Přijato: 30. 3. 2010, recenzováno: 18. 5. a 19. 5. 2010

Abstrakt

Článek se zabývá využitím popílku, jakožto odpadní suroviny vhodné při likvidaci hlavních důlních děl, zejména při likvidaci jámového stvolu zpevněným, základkovým materiálem. Záměrem bylo navrzení a zhodnocení nových, vhodných receptur základkových směsí pro likvidaci jam tak, aby navržené přísady kladně působily zejména na těsnicí účinky, které by příznivě ovlivnily vodo a plynonepropustnost likvidovaného díla.

Sealing properties of filling mixtures

This paper focuses on the flue ash as a waste material which can be used for filling main mine workings, especially filling pit shafts with consolidated filling material. The intention was to propose and assess new formulas of filling mixtures. A special emphasis was put on favourable impacts of ingredients on sealing properties of mixtures securing water- and gasproofness of treated mine workings.

Dichtungseigenschaften der Gemische aus dem Bergversatz

Der Artikel befasst sich mit der Nutzung der Asche als Abfallrohstoffes, der bei der Liquidierung der Hauptgrubenbaue, besonders bei der Liquidierung der Schachtsäule mit verfestigtem Versatzmaterial geeignet ist. Das Vorhaben war das Entwerfen und die Bewertung der neuen, geeigneten Rezepturen der Versatzgemische für Schachtliquidierung mit dem Ziel, damit die entworfenen Beimischungen vor allem auf Dichtungseigenschaften positiv wirken, die wieder günstig Wasser- und Gasundurchlässigkeit des liquidierten Grubenbaus beeinflussen würden.

Klíčová slova: popílek, fluidní popílek, důlní dílo, hydratační proces.

Keywords: ash, flue ash, mine working, hydration process.

1 Úvod

Základem bezpečné likvidace jam (jejich stability a stability jejich okolí) je likvidace, resp. zasypání jámy v celém jámovém stvolu zpevněným zásypovým materiálem. Tento technologický postup je však jak z časového, tak i z finančního hlediska velice nákladný, zejména díky velkému objemu vyhovujícího materiálu, který je třeba použít na zasypání hlavního důlního díla, a rovněž díky aspektům, které při likvidaci takového díla musíme respektovat.

Produkované popílky z určitých druhů spalovacích zařízení vykazují cementační vlastnosti a vzhledem ke značným rozdílům v chemickém i fázovém složení, zejména díky jejich latentní hydraulické vlastnosti, je výhodné jejich využití právě v úloze adekvátní náhrady pojiva. Tímto způsobem je možné výrazně snížit vysoké náklady čerpané pro bezpečnou likvidaci jam uzavíraných důlních děl.

2 Popílky, jejich vznik a charakteristika

Tradiční popílky vznikají při spalování práškových paliv v elektrárnách nebo v teplárnách v podobě velkého množství jemného úletu. Tento se zachytává v usazovacích a jiných odlučovacích zařízeních. Při odpopelnění je systémem suchého odběru popílek dopravovaný do expedičních zásobníků nebo je v mokřém stavu splavovaný do odkališť, kde tuhé fáze sedimentují a voda se vrací do elektrárny. Chemickým i mineralogickým složením se popílky navzájem liší podle druhu používaného uhlí.

Popílek je heterogenní směs částic, jež se liší tvarem, velikostí a chemickým složením. Tyto parametry jsou dány kvalitou

spalovaného uhlí a typem spalovacího zařízení [3]. Popílky jsou charakterizovány vysokým obsahem neporušených kulovitých, sklovitých částic. Kromě skelné fáze, jejíž podíl je z fázového hlediska nejvyšší, obsahují popílky také menší podíl krystalických fází, viz tabulka č. 1, a dle režimu spalování také organické látky, které nestačily vyhořet v důsledku rychlého přeletu paliva plamenem.

V různých frakcích popílků je zastoupení určitých chemických prvků, jejichž podíl na chemickém složení se procentuálně liší, viz tabulka č. 2. Kromě základních prvků, které popílek obsahuje, bylo zjištěno až 37 doprovodných prvků. V převážné míře se jedná o minoritní a stopové prvky.

3 Popílky z fluidního spalování

V poslední době je stále běžnější využití technologie fluidního spalování za atmosférického tlaku. Drcené palivo s přísadou vápence, příp. dolomitu, se spaluje v cirkulující vrstvě spalovacího vzduchu a vznikajících spalin tak, že zrna paliva se vyhříváním postupně zmenšují. Vznikající popílek je vynášen do určité výšky, kde vlivem rozšiřujícího se průřezu ohniště klesá rychlost nosného média a přiváděné palivo se společně se zrny popílku rozvrství podle hmotnosti do určitých výšek. Tam částice neustále víří kolem své rovnovážné polohy. Tuhé zbytky po spálení, které zůstávají určitou dobu v ohništi ve formě sypkého popílku, se nesmí spékat, proto teplota spalování se pohybuje okolo 850 °C, což je teplota nižší než teplota měknutí popelovin. Nízké teploty ve fluidním lůžku se dosahují použitím paliva s nízkou výhřevností, rovněž přiváděný vzduch je vyhříván na nízkou teplotu.

Tab. 1: Mineralogické složení popílků [2].

Miner. složení	SiO ₂	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	TiO ₂	CaO	SiO ₂	FeO	C
	křemen	mullit	hematit	rutil	anatás		cristobalit		uhlík
Hmot. (%)	70-80	14-26	4,5-7	1-2,5	0,5-1*	1*	0,6*	3*	1-2,5

*Tyto fáze se vyskytují jen v určitých spalovnách.

Tab. 2: Chemické složení popílků [2].

Chem. složka hmot. (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Černé uhlí	50-57	25-30	<1	2-4	1,5-3	2,5-5	0,2-2	0,5-1,2
Hnědé uhlí	43-60	19-34	1-7	4-6	0-2	0-2	0,5-1	0-5

Fluidní popílků obsahují na rozdíl od popílků klasických vyšší množství CaO, tedy měkce páleného reaktivního vápna (15 až 35 %), a poměrně vysoký obsah reaktivních amorfních aluminosilikátů (15 až 35 %). Díky těmto složkám vykazuje popelová směs po smíchání se záměsovou vodou cementační vlastnosti, což znamená, že tuhne a tvrdne bez přidavku jakékoli další příměsi či přísady. Základními produkty hydratace jsou minerál ettringit (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O) a amorfní C-S-H gely. Tedy kompozitní popelová směs s těmito vápenatými sloučeninami má při vhodném smísení s vodou takové pucolánové vlastnosti, při kterých dochází k chemickým a fyzikálním změnám jako v maltovině.

Stejně jako u popílku klasického se i u fluidních popílků obou druhů projevuje nevýhoda kolísavých vlastností, zejména chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů, způsobená nestabilitou spalovacího procesu a variabilitou vlastností vstupních komponent (uhlí a odsiřovacího činidla).

4 Likvidace důlních děl v OKR

V průběhu prováděných likvidací jam byly vytvořeny různé kombinace ukončení hlavního důlního díla. Vytvoření optimálního návrhu likvidace je podmíněno mnoha faktory. Jedním z nejdůležitějších faktorů je stanovení charakteristiky likvidovaného jámového stvolu, zejména jeho průřezu, druhu jámové výztuže a druhu horninového masivu, ve kterém je jámový stvol vybudován. Jako dalším z faktorů je stanovení podmínek, které v likvidované jámě převládají, tedy množství vytvořeného metanu s možností následné migrace, a zjištění objemu důlních vod a síly jejich přítoku. Na základě takto stanovených faktorů je následně projektantem vytvořena dokumentace, která udává druh a průběh likvidačních prací. V OKR byly použity tyto možnosti likvidace:

- Likvidace zpevněným zásypovým materiálem v celém jámovém stvolu, až po okraj ohlubně.
- Likvidace zpevněným zásypovým materiálem v celém jámovém stvolu, ukončené pod hladinou ohlubně s následným dosypáním zeminy.
- Likvidace zpevněným zásypovým materiálem v celém jámovém stvolu, ukončené pod hladinou ohlubně s následným použitím ohlubňového povalu a dosypáním zeminy.

- Ponechání volné (nezasypané) spodní části jámy, oddělené jámovou zátkou, a následné zasypání jámového stvolu nad jámovou zátkou zpevněným zásypovým materiálem.
- Likvidace nezpevněným zásypovým materiálem v celém jámovém stvolu, až po okraj ohlubně, s následným použitím ohlubňového povalu a dosypáním zeminy.

Likvidace hlavních důlních děl hydraulicky zpevněnou základkou se provádí u plynujících jam, kde hrozí nebezpečí výbuchu metanu. U takových jam nelze provádět likvidaci nezpevněnou základkou tvořenou převážně štětovým kamenem, vzhledem k vysokému nebezpečí frikčního jiskření a možnosti výbuchu a také vzhledem k následné možné migraci a nekontrolovatelnému úniku plynu skrz zásyp, který je plynopropustný. Proto v takových případech je volena možnost likvidace cementopopílkovou směsí.

4.1 Zpevněný zásypový materiál s požadovanou pevností 2 MPa

V nynější době jsou používány certifikované směsi, které při zachování technologického postupu dosahují uvedených pevnostních hodnot. Jedná se převážně o směs popílku s pojivem, kde jako pojivo je v dnešní době nejčastěji používán cement v množství do 5 %. Směs se používá v ostatních úsecích jámy, kde nehrozí nebezpečí roztečení zásypového materiálu do ostatních důlních děl.

4.2 Zpevněný zásypový materiál s požadovanou pevností 5 MPa

Jako u předchozího zpevněného zásypového materiálu i tyto směsi jsou certifikovány a při zachování technologického postupu dosahují patřičných pevností. Jako materiál je opět užívána směs popílku s pojivem, nejčastěji s cementem. Směs se používá v klíčových místech jámy, např. v pronicích s patrovým nárazím a všude tam, kde je potřeba zabránit unikům zásypového materiálu do horizontálních důlních děl.

5 Nové technologie při likvidaci hlavních důlních děl

V řadě svislých důlních děl je tak zvaná jámová tůň zaplavená vodou. Zaplnění základkovým materiálem jámové tůně, která je zaplavena vodou, vyžaduje speciální hmoty, jež zajistí

Tab. 3: Chemické složení použitých popílků.

Parametr	Fluidní popílek Kladno	Fluidní popílek Třinec	Popílek Přerov
SiO ₂	50,5 ± 1,1	42,6 ± 1,0	53,5 ± 2,2
CaO	6,8 ± 0,3	9,9 ± 0,3	2,45 ± 0,6
Al ₂ O ₃	27,3 ± 1,0	24,4 ± 1,0	24,2 ± 1,0
Uhličitany jako CO ₂	0,4 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,65 ± 0,2
Síraný jako SO ₃	1,9 ± 0,1	5,8 ± 0,2	0,55 ± 0,6

dostatečnou pevnost a těsnicí účinky, se současnou odolností vůči agresivním vodám.

Pro tyto požadavky byly ověřovány směsi na bázi popílku, cementu a bentonitu, které svými příznivými, těsnicími účinky bentonitů, měly být využity jako výplňový materiál při likvidaci hlavních důlních děl, přičemž musely splňovat základní požadavky dané normou. Přísada bentonitu v receptuře měla opět zvýšit vodotěsnost směsi a zlepšit tak její vlastnosti na vodonepropustnost, aniž by ovlivnila jiné vlastnosti, zejména pevnost směsi. Receptury směsí byly navrženy a namíchány ve složeních:

- K10 – 10 % cement Hranice CEM 42,5 R, fluidní popílek z teplárny Kladno odebraný z čistírny pod silem dne 12.02.2007, 10 % přísady bentonitu,
- K5 – 5 % cement Hranice CEM 42,5 R, fluidní popílek z teplárny Kladno odebraný z čistírny pod silem dne 12.02.2007, 10 % přísady bentonitu,
- T10 – 10 % cement Hranice CEM 42,5 R, fluidní popílek z energetiky Třinec odebraný z kotlů 11-12, dne 12.02.2007, 10 % přísady bentonitu,

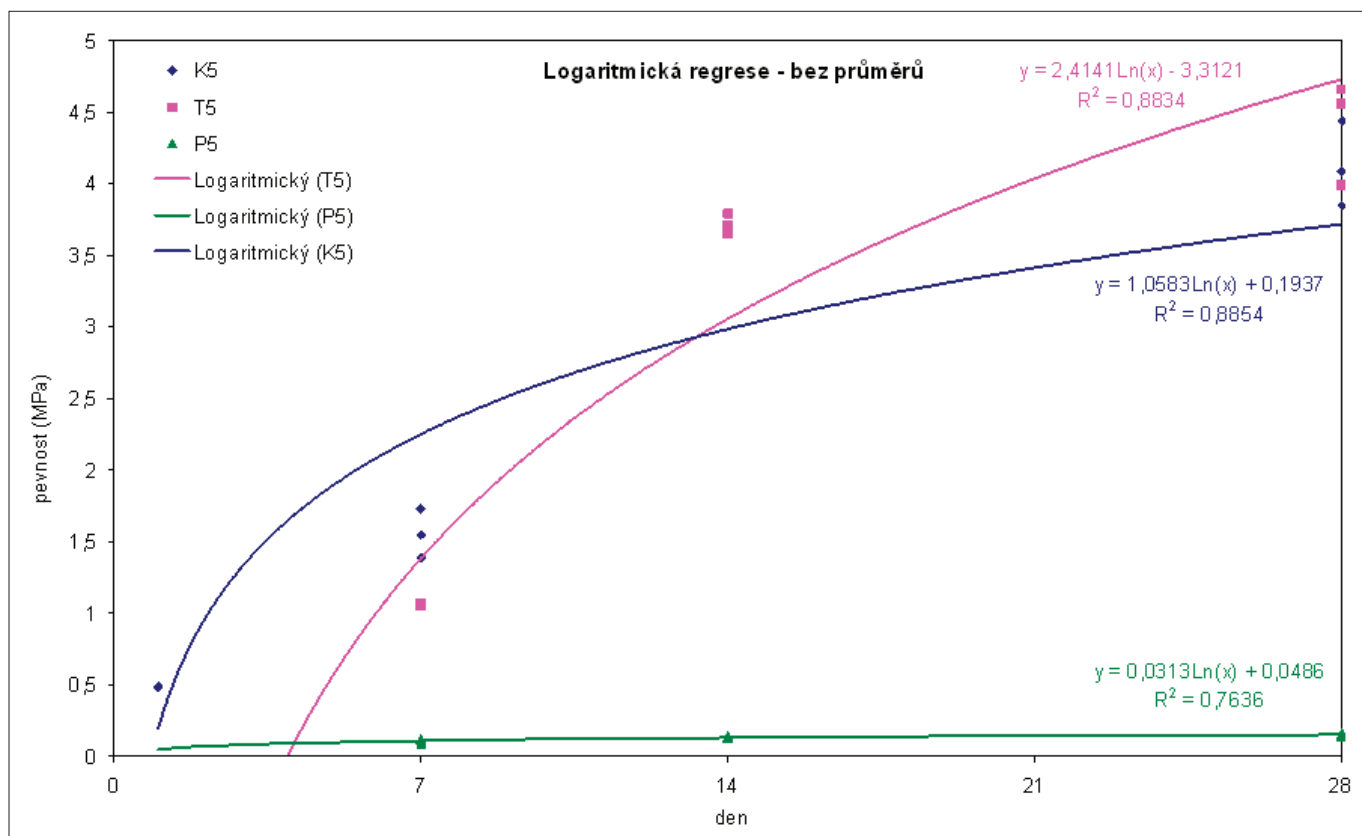
- T5 – 5 % cement Hranice CEM 42,5 R, fluidní popílek z energetiky Třinec odebraný z kotlů 11-12, dne 12.02.2007, 10 % přísady bentonitu,
- P10 – 10 % cement Hranice CEM 42,5 R, popílek z teplárny Přerov, 10 % přísady bentonitu,
- P5 – 5 % cement Hranice CEM 42,5 R, popílek z teplárny Přerov, 10 % přísady bentonitu.

Jako přísada byl použit bentonit Sabenil 65, výrobce Keramost, a.s.

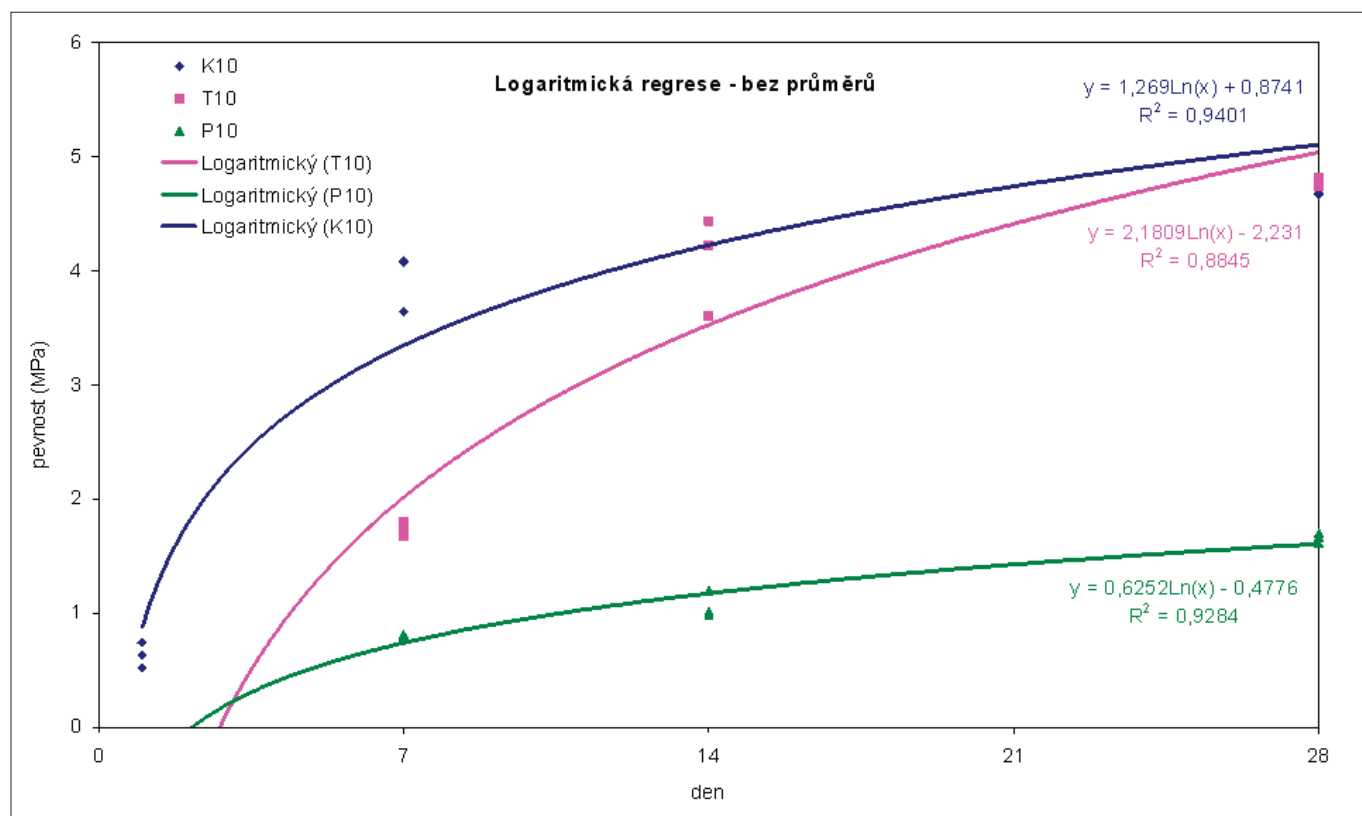
Popílků použité do zkušebních směsí dosahovaly různého chemického složení, jak je uvedeno v tabulce č. 3. Z této je patrné, že největší rozdíl je ve volném CaO, jehož množství je u fluidních popílků až trojnásobné.

Při míchání směsí musely být opět splněny základní požadavky, které byly dány tak, aby směs mohla být využitelná v praxi, a to zejména:

- použití co nejnižšího vodního součinitele v záměsi, s možností použití plastifikátorů,
- co nejvyšší obsah vzduchu v čerstvě vytvořené směsi.



Obr. 1: Logaritmická regrese nárůstu pevností směsí s použitím 5 % cementu.



Obr. 2: Logaritmická regrese nárůstu pevností směsí s použitím 10 % cementu.

* Na obrázku č. 2 jsou znázorněny 3 křivky nárůstu pevnosti v rozmezí 1 až 28 dnů, směsí K10, T10 a P10, tedy popílkových směsí s obsahem 10 % cementu a 10 % bentonitu.

- adekvátní tekutost směsí v takové míře, aby byla dopravitelná potrubím o průměru 150 – 200 mm na vzdálenost min. 50 m.

Z každé směsi byla zhotovena zkušební tělesa (krychle o hraně 150 mm), která byla uložena ve vlhkém prostředí. Všechna zkušební tělesa byla podrobena zkouškám ztvrdlého betonu pevnosti v tlaku.

Zkouškám byla podrobena vždy 3 zkušební tělesa zkouškou pevnosti v tlaku [2] po 1, 7 a 28 dnech zrání, aby mohla být vytvořena křivka nárůstu pevnosti. Z naměřených hodnot byly vytvořeny regresní křivky, ve kterých byl zaznamenán nárůst pevnosti.

Následně měla být zkušební tělesa z každé navržené směsi po 28 dnech zrání podrobena zkoušce metodou měření hloubky průsaku tlakovou vodou [1]. Ovšem již výsledky zkoušek navržených směsí metodou měření hloubky průsaku tlakovou vodou prokázaly, že ani jedna z navržených popílkových směsí s přísadou cementu a bentonitu nemá vodotěsnicí účinky. Z tohoto důvodu nebylo již přistoupeno k dalším zkouškám.

Na obrázku č. 1 jsou vytvořeny 3 křivky nárůstu pevnosti v rozmezí 1 až 28 dnů, směsí K5, T5 a P5, tedy popílkových směsí s obsahem 5 % cementu a 10 % bentonitu.

Zatímco směs fluidního popílku K5 má nárůst pevnosti plynulý, a po 28 dnech zrání nabývá pevnosti dosahující hodnot 4 MPa, směs popílku T5 má nárůst pevnosti prudký, po jednom dni tuhnutí nevykazuje měřitelnou pevnost. Zřetelný nárůst pevnosti zde probíhá až od 7. dne a po 28 dnech přesahuje

hodnoty 4 MPa. Hodnota pevnosti směsi P5 je sice pozvolná, nicméně nepatrná, nepřesahující ani hodnotu 0,5 MPa.

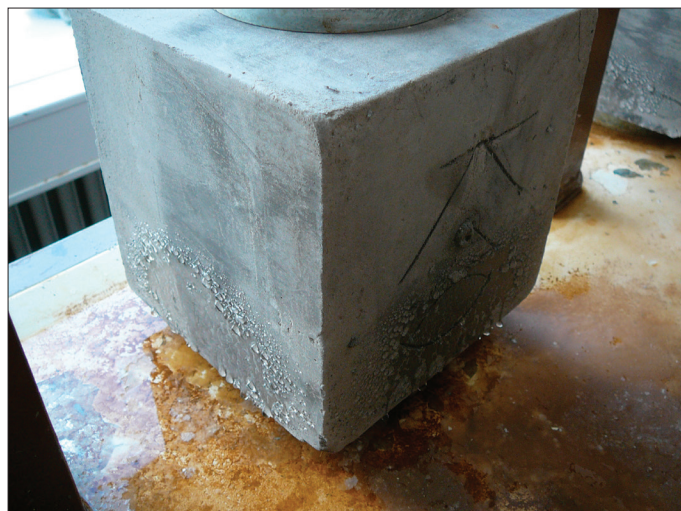
Uvedené pevnosti jasně ukazují, že fluidní popílků s volným CaO společně s cementem mají hydraulické vlastnosti, které vykazují znatelně vyšší pevnosti než nefluidní popílek z teplárny Přerov.

Hlavním faktorem prováděných zkoušek byla přísada bentonitu, která měla příznivě ovlivnit vodonepropustné účinky v navrhovaných recepturách směsí. Zkušební vzorky navržených popílkových směsí podrobené zkouškou metody měření hloubky průsaku tlakovou vodou [1] však vykazovaly, že zkušební vzorky - krychle, zkoušené výše uvedenou metodou, neprokázaly ani v jednom případě vodotěsnicí účinky, jak je vidět na obrázku č. 3 a 4. Do jedné hodiny po nasazení zkušebních vzorků - krychlí - na zkušební stoličce všechny zkušební vzorky prosáklý vodou.

Částečné nabuzení vodotěsnicích účinků bylo dosaženo uložením zkušebních vzorků - krychlí - (po ukončení hydratačního procesu) na jeden den do vodní lázně. Krychle byly do vodní lázně uloženy až po 28 dnech zrání, takže nedošlo k jejich rozpuštění nebo roztmelení. Tímto uložením se dokonce podařilo nabudit pozitivní vodotěsnicí vlastnosti bentonitu obsaženého ve směsi, ovšem tyto v konečné fázi nebyly natolik účinné, aby celkově ovlivnily vodonepropustnost celého zkušebního vzorku. Důvod, proč navržené směsi popílku, cementu a bentonitu nemají žádné vodotěsnicí schopnosti, je patrně ten, že zrnka popílku inklinují k vysoké nasákavosti vodou, a to i přesto, že popílek společně s cementem má sekundární



Obr. 3: Znárodné průsaky na zkušebních krychlech směsi K5 a K10.



Obr. 4: Patrný totální průsak krychle popílkové směsi K10.

hydraulické vlastnosti a společně tvoří vodonerozpustnou cementopopílkovou matici. Takto hydraulicky stmelená směs nemá již dalších těsnicích účinků, a proto její využití při tvorbě těsnicích směsí při zakládání jámových stvolů je bezpředmětné.

6 Shrnutí výsledků

Výsledky uvedené v článku dokumentují pevnostní parametry popílkových směsí s přísadou bentonitu. Pevnosti směsí na bázi fluidních popílků vykazaly pozvolný nárůst s hranicí po 28 dnech zrání přesahující hranici 4 MPa až 5 MPa. Směsi na bázi klasických popílků s bentonitem a cementem však nedosahují dostatečných pevnostních parametrů (pevnost v tlaku 0,2 MPa).

Směsi s přísadou bentonitu však neprokázaly žádné vodotěsnicí účinky.

Pro těsnění horninového masivu v místech s vysokými přítoky vody byly vyvinuty těsnicí betony, jejichž použití bylo úspěšně aplikováno v provozních podmínkách [4].

Literatura

- [1] ČSN EN 12390-8, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, Květen (2001).
- [2] ČSN EN 12390-3, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Září (2002).
- [3] FEČKO, P., KUŠNIEROVÁ, M., TYČKOVÁ, B. *Popílký*. Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0327-5.
- [4] KOSTKA, J., OTIPKA, P., LUKŠ, J. *Vývoj těsnicích základkových směsí*. Mezinárodní seminář „Zpevňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí 2010, VŠB-TUO, 2010.
- [5] MAYEROVÁ, M., RŮŽIČKOVÁ, Z., SRB, J. *Popílký - Jejich úprava a využití*. 1. vydání, Praha, SNTL, (1983).

Přehled akcí 2010

Datum	Název akce	Místo	Pořadatel/Kontakt
10. - 12. 9. 2010	14. setkání hornických měst a obcí České republiky	Stříbro	Hornicko-historický spolek Stříbro Město Stříbro
11. - 12. 9. 2010	Oslavanské historické slavnosti Turistický den "K pramenům těžby uhlí v Oslavanech"	Oslavany	Vlastivědný spolek Rosicko-Oslavanska Město Oslavany
6. - 9. 10. 2010	Stříbrná Jihlava 2010 Mezinárodní konference k historii hornictví a důlních prací na Vysočině	Jihlava	Muzeum Vysočiny Jihlava
12. - 14. 10. 2010	XVII. konference Společnosti důlních měřičů a geologů	Hodonín	Společnost důlních měřičů a geologů dana.sladkova@vsb.cz, tel.: 596 995 566
12. - 14. 10. 2010	49. ročník symposia Hornická Příbram ve vědě a technice	Příbram	Diamo, s. p. Zaměstnavatelský svaz důlního a naftového průmyslu Hornické muzeum Příbram