



POPÍLKY
ve stavebnictví

Sborník recenzovaných přednášek

3. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE POPÍLKY VE STAVEBNICTVÍ

18. - 19. 5. 2017

ISBN 978-80-214-5498-9

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

VĚDECKÝ VÝBOR

Ing. Petr Baranek
prof. Ing. Petr Buryan, DrSc.
doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Ing. Pavel Donát
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Ing. Pavlína Kulhánková
Ing. Tomáš Lobpreis
Ing. Roman Snop
doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

OBSAH

MOŽNOSTI VYUŽITIA POPOLČEKOV Z MORAVSKÉHO REGIÓNU při ÚPRAVE ZEMÍN V CESTNEJ INFRAŠTRUKTÚRE	
Lucia Bulíková a František Kresta	7
UVOLŇOVÁNÍ OXIDU UHLIČITÉHO PŘI STANOVENÍ TEPLOT TAVITELNOSTI POPELE BIOMASY	
Petr Buryan, Pavel Donát, Roman Snop, Šimon Buryan.....	15
UPLATNĚNÍ HYDROGEOLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ PŘI UKLÁDÁNÍ VEP	
Černoch Petr, Košťál Jiří.....	25
VLIV MLETÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN NA FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ	
Michaela Dvořáková, Vít Černý, Rostislav Drochytka, Petr Figala.....	25
VLIV DRUHU KŘEMIČITÉ SLOŽKY NA VÝVOJ TOBERMORITU PŘI SPECIFICKÝCH HYDROTERMÁLNÍCH PODMÍNKÁCH	
Fleischhacker Ján, Černý Vít, Kociánová Magdaléna, Drochytka Rostislav.....	45
MOŽNOSTI VYUŽITÍ POPÍLKŮ KONTAMINOVANÝCH VLIVEM DENITRIFIKACE SPALIN VE STAVEBNICTVÍ A EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ OPTIMÁLNÍ APLIKACE	
Jakub Hodul, Radka Sklenářová, Rostislav Drochytka	55
TECHNOLOGIE INJEKTÁŽE SYPANÝCH HRÁZÍ S POUŽITÍM POPÍLKU	
Kociánová Magdaléna, Černý Vít, Drochytka Rostislav	67
VLIV POPÍLKU A PŘÍŠAD NA STABILIZACI A ZTEKUCENÍ ZEMIN	
Kociánová Magdaléna, Černý Vít, Drochytka Rostislav	67
ÚPRAVA ZEMIN SMĚSMI POPÍLKŮ A ODPAŠKŮ Z VÝROBY VÁPNA A CEMENTU	
František Kresta	67
CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE WITH POZZOLANIC ADDITIVES	
Ramune Lebedeva, Rimvydas Moceikis	95
AMONIAK A BAKTERIE, VHODNÁ KOMBINACE?	
Denisa Romanovská, Štěpánka Trachtová, Tomáš Opravil, Roman Snop.....	97
VYUŽITÍ POPÍLKU V RÁMCI LEPIDEL A STĚREK PRO KONTAKTNÍ ZATEPLOVACÍ SYSTÉM	
Lubomír Sokola, Nikol Žižková	105
ÚPRAVA ZEMIN V PODLOŽÍ VOZOVKY POPÍLKU A POPÍLKOVÝMI STABILIZÁTY	
Dušan Stehlík, Veronika Sokolová	111
VYUŽITIE POPOLČEKA V PÓROBETÓNE	
Alena Struhárová, Svetozár Balkovic, Jakub Hodul	121
STANDARDNÍ A MIKROMLETÉ FLUIDNÍ POPÍLKU V PODKLADNÍCH VRSTVÁCH VOZOVKY	
Šedina Jakub, Valentin Jan, Suda Jan	129
DOPAD SNCR NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI POPÍLKŮ	
Martin Ťažký, Rudolf Hela	141
POHLED DO MIKROSTRUKTURY SILIKÁTU S POPÍLKOVÝM PLNIVEM	
Eva Tůmová, Rostislav Drochytka.....	151
VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VYUŽÍVAJÍCÍCH ELEKTRÁRENSKÉ POPÍLKU	
Nikol Žižková, Lubomír Sokola.....	161

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

MOŽNOSTI VYUŽITIA POPOLČEKOV Z MORAVSKÉHO REGIÓNU PŘI ÚPRAVE ZEMÍN V CESTNEJ INFRAŠTRUKTÚRE

POSSIBILITY OF USE OF FLY ASH FROM THE MORAVA REGION TO SOIL TREATMENT IN ROAD CONSTRUCTIONS

Lucia Bulíková a František Kresta

Fakulta stavební, VŠB Technická univerzita Ostrava

Anotace:

Popolčky, produkované v Moravskom regióne, boli testované ako potenciálne spojivo. Testované kremičité popolčky triedy F (ASTM C618) nepreukázali hydraulické vlastnosti, ale prejavil sa pozitívny účinok na zníženie maximálnej suchej mernej hmotnosti zmesi, zvýšenie hodnôt IBI a na klesajúcu tendenciu bobtnania pri zvyšujúcej sa dávky popolčkov. Výsledky laboratórnych testov ukazujú možnosť použitia popolčkov ako spojivo pre úpravu zemín.

Annotation:

Fly ash produced in the Moravian region was tested as a potential binder. Tested siliceous fly ash of class F (ASTM C618) did not showed hydraulic properties but it showed positive effect on reducing maximum dry density of mixtures, increasing the IBI value and decreasing tendency to volume changes when the amount of fly ash was increased. The results of laboratory tests demonstrate the possibility of using fly ashes for soil treatment

Klíčová slova:

popolčky, úprava zemín, spojivo

Keywords:

fly ash, soil treatment, binder

1. Úvod

Úprava a stabilizácia zemín je štandardná technológia a vedie k optimálnemu využitiu zemín pri cestnej výstavbe. Úprava je zmena vlastností pôd s cieľom zlepšiť ich stavebnú použiteľnosť. V Českej republike je úprava zemín popolčkami kontrolovaná nariadeniami EN 14227-15 a Technickými podmienkami TP 94. Najčastejšie modifikované vlastnosti zemín sú merná hmotnosť, obsah vody, plasticita, náchylnosť k objemovým zmenám, šmyková pevnosť a únosnosť [1]. V súčasnosti sa hydraulické cestné spojivá, používané k úprave zemín, prevažne skladajú z cementu a/alebo vápna. Avšak keďže je ich výroba ekologicky aj ekonomicky náročná, hľadajú sa iné lacnejšie možnosti. Úspešnou alternatívou sa v európskych krajinách stáva popolček [2,3].

Popolček je anorganická splodina vznikajúca pri spaľovaní jemne mletého uhlia v elektrárňach alebo teplárňach. Popolček pozostáva prevažne z malých čiastočiek kremičitého skla a zachycuje sa v elektrostatických odlučovačoch z plyných spalín. Základné fyzikálne vlastnosti popolčeka, ktoré sú potrebné pre využitie v stavebníctve, sú hlavne merná hmotnosť, zrnitosť, pucolanita a nasiakavosť. Medzi dôležité chemické vlastnosti patria mineralogické zloženie a obsah spáliteľných látok, resp. nedopalu. Popolčeky sa využívajú pri geotechnických aplikáciách spojených s cestnými stavbami k zvýšeniu pevnostných vlastností zemín, pre kontrolu zmrštenia a bobtnania zemín, k zníženiu obsahu vody v pôdach a k úprave krivky zrnitosti. [3,10].

2. Materiály a metodika

Vybrané popolčeky z Moravského regiónu boli testované ako spojivo pre úpravu tuzemských zemín. Prvý popolček, značený PO, produkuje elektráreň Arcelor Mittal Ostrava AMO a bol odobraný zo skládky neďaleko jeho zdroja. Druhý popolček, označený ako PP, pochádza z Přešovskej teplárne. Tento popolček bol ukladaný na depóniu v Předmostí Přerov do roku 1996 a následne bolo odkalisko popolčeku rekultivované. Vzorky popolčeku boli odobrané z hĺbky 2m pod úrovňou terénu. Oba popolčeky vznikli spaľovaním čierneho uhlia, ktoré pochádza z ostravsko-karvinského revíru (Obrázok 1.).



Obrázok 1. Odberné miesta popolčeka PO Bartovice Ostrava a PP Předmostí Přerov

Testované zeminy, sprašové hlíny (F6 Cl), boli odobrané z miest plánovanej výstavby pozemných komunikácií v Moravskom regióne. Zemina označená ZO bola odobraná zo stavby Cesty I/11 Ostrava – predĺžená Rudná a zemina ZP zo stavby Diaľnice D1 Přerov – Lipník nad Bečvou.

Laboratórne testy boli vykonané ako na neupravených tak aj na upravených zeminách. Zeminy boli zmiešané s 10% a 15% popolčeka. Na vzorkách bola vykonaná séria chemických a mineralogických analýz, vrátane vylúhovateľnosti na vzorke PP a elektrónovej mikrosondy. Vylúhovateľnosť ťažkých kovov je jeden z dôležitých ekologických aspektov, ktorý sa v prípade popolčekom zisťuje kvôli záťaži na životné prostredie. Jej limitné hodnoty sú uvedené v TP 93. Elektrónová mikrosonda a fluorescenčná spektrometria bola vykonaná na Inštitúte čistých technológií ICT na VŠB TU Ostrava. Skúška Proctor Standard stanovila maximálnu suchú mernú hmotnosť a optimálnu vlhkosť neupravených, upravených zemín a popolčekom. Zhutnenie prebehlo štandardne pri 100% energii Proctora. Nasledovne boli stanovené hodnoty IBI (Okamžitý index únosnosti), CBR (Kalifornský pomer únosnosti) po 96 hodinách saturácie a 3 dňoch vytvrdzovania. Minimálna hodnota IBI upravených zemín pomocou popolčekom použitých do násypov je 10%, podľa TP 94. Objemové zmeny reprezentujú rozhodujúci parameter popolčekom, limituje ich použitie ako sypaniny v cestnom staviteľstve. Maximálna prípustná hodnota objemových zmien (bobtnania) je 3%. Táto hodnota je zisťovaná v CBR mažiari po 3 dňoch vytvrdzovania vo vlhkom prostredí a podlieha nariadeniu TP 93. Všetky prevedené testy boli vykonané v laboratórnych podmienkach (Obrázok 2.).



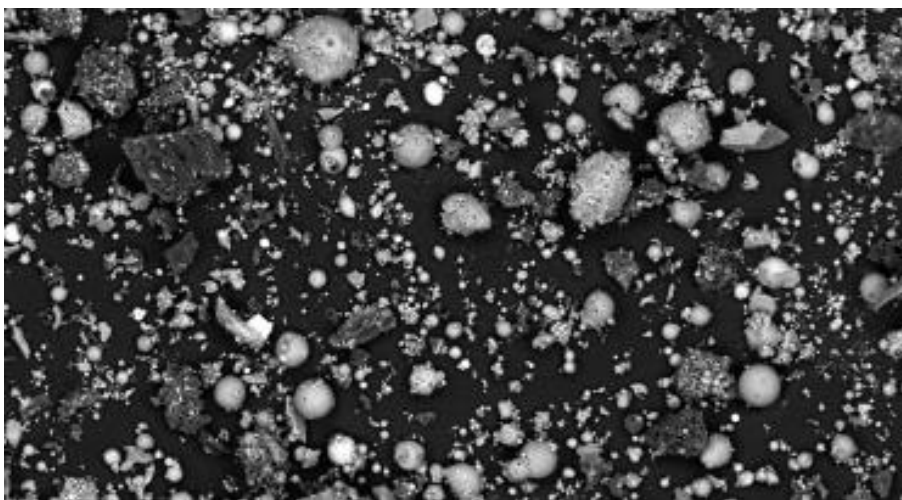
Obrázok 2. Skúška Proctor Standard a stanovenie objemových zmien

3. Výsledky a diskusia

Ako prvá bola vykonaná chemická analýza pre zatriedenie testovaných popolčekom a stanovenie ich reaktivity. Analýza preukázala väčšinové zastúpenie oxidov SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 a to pri oboch vzorkách nad 80% a obsah vápna CaO maximálne 2% (Tabuľka 1.). Na základe týchto výsledkov sa popolčekom zaradili do triedy F ako kremičité (ASTM C618). Kremičité popolčekom vykazujú nízke objemové zmeny a vysokú pucolánovú aktivitu –

spevňovanie štruktúry pri reakcii Ca(OH)_2 s vodou. Je ich možné použiť k mechanickej úprave zemín a to hlavne z úpravy krivky zrnitosti a k zníženiu vlhkosti v zemine.

Na obrázku 3 je ukázaná štruktúra testovaného popolčeka PO z elektrárne AMO získaná pomocou elektrónového mikroskopu. V štruktúre PO sú jasne viditeľné častice kremičitého skla a guľovité častice mikrosfér. Mikrosféry vznikajú pri spaľovaní v teplotnom rozmedzí 1200-1500 °C a ovplyvňujú celú radu mechanických vlastností popolčeka (objemová hmotnosť, pórovitosť a ďalšie). Zeminy boli reprezentované sprášovými hlinami (íly s nízkou až strednou plasticitou CL - CI, tuhej až pevnej konzistencie).



Obrázok 3. Mikroskopická štruktúra popolčeka PO (mikrosféry)

Skúška vylúhovateľnosti na vzorku PP preukázala, že je tento popolček vhodný materiál pre použitie v dopravnom staviteľstve pri výstavbe pozemných komunikácií. Žiadny prvok neprekročil limit stanovený predpismi a všetky hodnoty sú niekoľkonásobne menšie ako limitné hodnoty stanovené TP 93 (Tabuľka 2.). Najvyšší obsah vo výluhu bol v prípade As, Co a V.

Tabuľka 2. Výsledky vylúhovateľnosti vzorky popolčeka PP

Prvok	Max (mg/l)	Mer. (mg/l)	Prvok	Max (mg/l)	Mer. (mg/l)
Ag	0,1	< 0,005	Cu	1	< 0,01
As	0,1	0,0140	Ni	0,1	< 0,006
Ba	1	0,0230	Hg	0,005	< 0,0003
Pb	0,1	< 0,01	Se	0,05	< 0,012
Cd	0,005	< 0,003	V	0,2	0,0170
Cr celk	0,1	0,0070	Zn	3	< 0,01
Co	0,1	< 0,01	Sn	1	< 0,02

Skúška Proctor Standard stanovila optimálnu vlhkosť w_{opt} zemín v rozmedzí 15-17%. Maximálna merná suchá hmotnosť zmesi zeminy ZO a popolčeka PO bola $p_{dmax} = 1780 \text{ kg.m}^{-3}$ (zmes s 10% PO). V prípade zmesi 10% PP so zeminou ZP bola $p_{dmax} = 1670 \text{ kg.m}^{-3}$. Z výsledkov je zrejmé, že po pridaní popolčeka pri optimálnej vlhkosti sa znížila objemová

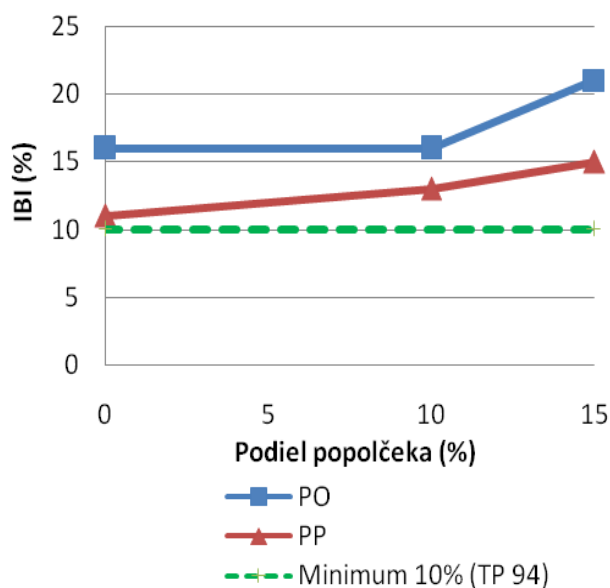
hmotnosť zmesi o 100 kg.m⁻³, čo pozitívne ovplyvňuje vlastnosti zemín pri výstavbe. Všetky vzorky vyhoveli českým nariadeniam ohľadom objemových zmien.

Výsledky indikujú znižujúcu sa tendenciu bobtnania pri zvyšujúcej sa dávke popolčeka (Tabuľka 3.). Objemové zmeny (lineárne bobtnanie) zmesí s PO boli v rozmedzí 0,8 až 1,6% a v prípade zmesí s popolčekom PP boli kritickejšie, a to 1,8 až 2,8%.

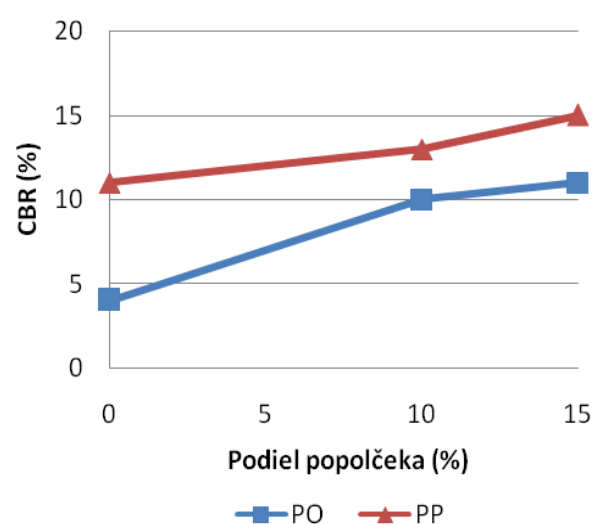
Tabuľka 3. Výsledky skúšok Proctor Standard a objemových zmien

Vzorka	w opt (%)	ρ max (kg/m ³)	Obj. zmeny (%)
PO	36	1080	-
ZO	16	1850	1,6
ZO+10% PO	16	1780	1,1
ZO+15% PO	15	1740	0,8
PP	45	890	-
ZP	16	1740	2,8
ZP+10% PP	17	1670	2,5
ZP+15% PP	17	1630	1,8

Všetky testované vzorky zmesí prekročili predpísanú hodnotu IBI (min=10%) pre použitie upravených zemín popolčekom ako sypaniny (Obrázok 4.). Hodnoty IBI okamžite po hutnení boli 11% a 16% pri neupravenej zemine ZP respektíve ZO. Najväčšia zmena nastala pri oboch vzorkách s 15% popolčeka. Hodnoty IBI vzrástli na 15% a 21%. Samostatné popolčeka nepreukázali hydraulické vlastnosti v zmesiach. CBR hodnoty po saturácii vzoriek s popolčekom PP sa nijak podstatne nezvýšili. Namerané hodnoty CBR boli 11 a 15%. V prípade vzoriek s PO sa hodnoty CBR zvýšili približne trikrát, a to z 4% na 11% (Obrázok 5.).



Obrázok 4. Závislosť hodnôt IBI zmesí zemín od podielu popolčeka



Obrázok 5. Závislosť hodnôt CBR zmesí zemín od podielu popolčeka

Pre zvýšenie hodnôt IBI a CBR je odporúčané do testovaných zmesí pridať hydraulické spojivo, ktoré by následne iniciovalo pucolánové vlastnosti popolčekom. Ďalej by spôsobilo aj iónovú výmenu medzi časticami zeminy a popolčeku, a tým by došlo k zvýšeniu pevnostných charakteristík upravovaných zemín.

4. Závěry a odporúčania

Otázka spracovávania elektrárenských popolčekom je v súčasnosti veľmi aktuálna, keďže ich normatívna základňa je v Českej republike dostatočne vysoká. Laboratórne testy ukazujú potenciál využitia kremičitých popolčekom z regiónu Moravy v cestnom stavitelstve. Na základe výsledkov vykonaných testov, popolčeky môžu byť využité pre mechanickú úpravu zemín (testy boli realizované pre sprašové hliny), bez prímiesí akýchkoľvek hydraulických spojív. V nasledujúcom výskume sa odporúča overiť parametre zmesí s rôznym obsahom vápna ako aktivátora pucolanity. V ďalšom kroku sa odporúča skontrolovať vlastnosti zmesí v rozsiahlych testoch na stavenisku za použitia vhodnej mechanizácie. V roku 2017 je plánované spustenie zemných prác na diaľnici D1. V marci tohto roku sa realizovali prvé zhutňovacie skúšky. Popolček z Predmostí Přerov PP je určený na použitie len ako sypanina do násypov. Jeho využitie ako spojiva sa zatiaľ neočakáva.

Poděkování

Práce byla podporována z prostředků Studentské grantové soutěže VŠB-TUO. Registrační číslo projektu je SP2017/155.

Literatura

- [1] AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION: Fly ash facts for highway engineers (FHWA), 2003, str. 47-52
- [2] KRESTA F.: Druhotné suroviny v dopravním stavitelství (VŠB-TU Ostrava), 2013, str. 54-66
- [3] MEZENČEVOVÁ A.: Možnosti zužitkovania energetických popolčekom, Acta Montanistica Slovaca 8, 2003, str. 146-151
- [4] KRESTA F.: Fly ash utilisation in road construction in Czech Republic, 5th symp. on ash, slag and waste landfills in power plants and mines, (Subotica), 2013, str. 118-125
- [5] KRESTA F.: Popílky z úložišť Předmostí a Prosenice – potenciální zdroj materiálu pro stavbu dálnice D1 v úseku Přerov – Lipník, Popílky ve stavebnictví 2015, (Brno), 2015, str. 141-51
- [6] ROCHOVANSKÝ M.: Vlastnosti popílků z úložiště Předmostí a možnost jejich zabudování do zemního tělesa dálnice v úseku Přerov – Lipník nad Bečvou, Diplomová práce, (VŠB TU Ostrava), 2016

-
- [7] ČSN EN 13286-2, Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška
- [8] ČSN EN 13286-47, Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání
- [9] ČSN EN 14227-15, Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 15: Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy
- [01] Technické podmínky TP 93, Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů, 2011
- [11] Technické podmínky TP 94, Úprava zemin, 2013

Kontakt

Ing. LUCIA BULÍKOVÁ, tel: +420 720 558 845, e-mail: lucia.bulikova@vsb.cz, VŠB – Technická univerzita Ostrava Ostrava FAST, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba.
doc. RNDr. FRANTIŠEK KRESTA, Ph.D., tel: +420 602 342 896, e-mail: frantisek.kresta@arcadis.com, VŠB – Technická univerzita Ostrava Ostrava FAST, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

UVOLŇOVÁNÍ OXIDU UHLIČITÉHO PŘI STANOVENÍ TEPLOT TAVITELNOSTI POPELE BIOMASY

Petr Buryan^{*)}, Pavel Donát^{**)},
Roman Snop^{**)}, Šimon Buryan^{***)}

*) Ústav plynný a pevných paliv a ochrany ovzduší, VŠCHT Praha,

**) ČEZ Energetické produkty, s.r.o.

***) Vysoká škola ekonomická v Praze

Anotace:

Laboratorní výzkum sledoval vlastnosti teploty popela z dřevěných odštěpků, získaných v souladu s příslušnými postupy. Při zahřátí, popílký významně uvolňovaly oxid uhličitý, který měl vliv na určenou charakteristiku teploty. Tento negativní efekt je způsoben kalcinací uhličitánů při zahřívání sledovaných subjektů podle předepsaných postupů.

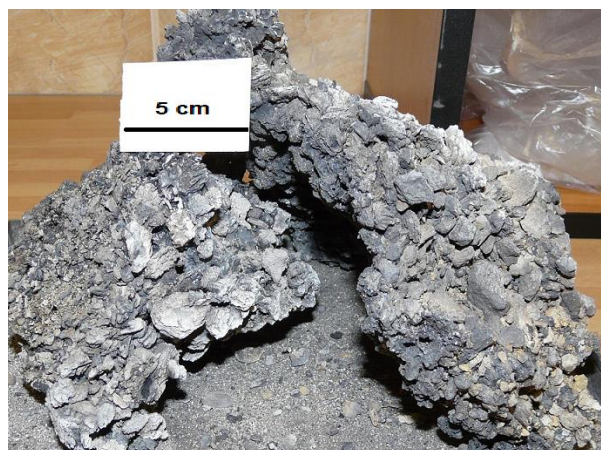
Annotation:

The conducted laboratory research did monitor characteristics of temperature of ash wood chips, which were gathered according to the applicable procedures. When heated, ashes significantly exposes carbon dioxide, which has affect on the determined characteristic of temperatures. This negative effect is caused by the process of calcination of carbonates present in ash during heating monitored bodies in accordance with prescribed procedures.

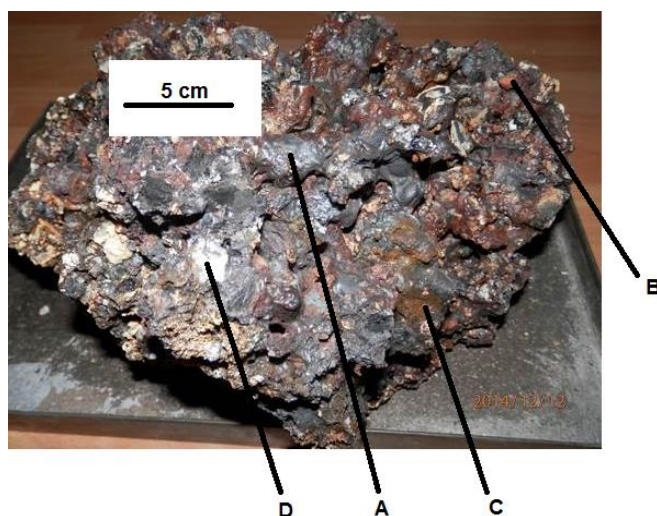
1. Úvod

Spolu s tím jak roste podpora využívání biopaliv v energetice, objevují rozmanité provenience a mnohé nečekané problémy spojené jak s exploatací, tak s deponováním vedlejších energetických produktů, které jsou certifikované stavební materiály dle nařízení REACH. Celé spektrum problémů se začalo uplatňovat ve spojitosti se spékáním popelů těchto materiálů. Zásadně se tyto problémy projeví i při spalování biopaliv a hnědého i černého uhlí, či práškového a hrubozrnného uhlí. V ohništích se vytváří inkrusty, které mají potenciál dosahovat velikosti od několika cm až po desítky cm, jak je vidět v obr. 1 a 2. Vznikající inkrusty obsažené následně v pevných vedlejších energetických produktech determinují i jejich následné využití a to zejména v technologiích, které jejich přítomnost nepředpokládaly.

Charakteristické pro vynikající inkrusty je přítomnost skelné fáze a mnoho bublin souvisejících s uvolňováním plynů během pyroplastického stavu popelů.



Obr. 1 Inkrusta ze spalování hnědého uhlí a dřevní štěpky ve fluidním kotli



Obr. 2 Inkrusta ze spalování hnědého uhlí a dřevní štěpky ve fluidním kotli

A - D - viz tabulka 1

Tabulka 1 Složení vměšků - částí A - D - % hm.

Oxid / místo odběru	A	B	C	D
Na ₂ O	0,46	0,13	0,26	0,24
MgO	1,73	21,10	0,94	0,82
Al ₂ O ₃	21,96	11,35	28,00	25,28
SiO ₂	45,69	37,35	54,60	65,70
K ₂ O	1,10	0,61	1,55	1,90
CaO	12,07	1,20	1,76	1,16
Fe ₂ O ₃	13,20	25,63	10,05	0,29

Spoluspalování biopaliv včetně alternativních zahrnujících ve svém složení i odpadní biomateriály přináší v různých typech topenišť i negativní problémy souvisejících s obalováním povrchů vápenců a dolomitů aplikovaných k odsiřování [1-3]. To je spojeno s nezanedbatelným nárůstem nákladů na odsiřování, včetně s nárůstem hmotnosti vznikajících vedlejších energetických produktů obsahujících nezanedbatelné množství „volného CaO“. Navíc dle pravidel EU vstupuje v platnost 1. 1. 2016 nový emisní limit pro SO₂ - 200 mg SO₂.m⁻³ spalin. To prohloubí diskutovaný problém, včetně využití vedlejších energetických produktů s vysokým obsahem poměrně reaktivního „volného CaO“.

Samotné vedlejších energetických produktů jsou považovány za chemickou látku, které jsou na úrovni EU řízeny nařízením REACH [19].

Je zřejmé, že tyto problémy jsou spojeny s nízkými teplotami tavitelnosti popela (TTP) biopaliv, které jsou definovány jako teploty, při kterých nastávají fyzikálně chemické změny ve struktuře popela. Nyní jsou určovány prostřednictvím definované úrovně deformace zkušebních tělísek [4]. Charakteristické TTP v oblasti energetického využití pevných paliv jsou sledovány převážně čtyři - teplota sintrace t_s , měknutí t_a , tání t_b a tečení t_c .

Metodika jejich určení spočívá v záhřevu sledované matrice s cílem získání popela. Následně ve vytvoření zkušebních definovaných tělísek a v jejich vizuálním sledování v průběhu definovaného ohřevu. Stupně jejich deformace potom definují jednotlivé charakteristické TTP.

V postupu, který byl vyvinut pro popely tuhých fosilních paliv [4-8], hraje významnou úlohu jeho příprava, protože během žíhání popela může docházet k chemickým proměnám popelovin. Tzn., že již samotný proces získání popela může významně ovlivnit výsledky stanovení TTP.

2. Současné metodicky

Jak bylo podrobně diskutováno v [4] do roku 2006 pro určování TTP biomas spalovaných v různých energetických zařízeních byly běžně aplikovány metodiky pro tuhá fosilní paliva [5-8], protože jiný usanční postup ještě neexistoval. Problematiku určování charakteristických TTP biomasy začala determinovat CEN [9]. Doporučený postup začal být v ČR využíván v roce 2010 [10].

Při procesu získávání popela definují metodiky cílené na biopaliva požadavek při přípravě popela na aplikaci maximální teploty žíhání na 550 °C. Tepelným zdrojem energie při žíhání biopaliva je i samotné jeho hoření, což by mohlo způsobit lokální navýšení teploty. Pro omezení tohoto procesu je předepsán ohřev stupňovitý, resp. s malým tepelným gradientem. Pokud by při přípravě popela došlo k překročení požadovaných maximálních teplot pro biomasu, mohly by ve struktuře popela proběhnout změny spojené se sintrací. Takovýto popel je pak pro potřeby dalších stanovení charakteristických TTP biomasy znehodnocen. Přes tato opatření, včetně drcení zrn popele pod 0,075 mm mnohé popely při určování charakteristických TTP vykazují vývoj nežádoucích plynů, které bortí pracně z nich připravované hranolky.

Proces sledování těchto tělísek spojený se změnami jejich relativních rozměrů, včetně popis přístrojů pro tato sledování je normami definován poměrně stručně. Norma [6] definuje pro sledování optický přístroj, který umožňuje pozorovat profil zkušební vzorku během stanovení; přičemž relativní rozměry profilu mohou být vhodně doplněny nitkovým křížem. Použití kamery se doporučuje, je ale volitelné, není vyžadované.

Optické nebo optoelektrické vyhodnocování pohledové plochy tělíska popelů z biomas je problematické, protože při jejich zahřívání nedochází primárně ke smrštění, ale často k nadouvání. Tvorba bublin způsobuje zvětšení pohledových ploch. Tělíska se často naklánějí, někdy i převracejí. Zejména v případech, kdy se bubliny tvoří u základové hrany tělíska. Na uvolňování plynů spojených s tvorbou bublin normy neupozorňují, resp. ani nepopisují jejich zdroj.

Na vysvětlení jejich vzniku je zaměřen předložený materiál.

3. Experimentální část

3.1 Sledované suroviny

Studium procesů vzniku plynů při sledování TTP biomasy bylo zaměřeno na typickou dřevní štěpku využívanou v elektrárnách ČEZ. Z celé škály dosažených výsledků jsou zde prezentovány údaje týkající se základních parametrů dřevní štěpky - tabulka 2 a složení vzorků popelů dřevní štěpky získaných cíleně spálením při 500 a 600°C (gradient ohřevu 5°C/min) za přítomnosti vzduchu prostřednictvím XRF metody - tabulka 3. Tyto teploty byly zvoleny záměrně, jelikož norma [10] doporučuje 550 °C, což je o 50 °C výš a níž.

Tabulka 2 Parametry dřevní štěpky

Parametr	% hm.
W^r	46,11
A^r	2,55
Prvek	
C^r	26,31
H^r	3,09
N^r	0,24
S^r	0,05

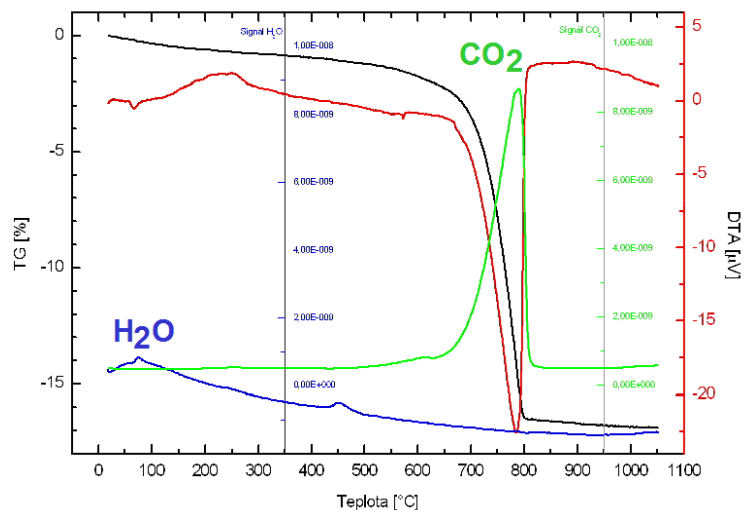
Tabulka 3 Složení popelů dřevní štěpky - % hm.

Oxid/teplota	500	600
Na ₂ O	0,63	0,58
MgO	3,98	4,16
Al ₂ O ₃	7,26	7,60
SiO ₂	32,32	39,47
P ₂ O ₅	3,05	3,49
SO ₃	8,13	2,27
Cl	0,12	0,53
K ₂ O	6,98	9,33
CaO	30,75	25,69
TiO ₂	0,64	0,67
V ₂ O ₅	0,01	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01
MnO	1,91	2,47
Fe ₂ O ₃	3,70	3,66
CuO	0,02	0,02
ZnO	0,15	0,14
Rb ₂ O	0,02	0,02
SrO	0,09	0,07
ZrO ₂	0,02	0,03
BaO	0,22	0,24
NiO	0,02	0,01

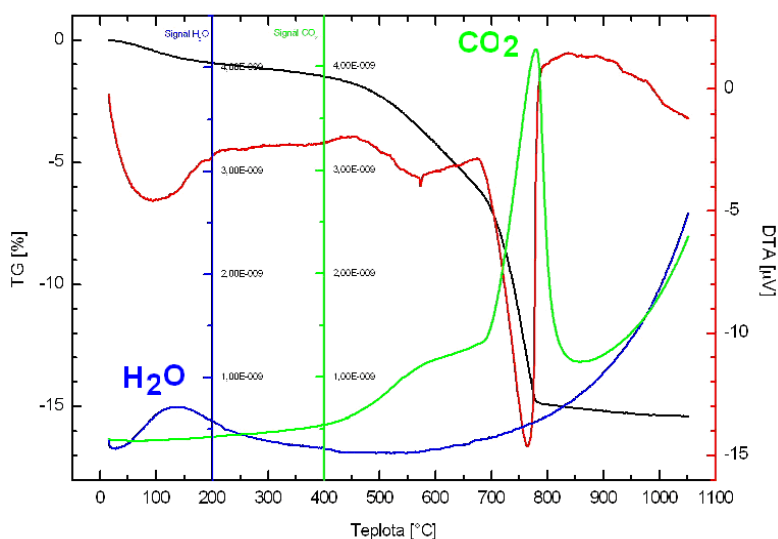
3.2 Sériové zapojení termogravimetrie a hmotnostní spektrometrie (TG – MS)

Vývoj plynů ze zahřívání popelů dřevní štěpky v oblasti teplot 20 až 1050°C byl sledován pomocí přístroje Setaram Setsys Evolution 1700. Navážka popelů činila 30 mg, rychlost ohřevu byla 10 °C/min., průtok vzduchu byl 20 ml/min.

Zaznamenaný vývoj oxidu uhličitého a vody je uveden na obrázcích 3 a 4. Vznik oxidu uhelnatého nebyl zaznamenán.



Obr. 3 TG – MS analýza popele dřevní štěpky získaného při 500 °C



Obr. 4 TG – MS analýza popele dřevní štěpky získaného při 600 °C

Ze získaných poznatků tím nejvýznamnějším je zjištění, že z plynných komponent dominantním je oxid uhličitý. Tzn., že uhlík vázaný v organické části dřevní štěpky musí vytvářet při jejím spalování za sledovaných teplot uhličitany. Tyto při záhřevu podléhají kalcinaci a vytvářející se CO_2 způsobuje již zmíněné problémy spojené s určováním charakteristických TTP.

Jak dokumentují výsledky měření, z popele dřevní štěpky získaného při 500 °C se CO_2 počal vyvíjet při cca 600 °C s maximem při cca 780 °C. Z popele získaného při 600 °C se CO_2 začal vyvíjet již při cca 400 °C, přičemž v tomto případě byla zjištěna dva maxima jeho vývoje. První bylo při cca 550 °C, druhé při cca 780 °C.

Vývoj CO_2 z popele získaného při 500 °C ustal asi při 820 °C, z popele získaného při 600 °C jeho vývoj vzrůstal i za teplot vyšších než 850 °C.

Z pohledu hodnocení termických rozkladů uhličitánů lze zde uvést tabulku 4, ve které jsou shrnuta vybraná data řady autorů [12, 13], kteří metodou DTA určovali teplotu počátku jejich rozkladu t_1 a teplotu, při níž probíhá endotermní maximum t_2 . Obě tyto hodnoty korespondují s námi sledovanou problematikou.

Tabulka 4 Termické chování uhličitánů - °C

Substance	t_1	t_2
Siderit (FeCO_3)	500	575
Magnezit (MgCO_3)	540	700
Dolomit ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$)	750	800
Kalcit (CaCO_3)	850	975
Cerrusit (PbCO_3)	260	360
ZnCO_3	260	500
Whitherit (BaCO_3)	790	>1050
Li_2CO_3	610	700
Cs_2CO_3	690	750
Na_2CO_3	795	820
K_2CO_3	820	890

Druhou identifikovanou plynnou komponentou uvolňující se ze zahřívání popelů dřevní štěpky za daných termodynamických podmínek byla voda. Ta se z popele získaného při 500 °C nejvíce uvolňovala za teplot nižších než 100°C. Na rozdíl od popele získaného při 600 °C, kde její uvolňující se množství vzrůstalo za teplot vyšších než cca 600 °C. Její přítomnost ve sledovaných popelech lze ale spíše přisoudit hydratačním reakcím komponent popele se vzdušnou vlhkostí před měřením.

Obecně lze ze zjištěných dat dovodit, že uhlík biomasy při hoření za sledovaných námi teplot nepřechází plně na oxidy uhlíku, ale část vytváří pevné uhličitany, které se zachytí v popelu.

Za důležité zjištění je nutné považovat i to, že klasickými analytickými postupy pro elementární analýzu používající spalování a stanovení oxidu uhličitého ve spalinách [14-16] nelze určovat nedopal v produktech spalování biomasy za teplot nižších než je ukončena kalcinace. Při těchto postupech dochází ke zkreslování dat týkajících se stanovovaného uhlíku. Je proto vhodné při hodnocení různých nedopalů aplikovat i postup [17,18] který je zaměřen na stanovení oxidu uhličitého z uhličitánů aplikovaný zejména při rozborech tuhých paliv a produktů jejich spalování.

Při hodnocení energetického obsahu hořlaviny biomasy, resp. energetické účinnosti jejich spalování je nezbytné mít taktéž na paměti teplotu jejího spalování, resp. energii potřebnou pro kalcinaci uhličitánů v hodnoceném procesu a uplatňující se termodynamické podmínky. Kalcinace je endotermní reakce a s její energetickou náročností řada aplikovaných bilančních energetických výpočtů neuvažuje.

Při posuzování možností vzniku inkrustů - jak dokumentuje tabulka 4 - je dále nezbytné zohledňovat i složení popele uhlí. Oxidy vzniklé jeho spalování vytvářejí spolu s produkty spalování biomasy sklovitou substanci, kde se vedle alkalických kovů nezanedbatelně angažuje železo za vzniku feritů. U hnědých uhlí to je spojeno zejména s koncentracemi pyritu.

3.3 Diferenciální termická analýza (DTA)

Posuzování vzniku inkrustů taktéž souvisí i se vznikem různých eutektik během spalování vznikajících jak ze spalovaných energetických surovin, tak i z odsiřovacích komponent dávkovaných do ohnišť při suchých odsiřovacích postupech. Teploty jejich vzniku z předem samostatně získaných popelů při 500 a 600 °C charakterizovaných v tabulce 5 při jejich prvním a opakovaném záhřevu (týkající se zejména fluidních loží) v Pt kelímku na 1050°C gradientem 10 °C/min. za průtoku vzduchu 20 ml/min. jsou zřejmé z obrázků 5 a 6.

Tabulka 5 Charakteristika modelových směsí popelů

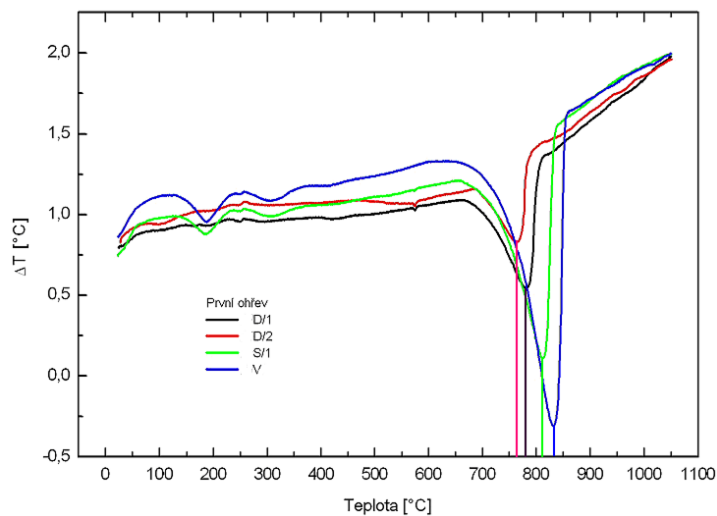
Teplota spalování 500 °C	Charakter	Poměr - %	Označení
Dřevní štěpka		100	D/1
Směs S/1	dřevní štěpka + vápenec	50 : 50	S/1
Teplota spalování 600 °C			
Dřevní štěpka		100	D/2
Vápenec		100	V

Z presentovaných dat vyplývá, že eutektikum popele dřevní štěpky získaného při 600°C má maximum cca 15 °C níž než popele dřevní štěpky získaného při 500°C. Přídavek popele z dřevní štěpky získaný při 500°C snižuje eutektikum vápence o cca 30 °C.

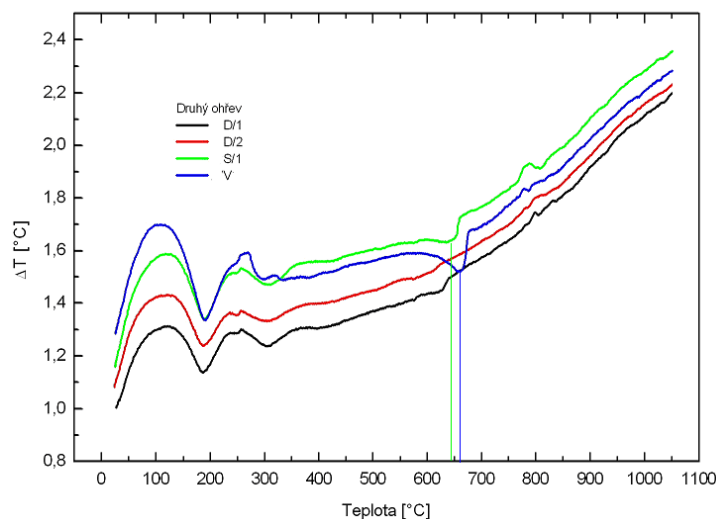
Za podnětné je však nutné označit data z opakovaného záhřevu kalcinovaného vápence a již jednou zahřáté jeho směsi s popelem dřevní štěpky na 1050°C. Samotný, již jednou zahřátý vápenec na 1050°C, vytváří nové eutektikum o teplotě nižší o cca 180°C. Tzn., že při prvním záhřevu samotného vápence se vytvořily komponenty, které při jejich opakovaném ohřevu vytvářejí eutektikum s výrazně nižší teplotou.

Totéž se týká již jednou zahřáté směsi popele dřevní štěpky a vápence na 1050°C. I v tomto případě se vytváří z produktů termolýzy nové eutektikum s maximem při cca 645°C.

Je tedy možné oprávněně předpokládat, že komponenty vzniklé při spalování spojeném s recirkulací mohou vytvářet tající směsi za významně nižších teplot při opětovném vstupu do ohniště po zchladnutí než při prvotním spalovacím cyklu. Tyto reakce budou tedy negativně ovlivňovat odsíření fluidních kotlů aplikujících vápence.



Obr. 5 Porovnání DTA křivek prvního ohřevu



Obr. 6 Porovnání DTA křivek druhého ohřevu

4. Závěr

Využití norem původně vyvinutých ke stanovení charakteristických termických teplot uhelných popelů u popelů biomasy naráží na problémy spojené s uvolňováním plynů ze zkušebních tělísek připravených usančními postupy.

Sériovým zapojením plynového chromatografu a hmotnostního spektrometru bylo prokázáno, že z popele dřevní štěpky získaného při 500 a 600°C se uvolňuje oxid uhličitý z uhlíčitanů vznikajících při jejím spalování. Doporučujeme proto se problémem TTP dále podrobně zabývat a postupně normovaný postup upravit a zpřesnit. Bude zde, s velkou pravděpodobností, nutné vyvinout i úplně nové postupy využívající v této oblasti dosud neaplikované fyzikálně-chemické principy.

Literatura

- [1] Buryan P, Negativní vliv spoluspalování biomasy na odsíření fluidních kotlů, *Chemické listy* 108, (12) 1162-1167 (2014).
- [2] Buryan P.: : Vliv tuhých alternativních paliv na odsíření fluidních kotlů, *Chemické listy* 109, 635-640 (2015).
- [3] Buryan P., Vejvoda J., Krátký J., Veverka L.: The Causation High Consumption of Limestone in Coal Fluidized Bed Boiler Desulfurization, *Ceramic – Silikaty* 54, (1) 85-88 (2010).
- [4] Horák J., Branc M., Straka F., Buryan P., Kubesa P., Hopan F., Krpec K., Mikulová Z.: Problematika stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popela biomasy, *Chemické listy* 107, (6) 502 - 509 (2014).
- [5] ČSN 44 1359: *Tuhá paliv, Stanovení tavitelnosti popela.*
- [6] ČSN ISO 540: *Tuhá paliva, Stanovení tavitelnosti popela – Vysokoteplotní metoda s trubící.*
- [7] ASTM D 1857-87: *Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash.*
- [8] DIN 51730: *Testing of Solid Fuels, Determination of Fusibility of Fuel Ash.*
- [9] DD CEN/TS 15370-1: *Solid biofuels. Method for the determination of ash meeting behaviour, Characteristic temperatures method.*
- [10] ČSN P CEN/TS 15370-1: *Tuhá biopaliv, Metoda pro stanovení teploty tání popela Část 1: metoda stanovení charakteristických teplot.*
- [11] ČSN P CEN/TS 15404: *Tuhá alternativní paliva, Metody pro stanovení teploty tání popela stanovením charakteristických teplot.*
- [12] Kerr P.F., Kulp J.L.: Thermal study of the carbonate minerals, *Am. Mineral.* 33, 411 – 423 (1948).
- [13] Atlas of thermo analytical curves, ed. Liptay G., Budapest, 1975.
- [14] ČSN ISO 625 *Liebigova metoda.*
- [15] ČSN ISO 609 *Vysokoteplotní spalovací metoda.*
- [16] ČSN EN 15104 *Stanovení elementárního složení tuhých paliv.*
- [17] ČSN 441355 *Stanovení uhlíku a vodíku z nedopalu.*
- [18] ČSN ISO 925: *Tuhá paliva, Metoda stanovení oxidu uhličitého z uhlíčitanů.*
- [18] ECHA. Substances registered. Dostupné na: <http://echa.europa.eu/information-on-chemicals/registered-substances> [cit. 03-03-2017].

Kontakt

Prof. Ing. PETR BURYAN, DrSc. Ústav plynný a pevných paliv a ochrany ovzduší, VŠCHT Praha,
e-mail: buryanp@vscht.cz

UPLATNĚNÍ HYDROGEOLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ PŘI UKLÁDÁNÍ VEP

HYDROGEOLOGICAL MODELING FOR THE ENVIRONMENT OF SECONDARY FLOAT ENERGY BY-PRODUCTS

Černoch Petr, Košťál Jiří

INSET s.r.o., ČEZ Energetické produkty, s.r.o.

Anotace:

Pro predikci chování hydrogeologického prostředí při ukládání VEP je vhodné využít hydrogeologické modelování. Před simulacemi je vhodné nejprve realizovat dlouhodobý monitoring, aby byla získána relevantní vstupní data a model mohl být verifikován. Hydrogeologické modelování lze využít nejen pro odhalení geotechnických rizik, ale i pro možnost modelování potenciálního transportu kontaminantů vně řešenou oblast.

Annotation:

For predicting the behavior of the hydrogeological environment while storing secondary float energy by-product is appropriate to use the hydrogeological modeling. The implementation of long-term monitoring relevant input data is suitable and as an application for verification as well. The modeling can be used not only for detection of geotechnical risks, but also for the transport of contaminants.

Klíčová slova:

Hydrogeologické modelování, dlouhodobý monitoring, verifikace, geotechnická rizika, transport kontaminantů

Keywords:

Hydrogeological modeling, long-term monitoring, verification, geotechnical risks, transport of contaminants

1. Úvod

Při ukládání vedlejších energetických produktů (dále jen VEP) z uhelných elektráren vystává několik zásadních otázek s vazbou na okolní životní prostředí (ŽP) a na možná geotechnická rizika.

V rámci provádění sanací a revitalizací bývalých odkališť pomocí ukládání VEP je nutné upozornit na zásadní fenomény vlivu zájmové stavby na ŽP a geotechnické problémy: nárůst hladiny podzemní vody a vliv přetížení [1]. Ukládáním VEP – přetížením – se může vrstva těchto materiálů prohýbat a v důsledku toho v ní mohou vznikat otevřené tahové trhliny. Proto je dobré věnovat velkou pozornost analýze změn, které mohou nastat po překrytí bývalých odkališť sanační vrstvou. Hrozí zejména nebezpečí ovlivnění lokální stability některých částí stavby, ale i celkové stability v širším okolí, zejména při zvýšení vztlaku na bázi stavby [2]. Zároveň může dojít k obnově, respektive změně odtokových poměrů podzemní vody a následně k transportu potenciálních kontaminantů z bývalých odkališť do okolního ŽP.

Výše uvedená rizika mohou být včas odhalena a následně eliminována díky realizaci hydrogeologických modelových výpočtů, zabývajících se simulací změn v odtokových poměrech vyvolanými ukládáním VEP – jedná se zejména o typické úlohy sledování vlivu změn hydrorežimu na stabilitu odkaliště, ověření možného šíření potenciálního znečištění v zemním saturovaném prostředí a vývoj HPV při různých variantách řešení celkového zkapacitnění a rekultivace stavby [3], [4].

Hydrogeologické modelování je poměrně složitá a časově náročná úloha, při zadání kvalitních vstupních dat a zvolených okrajových podmínek ovšem dává věrohodné a relevantně přesné výsledky. Zdrojová data pro veškeré simulace jsou klíčová – proto by každému modelování měl ideálně předcházet vhodně zvolený dlouhodobý monitoring, ze kterého vstupní data vyplynou. Model je pak možné nasimulovat tak, aby věrohodně pokryl a zohlednil všechny vazby na širší okolí, a následně je nutné jej verifikovat. Jedním ze zásadních výstupů modelování je průběh ustáleného proudění podzemní vody, který lze následně použít pro detailnější studie. Pro tyto studie pak průběh ustálené hladiny podzemní vody slouží jako okrajová podmínka, kterou je velmi obtížné až nemožné (v takto složitých poměrech jako jsou prostředí odkališť) získat klasickým monitoringem, který by musel být neúměrně rozsáhlý a nákladný. Hydrogeologické modelování proto slouží jako jeho adekvátní ekvivalent. Zároveň je vhodné v předstihu realizovat doplňující terénní zkoušky pro zjištění potřebných hydrodynamických parametrů modelovaného geologického prostředí.

2. Zájmová stavba

2.1. Historie a současný stav

Modelovou lokalitou je severní část bývalého odkaliště, které se skládá ze dvou částí, přičemž jižní část (odkaliště I) je v současné době již zrehabilitována a severní část (odkaliště II) je využívána jako úložný prostor pro řízené ukládání VEP z blízké elektrárny.

Bývalé odkaliště I je situováno v terénní depresi – přehrazeném údolí bývalého říčního toku, který byl v minulosti přeložen a částečně zatrubněn. Výstavba odkaliště byla zahájena již v roce 1967 budováním základní hráze s korunou na kótě 239 m n. m. Konstrukčně šlo o téměř 16 m vysokou homogenní hráz, pravidelně zvyšovanou po 3 m vysokých krocích. Dosaženo tak bylo definitivní výšky 263 m n. m. Hydraulický provoz (plavení popela) na odkališti I byl ukončen v roce 1990 na základě výpočtů stability hrázového systému pro další zvyšovací hráz, který konstatoval nemožnost dalšího zvyšování odkaliště bez nutné sanace základní hráze.

Odkaliště II se nachází v prostoru bývalého povrchového lomu, těžba hnědého uhlí zde byla ukončena v roce 1983. Zbytková jáma lomu měla nejhlubší místo přibližně 25 m pod povrchem původního terénu, na kótě 222 m n. m. Jednalo se o svažitý terén ukloněný směrem k V až VJV. Před zahájením plavení byly v centrální části zbytkové jámy postaveny dvě přepadové věže pro jímání vratné vody (obr. 1). Hydraulický provoz odkaliště (plavení strusky) byl zahájen v roce 1990 a v dnešní době pokračuje s provozní hladinou nepravidelně oscilující okolo úrovně 250 m n. m.

S ukončením plavení strusky je počítáno mezi lety 2017 až 2018. Od doby odsíření elektrárny pomocí mokré vápencové vypírky je na povrchu popelové pláže odkaliště II modelována předrekultivační úprava pro obnovu krajiny pomocí certifikovaného výrobku – stabilizátu – připraveného ze směsi popílku s vápnem, odpadní vodou, aj. Produkt je připravován v míchacím centru jako zavlhá směs a je dopravován do prostoru stavby pomocí trubkových dopravníků. Na místě je pak rozvážen nákladními auty a následně rozprostírán do vrstev a hutněn.



Obrázek 1.: Plavení strusky do zbytkového jezera (v pozadí přepadová věž)

2.2. Geologické a hydrogeologické poměry zájmové lokality

Z regionálně geologického hlediska spadá zájmová stavba do mostecké části severočeské hnědouhelné pánve, nejstarší stratigrafické jednotky představují krušnohorské krystalinikum a permokarbon. Na povrch nikde nevystupují, nasedají na ně subhorizontálně uložené horniny svrchní křídly (od sladkovodního cenomanu až po coniak).

Křídové sedimenty jsou zde reprezentovány jílovitými pískovci a písčítými jílovcí a slínovci, lokálně s glaukonitem. Terciární sedimenty tvoří převážnou část předkvartérního podkladu a vycházejí na povrch hlavně v sz. části zájmové stavby. Na relikty oligocénu ve formě písků nasedá miocenní sedimentace po stratigrafickém hiátu – komplex neogenních hornin vulkanogenního původu, tvořených tufy a tufity, místy bazalty.

Nad vulkanity se vyskytuje souvrství podložních jílu a písků, jehož svrchní část je tvořena šedými jíly s četnými uhelnými polohami a tzv. bazální slojkou. Nad slojí se nachází souvrství nadložních jílu a písků [5].

Předkvartérní podklad je zakryt v širším okolí stavby převážně eolickými, deluviálními a fluviálními sedimenty. Na morfologii zájmového území se významně podílí antropogenní sedimenty, představované v první řadě materiálem vnitřní a vnější výsypky z doby těžby uhlí a VEP. Eolické sedimenty jsou zastoupeny sprašemi a sprašovými hlínami a tvoří převážnou část přirozeného kvartérního pokryvu.

Díleč tektonické struktury nebyly v zájmovém území vzhledem k mocným kvartérním pokryvům přímo zmapovány, avšak pravděpodobný je zlom směru SZ – JV, omezující parovinu bývalé uhelné pánve. Lze předpokládat, že i původní údolí potoka, v němž je situováno bývalé odkaliště I, je tektonicky predisponováno.

Z pohledu hydrogeologických (HG) poměrů lze v širším okolí stavby rozlišit následující průběžné zvodněné horizonty podzemní vody.

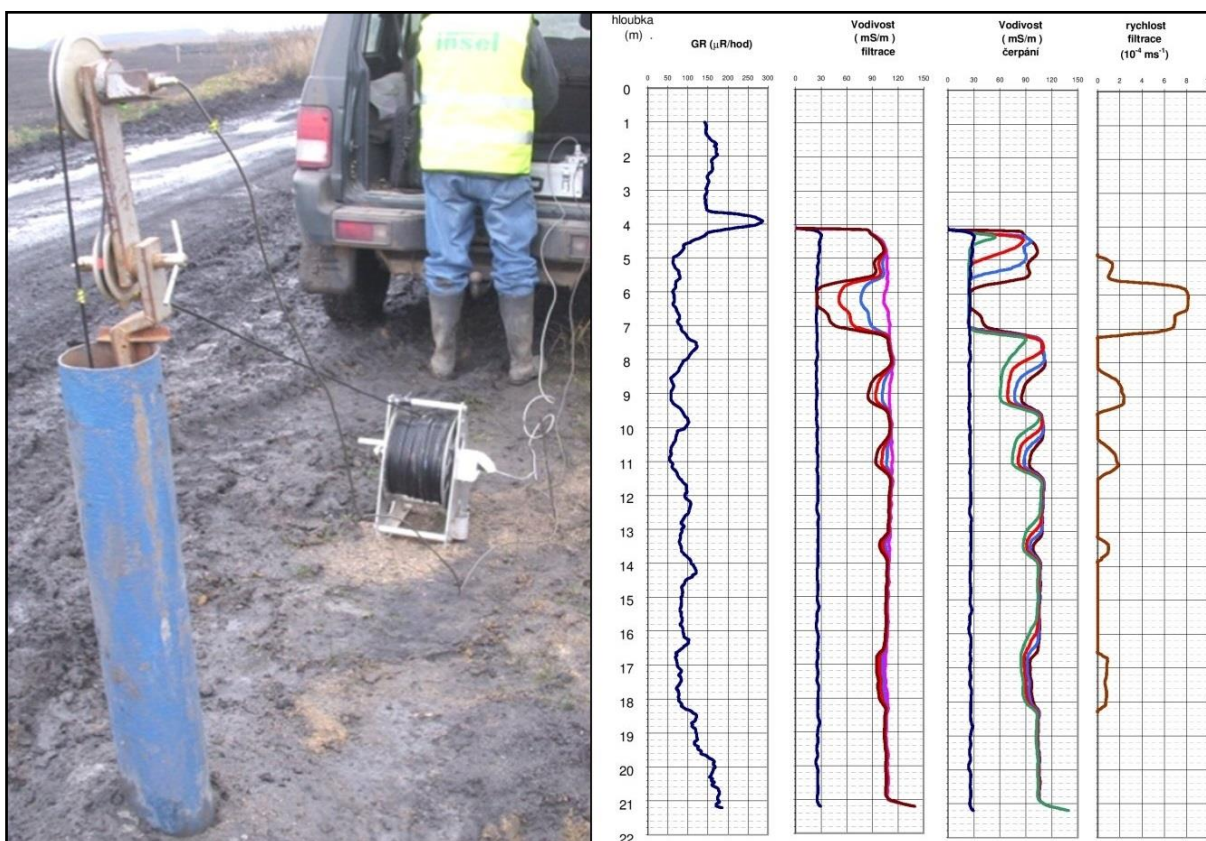
Horizont mělké podzemní vody se vyskytuje obzvláště ve fluviálních sedimentech (písčité štěrky).

Hlubší zvedň je vázána na uhelnou sloj. Tato voda pravděpodobně pochází z nadložních propustných štěrků a infiltruje jen v oblastech výchozů sloje pod štěrky. Výchozové partie oxyhumolitů jsou poměrně dobře propustné. Sloje jsou zachovány zvláště při jv. okraji bývalého odkaliště II, kde byly překryty výsypkou. Další infiltrační plocha povrchu výchozů uhelných slojí byla zakryta v s. části pánve deluviálními, zahliněnými štěrky, v j. části propustnými štěrky. V čedičových příkrovech lze očekávat pouze malé množství puklinové podzemní vody, v místech jílovitého podložního souvrství nebo tufitických jílu lze hovořit o izolátorech. Křídové jílovce a slínovce nemají vlastní horizont průlinové podzemní vody. Souvrství je prakticky nepropustné, pouze v povrchových rozvolněných partiích je malé množství puklinové podzemní vody, které je navíc ovlivněno jílovitým charakterem výplně [5].

Uvnitř úložného prostoru (odkaliště II) lze očekávat hladinu podzemní vody (HPV) na kótě cca 253 m n. m., průběh je ovlivněn zejména volnou hladinou u přepadových věží (obr. 1). Těžbou, výstavbou elektrárny a následným provozováním odkališť došlo k zásadním změnám původních přirozených hydrogeologických poměrů.

3. Terénní zkoušky, hydrogeologický a geotechnický monitoring

Monitoringu zájmové stavby předcházely doplňující zkoušky in situ pro získání příslušných hydrodynamických parametrů geologického prostředí. Ve vybraných pozorovacích sondách byly provedeny karotážní měření (obr. 2) a hydrodynamické zkoušky (HDZ – čerpací a stoupačké zkoušky). Z výsledků měření byly získány potřebné hydraulické údaje a směry proudění podzemních vod v místech sond.



Obrázek 2.: Karotážní měření ve vrtech (včetně vyhodnocení)

Kontrolní sledování trvající po dobu jednoho roku spočívalo v monitorování vývoje úrovní HPV (včetně korelace s hydrometeorologickými daty ČHMÚ) a sezónních změn v chemickém složení vod v pozorovacích sondách a v pravidelné terénní rekognoskaci. Dále byla získávána geotechnická (GT) data z měření pórových tlaků instalovaných ve vrtech v odkališti I a II. Rozsah pozorovacích prvků byl zvolen tak, aby postihl celé širší hydrogeologické území stavby s jeho možným ovlivněním. Vytipování sond bylo též závislé na předpokládaném směru proudění vod (přítoky a odtoky) s ohledem na geologické poměry (geneze a charakter zvodní) pro účely sestavení HG modelu. Celkem bylo sledováno 10 hydrovrtů, 2 místa průsakových vod a 2 místa zahrnující přirozené, odkalištěm neovlivněné pozadí. HG a GT měření bylo prováděno s měsíční periodou, aby co nejlépe postihlo oscilace a sezónní změny úrovně HPV. Četnost provádění chemických analýz byla 1x čtvrtletně

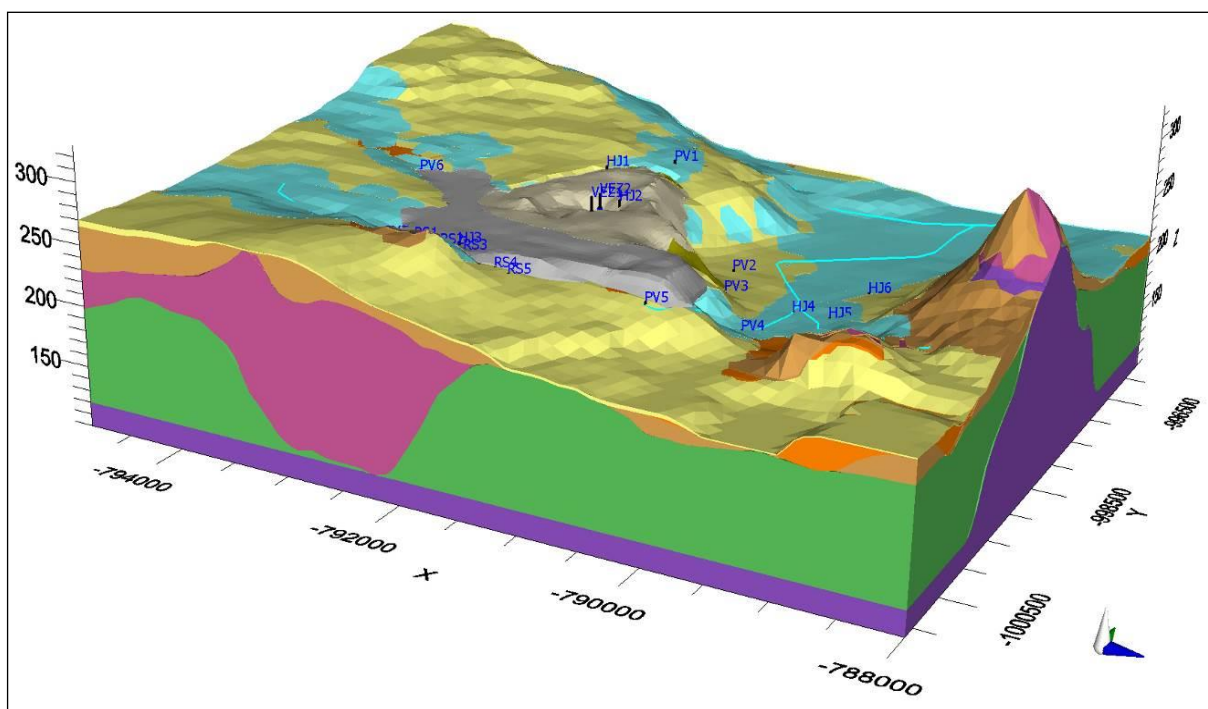
Z realizovaného ročního monitoringu lze konstatovat, že u většiny pozorovacích sond nedošlo v průběhu měření k výrazným zaklesáváním či vzduším hladin. Zjištěné hodnoty vybraných ukazatelů geochemie vod byly při zohlednění sezónních změn prakticky u všech pozorovacích prvků víceméně konstantní. Z porovnání zjištěných úrovní HPV a chemismů s pravidelným monitoringem zájmové stavby prováděným v minulosti vyplynula korelovatelná shoda.

Zaznamenané hodnoty měřidel pórových tlaků (MPT) zdokumentovaly ustálené napětí obou pozorovacích objektů bez výrazných anomálií. Nedocházelo k nárůstu pórových tlaků, které by znamenaly zvýšené množství vod protékajících tělesem zájmové stavby v úrovni instalovaných MPT. Terénní rekognoskace byly zaměřeny primárně na dokumentaci povrchu odkaliště, zemních těles, zakládáních VEP a dotčeného okolí úložného prostoru. Během pravidelné terénní pochůzky nebyla zjištěna žádná významnější místa lokálního zvodnění, povrchového porušení ronovou erozí, či lokální povrchové deformační projevy [5].

Veškeré zjištění a závěry z ročního monitoringu předmětné stavby posloužily jako podklad pro sestavení HG modelu – dosažené výsledky z terénních zkoušek (karotážní měření a HDZ) a dlouhodobého monitoringu byly implementovány do numerického modelování.

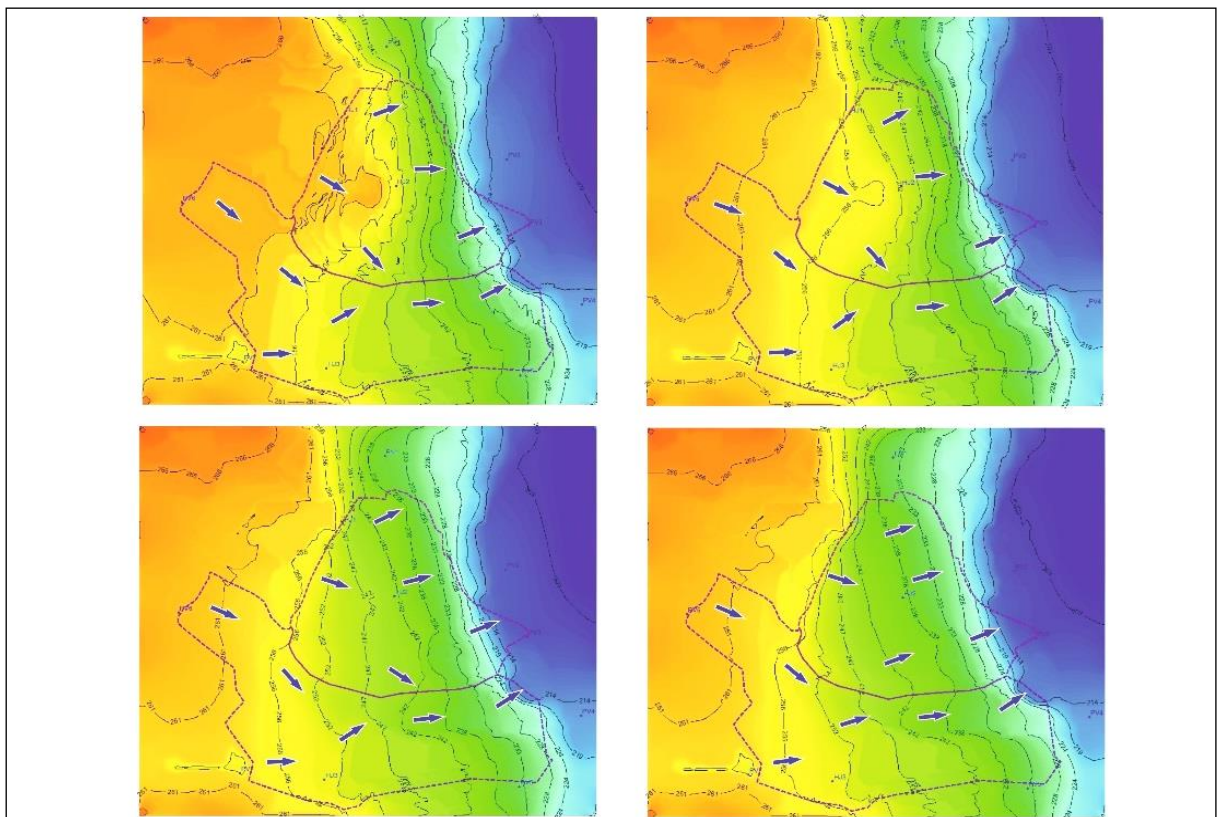
4. HG model proudění podzemních vod a transportu kontaminantů

Nejprve byl sestaven konceptuální geologický 3D model zkoumaného území (obr. 3), poté bylo možné vytvořit numerický model zavedením výpočetní sítě, okrajových a počátečních podmínek. Pro výpočet proudění podzemní vody a transportu kontaminantů v saturovaném zemním prostředí byl využit program Visual ModFlow Flex v. 2015.



Obrázek 3.: Geologický prostorový model

Hydrogeologický model zahrnoval atypicky velké území, cca 7 x 5,5 km s téměř 200 m výškového rozdílu. Nejprve bylo nezbytně nutné vygenerovat hydrogeologický model širší oblasti s ustáleným prouděním podzemní vody, vně obou odkališť. Pro následné řešení detailních studií byly proto výsledky modelu ustáleného proudění podzemní vody využity jako vstupní okrajová podmínka – z modelu průběhu ustáleného proudění vyplynulo, že se dominantní přítoky podzemních vod do bývalého odkaliště II odehrávají ze štěrkopískové zvodně (sz. strana). Gravitační odtok z bývalého odkaliště II je vzhledem k HG skladbě v části omezen na kótu cca 246 m n. m., směr odtoku podzemní vody z lokality probíhá generelně k V. Výsledný průběh HPV v odkališti I je nepravidelný, mírně ukloněný k V. Přelivná hrana mezi oběma odkališti se nachází v nejnižším místě vzájemného kontaktu, na 242 m n. m. Od této úrovně výše je umožněna hydraulická komunikace obou bývalých odkališť. Časově proměnné varianty (verze s neustáleným prouděním podzemní vody) byly provedeny v kroku jednoho až dvou let, respektive s pětiletým odstupem pro variantu nalezení ustáleného stavu po ukončení rekultivace (ukládání) do odkaliště II. Tyto časově proměnné simulace ukázaly, že dochází, a bude docházet, k oživení stagnujícího hydraulického režimu v bývalém odkališti I (obr. 4).



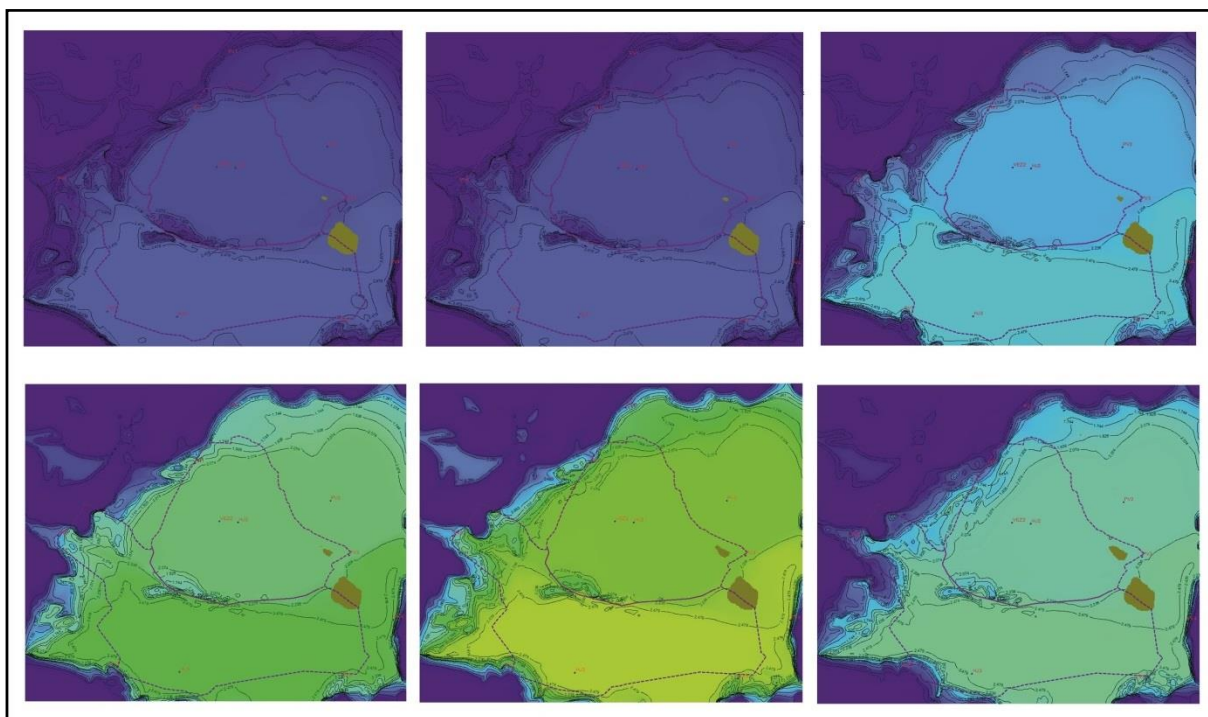
Obrázek 4.: Predikce vývoje proudění podzemních vod v čase

Hlavní otázkou spojenou s potenciálním negativním dopadem na hydrorežim a stabilitu zájmové stavby (riziko vzduť hladiny vody ve středu odkaliště II) je zachování trvalého drenážního účinku přepadových věží. Byly proto modelovány časově proměnné průběhy proudění podzemní vody ve variantě funkčních a nefunkčních přepadových věží. Simulace

ukázaly, že pokud by v budoucnu došlo k omezení či zrušení trvalého drenážního účinku přepadových věží (drenážního systému) odkaliště II, dojde k dočasnému nárůstu úrovně hladin podzemních vod v obou odkalištích [6].

Zachování funkčnosti přepadových věží i po zkapacitnění a sanaci je žádoucí alespoň do doby ustálení podzemních vod. Jak z modelování vyplynulo, jedná se o časový horizont cca 15 let po ukončení ukládání VEP.

Další realizované simulace rozdílných dílčích modelových variant hydrorežimu ukázaly, že se hydraulický spád bude s pokračujícím ukládáním VEP do bývalého odkaliště II mezi místem dotace a místem odvodňování zvětšovat, čímž se zvýší rychlost proudění při dně bývalého odkaliště I. Zvýšení rychlosti proudění podzemní vody však nebude dramatické, navíc po ukončení ukládání VEP bude opět docházet k omezení komunikace mezi oběma odkališti, až k jejich úplnému oddělení (ustálený stav). Krátký časový horizont a zároveň nízký gradient jsou hlavní příčinou, proč s největší pravděpodobností nedojde k vymývání potenciálních kontaminantů ze dna odkaliště I, což deklaruje model transportu kontaminantů (obr. 5) [6].



Obrázek 5.: Model transportu kontaminantů

Pro stabilitu tělesa ukládaných VEP je klíčový průběh HPV, přičemž snížení hladiny podzemní vody je na straně bezpečné (zlepšení stability). Z HG studií je možné odvodit vliv přitížení navýšením mocnosti ukládaných VEP na nárůst HPV. Byly modelovány různé etapy ukládání až po vybudování konečného tělesa v době uzavření a rekultivace. Ze spočtené úrovně HPV lze usuzovat, že nedojde k významnému zhoršení deformačně stabilitních poměrů v zájmové oblasti oproti dnešnímu stavu. Z HG modelování vyplynulo, že v průběhu výstavby, ani po jejím dokončení, by nemělo dojít k významnému zvednutí hladiny podzemní vody

v tělese odkaliště. Nicméně rozdíly v úložných poměrech mohou vyvolat diferenciální sedání, jak v konečné hodnotě, tak především z hlediska časového průběhu (rychlost konsolidace). Provedené parametrické studie ukázaly, že vliv vstupních parametrů jednotlivých zemin není pro sledování změn sledované oblasti nejdůležitější, i když není možné jej zcela zanedbat. Zcela zásadní se jeví otázka úrovně počáteční hladiny podzemní vody a směr jejího proudění [1].

5. Závěr

V rámci prevence rizik při provozu odkaliště (ukládání VEP) byly realizovány numerické výpočty proudění podzemní vody v saturovaném zemním prostředí zabývající se simulací změn v odtokových poměrech. Výstupy hydrogeologického modelování mohou posloužit jako podklad pro detailní deformačně stabilitní výpočty.

Závěrem lze konstatovat, že k úkolu včasného zjištění a eliminování rizik ohrožení okolního životního prostředí a k odhalení geotechnických problémů zájmové stavby odkališť byla realizace hydrogeologických modelových výpočtů účelná.

Literatura

- [1] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Studie vlivu změn hydrореžimu na stabilitu odkališť. Sborník Geotechnika 2016, Vysoké Tatry, Slovenská republika. Bratislava (Slovensko), Orgware. 2016.
- [2] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Implementation of geotechnical risk during realization of the slag dam based on the sediments in former sludge lagoon. Poster a sborník konference XVI ECSMGE Edinburgh 2015 (Skotsko).
- [3] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Řešení ukládání vedlejších energetických produktů do prostoru odkaliště. Sborník XIV. HG kongres 2014. Liberec, Techn. univerzita v Liberci. 2014.
- [4] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Stanovení zatěsnění úložného prostoru vedlejších energetických produktů na základě experimentu in situ. Časopis Geotechnika č. 02/2016. Praha, Česko-Slovenská společnost pro mechaniku zemin a geotechnické inženýrství. 2016.
- [5] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Hydrogeologické posouzení a hydrogeologický model území; Závěrečná zpráva. MS. Praha, INSET s.r.o., č. zak. 13030368000, č. dok. 4. 2015.
- [6] ČERNOCH, P.; KOŠŤÁL, J.: Model transportu kontaminantů, II. Etapa – Modelování vývoje kvality podzemní vody; Závěrečná zpráva. MS. Praha, INSET s.r.o., č. zak. 16110077000, č. dok. 1. 2016.

Kontakt

Mgr. PETR ČERNOCH, tel: +420 731 077 259, e-mail: cernoch.petr@inset.com,
ČEZ Energetické produkty, s.r.o., Komenského 534, 253 01 Hostivice.
Ing. JIŘÍ KOŠŤÁL, Ph.D., tel: +420 603 580 735, e-mail: kostal.jiri@inset.com,
INSET, s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

VLIV MLETÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN NA FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

FINELY MILLED SECONDARY RAW MATERIALS AND THEIR INFLUENCE ON CEMENT BASED COMPOSITES

Michaela Dvořáková, Vít Černý, Rostislav Drochytka, Petr Figala

Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří
331/95, 602 00 Brno

Anotace:

Z důvodu zatížení životního prostředí velkým množstvím odpadních surovin je vytvářen tlak na vývoj v oblasti „recyklace“ těchto odpadů, tedy jejich zpracování při výrobě stavebních materiálů. Příspěvek prezentuje vliv jemně mletých druhotných surovin, jako jsou popílký, škvára a obalové sklo na fyzikálně mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Příspěvek je primárně zaměřen na stanovení krátkodobých mechanických vlastností zkušebních těles stáří 3 a 7 dní s částečnou substitucí cementu druhotnými surovinami v dávce 20 a 40 %. Dále byl stanoven vliv jejich jemnosti mletí na zpracovatelnost a vývoj pevnosti.

Annotation:

In the production of building materials the emphasis is put on the utilization of waste materials generated in various industrial processes. This contribution presents the influence of finely milled secondary raw materials such as fly ash, waste glass and slag on physical and mechanical properties of cement based materials. The paper is primarily focused on the determination of short-term mechanical properties of testing samples of age 3 and 7 days with partial substitution of cement with secondary raw materials at a dose of 20 and 40 %. Furthermore, the influence of their fineness of milling on the workability and development of the strengths was determined.

Klíčová slova:

Druhotné suroviny, popílek, obalové sklo, škvára, cementový kompozit

Keywords:

Secondary raw materials, fly ash, waste glass, slag, cement based composite

1. Úvod

Mezi tradiční pucolány patří elektrárenský popílek a elektrárenská struska (škvára), která je obtížně využitelný materiál, produkováný tepelnými elektrárnami a teplárnami v nemalém množství. Novým směrem v oblasti pucolánů by mohl být skelný recyklát, který je produkován ve velkém množství. Není v dnešní době používán jako pucolán, ale svými vlastnostmi se ostatním pucolánům blíží, a proto se hledají možnosti jeho využití. Použití druhotných surovin (vedlejších produktů průmyslové výroby) má nejen pozitivní ekologický aspekt (použití druhotné suroviny místo skládkování, snížení spotřeby cementu a následně emisí CO₂), ale i aspekt ekonomický. Jemně mleté druhotné suroviny mohou soužit jako částečná náhrada pojivové složky – cementu, ale i jako doplnění jemných podílů směsi plniva, jelikož u těchto látek velikost částic nepřesahuje 0,125 mm a mají velký měrný povrch. Mnoho studií ukázalo, že nahrazení cementu popílkem zlepšuje zpracovatelnost, snižuje hydratační teplo, redukuje krvácení betonu a pozitivně ovlivňuje vývoj dlouhodobé pevnosti betonu v tlaku (stáří > 90 dnů) [1 - 2].

V posledních letech je pozornost v oblasti druhotných surovin směřována také na silikátové suroviny amorfního charakteru, mezi něž se řadí různé formy skel. Nejznámější z nich je recyklát pocházející z čirého či barevného obalového skla, jež se částečně uplatňuje při opětovné výrobě skleněných obalů. Většina skel se vyznačuje poměrně vysokým obsahem amorfního SiO₂, což je charakteristické především pro pucolánově aktivní, popř. latentně hydraulické látky. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je jejich schopnost podílet se na tvorbě hydratačních produktů během fyzikálně-chemických pochodů vedoucích ke zkompatnění matrice cementových kompozitů. Při použití skla je potřeba vzít zřetel na možnost vzniku tzv. alkalicko-křemičité reakce [3]. Literatura uvádí, že pokud je odpadní sklo jemně mleté (pod 75 μm), k tomuto negativnímu efektu nedochází a trvanlivost malty je zaručena [4]. U velmi jemných částic dochází k alkalicko-křemičité reakci stejně jako u hrubších zrn, tlak při bobtnání zůstává ale vlivem menší velikosti zrn tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin [5]. Navíc se zdá, že odpadní sklo pozitivně přispívá k mikrostrukturně-technickým vlastnostem malt, což má za následek zlepšení jejich mechanických vlastností. [6]

Pozitivní vliv upravených druhotných surovin závisí nejen na složení a množství samotné druhotné suroviny, ale také na druhu a množství cementu, poměru vody a cementu (v/c), druhu a množství chemických příměsí atd.

2. Materiálové složení

Referenční receptura (REF) byla připravena dle normy ČSN EN 196-1 [7] z 1 dílu cementu CEM I 42,5 R (450±2 g), tří dílů vysušeného normalizovaného písku CEN (1350±5 g) a 1/2 dílu pitné vody (225±1 g). Vodní součinitel (voda/cement) byl 0,5.

Ostatní zkušební receptury byly navrženy s ohledem k předepsanému dávkování surovin u referenční hmoty. Dávky jednotlivých druhotných surovin o specifickém měrném povrchu byly v množství 20 a 40 % hmotnosti cementu referenční receptury. Vodní součinitel byl

zachován a díky tomu bylo možné pozorovat změny konzistence a zpracovatelnosti cementové malty v čerstvém stavu. Složení receptur je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1.: Referenční receptura (množství jednotlivých složek je uváděno v gramech)

	Normal. písek CEN	Vodní součinitel	Cement CEM I 42,5	Obalové sklo (Sklo)	Popílek Tušimice (ETU)	Škvára Oslavany (EOS)
REF	1350±5	0,5	450	-	-	-
20%ETU_362			360	-	90	-
40%ETU_362			270	-	180	-
20%ETU_482			360	-	90	-
40%ETU_482			270	-	180	-
20%ETU_530			360	-	90	-
40%ETU_530			270	-	180	-
20%EOS_298			360	-	-	90
40%EOS_298			270	-	-	180
20%EOS_410			360	-	-	90
40%EOS_410			270	-	-	180
20%EOS_530			360	-	-	90
40%EOS_530			270	-	-	180
20%Sklo_300			360	90	-	-
40%Sklo_300			270	180	-	-
20%Sklo_400			360	90	-	-
40%Sklo_400			270	180	-	-
20%Sklo_541			360	90	-	-
40%Sklo_541			270	180	-	-

2.1. Označení receptur

20%ETU_362

20% množství náhrady cementu druhotnou surovinou

ETU druhotná surovina popílek

362 jemnost mletí uvedená v $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

2.2. Charakteristika testovaných druhotných surovin

Odpadní sklo bylo předpřipraveno na jemnost 0 - 4 mm pomocí čelistového drtiče. Následně byly všechny druhotné suroviny stejným způsobem mlety v kulovém mlýně. Vždy bylo mletu 5 kg suroviny stejnou intenzitou mletí. Jediný proměnný parametr představoval čas mletí. Cílem bylo získat od každé suroviny tři jemnosti mletí s měrným povrchem cca 300, 400 a 500 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\pm 60 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$). Použitím Blainova přístroje byly stanoveny hodnoty měrného povrchu, které jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2.: Měrný povrch testovaných druhotných surovin

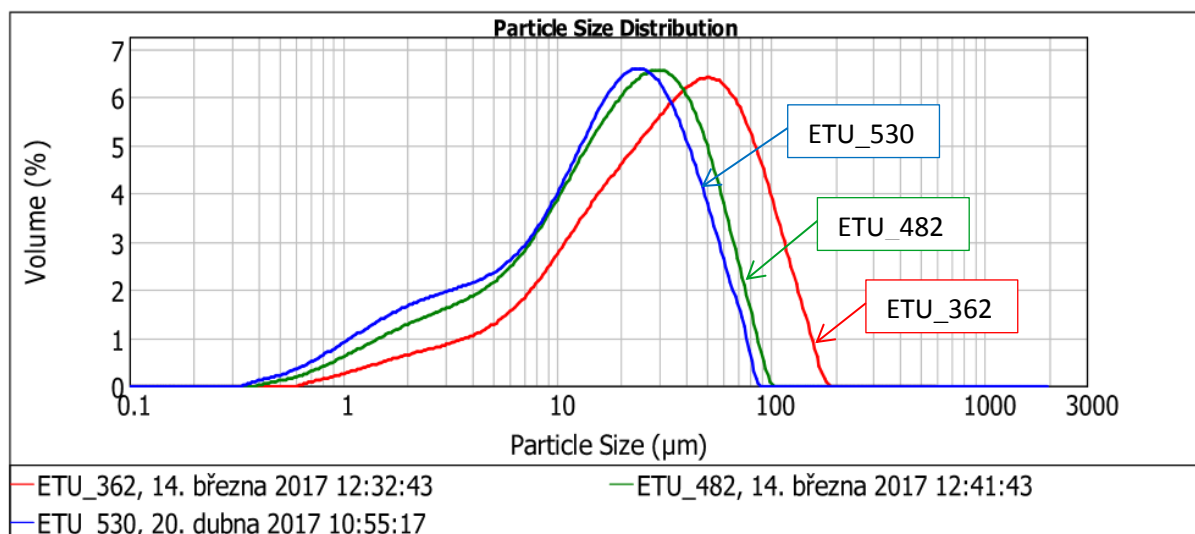
	Označení	Měrná hmotnost [kg m^{-3}]	Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$]		
			362	482	530
Popílek Tušimice	ETU	2100	362	482	530
Škvára Oslavany	EOS	2610	298	410	530
Obalové sklo	Sklo	2560	300	400	541

▪ Popílek

Použit byl popílek z prvního odlučovače elektrárny Tušimice. Na prvním odlučovači je zachyceno převážné množství popílku vzniklého při spalování hnědouhelného prachu a zároveň je frakce popílku poměrně kolísavá. Proto byl popílek z prvního odlučovače zvolen jako vhodný pro předúpravu mletím. Popílek z prvního odlučovače má objemovou hmotnost $2100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a ještě před mletím dosahoval měrného povrchu $266 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabulka 3.: Chemické složení testovaného popílku

Složení	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Tušimice	50,0	23,4	14,50	0,26	3,42	1,72	1,07	0,29	0,16



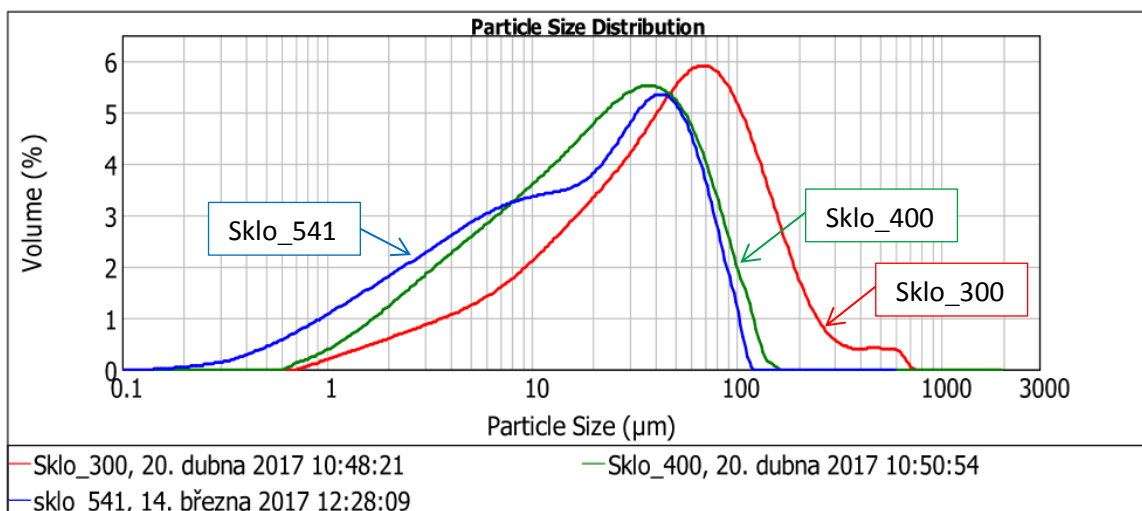
Obrázek 1.: Distribuce velikosti částic mletím upraveného vzorku popílku Tušimice

- Obalové sklo

Použité obalové sklo je odpadní sklo tříděné z domácností čiré barvy.

Tabulka 3.: Chemické složení testovaného obalového skla

Složení	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Obalové sklo	69,73	1,76	0,41	9,96	2,29	0,88	12,2

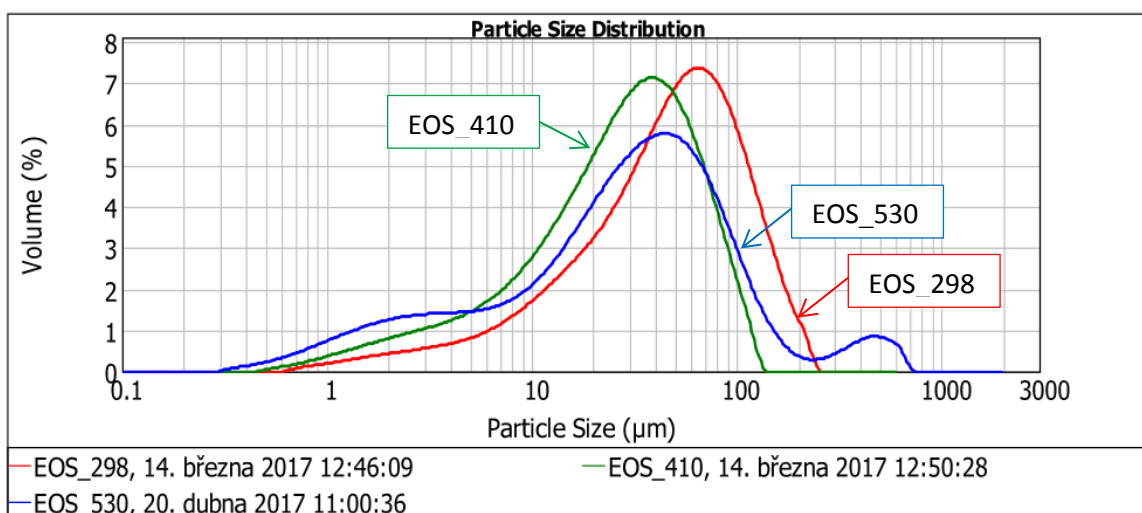


Obrázek 2.: Distribuce velikosti částic mletím upraveného vzorku obalového čirého skla

- Škvára Oslavany

Tabulka 4.: Chemické složení testované škváry

Složení	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Škvára	51,0	22,44	0,86	1,11	4,37	1,70	3,32	1,77	0,34

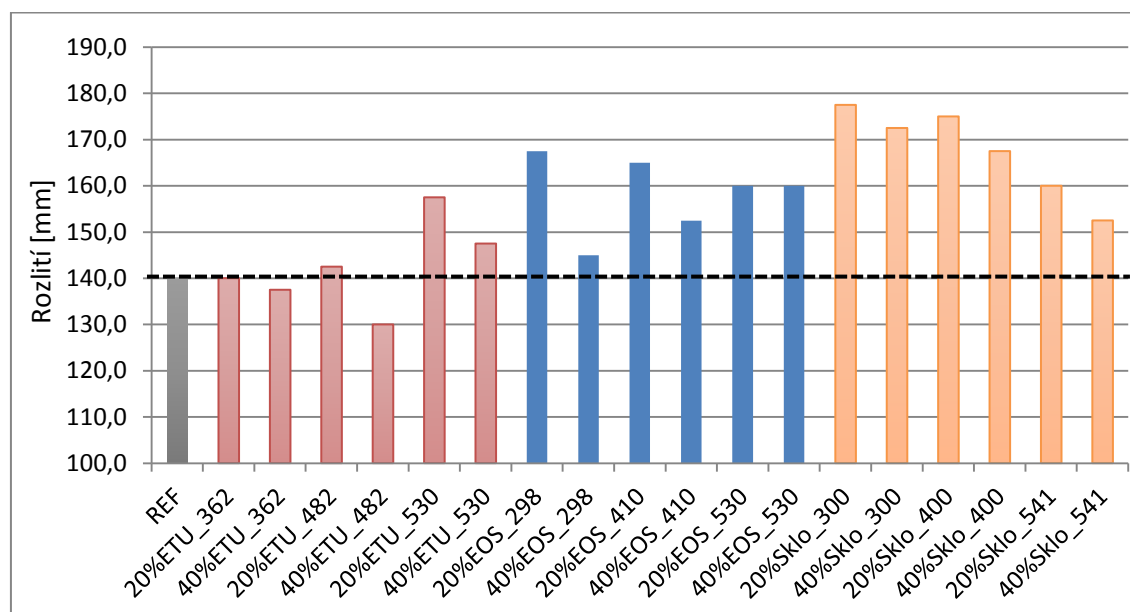


Obrázek 3.: Distribuce velikosti částic mletím upraveného vzorku škváry Oslavany

3. Vyhodnocení experimentálního testování

Primárně byl sledován vliv míry substituce cementu druhotnou surovinou na zpracovatelnost čerstvé směsi. Sledována byla náhrada v dávce 20 a 40 %. U všech testovaných receptur byl pozorován negativní vliv zvyšující se dávky druhotné suroviny na konzistenci, kdy konzistence dané receptury (stejná druhotná surovina, stejná jemnost mletí – velikost měrného povrchu) byla v případě vyšší dávky (40 %) negativně ovlivněna, přičemž je stále srovnatelná s recepturou referenční.

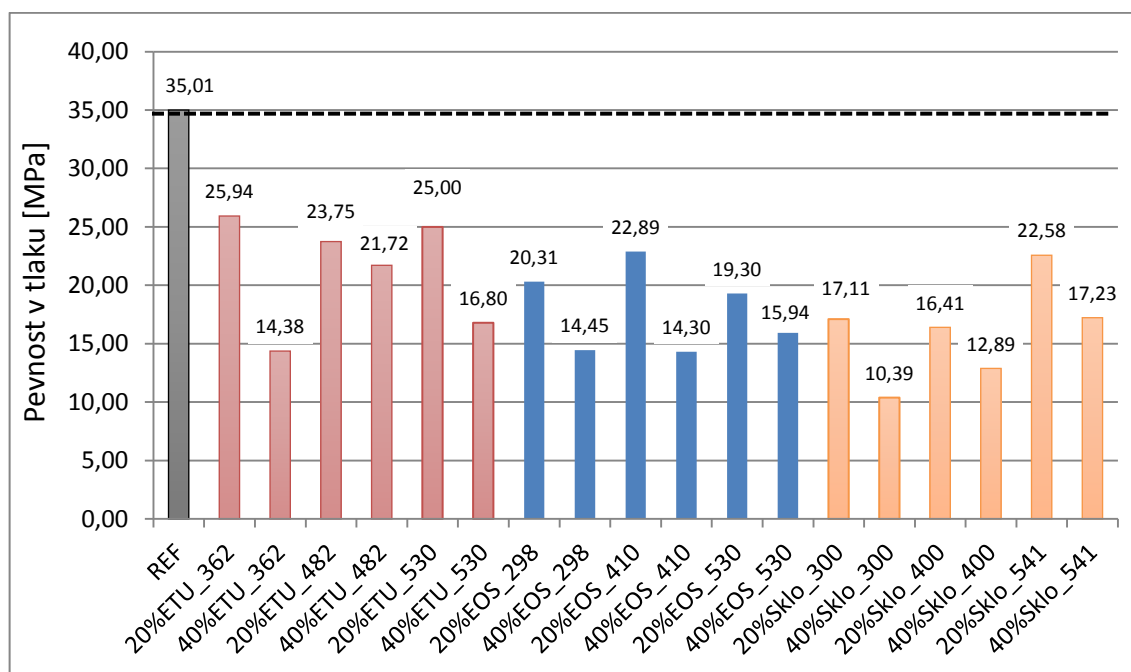
Vzhledem k zachování vodního součinitele voda/cement 0,5 ve všech recepturách je možné sledovat vliv nasákavosti druhotné suroviny na zpracovatelnost. Zpracovatelnost receptur s příměsí jemně mletého obalového skla a škváry byly v porovnání s recepturou referenční pozitivně ovlivněny. Nejlepší konzistence byla stanovena u receptur s dávkou obalového skla, nehledě na množství a jemnost mletí. Rozlité bylo zvýšeno ze 140 mm (v případě receptury referenční) na 175 mm (v případě receptury 20%Sklo_300), což je o cca 25 %. V případě receptury se skelným recyklátem lze pozorovat klesající trend v závislosti na stoupajícím měrném povrchu, což lze vysvětlit zvýšenou potřebou vody ke smáčení většího měrného povrchu zrn.



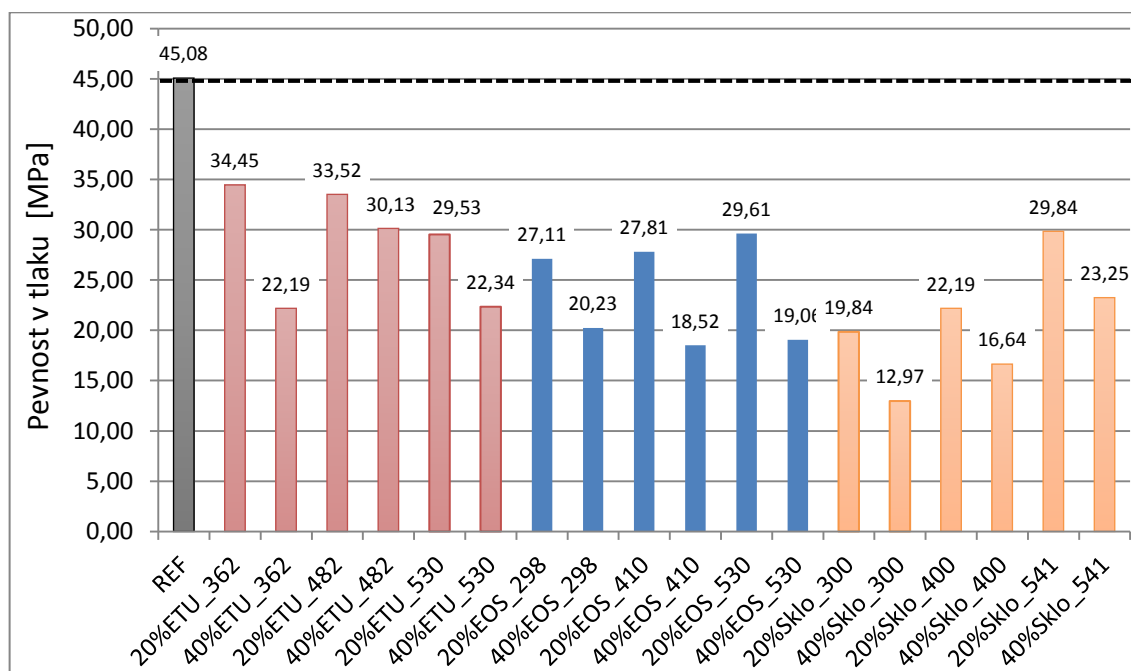
Obrázek 4.: Vliv jemnosti mletí a míry substituce druhotnou surovinou na zpracovatelnost

Nejvýznamnější materiálovou charakteristikou cementových kompozitů je pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Pevnost byla stanovena podle normy ČSN EN 13892-2 [8]. Primárně byl sledován vliv míry substituce cementu druhotnou surovinou na vývoj krátkodobých pevností v tlaku. Receptury s druhotnou surovinou v dávce 40 % vykazovaly výrazně nižší pevnosti v tlaku v porovnání s pevností referenční receptury REF a to až o 60 %. Nejnížší pevnost v tlaku byla stanovena na receptuře 40%Sklo300, kdy dosahovala cca 30 % pevnosti referenční receptury (REF naměřena 35 MPa, 40%Sklo300 pouze 10,4 MPa). Nejlepších krátkodobých pevností v porovnání s REF recepturou dosahovaly receptury s 20% substitucí

cementu popílkem Tušimice, které získaly ve stáří 3 a 7 dní cca 70 % pevnosti referenční receptury REF. Receptury s 20% náhradou cementu škvárou nabyly po 3 a 7 dnech cca 60 % pevnosti referenční receptury REF.

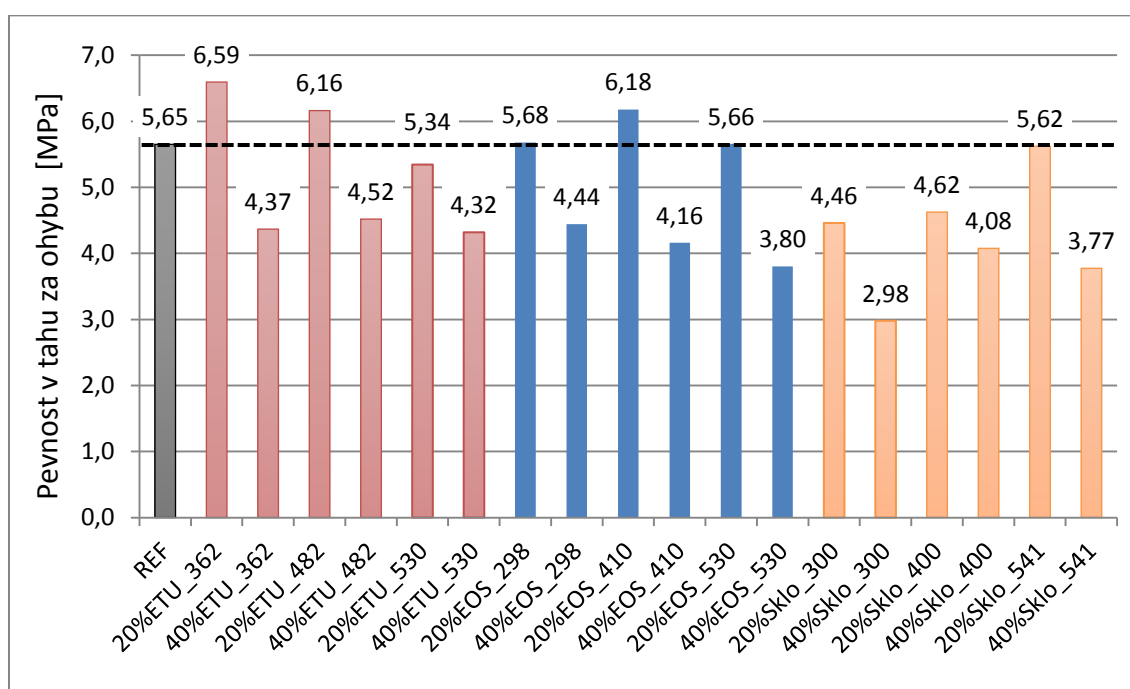


Obrázek 5.: Vliv jemnosti mletí a míry substituce druhotnou surovinou na pevnost v tlaku ve stáří zkušebních těles 3 dny

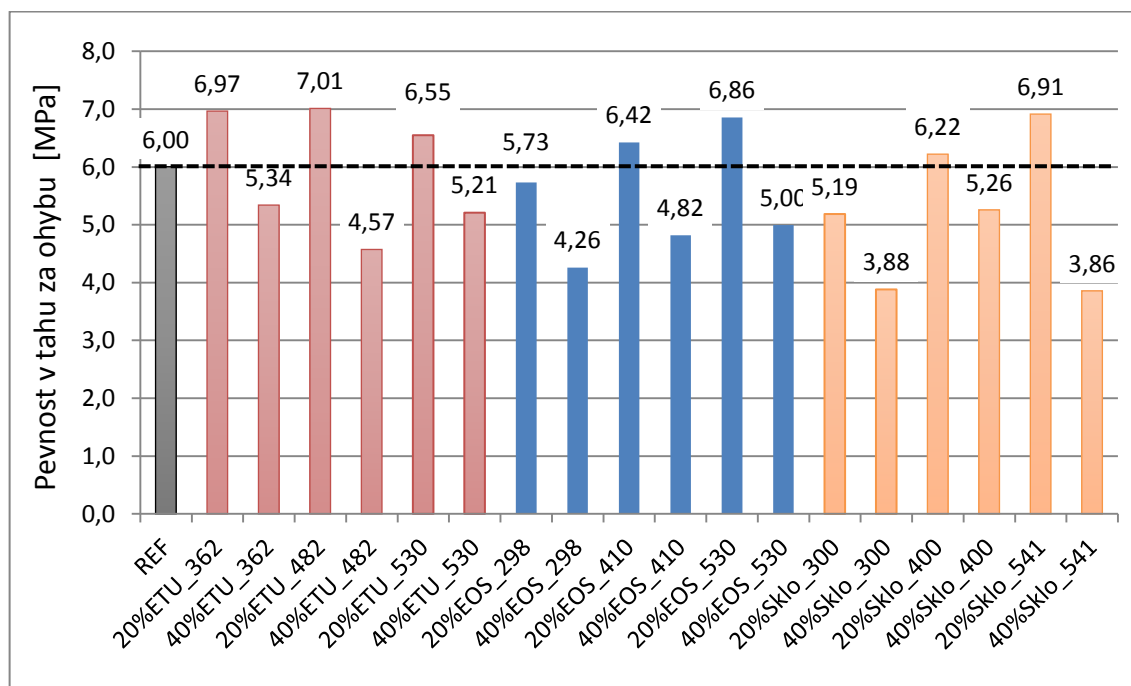


Obrázek 6.: Vliv jemnosti mletí a míry substituce druhotnou surovinou na pevnost v tlaku ve stáří zkušebních těles 7 dní

Dalším významným parametrem cementových kompozitů je pevnost v tahu za ohybu, která byla stanovena na zkušebních tělesech stáří 3 a 7 dní. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že částečná náhrada cementu popílkem Tušimice (ETU) a škvárou Oslavany (EOS) ve výši 20 % měla pozitivní vliv na vývoj pevností v tahu za ohybu. Krátkodobá pevnost v tahu za ohybu u receptur ETU a EOS byla v porovnání s referenční recepturou stejná, nebo dokonce vyšší (u receptury 20%ETU_362 byla o cca 16 % vyšší). Současně byl zaznamenán klesající trend v závislosti na jemnosti mletí u receptur s 20% náhradou cementu popílkem Tušimice a naopak rostoucí trend ve vývoji pevností u receptur s 20% náhradou cementu jemně mletý obalovým sklem a škvárou. Tento fakt je pravděpodobně způsoben rozdílnou nasákavostí druhotných surovin.



Obrázek 7.: Vliv jemnosti mletí a míry substituce druhotnou surovinou na pevnost v tahu za ohybu ve stáří zkušebních těles 3 dny



Obrázek 8.: Vliv jemnosti mletí a míry substituce druhotnou surovinou na pevnost v tahu za ohybu ve stáří zkušebních těles 7 dní

4. Závěr

Na základě experimentálního laboratorního výzkumu lze konstatovat následující:

- Částečná náhrada cementu druhotnou surovinou (popílek Tušimice, obalové sklo čiré, škvára Oslavany) má pozitivní vliv na vývoj krátkodobých pevností v tahu za ohybu a to v optimální míře substituce 20 %, kdy byly v porovnání s referenční recepturou naměřeny stejné, nebo dokonce vyšší pevnosti - o cca 16 % vyšší. Při substituci ve výši 40 % byly stanoveny cca o 20 % nižší pevnosti.
- Zpracovatelnost receptur s příměsí jemně mletého obalového skla a škváry byly v porovnání s recepturou referenční pozitivně ovlivněna.
- U všech testovaných receptur byl pozorován negativní vliv zvyšující se dávky druhotné suroviny na konzistenci, kdy konzistence dané receptury (stejná druhotná surovina, stejná jemnost mletí – velikost měrného povrchu) byla v případě vyšší dávky (40 %) negativně ovlivněna.
- Se zvyšující se mírou substituce cementu druhotnou surovinou dochází k poklesu krátkodobých pevností v tlaku (stanoveny byly 3 a 7 denní). Receptury s druhotnou surovinou v dávce 40 % vykazovaly výrazně nižší pevnosti v porovnání s pevností referenční receptury REF a to až o 60 %.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu TA04010143 „Výzkum a vývoj nového systému podlah na silikátové bázi pro extrémní mechanické a chemické zatížení“ podporovaného Technologickou agenturou České republiky.

Literatura

- [1] VAGELIS, G.; PAPADAKIS.: Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash, *Construction and Building Materials*, Volume 30, 4 August 2010, Pages 1647–1654.
- [2] MICHAEL THOMAS: Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association, Publication IS, 548, 2007, 24 pages.
- [3] MATULOVÁ, P.; MELICHAR, T.; PŘIKRYL, J.: Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí, *BETON TKS 3/2009*, 76 s.
- [4] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1st ed., 1993, reprint 1995, Int. Org. for Standardization (Geneva, Switzerland).
- [5] MEYER, C.; BAXTER, S.: Use of recycled glass and fly ash for precast concrete, Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Rep. 98–18, Albany, NY, Oct. 1998.
- [6] CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENEARO, A.: Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management* 25 (2005) pp. 197–201.
- [7] ČSN EN 196-1 - Stanovení pevnosti cementu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 19907.

Kontakt

Ing. MICHAELA DVOŘÁKOVÁ, tel: +420 541 148 225, e-mail: dvorakova.m@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D., tel: +420 541 147 463, e-mail: cerny.v@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, tel: +420 541 147 500, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Bc. PETR FIGALA, tel: +420 541 148 225, e-mail: 144412@vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

VLIV DRUHU KŘEMIČITÉ SLOŽKY NA VÝVOJ TOBERMORITU PŘI SPECIFICKÝCH HYDROTERMÁLNÍCH PODMÍNKÁCH

INFLUENCE OF TYPE OF SILICA COMPONENTS ON THE DEVELOPMENT OF TOBERMORIT AT SPECIFIC HYDROTHERMAL CONDITIONS

**Fleischhacker Ján, Černý Vít,
Kociánová Magdaléna, Drochytka Rostislav**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Anotace:

Tobermorit je hlavním minerálem, který dodává pórobetonu mechanické vlastnosti. Pro zefektivnění výroby je vhodný výzkum vlivu různých typů křemičitých složek na jeho mineralogické složení. Příspěvek je tak zaměřen na výzkum vzniku tobermoritu při použití přírodních a druhotných surovin. Výstupem by mělo být optimální surovinové složení a autoklávovací režim s ohledem na jeho mineralogické složení.

Annotation:

Tobermorite is the main mineral compound of AAC. It increases its mechanical properties. There needs to be done research of influence of type of silica components on the mineralogical compound of AAC. In the presence study, we examine the usage of nature and artificial silicious materials. Closure of the study will be design of the optimal raw material composition, also hydrothermal treatment of autoclaved aerated concrete.

Klíčová slova:

Křemičitý písek, vysokoteplotní popel, fluidní popel, mikrosilika, autoklávovaný pórobeton, tobermorit

Keywords:

Ground quartz, fly ash, fluidized bed combustion ash, silica fume, autoclaved aerated concrete, tobermorite

1. Úvod

Pro udržení rozvoje ve stavební produkci je potřebné myslet na požadavky koncového uživatele. Trendem dnešní doby je v první řadě hledět na cenu výrobku, pak až na jeho kvalitu. Proto je důležité hledat cesty, jak výrobek udržet na nízké cenové hladině a přitom nezhoršit jeho technické vlastnosti. Cestou, jak přijít k tomuto výsledku, je používat levné suroviny, které jsou ve většině druhotnými surovinami z průmyslové výroby, anebo odpadními produkty. Mezi tyto suroviny patří například popílky ze spalování uhlí, které probíhá vysokoteplotním anebo fluidním způsobem. Jedním s mnoha stavebních oborů, kde je možno používat tyto druhotné suroviny, je výroba pórobetonu.

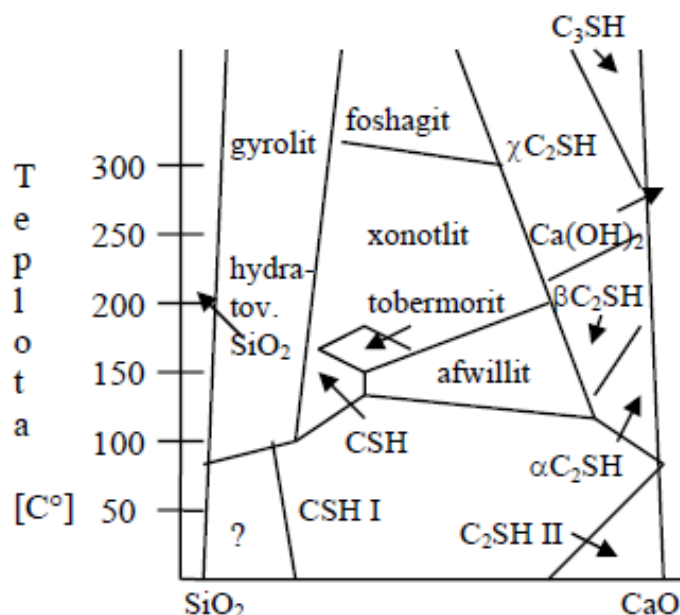
Pórobeton je lehký stavební materiál s výbornými tepelně-technickými vlastnostmi, v poměru k pevnostem, skvěle opracovatelný a ekonomicky výhodný. Je to materiál s dlouholetou tradicí počínaje od roku 1924. Přesto je jeho potenciál možné využívat i v dnešní době. Od počátku jsou využívány čisté suroviny, kterými je vápno a křemičitý písek. Současným trendem je hledat cesty, jak nahradit tyto dražší suroviny levnější alternativou. Je nutno zmínit, že na produkci pórobetonu je také využíván popílek z vysokoteplotního spalování uhlí. Produkce tohoto popílku je dnes omezována, poptávka narůstá a výsledkem je zvýšení jeho ceny. Naproti tomu vzrůstá produkce fluidních popílků, které jsou produktem spalování uhlí v teplárnách a elektrárnách technologií fluidního spalování. Produkty mají nižší využitelnost, ale jsou vhodné z hlediska ceny a obsahu CaO.

Jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností každého materiálu je pevnost. V případě pórobetonu je nositelem pevností minerál tobermorit. Vzniká reakcí oxidů křemíku a vápníku za hydrotermálních podmínek. Patří do skupiny kalciumhydrosilikátů s chemickým vzorcem $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Příspěvek dále pojednává o výběru surovin, vhodných pro návrh pórobetonu. Při výběru je kladen důraz na používání ekonomicky výhodnějších křemičitých surovin, zejména pak popílků ze spalování uhlí. Při splnění těchto podmínek je možné být na trhu stavebních výrobků víc konkurenceschopný a s vyššími zisky.

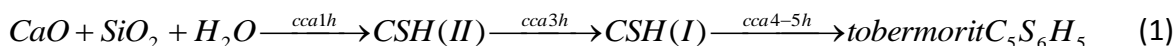
2. Vznik tobermoritu

Pro vznik tobermoritu a veškerých CSH fází je klíčovou vlastností molární poměr CaO/SiO_2 a teplota hydrotermálních procesů. Některé počáteční fáze mohou vznikat i při atmosférických podmínkách jako např. CSH I při hydrataci cementu. Jsou to fáze strukturou podobné tobermoritu, ale nemají zdaleka tak dokonale vyvinutou krystalickou mřížku. Při určité teplotě autoklávování a molárním poměru vzniká tobermorit, ten je ale pouze přechodnou fází, protože dále krystalizuje na xonotlit, který není požadován, pro jeho nižší pevnosti. Proto je důležité zvolit čas autoklávování tak, aby bylo množství tobermoritu na maximum a xonotlit nevznikal. Existenční oblasti kalciumhydrosilikátů v závislosti na teplotě a molárním poměru jsou vidět na Obrázku 1. [1]



Obrázek 1.: Fázový diagram $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ dle Besseye [1]

Z fázového diagramu je patrné, že při poměru C/S méně jak 0,5 může vznikat minerál gyrolit. Dále je to požadovaný minerál tobermorit s poměrem od 0,8 – 1,0. Nad 1,5 může vznikat afwillit. V systému $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ vzniká také hydrogranát. Obsah Al_2O_3 v systému $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ je klíčový z pohledu tvorby tobermoritu, kdy při jeho absenci vzniká tobermorit z CSH gelu dle rovnice:



Avšak při jeho obsahu vzniká tobermorit v systému $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ dvěma cestami. (1) Tvorba tobermoritu z CSH fáze: $\text{CSH} \rightarrow \text{tobermorit}$, (2) Tvorba tobermoritu z katoitu: SiO_2 , katoit, hydrogranát, $\text{CSH} \rightarrow \text{Si}^{4+}$, Ca^{2+} , Al^{3+} , OH^- . První fáze je proměna v tuhém stavu, druhá je proměna tuhá látka \rightarrow roztok, kdy tobermorit krystalizuje z roztoku. Děje probíhají současně. [2]

2.1. Vliv křemičitých surovin

První ze čtyř nejdůležitějších aspektů ovlivňujících vznik tobermoritu, je charakter vstupní křemičité suroviny. Hlavní vlastností je jejich mineralogický charakter, amorfni či krystalická forma suroviny a měrný povrch. Charakter křemičité látky nejvíce ovlivňuje vlastnosti vzniklých CSH gelů. Při použití krystalického křemene, ve formě křemičitého písku, vznikají gely o molárním poměru $\text{C/S} \approx 1,69$. Z toho vyplývá, že jsou bohaté na vápník. Tyto gely se vyznačují kratšími řetězci. Naproti tomu při použití amorfniho křemene vznikají gely s $\text{C/S} \approx 0,81$, bohaté na křemík, s dlouhými řetězci, které obtížněji krystalizují. [3] Důsledkem je rozdílná rychlost rozpuštění křemičité látky, a tím nasycování roztoku těmito ionty. Amorfni látky jsou snáze rozpustné, tím nasycují roztok ve větší míře Si^{4+} ionty a CSH fáze jich obsahují více. Naproti tomu se krystalické látky rozpouští pomaleji, je spotřebováváno vyšší

množství Ca^{2+} iontů na tvorbu CSH fází, tím jsou méně rozvětvené a snáze krystalizují na tobermorit. [4]

Příměs amorfního křemičitanu ve formě popílku může urychlit tvorbu tobermoritu, ale v konečném důsledku ho vzniká méně. Tím popílek snižuje pevnost výsledného produktu a také objemovou hmotnost. [5,6] Výsledný produkt zároveň obsahuje nezreagované částice popílku, tím jsou krystaly méně propojené. Důsledkem této mikrostruktury je také zvýšena nasákavost a smrštění. [7,8]

Velikost částic ovlivňuje rozpouštění křemičitých iontů do roztoku a tím vznik CSH fází. Nasycování roztoku křemičitými a vápennými ionty spolu úzce souvisí. Portlandit nemůže být rozpuštěn, pokud Ca^{2+} ionty nejsou určitou mírou spotřebovány, jako například tvorbou CSH gelu. Tedy rozpustnost křemene, a tím i portlanditu, klesá se zvyšující se velikostí zrna. [9] Jistý vliv má velikost částic také při hydrotermálních podmínkách. Se snižujícím se měrným povrchem křemičitanů, klesá schopnost rozkladu hydrogranátů, které krystalizují na tobermorit. V konečném důsledku tedy produkt obsahuje méně těchto fází. [10,11] Avšak křemičitý písek o menším měrném povrchu tvoří více krystalický tobermorit a při delších autoklávovacích časech ho může obsahovat větší množství. Důsledkem může být také opožděná proměna tobermoritu na xonotlit. [12]

2.2. Vliv doby hydrotermálních procesů

V průběhu autoklávování dochází k soustavné proměně krystalických fází, bez toho aby došlo k rovnovážnému stavu. V počátku hydrotermální syntézy se měrný povrch krystalků zvyšuje, příčinou je krystalizace hmoty a vytváření mikrostruktury. V pozdějších stádiích naopak nastává děj, kdy se krystalky zvětšují, a tím se jejich měrný povrch snižuje. Tento děj je možný pozorovat po 20 hod. autoklávování. [1]

Prodloužení doby izotermické výdrže má za důsledek zlepšení mechanických vlastností a mineralogického složení. Delší hydrotermální ošetřování umožňuje lepší krystalizaci tobermoritu, kdy jsou jeho krystalky větší a lépe do sebe zapadají. Tím vytváří celistvější mikrostrukturu, což má za následek zlepšení mechanických vlastností pórobetonu. Při době izotermie nad cca 20 až 72 hod a dostatku CaO může vznikat minerál xonotlit, který ale není žádán pro jeho nižší mechanické pevnosti v porovnání s tobermoritem. [1]

3. Metodika prováděných zkoušek a použité materiály

3.1. Metodika prováděných zkoušek

V rámci příspěvku byla metodika prováděných zkoušek rozdělena na dvě části. První část se týkala rozboru vstupních surovin, kdy byla každá surovina podrobena chemickému rozboru (XRD – RTG difrakční analýza) pro určení množství oxidů a stanovení měrného povrchu (permeabilní metoda dle Blaina, laserová granulometrie). Jako základní surovina pro zvýšení oxidu vápenatého ve směsi bylo zvoleno pálené vápno. Jako hlavní zástupci křemičitých látek s vysokým obsahem SiO_2 byly pro experimentální část vybrány křemičitý písek jako

krystalický typ a mikrosilika jako typ amorfni. Jako zástupce druhotných surovin byl vybrán vysokoteplotní popílek ze spalování uhlí.

Druhá část prováděných zkoušek byla zaměřena na syntetizaci tobermoritu, pro jehož přípravu byla použita kombinace vápna a křemičitých surovin o proměnlivém molárním poměru C/S, a to 0,73 a 1,00. V první fázi se suroviny nechaly odležet, v tomto procesu došlo k tvorbě počátečních CSH produktů a následně byly vzorky ošetřeny hydrotermálně po dobu 4, 8 a 16 hod od počátku autoklávování.

3.2. Použité materiály

Pro experimentální část byl použit vysokoteplotní popílek, pálené vápno, křemičitý písek a mikrosilika. Vstupní suroviny byly podrobeny chemickému rozboru. Tato analýza je potřebná pro vypracování receptur na přípravu tobermoritu. Jednotlivé procentuální zastoupení surovin bylo vztaženo na molární poměr C/S jednotlivých receptur. V následující Tabulce 1. je uvedeno chemické složení vstupních surovin s množstvím oxidů.

Tabulka 1.: Chemické složení vstupních surovin s množstvím oxidů

Surovina	Volný CaO	Celkové CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Ztráta žháním
Vysokoteplotní popílek	0,05	3,44	58,80	19,70	8,15	0,18	1,43
Pálené vápno	85,30	86,10	1,18	0,56	0,48	0,38	2,70
Křemičitý písek	0,05	0,17	86,10	5,47	1,58	0,17	1,12
Mikrosilika	0,12	0,40	93,20	0,23	0,90	0,29	2,69

Na vstupních surovinách byla také stanovena jejich měrná hmotnost a měrný povrch (viz Tabulka 2.). Měrný povrch ovlivňuje rozpustnost surovin a tím nasycování roztoku ionty vápníku a křemíku. Měrný povrch surovin byl stanoven permeabilní metodou dle Blaina. V případě mikrosiliky byla na stanovení měrného povrchu použita metoda laserové granulometrie, kdy se povrch počítá jako součet povrchů sférických částic.

Tabulka 2.: Měrná hmotnost a povrch vstupních surovin

Surovina	Měrná hmotnost [g·cm ⁻³]	Měrný povrch [cm ² ·g ⁻¹]
Vysokoteplotní popílek ¹⁾	1,97	2 800 ¹⁾
Křemičitý písek ¹⁾	2,72	3 500 ¹⁾
Mikrosilika ²⁾	2,32	15 200 ²⁾
Pálené vápno ¹⁾	3,20	4 800 ¹⁾

Metoda stanovení měrného povrchu:

¹⁾ permeabilní metoda dle Blaina,

²⁾ laserová granulometrie.

4. Experimentální část a diskuze

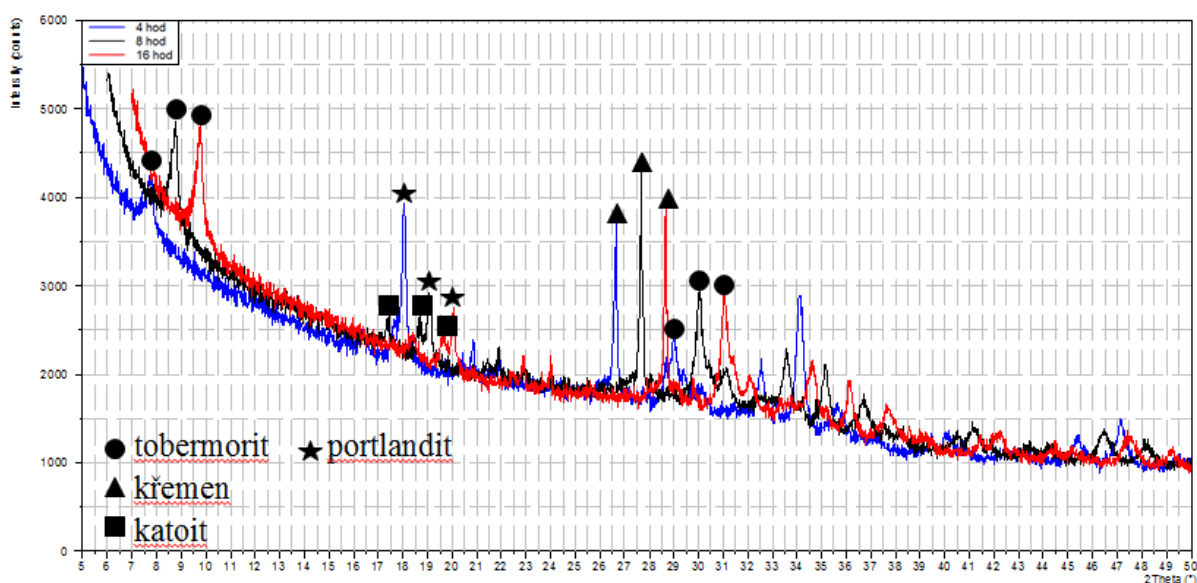
Experimentální část byla zaměřena na pozorování vlivů, které ovlivňují vznik tobermoritu. Vznik tobermoritických fází v systému C – A – S – H je závislý na molárním poměru CaO/SiO₂. Pro zhodnocení jeho vlivu byl zvolen molární poměr C/S = 0,73 a 1,00 s vyšším obsahem oxidu vápenatého.

Na základě vypočteného množství oxidů pro dané molární poměry byly zhotoveny receptury pro přípravu tobermoritu ze zvolených křemičitých surovin a přísad. Jako křemičitá surovina byl zvolen vysokoteplotní popílek, křemičitý písek a mikrosilika. Tabulky níže obsahují složení surovinových směsí vypočtených na základě chemického rozboru surovin a molárních poměrů. Referenční směsi pro přípravu tobermoritu bez příměsí jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3.: Receptury pro přípravu tobermoritu bez příměsí

			Molární poměr C/S	
			0,73	1,00
Množství surovin [%]	1	Vápno	30,04	37,70
		Vysokoteplotní popílek	69,96	62,30
	2	Vápno	40,68	48,54
		Písek mletý	59,32	51,46
	3	Vápno	42,52	50,46
		Mikrosilika	57,48	49,54

Pro všechny navržené receptury byly provedeny XRD analýzy. Na Obrázku 2. je uveden vzorový rentgenogram a v Tabulce 4. – Tabulce 6. pak výsledky mineralogických rozborů vzorů na bázi jednotlivých křemičitých surovin.



Obrázek 2.: XRD 1 Kombinace rentgenogramů vzorku s použitím vysokoteplotního popílku autoklávovaného při teplotě 190 °C s molárním poměrem C/S = 0,73

Tabulka 5.: Mineralogické složení vzorků na bázi křemičitého písku

	4 hod		8 hod		16 hod	
	0,73	1,00	0,73	1,00	0,73	1,00
Křemen	++++	++++	++++	++	++	++
Tobermorit	+	+	++	++	++	++
Phengite	++	++	++	++	++	++
Portlandit	+++++	++++	++	++	++	++
Amorfní fáze	++	++	++	++	++	++

++++ fáze tvoří majoritní část

+ fáze zastoupena v malém množství

++ fáze zastoupena ve značném množství

- fáze není přítomna

Z vyhotovených rentgenogramů lze říci, že majoritní část mineralogického složení ve vzorcích zhotovených z křemičitého písku při nízkém molárním poměru C/S a nižší době autoklávování tvoří nezreagovaný křemen a portlandit, v menší míře obsahují tobermorit a phengit. Přítomnost nespoteřovaného portlanditu ve vzorku způsobila nízká rozpustnost křemene do roztoku, tím byla omezena jeho schopnost reakce s křemenem za vzniku CSH fází. Vzorky také obsahovali phengite, jedná se o minerál obsažen v použitém křemičitém písku. Tobermorit vznikl po 8 hodinách autoklávování a s postupem hydrotermální syntézy mírně vzrůstalo jeho množství.

Tabulka 6.: Mineralogické složení vzorků na bázi mikrosiliky

	4 hod		8 hod		16 hod	
	0,73	1,00	0,73	1,00	0,73	1,00
Tobermorit	-	-	-	-	+	+
Portlandit	++	++++	++	++++	++	++++
Amorfní fáze	++++	++++	++++	++++	++++	++++

++++ fáze tvoří majoritní část

+ fáze zastoupena v malém množství

++ fáze zastoupena ve značném množství

- fáze není přítomna

Na základě výsledků rentgenogramů lze konstatovat, že majoritní část mineralogického složení vzorků zhotovených z mikrosiliky, tvoří amorfní fáze oxidu křemičitého, nevykrytalizovaných CSH fází, portlanditu a stopového množství tobermoritu. Vysoký obsah amorfní fáze je nejspíš důsledkem vysoké rozpustnosti použitého křemičitanu. Tím byly tvořeny CSH fáze s nízkým molárním poměrem C/S, tj. s vysokým obsahem SiO₂. Tyto kalciumhydrosilikáty obtížně krystalizují na tobermorit. Tobermorit vznikl až po 16 hodinách autoklávování v stopovém množství.

5. Závěr

Při použití vysokoteplotního popílku vznikl tobermorit v nejvyšším množství. Charakter oxidu křemičitého a obsah oxidu hlinitého v popílku urychloval jeho krystalizaci, což potvrzuje také obsah katoitu. Při vyšším molárním poměru C/S tobermorit vznikl ve větší míře, důsledkem je vyšší nasycení prostředí ionty Ca²⁺. Ty byly schopné reakce s ionty Si⁴⁺ za

vzniku CSH fází. Nižší poměr způsobil přesycení křemičitými ionty, za vzniku vysoko-křemičitých CSH fází, které obtížně krystalizují na tobermorit.

Majoritní část mineralogie vzorku zhotoveného z křemičitého písku pozůstávala zejména z křemene a portlanditu. Příčinou vysokého množství těchto minerálů je nízká rozpustnost křemene, důsledkem byla absence Si^{4+} iontů potřebných na vznik CSH fází, zejména tobermoritu.

Vzorky s obsahem mikrosiliky, jako křemičité látky, se vyznačovali vysokým obsahem amorfni fáze a nezreagovaného portlanditu. Příčinou je vysoká rozpustnost amorfniho křemičitanu. Ten vytvářel s portlanditem vysoko-křemičité CSH fáze, které dále téměř nekystalizovaly. Stopové množství tobermoritu bylo zaznamenáno při době syntézy 16 hod. Důsledkem toho obsahuje vzorek vysoké množství amorfni fáze skládající se hlavně z amorfniho SiO_2 a CSH gelu.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I" a projektu Grantové agentury České republiky s označením 17-14198S "Kinetika tvorby mikrostruktury silikátů v závislosti na hydrotermálních podmínkách a typu vstupních surovin"

Literatura

- [1] DROCHYTKA, R.: Pórobeton, Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1999, 156 s., ISBN 80-214-1476-6.
- [2] MATSUI, K., KIKUA, J., TSUNASHIMA, M., ISHIKAWA, T., MATSUNO, S., OGAWA, A., SATO, M.: In situ time – resolved X – ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: Influence of silica source reactivity and Al addition, Cement and Concrete Research 41, 2011, p. 510 – 519.
- [3] MOSTAFA, N.Y., EL-HEMALY, S.A.S., AL-WAKEEL, E.I., EL-KORASHY, S.A., BROWN, P.W.: Activity of silica fume and dealuminated kaolin at different temperatures, Cement and Concrete Research 31, 2001, p. 905 – 911.
- [4] SIAUCIUNAS, R., BALTUSNIKAS, A.: Influence of SiO_2 modification on hydrogarnets formation during hydrothermal synthesis, Cement and Concrete Research 33, 2003, p. 1789 – 1793.
- [5] JING, Z., JIN, F., HASHIDA, T., YAMASAKI, N., ISHIDA, E.H.: Influence of additions of coal fly ash and quartz on hydrothermal solidification of blast furnace slag., Cement and Concrete Research 38, 2008, p. 976 – 982.
- [6] KURAMA, H., TOPÇU, I.B., KARAKURT, C.: Properties of autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash, Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, p. 767 – 773.

- [7] GOÑI, S., GUERERO, A., LUXÁN, M.P., MACÍAS, A.: Activation of the fly ash pozzolanic reaction by hydrothermal conditions, *Cement and Concrete Research* 33, 2003, p. 1399 – 1405.
- [8] NARAYANAN, N., RAMAMURTHY, K.: Microstructural investigation on aerated concrete, *Cement and Concrete Research* 30, 2000, p. 457 – 464.
- [9] KIKUMA, J., TSUNASHIMA, M., ISHIKAWA, T., MATSUNO, S., OGAWA, A., MATSUI, K., SATO, M.: Effects of quartz particle size and water-to-solid ratio on hydrothermal synthesis of tobermorite studied by in-situ time-resolved X-ray diffraction, *Journal of Solid State Chemistry* 184, 2011, p. 2066 – 2074.
- [10] KLIMESCH, D.S., RAY, A.: Effects of quartz particle size on hydrogarnet formation during autoclaving at 180 °C in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system, *Cement and Concrete Research* 28, 1998, p. 1309 – 1316.
- [11] KLIMESCH, D.S., RAY, A.: Effects of quartz particle size and kaolin on hydrogarnet formation during autoclaving, *Cement and Concrete Research* 28, 1998, p. 1317 – 1323.
- [12] ISU, N., ISHIDA, H., MITSUDA, T.: Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation, *Cement and Concrete Research* 25, 1995, p. 243 – 248.

Kontakt

Ing. JÁN FLEISCHHACKER, tel: 00420 541 147 463, e-mail: fleischhacker.j@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. MAGDALÉNA KOCIÁNOVÁ, tel: 00420 541 147 525, e-mail: kocianova.m@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D., tel: 00420 541 147 463, e-mail: cerny.v@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, tel: 00420 541 147 500, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

MOŽNOSTI VYUŽITÍ POPÍLKŮ KONTAMINOVANÝCH VLIVEM DENITRIFIKACE SPALIN VE STAVEBNICTVÍ A EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ OPTIMÁLNÍ APLIKACE

POSSIBILITIES OF USING FLY ASH CONTAMINATED BY FLUE GAS DENITRIFICATION IN BUILDING INDUSTRY AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF OPTIMAL APPLICATION

Jakub Hodul, Radka Sklenářová, Rostislav Drochytka

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Anotace:

Hlavní náplní příspěvku je uvést možné způsoby využití popílků kontaminovaných vlivem denitrifikace spalin. Efektivní využití těchto popílků musí představovat minimální rizika pro životní prostředí a maximální přínos do praxe. Jako nejvhodnější se jeví jejich využití jako plnivo do polymerních správkových hmot na epoxidové bázi, a proto se tato možnost také experimentálně prověřila. Na základě výsledků pevností bylo stanoveno optimální množství plnění. V závěru práce je zhodnocen výsledek poloprovozního ověření, kdy byl vyvinutou polymerní správkovou hmotou reprofilován poškozený betonový prefabrikovaný dílec.

Annotation:

The main content of the paper is to introduce possible ways of using fly ashes contaminated due to flue gas denitrification. Effective utilization of the fly ashes must exhibit a minimum risks for the environment and maximum benefit to the practice. As one of the most appropriate application seems to be utilization as a filler in polymeric repair materials based on epoxy resin, and therefore this possibility is also experimentally verified. Mainly on the base of the strength results optimum amount of filling was determined. In conclusion the results of the pilot verification is evaluated, when damaged precast concrete panel was re-profiled by developed polymeric patching material.

Klíčová slova:

Denitrifikace spalin, kontaminovaný popílek, správkové hmoty, epoxidová pryskyřice.

Keywords:

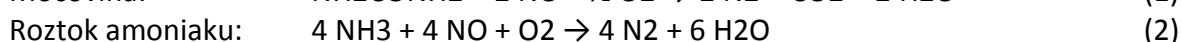
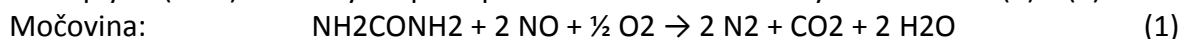
Flue gas denitrification, contaminated fly ash, patching materials, epoxy resin.

1. Úvod

S odhalením škodlivosti oxidů dusíku (NO_x) ve spalínách se zvýšil zájem o výzkum v oblasti mechanismu jejich tvorby a dále byl vyvíjeny i technologie na odstranění těchto škodlivin ze spalin. Zásadní změna pak nastává legislativním opatřením, vyhláškou č. 415/2012 Sb. v platném znění, která zpracovává příslušné předpisy Evropské unie týkající se snížení emisních limitů podle které od 1. 1. 2016 a dále pak opatření platné od 1. 1. 2020 týkající se zdrojů s výjimkou. Pod pojmem oxidy dusíku, obecně označované NO_x nejčastěji rozumíme oxid dusnatý - NO a oxid dusičitý - NO₂. Instalace denitrifikačních technologií je především za účelem snížení negativního dopadu na životní prostředí, která se však řídí zejména ekonomickým hlediskem celého procesu. Bohužel z důvodu minimalizace investic do sekundárních opatření jsou v ČR často instalovány technologie s metodou selektivní nekatalytické redukce (SNCR), při kterých dochází ke vstřikování roztoku močoviny nebo čpavkové vody (NH₃) do prostoru spalovací komory a dochází tak k redukcí NO_x až na dusík a vodu. Avšak tato technologie má zásadní vliv na výslednou kvalitu produkovaných popílků, které navíc v alkalickém prostředí bouřlivě reagují za masivního uvolnění čpavku (NH₃), a proto je už není možno využít jako aktivní příměs do betonu, jako tomu bývalo u popílků nekontaminovaných vlivem SNCR technologie [1]. Z toho důvodu je potřeba najít nové optimální oblasti využití těchto popílků a to nejlépe v oblasti stavebnictví, kde se popílek využívá v největším množství. Avšak efektivní využití tohoto popílku musí představovat minimální rizika pro životní prostředí a maximální přínos do praxe.

▪ Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Při selektivní nekatalytické redukcí (SNCR) oxidů dusíku je redukční činidlo vstřikováno ve formě vodného roztoku (roztok amoniaku (NH₃), močovina (NH₂CONH₂) – používaná v ČR) nebo plynu (NH₃) do horkých spalin podle reakcí znázorněných rovnicemi (1) a (2).



Optimální teplotní rozptyl, ve kterém dojde k redukcí NO_x, leží v závislosti na složení spalin mezi 900 a 1100 °C. Při dosažení vyšších teplot se nadbytečný amoniak (NH₃) začne oxidovat, což má za následek vznik dalšího množství NO_x. Naopak při nižších teplotách dochází ke zpomalování reakce za současného strhávání NH₃, který dále tvoří soli, což vede k druhotným problémům, proto je nutné tento efekt potřeba maximálně eliminovat [2][3].

▪ Srovnání technologií SCR a SNCR

Investiční náklady ke zřízení SNCR závisí především od množství NO_x obsaženého ve spalínách, stupně denitrifikace, množství vyčištěných spalin, kapacity skladování redukčního činidla a požadavků na provozní a řídicí techniku. Číselně se pohybují z pravidla mezi 10 – 20 % investičních nákladů na zřízení technologie selektivní katalytické redukce (SCR). Použití ji lze na téměř všechny druhy spalovacích procesů. V Tabulce 1 jsou uvedené rozdíly obou používaných metod pro snižování NO_x, zejména pak skutečnost, že použití výrazně levnější technologie SNCR s využitím močoviny jako redukčního činidla, snižuje množství NO_x o méně než polovinu oproti užití SCR technologie s použitým roztokem amoniaku (NH₃).

Tabulka 1.: Porovnání metod SNCR (močovina), SNCR (roztok NH₃), SCR [2].

Parametr	Jednotka	SNCR (45% CO(NH ₂) ₂)	SNCR (45% NH ₃)	SCR (25% NH ₃)
Vsázka odpadu	t/hod.	15		
NO _x - Koncentrace ve spalinách	mg/Nm ³	200	100	70
Investiční náklady	EUR	200 000	500 000	2 500 000
Doba provozu	rok	15	15	15
Roztok NH ₃ nebo CO(NH ₂) ₂	EUR/hod.	11,3	16,5	6
El. energie	EUR/hod.	0,15	0,15	6,7
Provozní náklady	tis. EUR/rok	109	155	395

2. Možnosti využití popílků kontaminovaných vlivem SNCR

Veřejné předcházející výzkumy byly zaměřeny většinou na možnost chemické úpravy popílků kontaminovaných vlivem denitrifikace spalin před řešením jejich možného dalšího využití v jejich neupraveném stave. V této části se uvádí stručný přehled možných využití popílku v jednotlivých oblastech a jeho vlivu na konečné produkty.

2.1. Využití v cihlářské výrobě

Z hlediska granulometrie je pro popílků požadován maximálně 10% zbytek na síť 0,125 mm, resp. 1% zbytek na síť 4 mm. Výhodou při použití popílku jako lehčiva oproti třeba dřevěným pilinám je ve snížení emisí oxidu uhličitého během výpalu, jelikož ten se při výpalu nevyhořívá resp. pouze minimálně. Nevýhodou může být také mírné zvýšení měrné aktivity izotopu Ra226 vypáleného střepu [4].

Při použití kontaminovaných popílků by však docházelo k reakci amonných solí s CaO za uvolňování plynného NH₃ doprovázené silným zápachem, což by jistě komplikovalo výrobu, ať už vezmeme v úvahu zdraví pracovníků tak třeba omezený emisní faktor výrobních zařízení. Kontaminovaný popílek tedy není doporučován v tomto případě užívat.

2.2. Využití do výrobků z taveného čediče

Mezi výrobky z taveného čediče patří odlitky vyrobené roztavením, opětovným vytvarováním a vychlazením vhodných přírodních hornin, zejména olivinických čedičů. Z taveného čediče se vyrábí široký sortiment dlaždic (včetně protiskluzných), trub (vloček), tvarovek a dalších speciálních odlitků. Avšak čedičové výrobky musí mít jasný zvuk, nesmí mít vady, které by mohly ovlivnit jejich funkci při určeném použití. Lze předpokládat, že narušením homogenní struktury výrobků z taveného čediče přidáním popílků jako plniva dojde k narušení homogenity materiálu, čímž by mohlo dojít k negativnímu ovlivnění fyzikálně-mechanických vlastností výsledných výrobků. Důležitým faktorem při zakomponování popílků po DeNO_x by byla dokonalá homogenizace směsi popílků s taveným čedičem a to především za účelem dokonalého obalení zrn popílků roztaveným čedičem.

Není přesně známo, zda by bylo skutečně možné popílek v horké tavenině čediče dostatečně rozmíchat, pravděpodobně by docházelo ke shlukování částic popílku a k jeho spečení, vytvoření dutin apod. Navíc by výrobní závod měl pravděpodobně vysoké emisní hodnoty ve spalínách po výpalu takovýchto výrobků.

2.3. Využití jako plnivo do polymerních stavebních materiálů

▪ Využití do epoxidových pryskyřic (EP)

Využití kontaminovaného popílku jako plniva do hmot na epoxidové bázi (polymerbeton, polymermalty) se jeví jako reálné řešení, jelikož v čerstvém stavu by popílek nepřišel do kontaktu s vodou a vytvrzením materiálu by došlo k uzavření do jeho struktury. Tento návrh je však nutno laboratorně ověřit, jestli by nedocházelo k nežádoucím reakcím s epoxidovou maticí a také zda by byla produkce technologicky reálná.

▪ Využití do polyesterových pryskyřic (PES)

Nejen pro zahušťování směsí, ale i např. pro snížení smrštění a stabilizaci vlastností se do těchto PES směsí používají plniva, které se užívají taktéž do polyuretanových a epoxidových pryskyřic. Plniva se dále používají tam, kde je zapotřebí udržet pryskyřici ve svislé poloze tak, aby nestékala. Avšak, při některých aplikacích může dojít k přehřátí pryskyřice a následným defektům. Mezi nejčastěji používaná plniva do PES patří: hliníkové plnivo ve formě krupice, mletá bavlna, mikrocelulósový prach, skleněné duté kuličky (mikrobalony), mletá uhlíková a aramidová vlákna, skelná sekaná vlákna a plastové kuličky zvyšující viskozitu pryskyřice [5]. Kontaminovaný popílek by se pravděpodobně mohl použít jako plnivo do PES pryskyřic. Navrhované řešení je však potřeba nejprve laboratorně prověřit, zda nedochází k nežádoucím chemickým reakcím mezi popílkem a PES maticí a dále také vyzkoušet poloproduční řešení, aby se ověřilo i technologické řešení jako např. homogenizace a aplikace vyvinuté směsi.

2.4. Využití jako plnivo do asfaltových pásů

Při výrobě hydroizolací z asfaltových směsí je základní složkou bezpochyby samotný asfalt, avšak nezbytnou součástí je také plnivo, které zlepšuje nejednu vlastnost tohoto materiálu. V první řadě přídavek jemného plniva zvyšuje bod měknutí, což v praxi znamená delší výdrž ve vysokých teplotách, neboť zvyšuje teplotu tání asfaltu. Dále zvyšuje odolnost proti stékání tím, že zdrsňuje povrch materiálu a také umožňuje nanášení relativně silných vrstev na nosnou vložku. Jako plnivo do těchto asfaltových směsí se nejčastěji využívá mletý vápenec, mletá břidlice nebo elektrárenský popílek. Dle standardizovaného postupu by množství plniva v asfaltové směsi nemělo přesáhnout 30 %. Využití kontaminovaného popílku jako plniva při výrobě hydroizolačních asfaltových pásů se jeví jako jedna z dalších možných variant. Při výrobě je však důležité klást důraz na co nejdokonalejší homogenizaci popílku s roztaveným asfaltem, aby například při použití takovéto hydroizolace nedošlo ke kontaktu popílku s vodou v pórech asfaltového pásu. Nevýhodou této možnosti však je relativně malý podíl popílku ve směsi, z čehož plyne značná neekonomičnost navrhovaného řešení.

Významným zjištěním je fakt, že kontaminovaný popílek není možné použít všude tam, kde při výrobě nebo aplikaci přichází do kontaktu s vodou nebo CaO z důvodu následného uvolnění NH₃ v plynné podobě. Mezi neoptimálnější řešení patří jeho využití jako plnivo do polymerů nebo do asfaltů. Obrovskou výhodou použití popílků jako plniva do polymerních pryskyřic je velmi dobrá cenová dostupnost popílků a předpokládané výrazné zlepšení vlastností materiálu jako je např. zvýšení pevnosti. Ověření možnosti využití kontaminovaného popílků jako plniva do polymerní správkové hmoty je uvedeno v experimentální části.

3. Experimentální část – prověření optimálního využití popílků

3.1. Použité materiály

▪ Polymerní pojivo EP-X

Pro přípravu vzorků polymerní správkové hmoty bylo použito bezrozpuštědlové dvousložkové epoxidové pojivo s označením EP-X, které se používá pro přípravu extrémně mechanicky a tepelně odolné polymermalty a polymerbetonu. Tuto hmotu lze použít v rozmezí teplot +5 °C až +30 °C, přičemž doporučená teplota je +20 °C s maximální relativní vlhkostí vzduchu 75 %. Navíc nesmí během aplikace a vytvrzování dojít do kontaktu s vodou či jiných agresivních látek. Pro aplikaci je nezbytné důkladné promísení složky A a složky B pomocí pomaluobrátkového míchadla (300 – 400 ot. /min) v daném poměru po dobu 3 minut. V rámci laboratorního prověření byly jednotlivé receptury míchány ručně v kelímku pomalými obrátkami míchátky, aby se do směsi nevmíchal vzduch, což by mohlo mít za následek zvýšenou tvorbu vzduchových pórů a zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností výsledného materiálu. V Tabulce 2 je uvedeno chemické složení použitého polymerního pojiva – samotné nevytvrzené epoxidové pryskyřice na oxiranové bázi (složka A) a tvrdidla na polyaminové bázi (složka B).

Tabulka 2.: Chemické složení použitého polymerního pojiva na epoxidové bázi (EP-X).

složka A – epoxidová pryskyřice	(alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14) solventní nafta, lehká aromatická
složka B – tvrdidlo	benzylalkohol, benzen amine, hydrogenovaný formaldehyd 2,4,6-tris (dimethylaminomethyl)fenol 4,4'-metylenbis (cyklohexylamin)

▪ Popílek kontaminovaný vlivem denitrifikační technologie SNCR

Použitý popílek pocházel z teplárny Třebovice, kde je zavedena technologie denitrifikace SNCR. Stanovení distribuce velikosti částic bylo provedeno metodou laserové difrakce na přístroji MALVERN Mastersizer 2000 suchou cestou. Bylo zjištěno, že popílek obsahuje velikost částic v rozmezí 0–355 μm, přičemž největší zastoupení představuje frakce 1–30 μm. Chemické složení popílků je uvedeno v Tabulce 3.

Tabulka 3.: Chemické složení kontaminovaného popílku(EP-X).

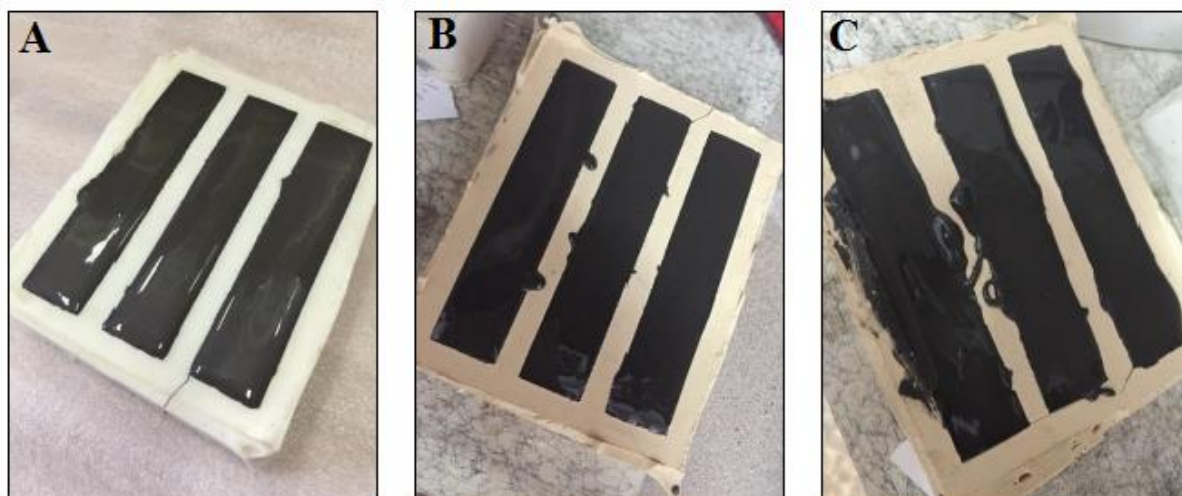
Parametr	Množství
Sušina [%]	99,95
Amonné ionty [mg/kg suš.]	3,79
Sírany [SO ₃]	0,25
SiO ₂ [% suš.]	53,4
CaO [% suš.]	4,13
Celk. organ. uhlík TOC [% suš.]	5,2

3.2. Prověřované receptury

V rámci experimentu bylo prověřováno 5 receptur (viz Tabulka 4), přičemž z každé bylo potřeba namíchat směs o hmotnosti 220 g s rozdílným množstvím použitého kontaminovaného popílku, jak je uvedeno v Tabulce 4. Nejprve byla navážena vypočtená množství složky A epoxidové pryskyřice EP-X, do ní bylo následně zamícháno příslušné množství kontaminovaného popílku, nakonec byla přimíchána složka B (tvrdidlo) a směs byla důkladně zhomogenizovaná. Poměr složek A:B byl 3,2:1, přičemž obě složky byly nízko viskózní. Následně byly naplněny silikonové formy (Obrázek 1) a vzorky byly uloženy v laboratorním prostředí po dobu 28 dní. Poté byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Výsledky byly srovnány s referenční hmotou, která obsahovala jako plnivo běžně používaný čistý křemičitý písek Dorsilit frakce 0,1 – 1,5 mm s komerčním označením ISG 1. Množství plnění u referenčních receptur bylo stejné a také byla použita stejná epoxidová pryskyřice EP-X.

Tabulka 4.: Navržené receptury pro ověření vhodnosti kontaminovaného popílku jako plniva

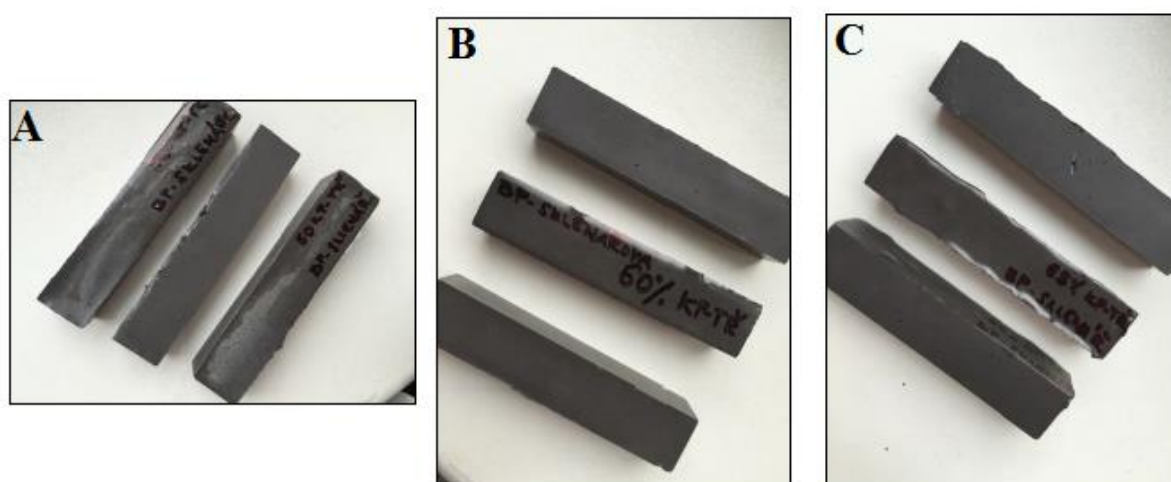
Složka	EP50	EP60	EP65	EP70	EP75
EP-X (A) [%]	38,1	30,5	26,7	22,9	19,0
EP-X (B) [%]	11,9	9,5	8,3	7,1	6,0
Popílek [%]	50	60	65	70	75



Obrázek 1.: Vzorčky polymerní správkové hmoty na epoxidové bázi polymerizující v silikonových trojformách (A – EP50, B – EP60, C – EP65)

3.3. Popis prováděných zkoušek

Na trámečcích o rozměrech 20x20x100 mm (Obrázek 2) byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku, přičemž se vycházelo z normy ČSN EN 13892-2 *Metody zkoušení potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku*. Na základě výsledků pevností byla vybrána nejlepší receptura s optimálním množstvím kontaminovaného popílku ve směsi a tato receptura byla použita pro reprofilaci prefabrikovaného betonového dílce. Při přípravě jednotlivých receptur byla také sledována konzistence směsi, stupeň homogenizace a zároveň jestli se neuvolňuje ze směsi amoniak NH_3 , případně jestli nedochází k nějakým nežádoucím reakcím mezi plnivem a pojivem.

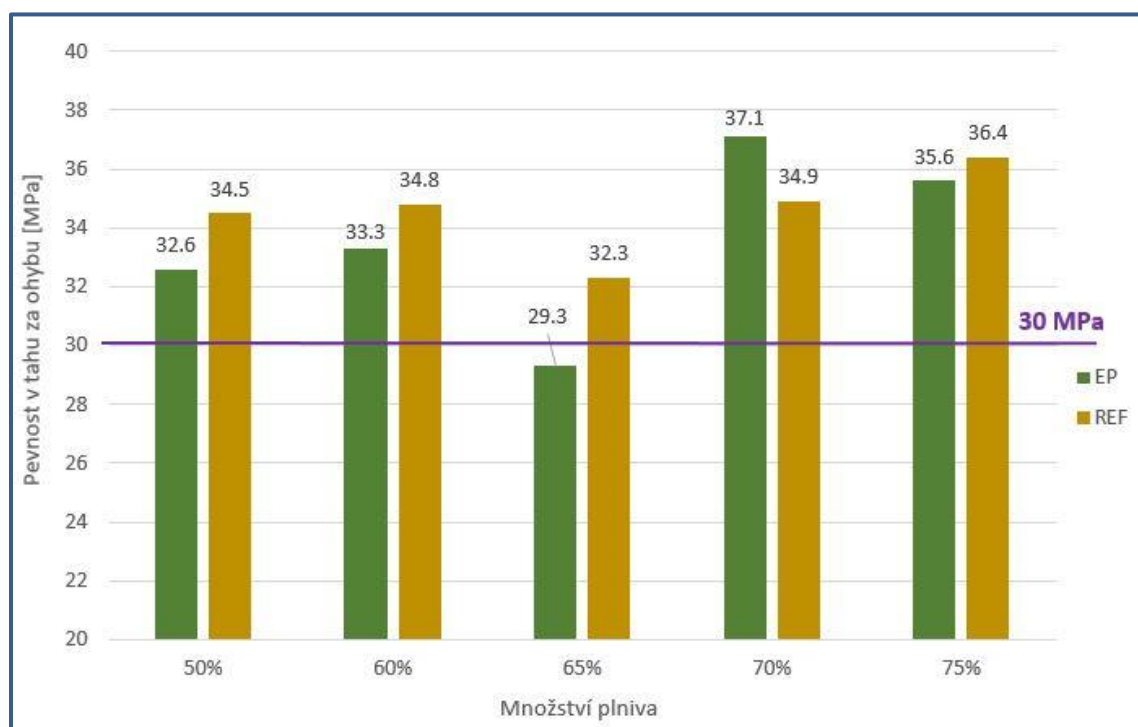


Obrázek 2.: Vzorčky polymerní správkové hmoty na epoxidové bázi s různým množstvím kontaminovaného popílku připravené pro zkoušení (A – EP50, B – EP60, C – EP65)

3.4. Výsledky a diskuse

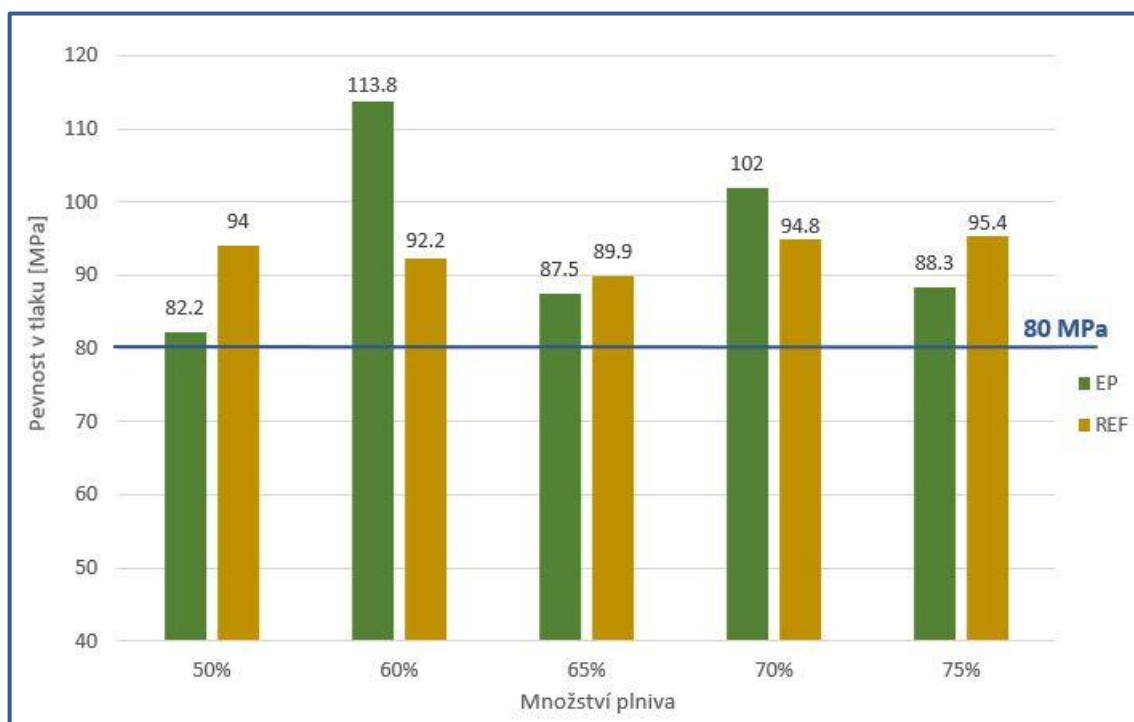
▪ Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Grafické vyhodnocení výsledků pevností v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku jsou uvedeny na Obrázku 3 a Obrázku 4. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu (37,1 MPa) vykazovaly vzorky s 70% obsahem kontaminovaného popílku, přičemž tato hodnota je vyšší než u referenční hmoty. Všechny ostatní receptury vykazovaly nižší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu než referenční vzorky, nicméně rozdíl byl minimální. Hranice 30 MPa byla překročena u všech vzorků, kromě receptury EP65. Tato nízká hodnota je pravděpodobně důsledkem nedostatečné homogenizaci směsi anebo příčinou může být také velké množství vzduchových pórů ve vzorku, které snižují mechanické vlastnosti vytvrzené hmoty.



Obrázek 3.: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu

Na Obrázku 4 lze vidět grafické vyhodnocení pevností v tlaku v závislosti na množství použitého plniva. Nejvyšší pevnost v tlaku vykazovaly vzorky obsahující 60 % kontaminovaného popílku, přičemž referenční hmota vykazovala přibližně o 20 MPa nižší pevnost v tlaku. Vyšších pevností oproti referenčním vzorkům bylo dosaženo také u receptury EP70.



Obrázek 4.: Výsledky pevnosti v tlaku

▪ Poloprovozní ověření

Při přípravě vzorků polymerní správkové malty s obsahem kontaminovaného popílku bylo pozorováno, že nedochází k uvolňování amoniaku (NH_3) do okolního prostředí a také ani k nežádoucím chemickým reakcím mezi popílkem a epoxidovou maticí. Z výše uvedených výsledků se jako nejvhodnější jeví receptura EP60, která vykazovala nejvyšší pevnost v tlaku (113,8 MPa), homogenizace této směsi nebyla obtížná a konzistence byla velice vhodná ke snadnému ručnímu nanášení. Především z těchto důvodů se byla tato vyvinutá hmota vybrána jako optimální pro poloprovozní ověření, které představovalo reprofilaci poškozeného prefabrikovaného betonového dílce (obrubičku). Foto před a po reprofilaci lze vidět na následujících obrázcích. Reprofilovaný obrubník byl vystaven po 28 dnech od nanesení správkové hmoty okolním povětrnostním vlivům po dobu 4 měsíců, kdy na něj působil déšť, sníh a teploty v rozmezí $-20\text{ }^\circ\text{C}$ až $+20\text{ }^\circ\text{C}$. Po této době bylo sledováno, jestli nedochází k nějaké degradaci, popřípadě ke ztrátě soudržnosti této hmoty. Jak lze vidět na následujících obrázcích vyvinutá polymerní správková hmota odolala vnějším povětrnostním podmínkám – nedošlo ke degradaci ani ztrátě soudržnosti



Obrázek 5.: Reprofilovaný obrubník (aplikace hmoty EP60)



Obrázek 6.: Reprofilovaný obrubník po 4 měsících od aplikace hmoty EP60

4. Závěr

V rámci průzkumu optimálního využití popílku kontaminovaného vlivem denitrifikační technologie SNCR bylo zjištěno, že jako nejvhodnější se jeví jeho využití jako plnivo do polymerních správkových hmot na epoxidové bázi, a proto se tato možnost také experimentálně prověřovala. Experimentálně bylo zjištěno, že nedochází k úniku NH_3 , jako tomu je při zamíchání kontaminovaného popílku do cementové malty. Na základě výsledků pevností a sledováním konzistence hmoty bylo zjištěno, že optimální množství popílku v epoxidové správkové hmotě činí 60 % - receptura EP60. Tato hmota byla také poloprovozně ověřena, kdy se pomocí ní úspěšně reprofiloval roh poškozeného betonového obrubníku. Vysoká přídržnost k podkladnímu betonu a soudržnost vyvinuté polymerní správkové hmoty byla zachována také po vystavení okolním povětrnostním vlivům. Z výsledků lze usuzovat, že využití popílků kontaminovaných vlivem denitrifikační technologie lze úspěšně využít jako plnivo do polymerní správkové malty na epoxidové bázi, čímž se také sníží ekonomické náklady na produkci a bude to mít také pozitivní vliv na některé ekologické aspekty.

Poděkování

Tato práce byla vytvořena v rámci řešení projektu FAST-J-17-4575 „Experimentální prověření možnosti využití popílků kontaminovaných vlivem DeNOx technologie do polymerních správkových hmot“ a v rámci řešení projektu TA04010425 „Komplexní systém speciálních správkových hmot s využitím druhotných surovin pro průmyslové provozy“.

Literatura

- [1] SNOB, Roman. VLIV TECHNOLOGIE SNCR Z POHLEDU ZPRACOVATELE A DISTRIBUTORA POPÍLKU. In: Popílký ve stavebnictví: Sborník recenzovaných přednášek II. mezinárodní konference. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015, s. 189-195, ISBN 978-80-214-5192-6.
- [2] VON DER HEIDE, Bernd. Das SNCR-Verfahren - Verfahrenstechnische Grundlagen. In: Ms-umwelt [online].
- [3] Umwelt Bundesamt. Beschreibung unterschiedlicher Techniken und deren Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickstoffoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen. In: Umweltbundesamt [online].
- [4] SOKOLÁŘ, R. Vedlejší energetické produkty ve výrobě stavebníkeramiky. In: Tretiruka.cz [online]. ©2016
- [5] Havel Composites. EPOXIDY, POLYESTERY, TUŽIDLA a GELCOATY. Havelcomposites.com [online]. ©2016

Kontakt

Bc. SKLENÁŘOVÁ RADKA, e-mail: Radka.Sklenarova@vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, tel: +420 541 147 7500, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. JAKUB HODUL, tel: +420 541 147 7530, e-mail: hodul.j@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

TECHNOLOGIE INJEKTÁŽE SYPANÝCH HRÁZÍ S POUŽITÍM POPÍLKU

GROUTING TECHNOLOGY OF EMBANKMENT DAMS BY USING FLY ASH

Kociánová Magdaléna, Černý Vít, Drochytka Rostislav

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Anotace:

Technologie těsnění písků nebo štěrkopísků chemickými injektážemi jsou známé a používané již dlouhou dobu. Tyto technologie bývají ovšem finančně nákladné. Snahou je proto hledat nové hmoty a optimální technologie, které vedou k možnému snížení ekonomického hlediska směsi. Jednou z možností technologie sanace sypaných hrází je klasická injektáž s využitím popílku ze spalování uhlí.

Annotation:

Sealing technology of sand or gravel by chemical injections are known and used for a long time. These technologies are mostly expensive. Therefore the aim is to find new materials and the optimal technologies that lead to a possible reduction of economic viewpoint of the mixture. One of the possibilities of remediation technology earth dams is a classic injection with the use of fly ash from coal combustion.

Klíčová slova:

Injektáž, sypaná hráz, vápno, popílek

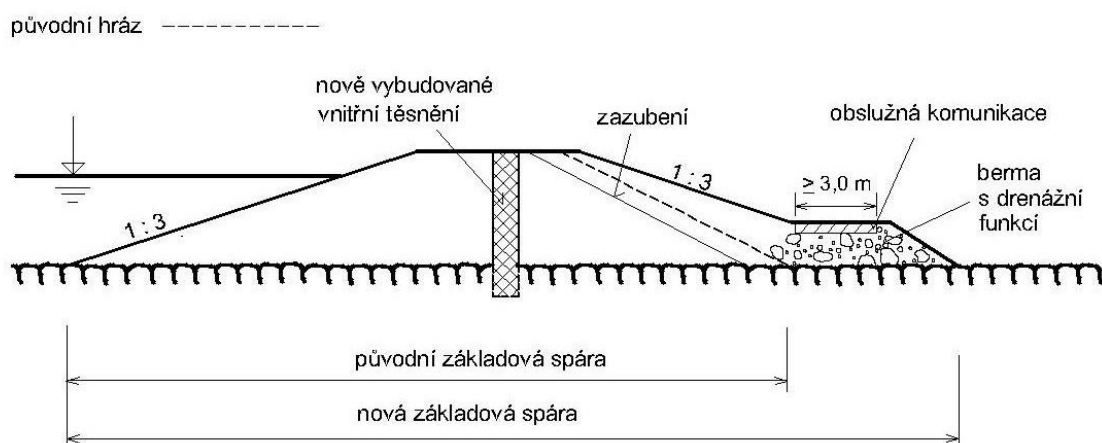
Keywords:

Grouting, embankment dam, lime, fly ash

1. Úvod

Sypané hráze patří mezi nejjednodušší typ vodních děl a v ČR se nachází v největším měřítku. Obecně se jedná o malá vodní díla typu melioračních nádrží, hrází rybníků atd. [1] Největší rozmach výstavby těchto hrází byl v 60. až 90. letech 20. století. Díky stárí a nestejnomyšlnému sedání dochází u těchto hrází často k průsakům a v některých případech až ke ztrátě stability. Projevy poruch těchto hrází se nejvíce objevují v období vyšších srážek či při záplavách. Těmto poruchám je ovšem nutné předcházet a nevěnovat jim pozornost až v době, kdy následky přírodních katastrof, především záplavy, způsobí vážné krizové situace, při nichž mohou vznikat jak ztráty na životech, tak rozsáhlé materiálové škody.

Mezi nejčastější strukturální opatření na ochranu před povodněmi patří hráze nádrží a hráze podél vodních toků, které musí být dostatečně nepropustné. Průsak tělesem hráze a jejím podloží je omezen vlastním tělesem hráze a těsnícím prvkem. V případě, že je těsnění hráze nedostatečné, je nutné provést sanaci vhodně zvoleným způsobem pro daný typ hráze. Ve většině případů sypaných hrází se jedná o vybudování svislého těsnícího prvku z koruny hráze (viz Obrázek 1.). Pokud je hráz založena na propustných vrstvách, je nutné prodloužit těsnící stěnu vedenou tělesem hráze až do jejího podloží.



Obrázek 1.: Vybudování dodatečného svislého těsnícího prvku [2]

Při provádění sanace sypaných hrází je důležitý vhodný výběr technologie, který je potřeba volit tak, aby samotné technické provádění nezpůsobovalo další poškození hráze. Jako optimální se při sanaci sypaných hrází jeví použití technologie klasickou injektáží. Výběr technologie byl proveden na základě druhu hráze, jejího poškození a s ohledem na místní podmínky. Pro tuto technologii a zároveň pro zamezení průsaků hráze bylo nutné zvolit vhodnou injektážní směs. Mezi nejčastěji používané injektážní směsi patří jílo-cementové suspenze, u kterých prostupuje vod velmi pomalu. Pro zajištění geotechnických vlastností se volí větší množství jílu. V rámci návrhu směsi se předpokládá i vhodné využití vedlejších energetických produktů, které se vyznačují nejen nízkými pořizovacími náklady, ale v mnoha případech jsou plnohodnotnou náhradou klasických stavebních látek. Všechny vstupní materiály ovšem musí splňovat požadavky kladené na návrh směsi.

Na navržených směsích se provádí řada zkoušek, které musí odpovídat požadavkům injekční směsi. Po přezkoumání zkoušek může být proveden výběr optimálního složení injektážní směsi vhodné pro sanaci sypaných hrází. Vzájemná kompatibilita jednotlivých složek a vhodný výběr technologie zajistí správnou injektáž. Jako názorná ukázka aplikace je v rámci příspěvku uvedena technologie klasické injektáže rybníku na Přeloučsku.

2. Technologie provádění sanace sypaných hrází

Jednou z aplikací ověření funkčnosti technologie klasickou injektáží byla sanace rybníku v okrese Pardubice. Rozloha rybníku je cca 12 Ha. Hráz rybníku je v koruně široká 4 m, výška návodní strany hráze od hladiny vody je 1 m a výška vzdušné strany hráze je 3m. Zainjektování hráze bylo v úsecích o délce 20 m a hloubce 5 m. Jak z technologického, tak z ekonomického hlediska se jako nejvhodnější způsob provedení sanace sypané hráze rybníku jevílo použití technologie klasickou injektáží. Výhodou této technologie je jednoduchost a účinnost. Zároveň lze touto technologií zlepšit vlastnosti základových půd. Obecně se technologie injektáže dle [3] provádí tak, že je injekční směs vháněna pod tlakem do hráze. Tímto způsobem se dosahuje vyplnění nespojitostí hráze, které jsou příčinou průsaků. Zaplněním těchto prostor dochází ke zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů těsnícího jádra hráze.

2.1. Postup při provádění sanace

Před zahájením injekčních prací je důležitý návrh rozložení a počet vrtů. U testovaného rybníku byla na základě dříve provedeného průzkumu, navržena jednořadá injekční clona se vzdáleností mezi vrty cca 400 mm. Provedení oprav sypané hráze bylo započato ještě před zimním obdobím proto, aby byla hráz připravena na nadcházející zimní období a především na jarní povodňové stavy vznikající tajícím sněhem a povodňovými stavy z regionálních nebo lokálních srážek.

Jelikož byla hráz složena převážně z jemnozrnných náplavů, byla pro vyhloubení vrtů zvolena metoda rotačního vrtání při současném pažení. Provádění injektáže, jak ve své knize uvádí Verfel, J. [4], tak začíná vždy vyhloubením vrtu (Obrázek 2.). Průměr vrtu, v případě vybraného rybníku, měřil 80 mm. Do vyvrtaného otvoru bylo nutné zavést polymerní injektážní trubky o průměru 40 mm, které byly ve spodní části perforované a v horní části opatřeny závitěm, pro osazení ventilu (Obrázek 3.).



Obrázek 2.: Vyhloubení vrtu – metoda rotačního vrtání při současném pažení



Obrázek 3.: Polymerní injektážní trubka v horní části opatřena závitem

Aby byla zajištěna stabilita vrtu a umožněn postup injektážní směsi do horní části hráze, byly trubky ve spodní části obsypány pískem. Se zvyšující se výškou byl pro obsypání použit hrubozrnnější materiál (Obrázek 4.). Pro utěsnění trubek a jejich zajištění proti vytlačení byly horní části vrtu zabezpečeny betonovým potěrem (Obrázek 5.). Vyhloubení vrtu bylo do hloubky 4 m, konec vrtu zasahoval do paty hráze, kterou bylo potřeba zainjektovat.



Obrázek 4.: Provádění stabilizace injekční trubky pískem



Obrázek 5.: Zabezpečení horní části vrtu betonovým potěrem

Pro míchání směsi byla použita jednoduchá injekční stanice Häny IC 325 (Obrázek 6.). Jednalo se o dezintegrační míchací zařízení, ve kterém byly suroviny míchány společně s vodou. Dávkování složek probíhalo hmotnostně. Proces míchání trval cca 5 min a hned po namíchání byla směs vedena pomocí čerpadla a gumových hadic do předem připravených vývrtů (Obrázek 7.).



Obrázek 6.: Míchací souprava Häny IC 325



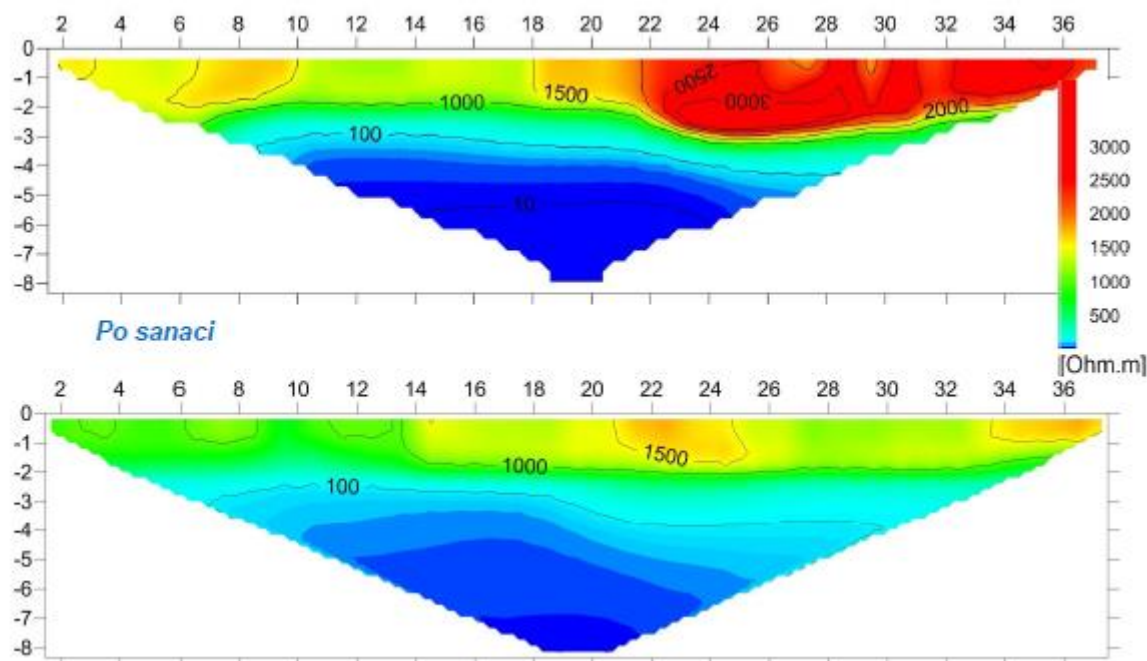
Obrázek 7.: Převedení směsi pomocí gumových hadic

Po provedení všech injekčních prací bylo nutné provést ukončení vrtu. Nejprve se odšroubovaly ventily, poté, po 24 hod, mohlo být provedeno odřezání vyčnívajících trubek nad povrchem terénu. Po dobu 24 hod se trubky nechávají záměrně vyčnívat nad povrch z důvodu případného doinjektování vrtů. V případě vybraného rybníku nebylo nutné doinjektování provádět.

2.2. Kontrola injekčních prací

Po uplynulé době bylo na daném rybníku provedena kontrola injekčních prací, která se prováděla pomocí georadarového měření (odporová tomografie). Účelem měření byla diagnostika vybraného úseku tělesa hráze a kontrola sanace. Měření bylo provedeno ve dvou etapách a to před sanací a po sanaci. Délka georadarového měření byla 40 m a šířka 4 m. Georadarové měření bylo uskutečněno na 4 podélných profilech (L0 až L3) a na ně kolmých georadarových liniích (L4 až L15). Pro měření byl použit georadar pulse EKKO 100 (Sensors & Software Inc., Kanada) s centrální frekvencí 100 MHz, krokem 0,25 m a rozstupem antén 1 m. Na základě měření před sanací a po sanaci bylo zjištěno, že po zainjektování hráze voda pronikala pouze k těsnicí cloně a dále neprosakovala. Pro injektáž byla zvolena směs složená z jílu Ge (75 %), fluidního popílku (25 %) a cementu CEM I 32,5 R (4 % z hmotnosti jílu Ge).

Na základě struktury rozdílového odporového řezu M3 - M1 lze v hloubce 2,5 m až 3 m vymežit anomální zónu, metrůž 8 až 18 (světle fialové poloha vyznačené šipkami), která je interpretována jako místo průsaku tělesem hráze, které bylo úspěšně zainjektováno (Obrázek 8.).



Obrázek 8.: Odporové řezy M1 (před injektáží) a M3 (po injektáži)

3. Použité materiály a metodika prováděných zkoušek

Pro návrh injekční směsi byl použit jíl Ge (Grüne Erde, tj. zelený jíl) z oblasti Chebské a Sokolovské pánve. Jedná se o montmorilloniticko-illiticko-kaolinitický jíl. Montmorillonit způsobuje bobtnání jílu Ge. Přítomností montmorillonitu je tedy dosaženo snížení sorpčních vlastností pro vodu. Plastičnost je dosažena přítomností illitu. Kombinace mineralogických složek jílu Ge je ideální pro návrh injekční směsi. Mineralogické složení jílu je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1.: Mineralogické složení jílu Ge

Montmorillonit	Illit	Kaolinit	Křemen	Živec	Ostatní
29 %	27 %	11 %	20 %	1 %	12 %

Dalším použitým materiálem byl fluidní popílek (FA). Ve srovnání s klasickým popílek se CaO ve fluidním popílku nachází v nezreagované formě, tzn. jako měkce pálené vápno. Přítomný CaO je velmi reaktivní, čehož bylo využito při stabilizaci směsi. Fluidní popílek je zároveň z hlediska granulometrie velmi jemnozrný, s významným podílem částic nad hodnotu 0,045 mm, a je tedy vhodný jako částečná náhrada jílu Ge. Jako optimální se jevílo použití popílku v množství 20 % (z hmotnosti jílu Ge). Vlastnosti popílků jsou dány především typem spalovaného materiálu. V Tabulce 2. je uvedeno chemické složení použitého popílku.

Tabulka 2.: Chemické složení popílku (FA)

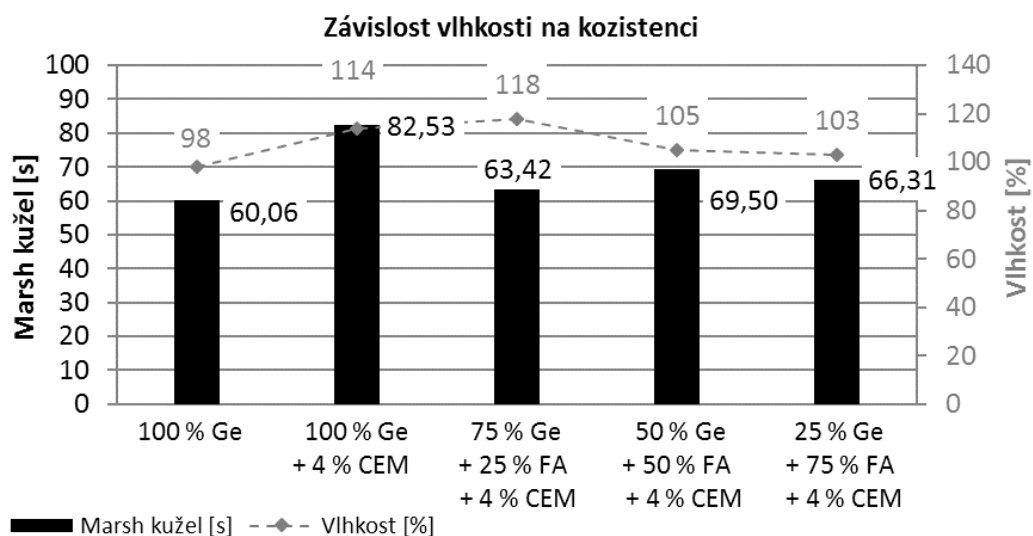
Název	Chemické složení [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
FA	28,6	18,0	6,5	7,8	31,1	0,9	0,5	0,3	0,3

Při návrhu směsi plní funkci stabilizace pojiva. Vhodnými pojivy pro stabilizaci jsou vápno a cement. Vápno se pro stabilizaci volí dle [5] vždy hašené, nebo nehašené, nikdy ne však vápenec. Vápno na rozdíl od cementu chemicky atakuje jílovitou část zeminy. Všechny jílové minerály jsou tak napadány vápnem a to především podle obsahu křemíku. Množství vápna obsaženého v pojivu plnilo funkci stabilizace směsi. Z tohoto důvodu nebylo nutné do směsi přidávat další množství vápna. Pro zvýšení pevnosti a nepropustnosti byl při návrhu směsi použit cement CEM I 32,5 R v množství 4 % (z hmotnosti jílu).

3.1. Metodika prováděných zkoušek

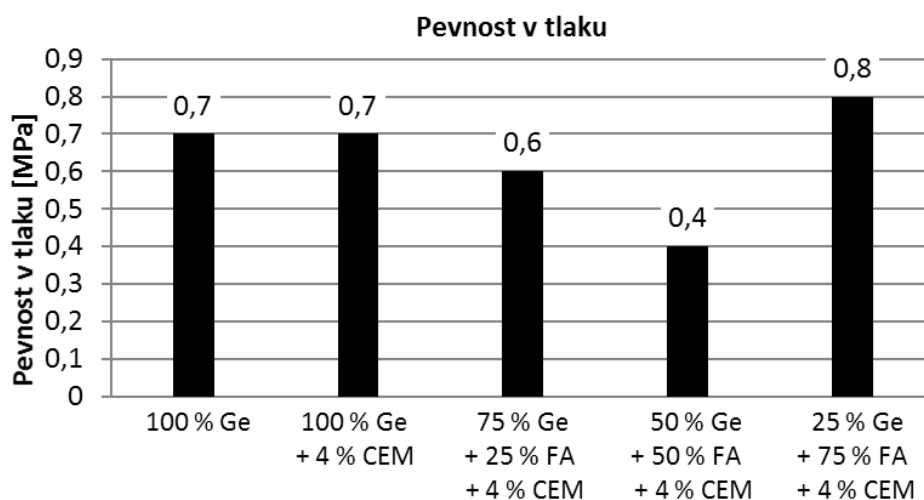
Pro správný návrh směsi je nutné provést řadu zkoušek v laboratoři. Na základě získaných poznatků se určí vhodnost použití a množství jednotlivých složek. Předpis je třeba stanovit pro každou stavbu zvlášť. A to díky tomu, že pouze změna chemismu vody či jílové složky může změnit složení celé injekční směsi. Mezi jednu z nejdůležitějších zkoušek, která se na směsi provádí, je stanovení konzistence pomocí Marsh kužele. Zkouška se provádí dle ČSN EN 14 117 [6]. Směs se nalije do kuželu (objemu 1,5 l) přes síto o velikosti ok 1 mm. Po naplnění se uvolní spodní uzávěr a měří se doba vytečení 0,5 l směsi. Doba vytečení by se měla pohybovat v rozmezí od 40 s do 100 s.

V rámci zkoušení byla ověřena spousta směsí, z nichž dále v příspěvku uvádím pouze výběr směsí, ve kterých byl použit jíl Ge se zvyšujícím se množstvím fluidního popílku postupně o 25 %. Zároveň byl ke směsím přidán cement CEM I 32,5 R v množství 4 % (z hmotnosti jílu a popílku). V následujících grafech jsou uvedeny výsledky zkoušek.



Obrázek 9.: Závislost viskozity na vlhkosti směsi jílu Ge, FA a cementu

Jak je vidět z Obrázku č. 9 přidavek fluidního popílku zvyšoval potřebné množství vody pro stanovení konzistence. Bylo to způsobeno vyšším množstvím CaO. Přidavek popílku nad 50 % bylo neefektivní. Popílek zlepšoval reologické vlastnosti směsi, ale zároveň zvyšoval dekantaci. V tomto případě bylo při návrhu vhodné volit množství popílku v hodnotě do 25 %. Přítomnost fluidního popílku nad 50 % znesnadňovala reologické vlastnosti směsi v čerstvém stavu.



Obrázek 10.: Výsledky stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání směsí z jílu Ge, FA a cementu

Na Obrázku 10. je vidět, že zvyšující se množství popílku způsobovalo snížení pevnosti. Jíl spolu s popílkem tvoří méně pevné vazby, což vedlo k poklesu pevnosti. Zvýšení pevnosti pak bylo zaznamenáno při použití fluidního popílku v hodnotě 75 %, což bylo způsobeno vyšším množstvím CaO v popílku a jeho reakcí s vodou a jílovými minerály.

4. Závěr

V rámci příspěvku byla uvedena technologie sanace sypané hráze pilotního rybníku v oblasti Přeloučska.

U hráze se vyskytovaly značné průsaky, kterým bylo potřeba zabránit. Z tohoto důvodu byla provedena sanace rybníku pomocí optimální technologie klasické injektáže a vhodnou injektážní směsí.

Provedení oprav sypané hráze bylo započato ještě před zimním obdobím proto, aby byla hráz připravena na nadcházející zimní období a především na jarní povodňové stavy vznikající tajícím sněhem a povodňovými stavy z regionálních nebo lokálních srážek.

Postup prací byl započat návrhem rozložením, počtem a průměrem vrtů, následovala samotná aplikace a po ukončení injektážních prací byla provedena kontrolou zainjektovaného úseku. Na hrázi byly navrženy vrty o průměru 80 mm, které byly uloženy liniovým způsobem. Pomocí výkonné čerpací stanice byla směs vháněna pod tlakem

(až 100 bar) do předem připravených vývrtů. Po zainjektování všech vrtů bylo provedeno ukončení injektážních trubek. Stav opravené hráze byl pravidelně kontrolován a měřen.

Z výsledků georadarového měření před sanací bylo patrné porušení těsnícího jádra do hloubky 2,5 m. V důsledku této poruchy došlo k průchodu hladiny podzemní vody tělesem hráze, což mělo za následek příčinu lokálních úniků vody. Vlivem sanace došlo k razantní změně struktury hráze. Z georadarového měření byla patrná obnova těsnícího jádra hráze a zatlačení hladiny podzemní vody k bázi hráze. Lze konstatovat, že vhodnou technologií sanace a použitím vhodné injektážní směsi byla obnovena funkčnost hráze. Injektáž hráze vybraného rybníku tak lze posuzovat za úspěšnou.

Pro návrh injektážní směsi byl použit jílu Ge, fluidní popílek a cement. Jako optimální se ukázalo použití injektážní směsi složené ze 75 % jílu Ge, 25 % fluidního popílku a 4 % cementu.

CEM I 32,5 R. Takto navržená směs splňovala požadované vlastnosti pro návrh injektážní směsi. Zlepšovala reologické vlastnosti směsi a snižovala dekantaci. Pevnost v tlaku této směsi dosahovala hodnoty 0,6 MPa. Zvyšování hodnoty pevnosti v tlaku bylo ovlivněno množstvím přidaného popílku ve směsi. Největší zvýšení pevnosti v tlaku pak bylo zaznamenáno při použití fluidního popílku v hodnotě 75 %, což bylo způsobeno vyšším množstvím CaO v popílku a jeho reakcí s vodou a jílovými minerály. Z hlediska návrhu směsi je ovšem zvyšování množství popílku ve směsi nad 25 % neefektivní.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Literatura

- [1] Sypané hráze: Sypaná zemní (popř. kamenitá) hráz s těsnícím prvkem. DET_14/6.2.indd [online]. 2014 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOM1TLo5UgePQJ9yCVIbC5WOFcBcB3dohQA.
- [2] ŘÍHA, J. 2010.: Ochranné hráze na vodních tocích. GRADA. 223 str. ISBN 978-80-247-3570-2.
- [3] MACEKOVÁ, V. Zakládání staveb. 2., dopl. vyd. Brno: ERA, 2006, vi, 130 s. ISBN 80-736-6055-5.
- [4] VERFEL, J. Injektování hornin a výstavba podzemních stěn. Vyd. 2., přeprac. Bratislava: Bradlo, 1992, 511 s., 16 s. příl. ISBN 80-712-7043-1.
- [5] CAMBEFORT, H.: Injection des Sols. Edition Eyrolles, Paris 1964.
- [6] ČSN EN 14 117 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení viskozity cementových injektážních výrobků.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

Kontakt

Ing. MAGDALÉNA KOCIÁNOVÁ, tel: 00420 541 147 525, e-mail: kocianova.m@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D., tel: 00420 541 147 463, e-mail: cerny.v@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, tel: 00420 541 147 500, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

VLIV POPÍLKU A PŘÍRAD NA STABILIZACI A ZTEKUCENÍ ZEMIN

INFLUENCE OF FLY ASH AND ADDITIVES FOR SOIL STABILIZATION AND LIQUEFACTION

Magdaléna Kociánová, Vít Černý, Rostislav Drochytka

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Anotace:

Příspěvek pojednává o výzkumu stabilizace a ztekucení zemin pro jejich zpětné použití ve formě samozhutnitelných záливоk. Tyto zálivky by bylo možno použít pro vyplnění prostoru inženýrských sítí. Předpokladem je, že se zemina stabilizuje vhodnou stabilizační přísadou. Kompozit je dále potřeba ztekutit pomocí vhodných ztekučovadel. V rámci příspěvku je zhodnocen i vliv popílků na stabilizaci či ztekucení zemin.

Annotation:

The paper describes the research of stabilization and liquefaction of soils for their re-use in the form of self-compacting grout. These grouts could be used to fill the space of underground utilities. The prerequisite is that the soil is stabilized by suitable stabilizers. The composite is also needed liquefied by a suitable liquefier. Within this paper is also evaluated the influence of fly ash for stabilization or liquefaction of soils.

Klíčová slova:

Zemina, stabilizace, ztekucení, přísada, vápno, cement, popílek

Keywords:

Soil stabilization, liquefaction, additive, lime, cement, fly ash

1. Úvod

Při realizaci inženýrských sítí se vyprodukuje velké množství zemin různého složení či frakce. Tyto zeminy ve většině případů nesplňují požadavky pro jejich zpětné použití. Především se jedná o zeminy citlivé na ztekucení, měkké, plastické, degradované zeminy a zeminy obsahující vyšší množství organických látek a vlhkosti. Tyto zeminy pak často končí na skládkách. Podle nynější vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu [1] a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady [2], lze na povrchu terénu ze stavebních odpadů využívat pouze vytěžené zeminy a hlušiny, ze kterých byly odstraněny nebezpečné složky.

V běžné praxi se úprava nevhodných zeminy provádí stabilizací za použití hydraulických pojiv, jejichž druh se volí v souvislosti s typem zeminy. Stabilizované zeminy vykazují obecně lepší vlastnosti, jako je pevnost a snížení vlhkosti [3]. Jako účinné stabilizační činidlo se jeví použití popílku. Příměs popílku k zemině může ovlivňovat jak reologické vlastnosti, tak pevnost. Částečná náhrada zeminy popílkem zároveň vede ke snížení ekonomického hlediska.

Z hlediska postupu prací je v první fázi potřeba na vykopané zemině provést zkoušky pro zjištění jejích vlastností. Důležité je především znát křivku zrnitosti, chemické a mineralogické složení zeminy. Na základě těchto parametrů se navrhuje použití vhodného druhu a množství pojiv, které by měly zajistit nárůst pevnosti. Z vlastností zeminy zároveň můžeme předběžně určit druh použití vhodně ztekucující či plastifikační přísady. Druh a množství přísad, které se k zemině přidávají, je vždy nutné laboratorně ověřit. Ztekucující a plastifikační přísady budou předmětem dalšího výzkumu úpravy zemin, ze které by vznikl tekutý kompozit, který by svými vlastnostmi nahrazoval pískový obsyp. Takto upravená zemina by se dala zužitkovat efektivněji a použít zpět v procesu výstavby inženýrských sítí.

Předpokládané výhody stabilizovaných a ztekucených zemin na bázi samozhutnitelných záливоk je např. nižší ekonomická náročnost, využití alternativních surovin a spotřeba druhotné suroviny ve formě vykopané zeminy, se kterou by se za jiných okolností zacházelo jako s odpadem.

2. Úprava zemin

Úpravu zemin lze obecně rozdělit do dvou kategorií, kterými je mechanická stabilizace (dosažena změnou fyzikálních vlastností půdních částic, např. vibrací, hutněním, přibíjením atd., viz Obrázek 1.) a chemická stabilizace (dosažena chemickou reakcí mezi stabilizátorem/pojivem a minerálními látkami v zemině, viz Obrázek 2.). Následující část příspěvku se zabývá chemickou úpravou zemin, z nichž nejznámější je stabilizace. Stabilizace zemin slouží např. pro zlepšování zpracovatelnosti, zhutnitelnosti a pevnosti zeminy. Dalším efektem stabilizace může být snížení vlhkosti zeminy, zvýšení modulu únosnosti (CBR_{sat}), zvýšení modulu přetvárnosti ($E_{def,2}$), snížení indexu plasticity (I_p) a snížení namrzavosti (β).



Obrázek 1.: Mechanické zhutnění zeminy [4]



Obrázek 2.: Stabilizace zemin [5]

2.1. Stabilizace zemin

Přidáním příměsí k zeminám bývá často dosaženo zlepšení mnoha technických vlastností. Přesto ovšem vlastnosti ošetřených zemin závisí na charakteru zeminy, druhu použitého pojiva, délce vytvrzování a na způsobu a kvalitě stavby. Pro stabilizaci jílovitých zemin se nejčastěji používá vápno. Při této úpravě dochází k dlouhodobým změnám vlastností zeminy. Tato změna spočívá v kationtové výměně, kdy volné ionty vápníků (Ca^{2+}) nahrazují v krystalové struktuře jíly ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+). Při tomto procesu dochází k přeměně z vrstevnaté struktury na strukturu zrnitou. [6] Přidáním vápna k zemině dochází ke zlepšení zpracovatelnosti, ale většinou ne ke zvýšení pevnosti. Vápno má zásadní vliv na množství vody v zemině, viskozitu a stabilizaci zemin. [7]

Protože vápno reaguje pouze s jílovými minerály na chemické úrovni, není vhodné pro použití s písčitymi zeminami. [8] U písčitých zemin se jako vhodnější stabilizační činidlo jeví použití cementu. Hlavním cílem stabilizace zemin pomocí cementu je zpevnění strukturních vazeb, které vzniknou mezi zeminou a cementem. [6] Zeminy stabilizované cementem tak mají vyšší pevnost. [7] V závislosti na druhu zeminy se volí obsah cementu, který se pohybuje v rozmezí 2 % až 15 % (z hmot. zeminy).

Jako další druh stabilizačního činidla lze uvést fluidní popílek. Jedná se o jemný prášek, který se skládá z jemných částic a má pucolánové vlastnosti. Na základě vlastností popílků jej můžeme při stabilizaci použít pro zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností. Zároveň stabilizace zemin popílkem musí splňovat povinné, předepsané technologické postupy přípravy a použití. Za zásadní výhodu technologie stabilizace popílkem lze považovat jeho využití, jakožto druhotného odpadního materiálu. Stabilizace zemin popílkem funguje především díky vyššímu obsahu CaO ve fluidním popílkem, který se zeminou reaguje podobně jako při použití vápna. [9]

2.2. Ztekucení zemin

Další možnost úpravy zemin je jejich ztekucení (Obrázek 3.). Jedná se o nový druh technologie úpravy zemin, který v nynější praxi není zcela znám. V ČR se jedná o dosud zcela nepoužívanou metodu a v zahraničí je tato technologie popsána a realizována pouze výjimečně. Především v Německu, Švýcarsku, Francii, Itálii, Velké Británii, USA a Japonsku

můžeme najít zmínky o technologii ztekucení zemin, ovšem konkrétní údaje popisu a realizace této technologie jsou zcela výjimečné. Obecně lze říci, že principy technologie ztekucení zemin jsou velmi podobné a vždy obsahují složky, jako jsou stabilizátory, ztekucovadla, případně další přísady. [10] Konkrétní typy přísad však nejsou specifikovány a technologie jsou pro využití v ČR nebo v Evropě prakticky nedostupné. V rámci příspěvku je dále uvedeno ztekucení zemin pomocí vody a popílku.



Obrázek 3.: Ztekucená zemina [11]

3. Materiál a prováděné zkoušky

Před procesem úpravy zemin je důležité si nejprve zjistit proveditelnost úpravy v daném místě z geotechnického hlediska. Z tohoto důvodu se před zahájením procesu návrhu provádí průzkum lokality. Cílem průzkumu je seznámit se s vlastnostmi podloží, kde budou práce realizovány. Nynější praxe se zabývá úpravami technických vlastností zemin tak, aby splňovaly specifikace návrhu. To, jakým způsobem se zemina ošetří, částečně specifikuje, o jaký druh úpravy se jedná.

3.1. Zeminy

Pro experimentální část byl použit písčité jíly (SaCl) z oblasti Brno, Medlánky. Jedná se o jíly se střední plasticitou $F6=Cl$. Zatřídění zeminy bylo provedeno na základě laboratorních zkoušek (mez tekutosti, mez plasticity, index plasticity, konzistence) dle ČSN EN ISO 14688-1 [12] a ČSN EN ISO 14688-2 [13]. Výsledky laboratorních testů jsou uvedeny v tabulce 1. Vzhledem k výsledkům zkoušek bylo zjištěno, že bud potřeba zeminu upravit. Úprava zemin byla provedena pomocí cementu a popílku.

Tabulka 1.: Výsledky rozboru zeminy SaCl

Vlastnosti	Označení	Jednotky	Hodnota
Vlhkost	w	[%]	19,7
Mez tekutosti	w _L	[%]	38,0
Mez plasticity	w _p	[%]	21,6
Číslo plasticity	I _p	[%]	16,4
Stupeň konzistence	I _c	-	1,12

3.2. Stabilizační činidla

Pro určení druhu stabilizačního činidla a zlepšení kvality zemin je důležité brát v úvahu především vlhkost zeminy a index plasticity. Z těchto parametrů je možné určit optimální množství pojiv. Podle [8] je vhodné použít:

- vápno (3 – 9 %), pokud $I_p > 10$ a obsah jílovitých částic $f > 10$ %,
- cement (3 – 10 %), pokud $I_p \leq 10$ a $f < 20$ %,
- kombinace vápno, cement (3 – 10 %), pokud $10 < I_p < 20$ a $f < 10$ %.

Na základě těchto parametrů byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R od společnosti Českomoravský cement, a.s. z Mokré v množství 4 %. Vápno pro návrh směsi nebylo použito, protože se předpokládá určitý obsah vápna v použitém popílku. Cement i popílek ochotně reagovaly s použitým druhem zeminy.

V rámci experimentu byla, jako částečná náhrada zeminy, použita popílek (FBC) z vybrané elektrárny s fluidním způsobem spalování. Popílek byl použit v množství 30 % a 60 % (z hmot. zeminy). Na základě dřívějších zkušeností s chováním vápna (zlepšení reologických vlastností, snížení potřebného množství vody pro stanovení konzistence), byly provedeny i zkoušky, kdy byl popílek přidáván k zemině 24 hodin předem. V případě přídavku popílku 24 hodin předem nedošlo ke zlepšení vlastností směsi, proto nejsou výsledky těchto zkoušek dále uváděny. Chemické složení popílku je uvedeno v Tabulce 2.

Tabulka 2.: Chemické složení popílku (FBC)

Název	Chemické složení [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
FBC	28,6	18,0	6,5	7,8	31,1	0,9	0,5	0,3	0,3

3.3. Prováděné zkoušky

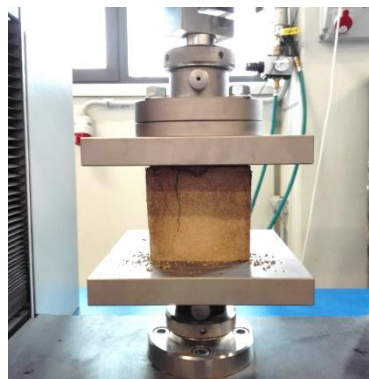
Na směsích se prováděla řada zkoušek, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. V rámci příspěvku je dále pojednáno o sledování vlivu popílku a cementu na stabilizaci zemin, stanovení množství záměsové vody pro určení konzistence a stanovení pevnosti v tlaku. Konzistence směsi byla zkoušena pomocí Abrams kužele (viz Obrázek 4.) dle ČSN EN 12350-8 [14]. Podle zkoušky se připraví kužel, podkladní deska a objímka. Kužel se postaví na podkladní desku, přesně na kruh o průměru 200 mm, naplní se směsí a přebytek se odstraní pomocí stěrky. Následně se kužel plynulým pohybem zvedne a změří se průměr rozlitého koláče ve dvou na sebe kolmých směrech. Po stanovení průměru rozlití se směs zařadí do

třídy SF1 = 550 – 650 mm, SF2 = 660 – 750 mm a SF3 = 760 – 850 mm. Míchání směsí bylo provedeno stavebním míchadlem.

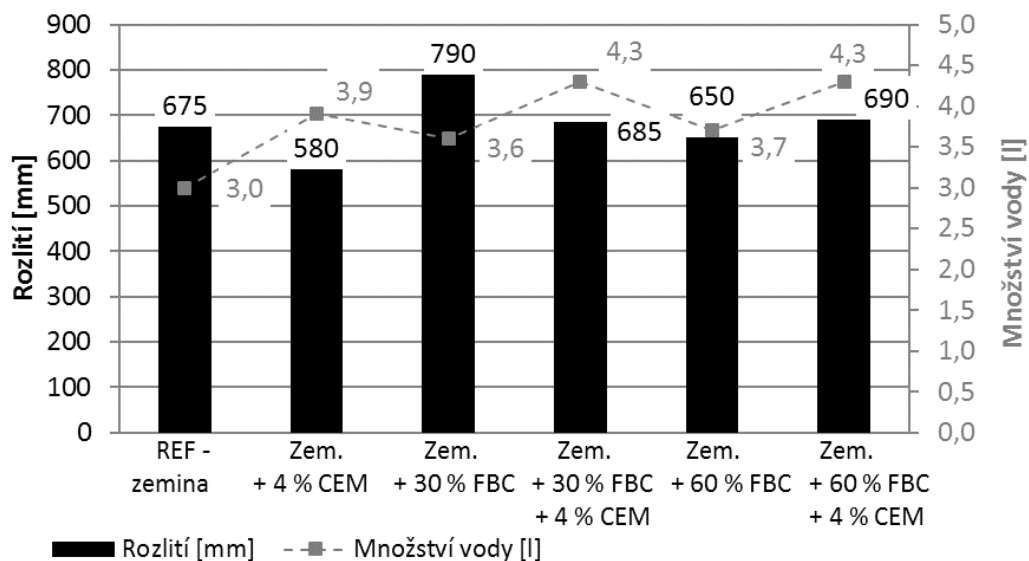
Další zkouška, která se na vzorcích prováděla, bylo stanovení pevnosti v tlaku (Obrázek 5.). Zkouška se prováděla podle normy ČSN EN 12390-3 [15] na zkušebních tělesech o rozměru 100 x 100 x 100 mm. Zkoušky pevnosti v tlaku byly prováděny po 7 dnech zrání vzorků. Výsledky zkoušek jsou uvedeny na Obrázku 6. a Obrázku 7.



Obrázek 4.: ČSN EN 12350-8
Zkouška sednutí-rozlítím



Obrázek 5.: ČSN EN 12390-3
Pevnost v tlaku zkušebních těles

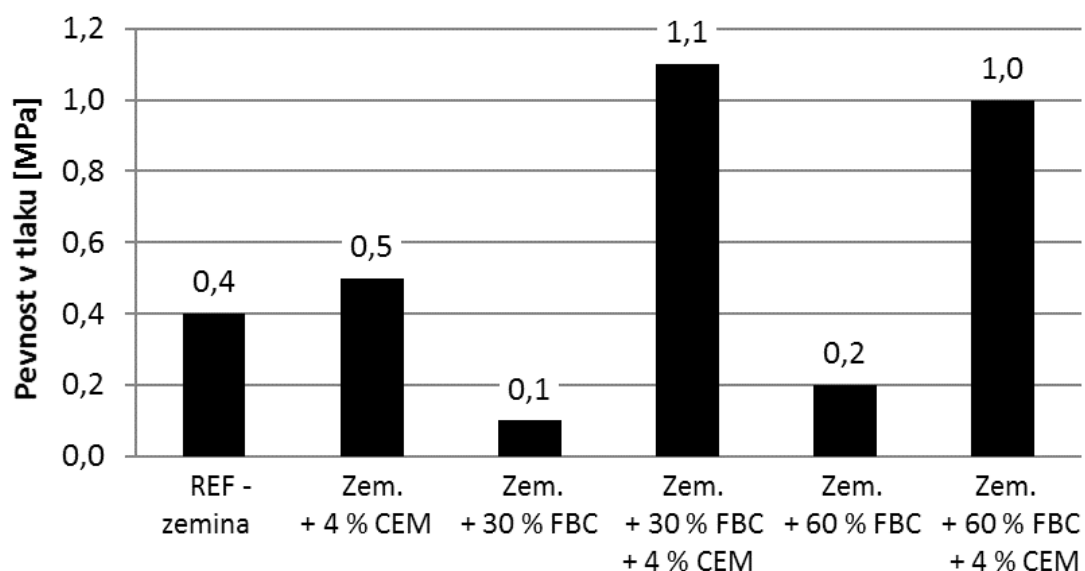


Obrázek 6.: Výsledky zkoušky rozlití směsí

Z výsledků hodnot zkoušky rozlití lze vidět (Obrázek 6.), že příměs fluidního popílku k zemině ovlivňoval reologické vlastnosti směsi. Příměs fluidního popílku v množství 30 % (z hmot. zeminy) výrazně zvyšoval hodnotu rozlití směsi na 790 mm (SF3), ve srovnání s referenční zeminou (675 mm, SF2). Přídavkem fluidního popílku v množství 60 % naopak hodnotu rozlití snižoval (650 mm, SF1). Tento jev byl ovlivněn přítomností CaO v popílku, který okamžitě reagoval s přidanou vodou. Obecně lze konstatovat, že přídavkem popílku ke směsi došlo ke zlepšení reologických vlastností a k stabilizaci směsi. U směsí, ve kterých byl přítomný

popílek, byla zároveň snížena dekantace (odstoj vody). Z těchto výsledků lze usuzovat, že popílek ve směsi působil jako účinný stabilizátor.

Jistou funkci, při hodnocení reologických vlastností směsi, zároveň sehrál cement. Cement ochotně reagoval s písčítým jílem. V čerstvém stavu se cement projevoval jako účinný stabilizátor zeminy, zejména tím, že snižoval sedimentaci částic při míchání směsi. Z Obrázku 6. můžeme vidět, že přítomnost cementu mohla snižovat hodnotu rozlití (zemina + 30 % FBC + 4 % CEM = 685 mm, SF2, zemina + 60 % FBC + 4 % CEM = 690 mm, SF2), protože při smíchání vody s cementem, popílkem a písčítým jílem okamžitě došlo k hydrataci. Ovšem v případě navržených směsí měl na hodnotu rozlití spíše vliv popílek než cement. Cement spolu se zeminou reagoval za vzniku hydratačních produktů (rozpuštěných gelů), které postupem času krystalovaly a vytvářely propletenou mřížku, což se projevilo i na výsledných pevnostech vzorků.



Obrázek 7.: Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku směsí

Při hodnocení pevnosti v tlaku můžeme z Obrázku 7. vidět, že s přibývajícím množstvím popílku, docházelo ke snižování pevnosti v tlaku. Příměs 30 % fluidního popílku k zemině vedl ke snížení hodnoty pevnosti v tlaku na 0,1 MPa, ve srovnání s referenčním vzorkem, který měl hodnotu pevnosti v tlaku 0,4 MPa. Při přidavku 60 % fluidního popílku k zemině byla pevnost v tlaku 0,2 MPa. Snižování pevnosti v tlaku s přibývajícím množstvím popílku bylo způsobeno vytvářením méně pevných vazeb mezi fluidním popílkem a zeminou. Zároveň přítomnost CaO v popílkem mohla hodnoty pevnosti v tlaku směsí mírně zvyšovat, ovšem tento jev se výrazně neprojevil. Ve srovnání referenčního vzorku se směsí složenou ze zeminy, 30 % FBC a 4 % CEM bylo znatelné značné zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku (1,1 MPa). Zvýšení hodnot pevnosti v tlaku bylo ovlivněno především přítomností cementu. Tento jev se projevil i u směsi složené ze zeminy, 60 % FBC a 4 % CEM. U této směsi byla hodnota pevnosti v tlaku 1,0 MPa.

4. Závěr

Předmětem výzkumu bylo, navrhnout a ověřit ztekucení zemin, umožňující jejich zpětné použití ve stabilní a tekuté formě, s použitím popílku. Na základě laboratorního měření bylo zjištěno, že vhodnou úpravou je možné zeminy ošetřit tak, aby bylo možné jejich zpětné použití. Zeminy vykopané v čerstvém stavu obsahují určitou vlhkost, mohou obsahovat určité nežádoucí složky či mají rozdílnou granulometrii. Všechny tyto a spousta dalších důvodů zapříčiňují nemožnost zpětného použití zeminy v konstrukci ve stavu, v jakém byla vykopána. Proto, aby tyto zeminy nekončily na skládkách a bylo možné jejich další použití je nutné je ošetřit. Zeminy lze ošetřovat různými způsoby, z nichž nejúčinnější je jejich stabilizace. V rámci příspěvku jsme se kromě stabilizace zabývali i ztekucením zemin, které může být dosaženo pomocí popílku.

U směsi se nejprve hodnotily reologické vlastnosti směsi, na základě kterých byly zjištěny následující poznatky. Příměs fluidního popílku v množství 30 % (z hmot. zeminy) výrazně zvyšoval hodnotu rozlití směsi na 790 mm (SF3). Vyšší množství popílku naopak hodnotu rozlití snižovalo. Tento jev byl ovlivněn přítomností CaO v popílku, který okamžitě reagoval s přidanou vodou. Obecně lze konstatovat, že přidáním popílku ke směsi došlo ke zlepšení reologických vlastností a k stabilizaci směsi. U směsí, ve kterých byl přítomný popílek, byla zároveň snížena dekantace (odstoj vody). Z těchto výsledků lze usuzovat, že popílek ve směsi působil jako účinný stabilizátor. Při srovnání hodnoty rozlití směsí, kde nebyl a kde byl přítomný cement, můžeme konstatovat, že na hodnotu rozlití měl spíše vliv popílek než cement. Pro stabilizaci zeminy SaCl se jako účinné stabilizační činidlo tedy jeví použití fluidního popílku v množství do 30 % a použití cementu v množství 4 %. Z ekonomického hlediska, lze také konstatovat, že částečná náhrada zeminy popílkem vede ke snížení celkových nákladů při návrhu směsi.

Při hodnocení pevnosti v tlaku můžeme říci, že s přibývajícím množstvím fluidního popílku ve směsi, docházelo ke snižování pevnosti v tlaku. Příměs 30 % fluidního popílku k zemině vedl ke snížení hodnoty pevnosti v tlaku na 0,1 MPa, ve srovnání s referenčním vzorkem, který měl hodnotu pevnosti v tlaku 0,4 MPa. S dalším přidáním popílku, na hodnotu 60 % (z hmot. zeminy), byla pevnost v tlaku 0,2 MPa. Přítomnost CaO ve fluidním popílku mohla hodnoty pevnosti v tlaku směsí mírně zvyšovat, ovšem tento jev nebyl až tak znatelný. Výrazný vliv na zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku měl cement. Cement spolu se zeminou reagoval velice ochotně za vzniku hydratačních produktů (rozpuštěných gelů), které postupem času krystalovaly a vytvářely propletenou mřížku, což se projevilo i na výsledných pevnostech vzorků. Jejich hodnotu je však vhodné udržovat blíže pevnostem uložené zeminy (přibližně 0,2-0,5 MPa) a tak je zde prostor pro snížení podílu cementu ve směsi.

Vzhledem k dosavadnímu šetření úpravy zemin ve ztekucené formě je snahou pokračovat v dalším výzkumu, který by se zaměřil nejen na optimalizaci pojivových složek, ale také na možnost použití ztekucujících, plastifikačních, či jiných dalších přísad, které by zlepšovaly požadované vlastnosti směsi.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci specifického výzkumu r. č. FAST-J-17-4744, i. č. 4744 "Vývoj nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných záливоk".

Literatura

- [1] Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu.
- [2] Vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.
- [3] HEBIB, S.; FARRELL, E.R.: Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 1999, str. 81 - 84. Stockholm: Balkema.
- [4] ŠIMŮNEK, M.: Mechanizované zemní práce: Akce Kanalizace - Staré Hrady 2014. Staré Hrady: © L. Sluka, 2014 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.trosky.cz/simunek-zemni-prace/>.
- [5] Soil Stabilization: West-Can Seal Coating Inc. WCS: WEST-CAN Seal Coating Inc. [online]. Didsbury, Alberta: © 2017 West-Can Seal Coating Inc. All Rights Reserved, 2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.west-cansealcoating.com/services/soil-stabilization/>.
- [6] KRESTA, F.: Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP 94, Úprava zemin. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika a.s. 2009.
- [7] SHERWOOD, P.: Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, 1993, HMSO.
- [8] BELL, F. G.: Ground Engineer's Reference Book. Butterworths, London, 1987, ss. 38/1-17.
- [9] TP 93 - Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury. Praha: ARCADIS Geotechnika, a.s., 2011.
- [10] Liquid soil - A Technical challenge - UNITRACC - Underground Infrastructure Training and Competence Center. Liquid Soil - A Technical Challenge [online]. Wiehl, Germany: © 2016 Knowledge Factory GmbH, a subsidiary of Prof. Dr. Ing. Stein & Partner GmbH, 2016 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.unitracc.com/aktuelles/artikel/liquid-soil--a-technical-challenge-en>.
- [11] RSS: Flüssigboden für mehr Wirtschaftlichkeit im Kanalbau. Lhoist [online]. Wülfrath: Copyright Lhoist, 2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: http://www.newsletter-lhoist.de/index.php?id=3&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=76&cHash=191be28cee a919f595052fc0cc23d29e.
- [12] ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin - Část 1 : Pojmenování a popis.
- [13] ČSN EN ISO 14688-2 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin - Část 2 : Zásady pro zatřídování.
- [14] ČSN EN 12350-8 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím.
- [15] ČSN EN 12390-3 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

Kontakt

Ing. MAGDALÉNA KOCIÁNOVÁ, tel: 00420 541 147 525, e-mail: kocianova.m@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D., tel: 00420 541 147 463, e-mail: cerny.v@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, tel: 00420 541 147 500, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

ÚPRAVA ZEMIN SMĚSMI POPÍLKŮ A ODpraŠKŮ Z VÝROBY VÁPNA A CEMENTU

SOIL TREATMENT BY MIXTURES WITH FLY ASH, LIME KILN DUST AND CEMENT KILN DUST

František Kresta

SG Geotechnika a.s.

Anotace:

Použití popílků v zemních pracích má v České republice dlouhou tradici. Vedle používání popílků jako sypaniny se objevují snahy uplatnit popílků v nových hydraulických silničních pojivech. Proto byly provedeny průkazní laboratorní zkoušky úpravy zemin (sprašových hlín) směsmi obsahujícími popílek a odprašky z výroby vápna a cementu. Výsledky prokázaly použitelnost těchto směsí pro úpravu vybraného typu zemin při optimální vlhkosti. Upravené zeminy splnily požadavky pro ukládání do násypů. Avšak cesta k přípravě nového hydraulického silničního pojiva je teprve na začátku.

Annotation:

Fly ash is a secondary material with long tradition of utilisation in Czech republic. Besides its applications as fill there are attempts to prepare a new hydraulic road binder with fly ash. Therefore first laboratory tests of soil (loess loams) treatment by mixtures prepared with fly ash, lime kiln dust and cement kiln dust were executed. Results of laboratory tests showed that it is possible to use loess loams treated by new mixtures under optimal moisture as fill. However, a way to the new hydraulic road binder is in its beginning.

Klíčová slova: popílek, odprašky z výroby vápna, odprašky z výroby cementu, úprava zemin

Keywords: fly ash, lime kiln dust, cement kiln dust, soil treatment

1. Úvod

Popílky jsou velmi rozšířenou druhotnou surovinou a jejich použití v dopravních stavbách má v České republice dlouhou tradici. Vedle aplikací popílků jako sypaniny se objevují snahy o zvýšení jejich přidané hodnoty, kdy budou součástí hydraulických silničních pojiv.

Proto byly iniciovány průkazní zkoušky úpravy zemin směsmi tvořených popílkem a odpraškou z výroby vápna a cementu. V první etapě byla laboratorně zkoušena úprava sprašových hlín, které patří k nejběžnějším geotechnickým typům zemin u nás, které se upravují pojivy.

Hovořit o připravených směsích jako o hydraulických silničních pojivech, mezi které by mohly být zařazeny, je předčasné, protože nebyly provedeny zkoušky dle ČSN EN 13282-2.

2. Příprava směsí pro úpravu zemin

Směsi byly připraveny z následujících vstupních surovin:

- popílek z Elektrárny Nováky (popílek ze spalování lignitu);
- odpraška z výroby vápna (*lime kiln dust*) z vápenky Mokrá;
- odpraška z výroby cementu (*cement kiln dust*) z cementárny Mokrá.

Pro ověření účinnosti úpravy byly připraveny a odzkoušeny následující směsi:

- 50% LKD + 50% popílkem (označení ViaCalco S)
- 30% LKD + 70% popílkem (označení ViaCalco F)
- 30% LKD + 10% CKD + 60% popílkem (označení ViaCalco X1)
- 30% LKD + 30% CKD + 40% popílkem (označení ViaCalco X2)

Jako referenční směs bylo zvoleno hydraulické silniční pojivo ViaCalco C50, které obsahuje 50% LKD, 30% cementu a 20% CKD.

V rámci zkoušek byla testována úprava sprašových hlín charakteru jílu s nízkou plasticitou (F6 CL), tuhé až pevné konzistence. Vzorky zemin obsahovaly 87.5% jemných částic (pod 0.063 mm). Přirozená vlhkost zemin ($w_n=17.5\%$) se blížila vlhkosti optimální dle zkoušky Proctor Standard ($w_{opt}=18.0\%$). Zkoušky úpravy zemin jednotlivými směsmi byly provedeny při optimální vlhkosti [1].

Cílem zkoušek bylo

- Připravit směsi, které by se staly základem pro přípravu nového hydraulického silničního pojiva.
- Ověřit úpravu sprašových hlín (F6 Cl, CL) jednotlivými směsmi.
- Doporučit směs s největším potenciálem pro úpravu zemin.

Laboratorní zkoušky byly zaměřeny na úpravy zemin jednotlivými směsmi. Zeminy byly míseny vždy s 2% a 3% pojiva.

Pro ověření účinků jednotlivých směsí byly provedeny průkazní zkoušky v rozsahu dle TP 94 - IBI, CBR po 7 dnech zrání a 96 hodinách sycení, CBR po 28 dnech zrání a 96 hodinách sycení, pevnost v prostém tlaku po 7 a 28 dnech zrání, lineární bobtnání [8].

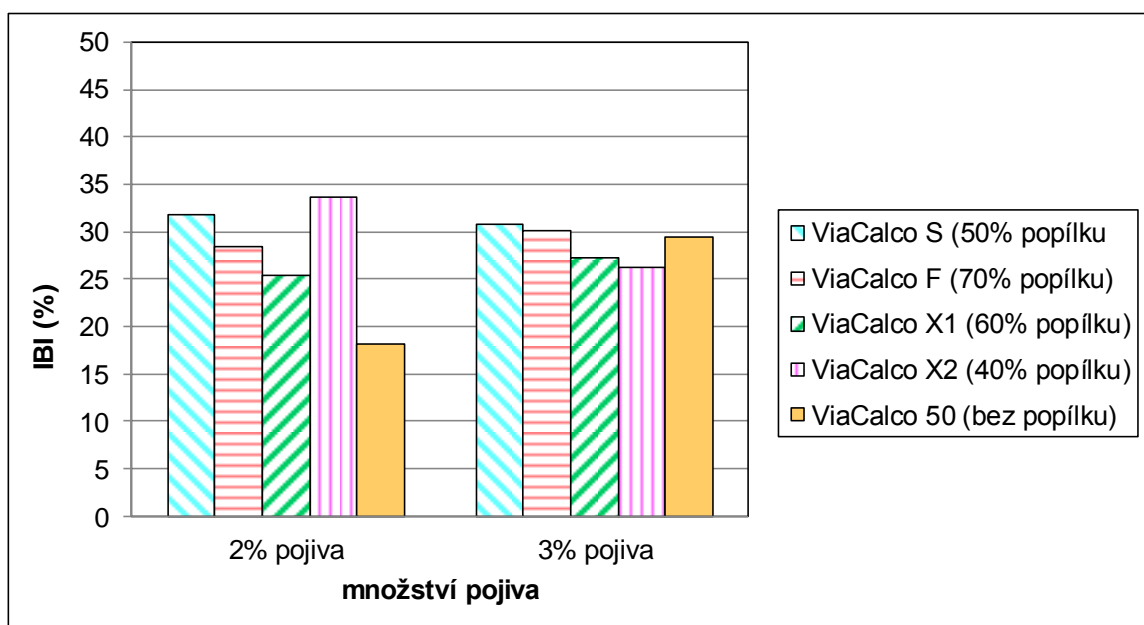
3. Výsledky průkazních zkoušek pro úpravy jemnozrnných zemin novými pojivy

Výsledky průkazních zkoušek upravených zemin jednotlivými směsmi byly porovnány s požadavky TP 94, ČSN 73 6133 a TP 170 [6], [7], [8].

IBI

Hodnota okamžitého poměru únosnosti (IBI) zeminy před úpravou byla velmi vysoká (28.3%). Limitní hodnota pro zeminy upravené i neupravené pro použití do násypu je IBI= min. 10%. Vzhledem k nízké plasticitě zkoušených zemin a jejich vlhkosti, která se blížila vlhkosti optimální, by tyto zeminy bylo možné použít do násypu bez úpravy.

Efekt nových směsí při úpravě zemin na hodnoty IBI byl zanedbatelný. Pouze v případě směsi ViaCalco X2 (LKD, popílek cement) byla hodnota IBI nižší ve směsi s 3% pojiva oproti směsi s 2% pojiva. Jednalo se o jedinou odchylku od očekávané závislosti, že s rostoucím množstvím pojiva roste i hodnota IBI. Rovněž byla ověřena další očekávaná závislost, že s rostoucím podílem popílku ve směsi klesá hodnota IBI (opět vyjma směsi se 2% pojiva ViaCalco X2). Je zajímavé, že v případě směsí s referenčním pojivem ViaCalco 50 nebyly změřeny nejvyšší hodnoty IBI.



Obrázek 1: Závislost hodnoty IBI upravených zemin na dávkování pojiv

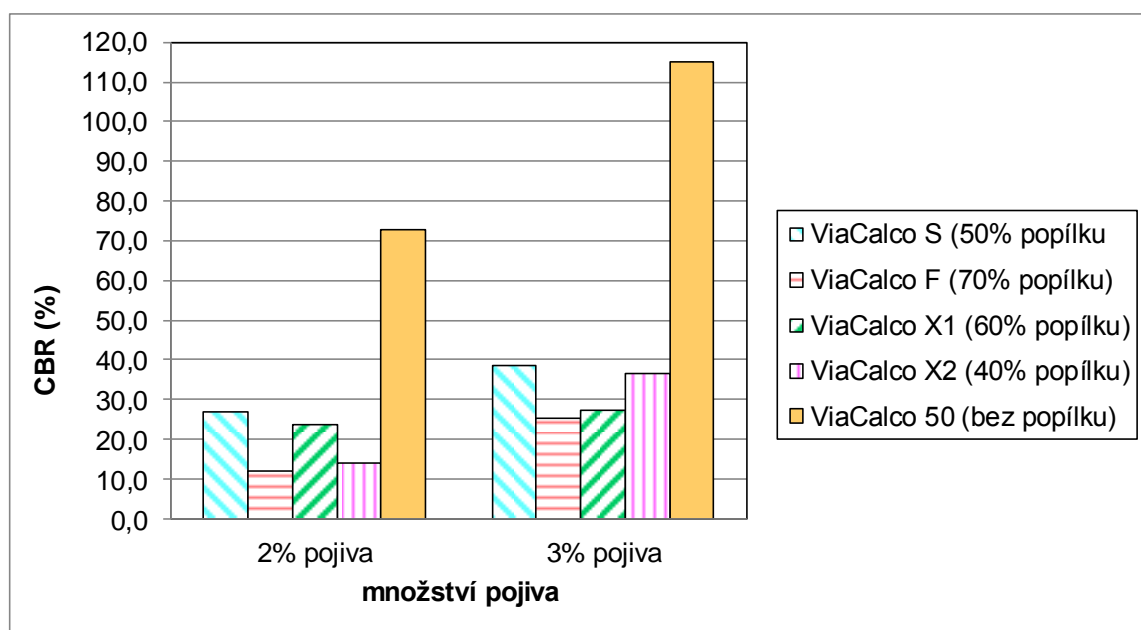
CBR

Hodnoty CBR po 96 hodinách syčení zeminu upravených nově připravenými směsmi rostly s rostoucím množstvím pojiva (viz obrázek 2 a 3).

Předpoklad, že s rostoucí dobou zrání poroste i hodnota CBR nebyl pozorován v případě směsí označených ViaCalco S, ViaCalco F, ViaCalco X1 a v případě referenční směsi s pojivem ViaCalco 50.

Pro použití upravených zemin do aktivní zóny je kritériem hodnota CBR. Ta závisí na kategorii komunikace a dopravní zatížitelnosti (viz TP 170). Pro komunikace s nejnižším dopravním zatížením je požadováno dosáhnout hodnoty CBR = min. 15% (ČSN 73 6133, TP 170) [6].

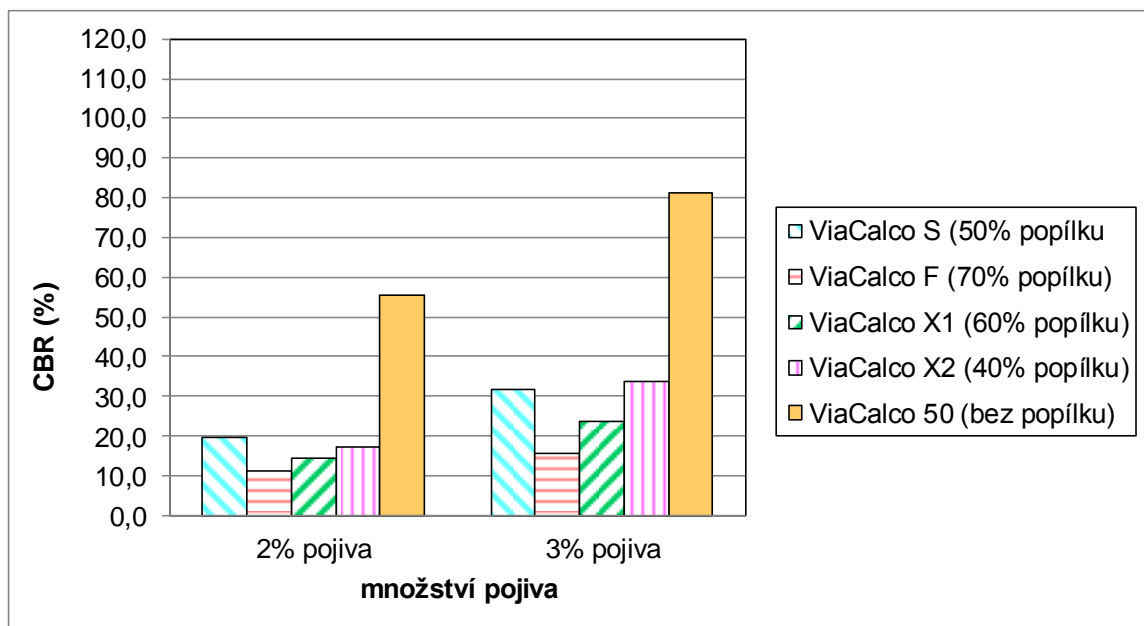
Po 7 dnech zrání dosahovaly hodnoty CBR nižší než 15% směsi zemin se 2% pojiva ViaCalco F a ViaCalco X2. Po 28 dnech zrání byly hodnoty CBR nižší než 15% u směsí se 2% pojiva ViaCalco F a ViaCalco X1.



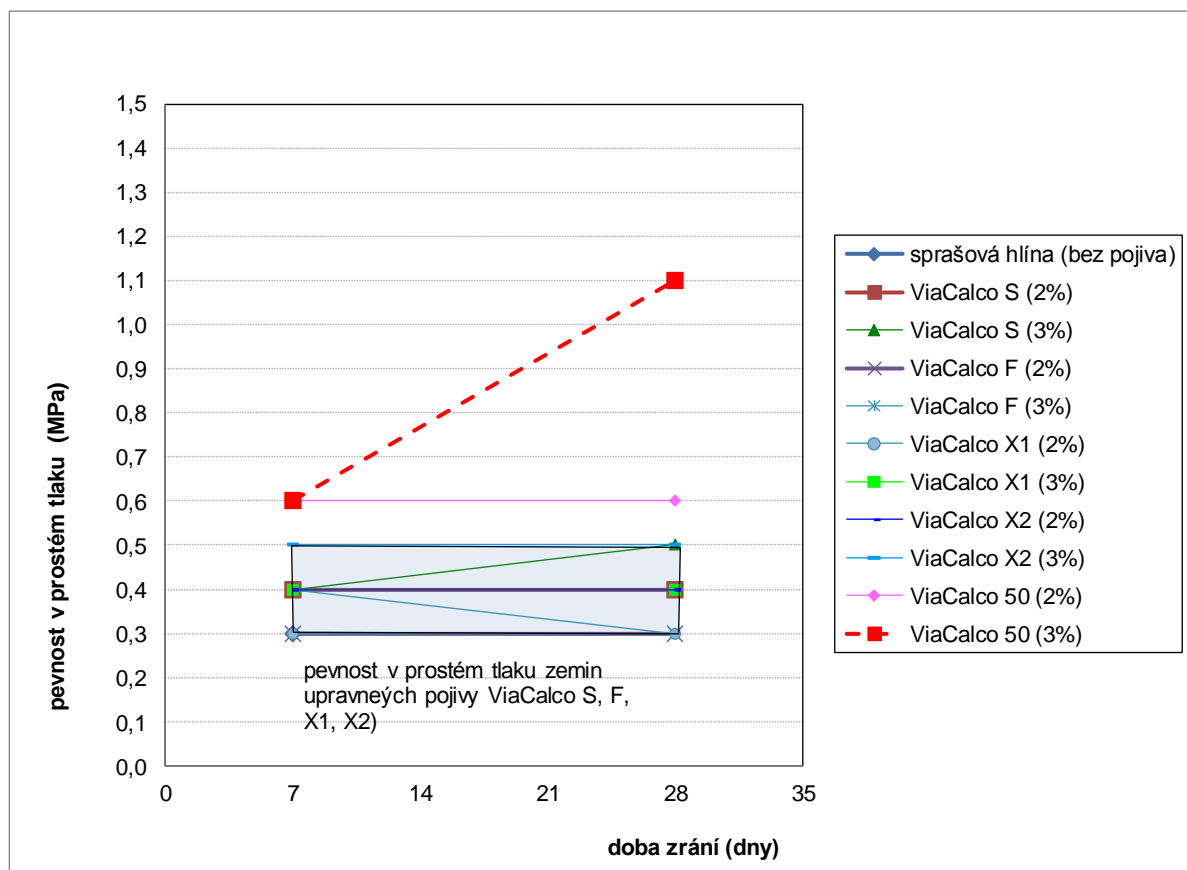
Obrázek 2: Závislost hodnoty CBR upravených zemin na množství pojiva po 7 dnech zrání a 96 hodinách syčení

Pevnost v prostém tlaku

Pevnost v prostém tlaku neupravených zemin byla 0.3 MPa. Po úpravě zemin připravenými směsmi a 7 a 28 dnech zrání vzrostla hodnota pevnosti v prostém tlaku maximálně na 0.5 MPa. Pouze v případě referenční směsi (ViaCalco 50) byla hodnota pevnosti v prostém tlaku 0.6 MPa (2% pojiva po 7 i 28 dnech zrání) a 0.6 MPa pro 3% pojiva po 7 dnech zrání a 1.1 MPa pro 3% pojiva po 28 dnech zrání. Z výsledků plyne, že dávkování 2% a 3% nově připravených směsí nikterak neovlivnilo hodnotu pevnosti v prostém tlaku upravených zemin.



Obrázek 3: Závislost hodnoty CBR upravených zemín na množství pojiva po 28 dnech zrání a 96 hodinách sycení



Obrázek 4: Hodnoty pevnosti v prostém tlaku upravených zemín po 7 a 28 dnech zrání

Lineární bobtnání

Zeminy upravené nově připravenými směsmi i referenčním pojivem jsou objemově stálé. Přídavek pojiva snižuje potenciál k objemovým změnám. Zatímco neupravené zeminy vykazovaly lineární bobtnání 1.9%, zeminy po úpravě pak jen 0.1-0.5%.

4. Závěry a doporučení

Závěry laboratorních zkoušek zemin (sprašových hlín) upravených směsmi s obsahem popílku a odprašků z výroby vápna a cementu lze shrnout do následujících bodů:

1) Jemnozrnné zeminy (sprašové hlíny charakteru jílu s nízkou plasticitou) upravené nově připravenými směsmi v množství 2% a 3% vyhovují požadavkům norem a předpisů z hlediska požadované hodnoty IBI (min. 10%), avšak efekt nových směsí při úpravě zemin na hodnoty IBI byl zanedbatelný. Upravené zeminy bylo možno zabudovat do násypů pozemních komunikací.

2) Hodnoty CBR po 96 hodinách sycení zemin upravených nově připravenými směsmi rostly s rostoucím množstvím pojiva. Předpoklad, že s rostoucí dobou zrání poroste i hodnota CBR nebyl pozorován.

3) Po 7 dnech zrání dosahovaly hodnoty CBR nižší než 15% směsi zemin se 2% pojiva ViaCalco F a ViaCalco X2. Po 28 dnech zrání byly hodnoty CBR nižší než 15% u směsí se 2% pojiva ViaCalco F a ViaCalco X1.

4) Dávkování 2% a 3% nově připravených směsí nikterak neovlivnilo hodnotu pevnosti v prostém tlaku upravených zemin po 7 a 28 dnech zrání.

5) Zeminy upravené nově připravenými směsmi i referenčním pojivem jsou objemově stálé. Přídavek pojiva snižuje potenciál k objemovým změnám. Zatímco neupravené zeminy vykazovaly lineární bobtnání 1.9%, zeminy po úpravě pak jen 0.1-0.5%.

Výsledky laboratorních zkoušek prokázaly, že lze připravenými směsmi upravovat sprašové hlíny charakteru jílu s nízkou plasticitou při optimální vlhkosti. Všechny výsledky zkoušek vyhověly normám a předpisům pro použití do násypu. Použití do aktivní zóny je podmíněno dosažením požadovaných hodnot CBR (min. 15%).

Je nutno upozornit., že vývoj nových pojiv je teprve na začátku. Byl testován jen jeden geotechnický typ zemin a zkoušky probíhaly při optimální vlhkosti. V dalších etapách je nutno:

1) Analyzovat úpravu zemin stejného geotechnického typu (F6 CL) se zvýšenou vlhkostí ($w_{opt}+3\%$, $w_{opt}+5\%$, $w_{opt}+7\%$).

2) Posoudit úpravu i jiných geotechnických typů zemin (např. jíly s vysokou plasticitou - F8 CH, písčité jíly – F4 CS, jílovité písky – SC) s rozdílnými vlhkostmi.

3) Realizovat poloprovozní zkoušky s využitím techniky, která se běžně používá v technologii úpravy zeminy (zemní frézy, dávkovače, gradery, válce apod.).

4) U vybrané směsi provést průkazní zkoušky dle ČSN EN 13282-1 a 2 pro zařazení a klasifikaci hydraulického silničního pojiva [2], [3].

Teprve na základě podrobnější analýzy vlastností jednotlivých nově navrhovaných směsí bude možno vybrat směs s nejvyšší přidanou hodnotou, které bude účinně působit v co nejširší škále geotechnických typů zemin s variabilní vlhkostí [1].

Literatura

- [1] KRESTA, F.: Carmeuse – a new binder. Laboratory tests. Final report. ARCADIS CZ a.s., 06/2015.
- [2] ČSN EN 13282-1 Hydraulická silniční pojiva - Část 1: Rychle tuhnutí hydraulická silniční pojiva – Složení, specifikace a kritéria shody
- [3] ČSN EN 13282-2 Hydraulická silniční pojiva - Část 2: Normálně tuhnutí hydraulická silniční pojiva – Složení, specifikace a kritéria shody
- [4] ČSN EN 14227-4 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 4: Popílků pro směsi stmelené hydraulickými pojivy
- [5] ČSN EN 14227-15 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 15: Zeminy stabilizované hydraulickými pojivy
- [6] ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací
- [7] TP 93 Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů
- [8] TP 94 Úprava zemin

Kontakt

Doc. RNDr. František Kresta, Ph.D., tel. : +420 602 342 896, e-mail:
frantisek.kresta@geotechnika.cz, SG Geotechnika a.s., pracoviště Ostrava, 28.října 150,
702 00 Ostrava

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE WITH POZZOLANIC ADDITIVES

Ramune Lebedeva, Rimvydas Moceikis

Vilnius Gediminas Technical University

Abstract

The rate of chloride ions diffusion through concrete to the vicinity of rebar is a major determinant of durability for many hydro technical structures. Concrete is exposed to severe chloride environments when placed in the salty sea water. This results to penetration of chloride ions through protective layer of concrete and electro chemical corrosion of reinforcement steel. Chloride penetration in concrete with commonly used pozzolanic additives- micro silica suspension, fly ash and blast furnace slag is investigated in this paper. Variety of concrete recipes produced changing up to 70% of cement by mentioned mineral additives. Concrete mix workability according to slump test and entrained air was tested. Compressive strength and density of concrete cubes were tested after 28 days. Chemical analysis of water from Baltic sea showed up to 15,5 g/l chloride salts concentration. Chloride penetration depth in concrete with pozzolanic additives was measured according to standard Nordtest NT492 and the chloride migration coefficient was calculated using equations given in the standard. The results of investigation show significant reduction of chloride migration coefficient with pozzolanic additives application in concrete.

Keywords

Concrete, hydro technical structures, chloride diffusion, fly ash, blast furnace slag, micro silica, chloride migration coefficient.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

Reviewer

GINTAUTAS SKRIPKIŪNAS, prof., head of Building Materials Department, VGTU, Saulėtekio al. 11., Vilnius, Gintautas.skripkiunas@vgtu.lt

Contact

RAMUNE LEBEDEVA, PhD student, Vilnius Gediminas Technical University, Sauletekio al.11, Vilnius, email: ramune.lebedeva@vgtu.lt

RIMVYDAS MOCEIKIS, PhD student, Vilnius Gediminas Technical University, Sauletekio al.11, Vilnius, email: rimvydas.moceikis@vgtu.lt

AMONIAK A BAKTERIE, VHODNÁ KOMBINACE?

AMMONIA AND BACTERIA, LIKELY COMBINATION?

**Denisa Romanovská¹, Štěpánka Trachtová¹, Tomáš Opravil¹,
Roman Snop²**

1, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Centrum
materiálového výzkumu;

2, ČEZ Energetické produkty, s.r.o.

Anotace:

Eliminace amonných podílů v produkovaných VEP z provozů se zavedeným SNCR má velký význam zejména při dalším využívání těchto materiálů nebo při jejich deponování. Cyklus dusíku v přírodě je řízen okolními podmínkami prostředí a mikroorganismy. Činnost přítomných mikroorganismů určuje distribuci dusíkatých sloučenin v přírodě i ve VEP. Práce je zaměřena na mikrobiologický screening složišť VEP a na nalezení vhodných mikroorganismů schopných metabolizovat amoniakální dusík přítomný ve VEP.

Annotation:

The elimination of ammonia in CCP produced by facilities using SNCR is very important, especially with further use of these materials or with their deposition. The nitrogen cycle in the nature is controlled by environmental conditions and by microorganisms. Activities of present microorganisms determine the distribution of nitrogen compounds in the nature and in CCP. The study is focused on microbiological screening of CCP dumps and on finding suitable microorganisms capable of metabolizing ammonia present in CCP.

Klíčová slova:

VEP (vedlejší energetické produkty), amoniak, mikroorganismy, eliminace amonných složek

Keywords:

CCP (coal combustion products), ammonia, microorganisms, elimination of ammonia

1. Úvod

Cílem práce bylo provedení mikrobiologického screeningu u vzorků popela z tepelných elektráren. U vzorků popela odebraného z různých složišť byla v závislosti na lokalitě úložiště sledována přítomnost vybraných skupin mikroorganismů. Stanovení byla s ohledem na charakter vzorku provedena podle normy ČSN ISO 10381-6, které se zabývá pokyny pro odběr manipulaci a uchovávání půdních vzorků za aerobních podmínek pro studium mikrobiálních procesů, biomasy a diverzity v laboratoři. Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné žádné závazné normy vztahující se k mikrobiologickému rozboru popela, bylo při návrhu postupu prací vycházeno právě z materiálů pro studium mikrobiologického zastoupení v půdách, které bylo doplněno sledováním vybraných zájmových skupin mikroorganismů.

Amoniak oxidující bakterie jsou řazeny mezi chemolitotrofní autotrofy. Jedná se o obligátní aeroby, přičemž některé kmeny se vyznačují vysokou tolerancí k nízké přítomnosti kyslíku v prostředí nebo přímo prostředí bez kyslíku. Nitrifikační bakterie (*Nitrobacteraceae*) patří mezi Gram-negativní mikroorganismy, přirozeně se vyskytující v půdě, kompostech, v slané i sladké vodě. Mezi nitrifikační bakterie čeledi *Nitrobacteraceae* umožňující oxidaci amoniaku, patří *Nitrosomonas*, *Nitrosobacter*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospina*, *Nitrosovibrio* a *Nitrosolobus*. Vzhledem ke svému atypickému metabolismu se tyto mikroorganismy vyznačují pomalým růstem. Za optimálních podmínek tj. teplota v rozmezí 25–30 °C, pH 7,8–8,0 a koncentrace substrátu 2–10 mM (pro amoniak) je generační doba pro *Nitrosomonas* 8 hodin. Schopnost využívat amoniakální dusík vykazují také některé další mikroorganismy, jako je *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas aeruginosa* NBRC 12689, *Pseudomonas stutzeri* YZN-001, *Alcaligenes faecalis* no. 4 a mimo jiné i vybrané houby [1, 2].

Působení nitrifikačních bakterií, a tedy účinnost oxidace amoniaku může být limitována zejména přítomností různých iontů kovů a jiných inhibitorů nitrifikace. Negativní efekt má také nízké pH.

2. Metodika experimentu

2.1. Mikrobiologický rozbor vzorků VEP

Odběr vzorků popela z úložiště byl proveden do sterilních sáčků určených pro odběr půdních vzorků. Po odběru byly vzorky uchovány při teplotě 8 °C. Vzorky popela byly naváženy do sterilních zábrusových lahví a doplněny sterilní vodou na daný objem. Vzorky byly umístěny na temperovanou třepačku a byly třepány po dobu 18 hodin (tzv. over night). Následně byla desítkovým ředěním připravena sada roztoků v rozmezí koncentrací 10^0 až 10^{-6} . Roztoky o vybrané koncentraci (nejčastěji 10^{-3} a 10^{-5} nebo 10^{-4} a 10^{-6}) byly použity pro zaočkování připravených kultivačních médií na Petriho miskách. Zaočkování Petriho misek bylo provedeno metodou výsevu za pomoci sterilní mikrobiologické hokejky. Po zaočkování byly Petriho misky uloženy do termostatu ke kultivaci při odpovídající teplotě optimální pro danou skupinu mikroorganismů.

Byl stanoven celkový počet mikroorganismů, který je standardně považován za základní stanovení při jakémkoli mikrobiologickém rozboru. Jedná se o obecný ukazatel obsahu chemoorganotrofních mikroorganismů, který nás informuje o výskytu mikroorganismů ve sledovaném vzorku.

Dále byly sledovány vybrané skupiny mikroorganismů. **Proteolytické bakterie** zahrnují mikroorganismy aerobního i anaerobního typu. Jsou považovány za doplňující skupinu amonizačních bakterií. Tyto bakterie jsou charakteristické produkcí hydrolytických enzymů, označovaných jako proteinázy, do prostředí. Proteolytické bakterie slouží jako indikátory zatížení vyšším obsahem látek bílkovinné povahy. Přítomnost **lipolytických mikroorganismů** byla sledována za použití média obsahujícího tuk. Tuhy jsou v půdě odbourávány na volné mastné kyseliny a glycerol. Jedná se o proces, který zahrnuje celý komplex enzymatických reakcí. **Půdní vláknité mikroorganismy** ovlivňují strukturu půdy a především se účastní rozkladu organických látek, čímž hrají nezastupitelnou roli v koloběhu biologicky důležitých prvků v přírodě. Významnou složkou mikroflóry půd jsou **celulolytické mikroorganismy**, tedy mikroorganismy podílející se na rozkladu buněčných stěn rostlin, jejichž základem je celulóza. Jejich zastoupení v půdě je jedním ze základních ukazatelů úrodnosti. S ohledem na charakter testovaných vzorků byla také věnována pozornost obsahu **železitých a siřných bakterií**.

Do skupiny **mikroorganismů podílejících se na metabolismu dusíkatých látek**, které se vyskytují v půdách, jsou nejčastěji řazeny dusík fixující bakterie, chemoheterotrofní bakterie fixující vzdušný dusík a denitrifikační bakterie. Dusík je na Zemi přítomen ve třech formách – molekulární, organicky (močovina, siláže, apod.) a anorganicky vázaný (amoniakální – NH_3 , NH_4^+ ; dusitanový NO_2^- , dusičnanový NO_3^- , dusík umělého původu – kyanidy, kyanatany). V závislosti na formě dusíku v daném prostředí jsou rozlišovány procesy jeho odbourávání. Patří k nim fixace molekulárního dusíku, amonifikace, tedy proces, v jehož průběhu dochází k oxidaci amonných iontů na dusitany a dusičnany a denitrifikace – proces přeměny dusičnanů a dusitanů na plynný dusík nebo N_2O . Do skupiny mikroorganismů podílejících se na metabolismu dusíkatých látek se řadí bakterie rodu ***Azotobacter***. Jedná se o chemoorganotrofní mikroorganismy, které mají schopnost nesymbioticky vázat molekulární dusík ze vzduchu a převádět jej na formu dostupnou pro jiné mikroorganismy a rostliny. Dále se sem řadí **dusík fixující mikroorganismy a denitrifikační bakterie**.

Bylo odebráno 21 vzorků z úložiště popela. Vzorky byly odebrány jednak z otevřeného složiště a dále byly odebrány vzorky z rekultivované části složiště a čerstvé vzorky. Shrnutí výsledků stanovení sledovaných skupin mikroorganismů je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1.: Shrnutí výsledků stanovení sledovaných skupin mikroorganismů

Vzorek č.	Médium/ počet mikroorganismů														
	KTJ.10 ⁸ /g		KTJ.10 ⁵ /g												
	CPM 30	CPM 10	PMex	LM	VM	ChM	PůM	AcM	DenM	ŽB	DfB	VdfM	SB	AzM	CM
1	30,4	0	436	+	1	62	11	65	65	93	1	-	-	-	-
2	10,6	0	23,0	+	5	156	26	186	186	n	6	-	-	-	-
3	2,4	0	22	+	6	4	10	13	13	16	11	-	-	+	-
4	9,2	0	110	+	1	22	28	100	100	80	7	-	-	-	-
5	11,1	7,6	516	+	18	19	19	163	163	112	53	-	-	+	-
6	7,2	8,1	44	+	1	48	10	128	128	222	37	-	-	-	-
7	1,6	9,5	12	+	17	23	2	15	15	19	3	-	-	-	-
8	3,8	3,7	159	+	4	25	0	19	19	14	1	-	-	+	-
9	18,2	5,0	121	+	3	30	1	12	12	18	0	-	-	-	-
10	1,0	1,7	37	+	2	3	19	n	n	192	66	-	-	-	-
11	2,3	13,3	129	+	3	35	5	160	160	65	80	-	-	-	-
12	7,4	0	18	+	1	24	7	34	34	166	15	-	-	+	-
13	49,5	3,0	45	+	4	8	0	1	1	19	0	-	-	+	-
14	1,1	0,3	9	+	2	5	1	0	0	12	13	-	-	+	-
15	3,6	0,3	0	+	2	28	27	32	32	84	32	-	-	-	-
16	12,8	0	4	+	7	78	9	107	107	136	54	-	-	+	-
17	6,5	0	3	+	2	72	21	n	n	162	13	-	-	+	-
18	5,2	0	5	+	3	14	39	n	n	57	237	-	-	+	-
19	3,9	0	3	+	1	73	51	153	153	65	102	-	-	+	-
20	2,3	0	4	+	1	55	114	33	33	30	299	-	-	+	-
21	1,9	0	3	+	2	23	0	89	89	192	58	-	-	+	-

Pozn.:

+ ... nárůst kolonií na všech miskách;; - ... bez nárůstu kolonií;

CPM 30 ... Celkový počet mikroorganismů při teplotě 30 °C, CPM 10 ... Celkový počet mikroorganismů při teplotě 10 °C, PMex ... Proteolytické mikroorganismy, LM ... Lipolytické mikroorganismy, VM ... Vláknité mikroorganismy (kvasinky a plísňe), ChM ... Chemoorganotrofní bakterie/celkový počet mikroorganismů s produkcí extracelulárních enzymů, PůM ... Půdní mikroorganismy, AcM ... Actinomycety, DenM ... Denitrifikační bakterie, ŽB ... Železité bakterie, DfB ... Dusík fixující bakterie, VdfM ... Chemoheterotrofní bakterie fixující vzdušný dusík, SB ... Sírné bakterie, AzM ... Bakterie rodu *Azotobacter* CM...Celulolytické mikroorganismy

V závislosti na stanovení celkového počtu mikroorganismů (CPM 30) nelze přesně říci, jaký je nejvhodnější způsob skladování popela. Byly sledovány jednotlivé skupiny mikroorganismů v závislosti na jejich výživových potřebách a zároveň schopnosti metabolizovat vybrané látky obsažené v prostředí. Byla zjištěna přítomnost proteolytických, lipolytických mikroorganismů i chemoorganotrofních bakterií s produkcí extracelulárních enzymů a obecně půdních mikroorganismů. Byla zjištěna i přítomnost železitých bakterií. V žádném testovaném vzorku nebyla prokázána přítomnost celulytických mikroorganismů ani sírných bakterií.

Významnou skupinou mikroorganismů, jejichž přítomnost byla sledována, jsou mikroorganismy podílející se na metabolismu dusíkatých látek. Mezi v přírodě nejrozšířenější

skupiny mikroorganismů této skupiny patří dusík fixující bakterie, zejména bakterie rodu *Azotobacter* dále chemoheterotrofní bakterie fixující vzdušný dusík a denitrifikační bakterie. Byla prokázána přítomnost všech sledovaných skupin mikroorganismů podílejících se na metabolismu dusíkatých látek, kromě skupiny Chemoheterotrofních bakterií fixujících vzdušný dusík.

2.2. Sbírkové mikroorganismy a sledování utilizace NH_4^+ mikroorganismy

Za účelem testování biologického odbourávání amoniakálního dusíku, byly na základě literární rešerše, vytipovány sbírkové kmeny, pocházející ze sbírky NITE Biological Resource Center (NBRC) v Japonsku. U těchto kmenů byla prokázána nitrifikační schopnost za aerobních i anaerobních podmínek. Nitrifikační vlastnosti vykazují také heterotrofní kmeny *Bacillus*, konkrétně *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis* a *Bacillus licheniformis*. Vzhledem k tomu, že se jedná o kmeny, které splňují požadované vlastnosti (rychlá kultivace za nenáročných podmínek - relativně nízká teplota, aerobně, apod.) byly také zařazeny mezi vytipované kmeny. Vybrané kmeny *Bacillus* byly získány z České sbírky mikroorganismů (CCM) v Brně. Vzhledem k tomu, že účelem studie je nalezení mikroorganismu schopného využít amoniakální dusík za co nejméně náročných podmínek a ve velkých objemech, byla pozornost věnována složení kultivačního média. Cílem bylo nalezení bazálního neboli minimálního média o přesném složení, tedy média složeného pouze ze základních složek nutných pro růst mikroorganismů. Za tímto účelem bylo testováno několik médií získaných z literatury a bylo optimalizováno jejich složení [2, 3]. Bylo vybráno médium určené pro heterotrofní nitrifikační médium o složení uvedeném v publikaci autorů Zhang a kol. 2012 [2].

Stanovení amonných iontů bylo prováděno pomocí fotometrického stanovení s Nesslerovým činidlem. Za tímto účelem byla pomocí NH_4NO_3 sestrojena kalibrační křivka v rozmezí koncentrací amonných iontů 0,2-1,0 ppm. Kvalita sestrojené kalibrační křivky byla vyhodnocena podle normy ČSN ISO 8466-1. Kultivační médium bylo obohaceno o NH_4NO_3 , přičemž finální koncentrace byla 1 mg/ml. Byl sledován úbytek koncentrace amonných iontů po 4 dnech kultivace v basálním médiu a basálním médiu s přidavkem glukosy (5 ml) za odpovídajících podmínek (30, respektive 28 °C, aerobní submerzní kultivace).

Na základě provedených experimentů bylo potvrzeno, že vybrané kmeny *Pseudomonas aeruginosa* (NBRC 12689), *Paracoccus denitrificans* (NBRC 13301), *Alcaligenes faecalis* subsp. *faecalis* (NBRC 13111) a *Nitrosomonas europaea* (NBRC 14298) jsou schopny využít amonné ionty. Získané výsledky potvrzují údaje uvedené v literatuře, na jejichž základě byl proveden výběr vhodných kmenů [4, 5, 6, 7, 8]. Vybrané bakteriální kmeny dokáží využívat amoniakální dusík.

3. Závěr

Experimentální prací bylo prokázáno, že komerčně dostupné bakteriální kmeny, které jsou schopny zpracovávat amonné složky, lze snadno kultivovat na běžně dostupných agaroch běžným způsobem. Dále bylo ověřeno, že při záměně agaru za popílek zůstane tato schopnost zachována. Jinými slovy, testované komerčně dostupné sbírkové kmeny lze použít v prostředí VEP (popílku).

Další mikrobiologická stanovení provedená na reálných vzorcích odebraných na složištích ukázala, že vzorky VEP se bez ohledu na jejich původ vyznačují širokým zastoupením různorodých skupin mikroorganismů, které se přirozeně vyskytují v životním prostředí.

S ohledem na charakter a původ vzorku byla pozornost zaměřena nejen na mikroorganismy vyznačující se širokým enzymovým vybavením, jako jsou proteolytické, celulólytické, tak i lipolytické mikroorganismy, dále mikroorganismy podílející se na metabolismu dusíkatých látek, které se vyskytují v půdách. To jsou nejčastěji dusík fixující bakterie, chemoheterotrofní bakterie fixující vzdušný dusík a denitrifikační bakterie, malé množství železitých bakterií. Sírné bakterie nebyly detekovány.

S ohledem na dosažené výsledky lze shrnout, že při uložení popela nehraje nikterak významnou roli hloubka uložení ve složišti vzhledem k výskytu mikroorganismů. Závislost mezi hloubkou odběru vzorku a množstvím přítomných sledovaných organismů nebyla prokázána u žádného z testovaných vzorků. V žádném z testovaných vzorků naopak nebyla prokázána přítomnost sírných bakterií a celulólytických mikroorganismů. Výskyt mikroorganismů schopných metabolizovat dusík není závislý na žádném ze sledovaných parametrů, jako je místo uložení a hloubka.

Dále lze konstatovat, že některé zjištěné mikroorganismy, jež mají schopnosti metabolizovat dusíkaté složky popílku, by bylo možné využít pro likvidaci těchto látek přítomných ve VEP.

Pro zjištění míry účinnosti mikrobiologického odbourávání látek (např. deamonizace popílků), by bylo potřeba znát konkrétní druhy mikroorganismů, neboť každý organismus metabolizuje jinou rychlostí.

Ze zjištěných hodnot uvedených v $KTJ \cdot 10^x/g$ (kolonie tvořící jednotky), lze pouze predikovat, že zjištěné množství mikroorganismů v analyzovaných vzorcích, poukazuje na skupiny mikroorganismů, které jsou schopny života v podmínkách složiště. Z toho lze usuzovat, že účinné mikrobiologické odbourání konkrétních nežádoucích složek bude vhodné provádět s bakteriemi zjištěných skupin. Potřebné množství přidaných mikroorganismů a rychlost odbourání bude závislá na okolních podmínkách a lokálním složení místa aplikace mikroorganismů. Tato stanovení a další experimentální činnosti budou předmětem dalšího výzkumu.

Poděkování

Centru materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně - udržitelnost a rozvoj, r.č. LO1211, za finanční podpory Národního programu udržitelnosti I (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy)

Literatura

- [1] BOTHE, H. a G. JOST. Molecular analysis of ammonia oxidation and denitrification in natural environments. *FEMS Microbiology Reviews*. 2000, 24(5), 673-690. DOI: 10.1111/j.1574-6976.2000.tb00566.x. ISSN 1574-6976. Dostupné také z: <https://academic.oup.com/femsre/article-lookup/doi/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00566>.
- [2] ZHANG, J. a P. WU. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the bacterium *Pseudomonas stutzeri* YZN-001. *Bioresource Technology*. 2011, 102(21), 9866-9869. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.118. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/>
- [3] ATLAS, R. M. *Handbook of Microbiological Media: Fourth Edition*. 4. Kentucky, USA: CRC Press, 2010. ISBN 9781439804087.
- [4] FURSOVA, P. V. a E. S. MIL'KO. Cultivation of *Pseudomonas aeruginosa* dissociants under specified limitation conditions. *Microbiology*. 2008, 77(2), 192-197. DOI: 10.1134/S0026261708020124. ISSN 0026-2617. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1134/S0026261708020124>
- [5] MAKSIMOV, V. N. a E. S. MIL'KO. Requirements of *Pseudomonas aeruginosa* Dissociants in Glucose, Nitrate, and Phosphate. Limiting Concentrations of the Nutrients during Batch Cultivation. *Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2001, 28(5), 517-522. DOI: 10.1023/A:1016704613114. ISSN 10623590. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1016704613114>
- [6] HAHNKE, S. M. a Philipp MOOSMANN. An improved medium for the anaerobic growth of *Paracoccus denitrificans* Pd1222. *Frontiers in Microbiology*. 2014, 5, -. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00018. ISSN 1664-302x. Dostupné také z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2014.00018/abstract>
- [7] GATES, A. J. a V. M. LUQUE-ALMAGRO. A composite biochemical system for bacterial nitrate and nitrite assimilation as exemplified by *Paracoccus denitrificans*. *Biochemical Journal*. 2011, 435(3), 743-753. DOI: 10.1042/BJ20101920. ISSN 0264-6021. Dostupné také z: <http://biochemj.org/lookup/doi/10.1042/BJ20101920>
- [8] MULET, M. a A. BENNASAR. An *rpoD*-based PCR procedure for the identification of *Pseudomonas* species and for their detection in environmental samples. *Molecular and Cellular Probes*. 2009, 23(3-4), 140-147. DOI: 10.1016/j.mcp.2009.02.001. ISSN 08908508. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890850809000206>

Kontakt

Bc. DENISA ROMANOVSKÁ, tel: +420 774 373 606, e-mail: xcromanovska@fch.vut.cz, Ústav potravinářské chemie a biotechnologií, FCH VUT v Brně, Purkyňova 464/118, 610 00, Brno
Ing. ŠTĚPÁNKA TRACHTOVÁ, Ph.D., tel: +420 54114 9476, e-mail: trachtova@fch.vut.cz, Ústav potravinářské chemie a biotechnologií, FCH VUT v Brně, Purkyňova 464/118, 610 00, Brno
Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D., tel: +420 541 149 423, e-mail: opravil@fch.vut.cz, Centrum materiálového výzkumu, FCH VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.
Ing. ROMAN SNOP, tel: +420 725 648 981, e-mail: roman.snop@cez.cz, ČEZ Energetické produkty, s.r.o., Komenského 534, 253 01 Hostivice.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

VYUŽITÍ POPÍLKU V RÁMCI LEPIDEL A STĚREK PRO KONTAKTNÍ ZATEPLOVACÍ SYSTÉM

USING FLY ASH IN ADHESIVES AND LEVELING SUBSTANCES FOR INSULATION SYSTEM

Lubomír Sokola, Nikol Žižková

STOMIX, spol. s r.o.
Fakulta stavební VUT v Brně

Anotace:

Práce je zaměřena na využití popílku v rámci lepidla a stěrky pro vnější kontaktní zateplovací systém. V praktické části se ověřovaly zásadní fyzikálně-mechanické vlastnosti upravených výrobků v několika etapách za účelem ověření vhodnosti použití popílku v těchto aplikacích. V závěru je uvedeno obecné shrnutí vlivu popílků a srovnání se standardními produkty.

Annotation:

The work focuses on the using of fly ash in adhesives and leveling substances for external thermal insulation system. In the practical part there were verified underlying physico-mechanical properties of formulated products in several stages in order to verify the suitability of using fly ash in these applications. In conclusion, a general summary of the influence of fly ash comparison with standard products is noticed.

Klíčová slova:

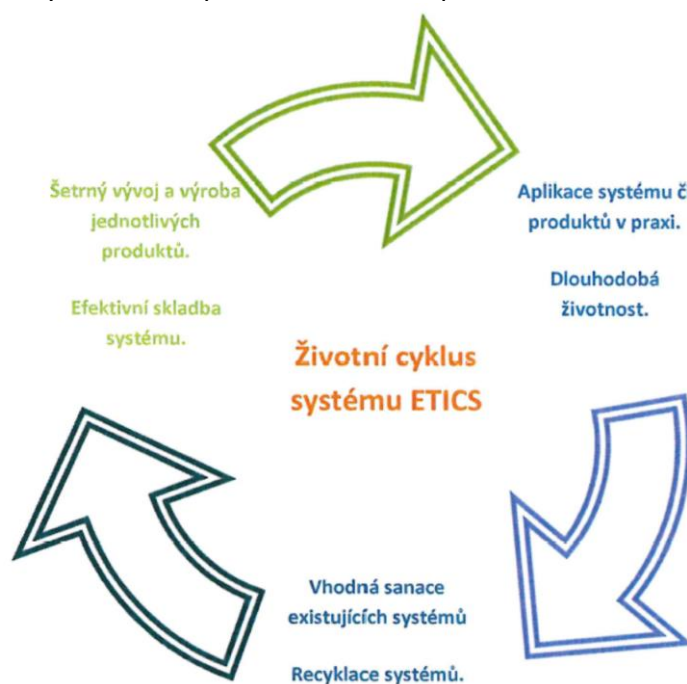
popílek, zateplovací systém, ETICS (external thermal insulation composite system), ETAG 004

Keywords:

fly ash, insulation system, ETICS (external thermal insulation composite system), ETAG 004

1. Kontaktní zateplení

V dnešní době, kdy řada staveb vybudovaných v předešlých letech již nesplňuje požadavky v oblasti tepelně izolační, dochází k úpravám těchto objektů zateplením. Nejen zde, ale i u nově navrhovaných staveb je systém zateplení ve značné míře navrhován. V rámci České republiky se nejvíce používá systém kontaktního zateplení označovaný jako ETICS (external thermal insulation composite system). Hlavním přínosem je podstatné snížení tepelných ztrát obvodovou konstrukcí, což šetří peníze za vytápění či chlazení. Snížením energetické náročnosti budovy tyto systémy značnou měrou přispívají k ochraně životního prostředí. Z hlediska udržitelného využití produktů pro zateplení a zateplovacích systémů je kladen velký důraz na ucelený náhled na problematiku zateplování budov.



Obrázek 1: ideální životní cyklus ETICS z hlediska udržitelného využívání zdrojů

2. Udržitelné použití přírodních zdrojů

2.1. Požadavek Evropského parlamentu

Jedním z “nových” základních požadavků na stavby dle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 je bod č. 7. Tento bod pojednává o udržitelném využívání přírodních zdrojů. Stavba (popř. její součást) tedy musí být navržena, provedena a zbourána takovým způsobem, aby bylo zajištěno udržitelné použití přírodních zdrojů.

V rámci výzkumu a vývoje lepidel a stěrek pro zateplovací systém jsme se zabývali možným využitím odpadních či druhotných surovin nebo produktů, které z těchto surovin vznikly. Byla tedy snaha navrhnout složení jednotlivých výrobků pro ETICS, které by přispělo k udržitelnému použití přírodních zdrojů a tím pádem reflektování bodu č. 7.

Vznikl tak seznam surovin, které byly v teoretické rovině uvažovány jako možné součásti receptur lepidel a stěrek pro ETICS.

2.2. Popílek v produktech pro ETICS

Jednou z vybraných surovin byl mimo jiné popílek. Jednalo se o popílek vzniklý vysokoteplotním spalováním černého a hnědého uhlí v elektrárnách, který je běžně používán zejména jako částečná náhrada cementu v betonu. Tato surovina byla vybrána pro praktické ověření v rámci výrobků na bázi cementu.

Složení produktů, přidávané množství a původ popílků jsou chráněnou informací firmy STOMIX a proto budou výsledky publikovány pouze v obecné rovině, nebude uvedeno přesné množství, typ nebo původ ostatních surovin a nebudou publikovány přesné číselné hodnoty výsledků zkoušek.

3. Praktická část

3.1. Vývoj produktů pro ETICS s obsahem vysokoteplotního elektrárenského popílku

Praktická část testů se zaměřila na standardní produkty (lepidlo, stěrka) společnosti STOMIX a úpravu složení za pomoci černouhelného a hnědouhelného popílku. Je třeba uvést, že na produkty pro ETICS jsou kladeny náročné požadavky dle ETAG 004 2013 (řídící systém EU) a také kvalitativní třídy A, která stanovené požadavky ještě více zpřísňuje. V rámci ověření bylo tedy nutné otestovat velkou škálu fyzikálně-mechanických vlastností, aby bylo možné posoudit, zdali přidáním popílku nedojde k nežádoucím změnám standardních produktů. Cílem bylo rovněž zjistit, které parametry produktů se mohou změnou složení zlepšit.

Provedené testy:

- Stanovení konzistence čerstvé směsi
- Retence
- Zpracovatelnost a otevřená doba
- Objemová hmotnost čerstvé směsi
- Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě
- Přídržnost k betonu a k polystyrenu
- Objemová hmotnost po 28 dnech
- Dynamický modul pružnosti
- Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku
- Nasákavost
- Paropropustnost
- Spotřeba a vydatnost materiálu

3.2. Lepidlo pro lepení izolantů

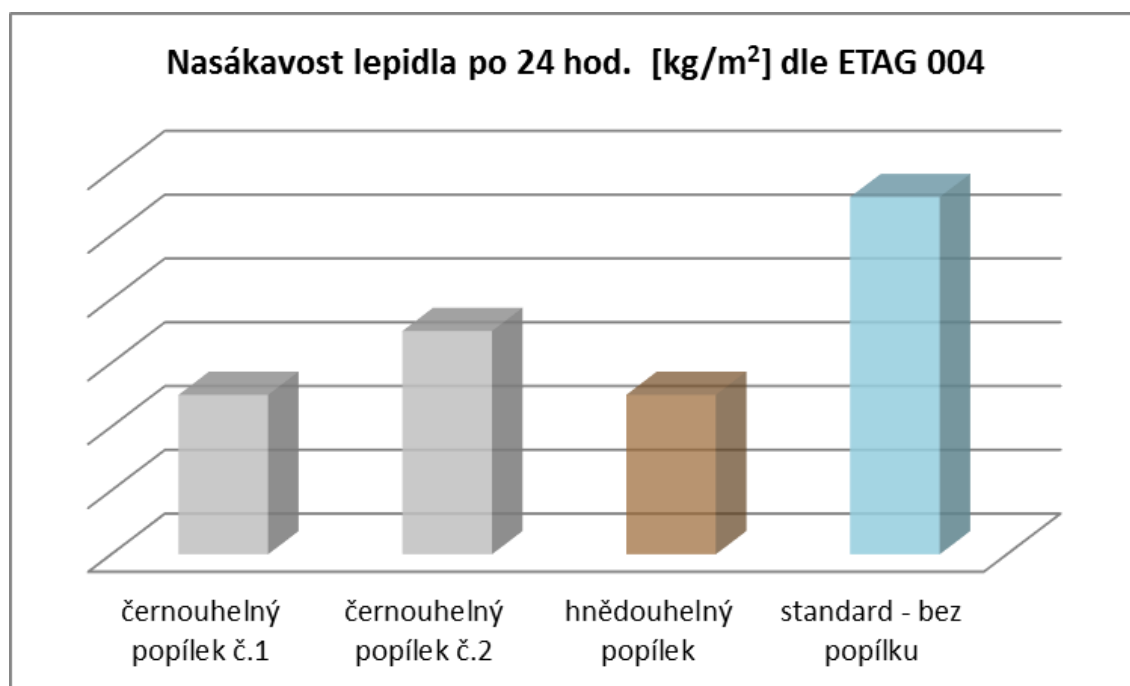
Hlavním účelem lepidla v rámci kontaktního zateplení je stabilní a spolehlivé připevnění izolačního materiálu, jako je expandovaný polystyren (EPS) nebo minerální vata (MW)

k podkladu. V posledních letech se začínají objevovat nové progresivní materiály, které svými parametry předčí standardní izolanty z EPS či MW. Těmito materiály jsou např. desky z fenolické pěny, PUR desky nebo např. PIR-PUR desky. Na lepidla jsou tedy kladeny rozmanité požadavky z hlediska jejich vlastností.

V rámci našich testů jsme se zaměřili na standardní izolanty (EPS a MW).

3.2.1 Shrnutí výsledků zkoušek

Vliv popílku byl zejména patrný u nasákavostí, kde došlo k podstatnému snížení příjmu vody do struktury zkoušeného materiálů (viz Graf 1). Zlepšení bylo možné pozorovat také u přídržností po 1 a 28 dnech ve standardním uložení. Naopak po vodním uložení došlo k mírnému poklesu hodnot přídržností, ale rozdíl od standardních produktů nebyl v takové míře, že by použití popílků vylučoval. Vlivem užití popílku došlo ke snížení objemové hmotnosti směsi, což lze přikládat náhradě plniva, které má vyšší objemovou hmotnost. Došlo také k mírnému navýšení pevnosti v tlaku a k snížení tahu za ohybu. Ostatní zkoušené parametry se pohybovali ve stejných mezích jako u standardního produktu.



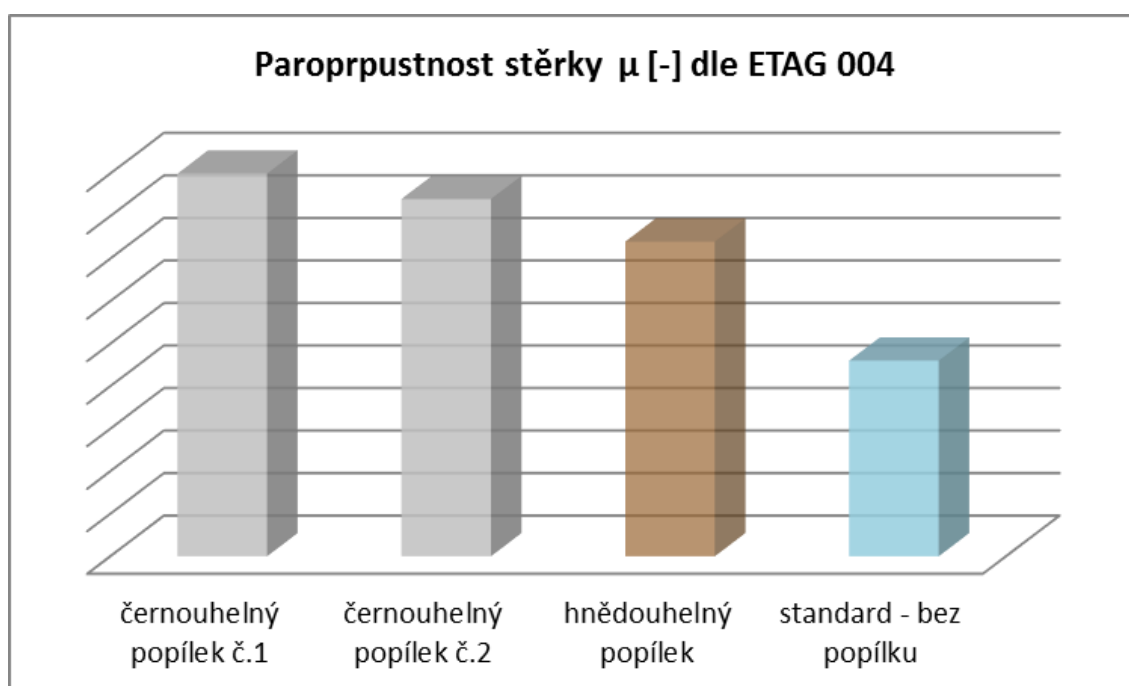
Graf 1: nasákavost lepidla pro ETICS po 24 hodinách

3.3. Stěrka pro základní vrstvu ETICS

Základní vrstvu ETICS tvoří nejběžněji stěrky na cementové bázi modifikované polymerovou disperzí. Tato vrstva je nanášena obvykle v tloušťce 3 mm a je vyztužena skelnou síťovinou. Hlavním požadavkem na stěrku je dobrá zpracovatelnost s nízkou nasákavostí a vysokou paropropustností.

3.3.1 Shrnutí výsledků zkoušek

Taktéž u stěrkové hmoty byla vylepšena nasákavost, což by v praxi mohlo znamenat možnost omezení navážky hydrofobních činidel. U přídržností bylo stejně jako u lepidel zlepšení přídržností po 1 a 28 dnech a u vodního uložení bylo docíleno podobných hodnot jako u standardu. Za negativní lze považovat zhoršení paropropustnosti, které u stěrky pravděpodobně vzniklo zamezením prostupu vodní páry díky jemnosti popílku v rámci celé struktury tmele (viz Graf 2). Ostatní zkoušené parametry byly velmi podobné jako u běžné stěrky.



Graf 2: paropropustnost stěrkové hmoty pro ETICS

4. Závěr

Proces použití popílků zejména jako náhrady plniva, který má přidanou hodnotu v podobě částečné náhrady pojiva, nebyl z hlediska složení výrobků snadný proces. Bylo nutné provést úpravu receptur v několika etapách, aby bylo dosaženo uspokojivých výsledků u všech fyzikálně-mechanických vlastností. To obnášelo úpravy množství jak pojiv a plniv, tak i jednotlivých přísad z hlediska reologie a dalších vlastností. Lze konstatovat, že po potřebné úpravě složení byla prokázána vhodnost použití vysokoteplotních elektrárenských popílků a to v celkem zajímavém objemu. Přínosem změny je zlepšení některých vlastností, při zachování ostatních parametrů. Mimo úpravu vlastností bylo také dosaženo snížení surovinových nákladů pro dané receptury a v neposlední řadě byl splněn požadavek v podobě ochrany životního prostředí ve shodě se sedmým základním požadavkem na stavby.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

Závěrem je tedy možné říci, že obsáhlým testováním upravených receptur bylo dosaženo požadovaných výsledků a takto formulované hmoty obsahující elektrárenský popílek lze v rámci zateplování využít.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I".

Za možnost využití laboratoří a laboratorních zařízení děkujeme Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně a vývojovému oddělení společnosti STOMIX.

Kontakt

Ing. LUBOMÍR SOKOLA, tel: +420 725 768 686, e-mail: sokola@stomix.cz, STOMIX, spol. r. o., Skorošice 197, 790 65 Skorošice.

doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D., tel: +420 541 147 515, e-mail: zizkova.n@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

ÚPRAVA ZEMIN V PODLOŽÍ VOZOVKY POPÍLKY A POPÍLKOVÝMI STABILIZÁTY

IMPROVEMENT OF SOILS IN PAVEMENT SUBGRADE BY FLY-ASHES AND STABILIZED FLY-ASHES

Dušan Stehlík, Veronika Sokolová

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Ústav pozemních komunikací

Anotace:

Úprava nevhodných jemnozrnných zemin v podloží vozovek hydraulickým pojivem je v současné době velmi používanou a úspěšnou technologií zvyšující zpracovatelnost převlhčených jemnozrnných zemin, únosnost a účinně snižuje namrzavost těchto směsí. Jako pojiva se používají především vzdušná vápna, směsné cementy, případně alternativní pojiva. Jedním z nejčastěji aplikovaným alternativním pojivem je popílek z fluidního spalování. Ve směsi s nevhodnou jemnozrnnou zeminou často tvoří po zhutnění velmi únosné technologické vrstvy. Pro takto navržené směsi je nutné důsledně sledovat namrzavost.

Annotation:

Soil treatment of fine-grained soils in the subgrade with the exploitation of hydraulic binders is nowadays a successful and frequent technology uses to improve particularly the workability of overly saturated soils. Moreover, the use of hydraulic binders also increases load carrying capacity and reduces soils' frost susceptibility. Among the used binders are included air lime, composite cements or alternative binders. One of the most frequently applied alternative binder is fly ash obtained during fluidized bed combustions. Fly ash mixed with an inappropriate soil form after the compaction a technological layer with high bearing capacity. In this case, attention must be paid to mixture's frost susceptibility.

Klíčová slova:

Podloží vozovky, úprava zemin, únosnost zemin, namrzavost upravených zemin, popílek, popílkový stabilizát.

Keywords:

Pavement subgrade, improvement of soils, bearing capacity of soils, frost susceptibility of improved soils, fly-ash, stabilized fly-ash.

1. Úvod

Při návrhu a provádění dopravních staveb je velmi důležité sledovat chování použitých materiálů a konstrukcí při predikovaném dopravním zatížení a komplikovaných povětrnostních podmínkách (např. střídání nízkých a vyšších teplot). V zemích, kde teploty klesají pod bod mrazu, mají tyto podmínky vždy negativní vliv na trvanlivost a životnost konstrukcí a zejména podloží vozovek pozemních komunikací. V jarním a podzimním období mohou změny vodoteplotního režimu v horní konstrukční části podloží pozemní komunikace způsobovat mrazové zdvihy saturovaných jemnozrnných zemin a co je významnější, následně při tání ztrátu únosnosti těchto vrstev podloží vozovky. Vlastnosti nejčastěji navrhovaných netuhých vozovek se v závislosti na teplotě mohou výrazně měnit.

Jako zástupce vedlejších energetických produktů (VEP) je nejčastěji používán do podloží dopravních staveb elektrárenský popílek. Je to zejména kvůli nárůstu jeho produkce a s tím související problém, jeho skladování. Popílek je nevyhnutelný vedlejší produkt výroby elektrické energie spalováním uhlí. Díky důslednému zachytávání pomocí elektrofiltrů se dnes popílek již nedostává do ovzduší v takovém rozsahu, aby způsoboval škody v zemědělství, lesnictví i na zdraví člověka, ale vzniká problém s jeho likvidací jako odpadu výroby elektrické energie. Roční produkce popílků v České republice přesahuje 10 miliónů tun, ale vzhledem k technologickým i ekonomickým důvodům se využívá pouze přibližně 20 % z celkového množství. Popílek má oproti jiným odpadům určitou výhodu, lze jej použít v původní formě bez jakéhokoliv zpracování nebo velkých úprav složení. Používá se zejména jako přísada do betonu ve snaze o částečné nebo úplné nahrazení portlandského cementu, ke stavbám konstrukčních vrstev vozovky, podloží a násypů silnic, jako cementová surovina, protože má v některých případech výrazné hydraulické reakce způsobující tuhnutí a tvrdnutí navržených stmelovaných směsí, apod. Další možností použití je jeho alkalická aktivace za vzniku geopolymerního materiálu.

2. Materiály a metody zkoušení popílků a popílkových stabilizátů jako příměsí

Pro návrhy úpravy zeminy do podloží vozovky bylo použito:

Jemnozrnná zemina: F6Cl jíla se střední plasticitou, frakce 0/8 mm, $f=78\%$, $s=19\%$, $g=3\%$, $w_L=42\%$, $w_p=19\%$, $I_p=23\%$, podmíněčně vhodná do násypu, nevhodná do aktivní zóny podloží vozovky (podle ČSN 73 6133)

Popílký jako příměs: hnědouhelný popílek ECHVA (ČEZ, a.s., Chvaletice)
černouhelný popílek EDE (ČEZ, a.s., Dětmovice)
fluidní popílek EPO (ČEZ, a.s., Počeradý)

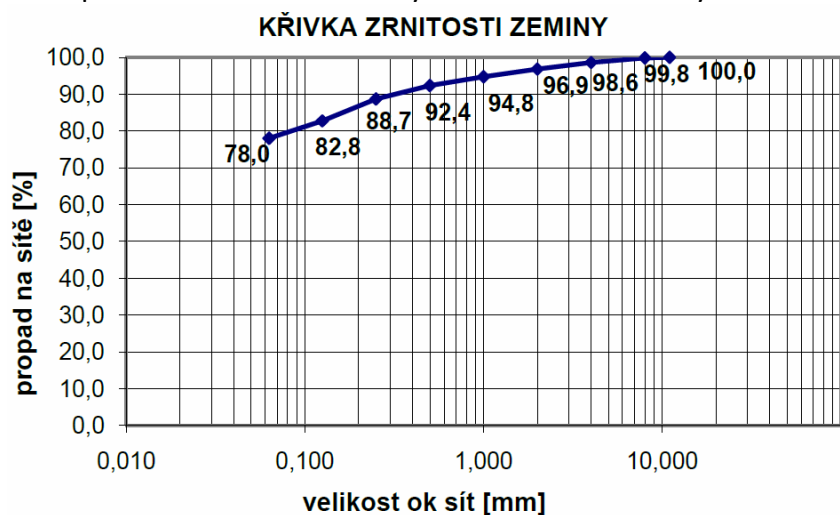
Pojivo: vzdušné vápno CL 90.

Pro každou směs byla, z důvodů relevantního porovnání vlastností, použita stejná zemina, jíla se střední plasticitou F6 Cl. Zemina byla míchána s pojivy a příměsí dle receptur. Množství vzdušného vápna bylo stanoveno na základě zkušeností a běžným použitím v praxi. Pro směsi s popílkou bylo dávkování 15% a 25% hm. zvoleno na základě laboratorních zkoušek a vyhovujících výsledků stanovení poměru únosnosti CBR.

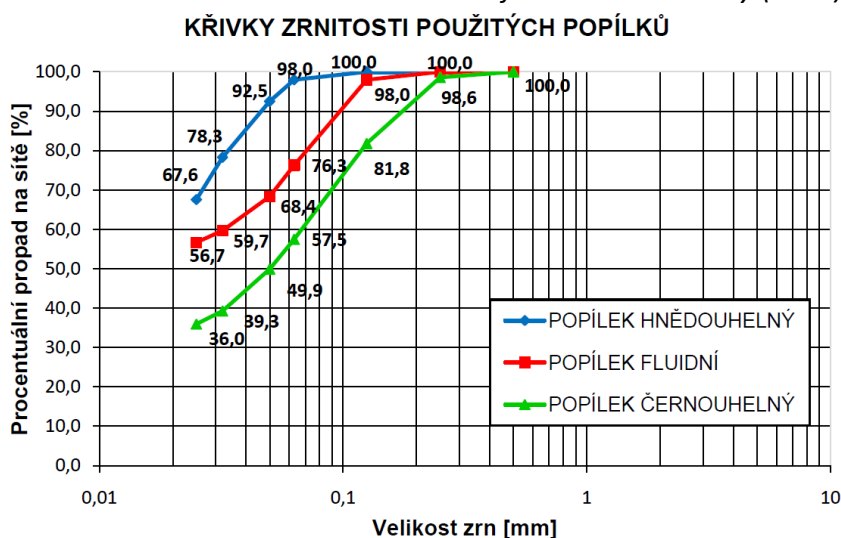
2.1. Návrh receptur upravené zeminy vápnem a popílký

- Směs č.1 Zemina F6 CI
- Směs č.2 Zemina F6 CI zlepšená 2 % vápna
- Směs č.3 Zemina F6 CI s 15 % popílků hnědouhelného ECHVA
- Směs č.4 Zemina F6 CI s 25 % popílků hnědouhelného ECHVA
- Směs č.5 Zemina F6 CI s 15 % popílků černouhelného EDE
- Směs č.6 Zemina F6 CI s 25 % popílků černouhelného EDE
- Směs č.7 Zemina F6 CI s 15 % popílků fluidního EPO
- Směs č.8 Zemina F6 CI s 25 % popílků fluidního EPO
- Směs č.9 Popílek hnědouhelný ECHVA

Na těchto devíti zkušebních vzorcích směsí byly následně provedeny mechanické a funkční laboratorní zkoušky, a to zkouška zhutnitelnosti, namrzavosti, stanovení Kalifornského poměru únosnosti a okamžitého indexu únosnosti a cyklická triaxiální zkouška pro určení modulu pružnosti po 7 dnech zrání zhutněných zkušebních válcových tělesech.



Obrázek 1.: Křivka zrnitosti nevhodné jemnozrné zeminy (F6 CI)



Obrázek 2.: Křivky zrnitosti použitých alternativních pojiv - popílků

2.2. Metody zkoušení vlastností upravené jemnozrné zeminy vápnem a popílky

Zkušební postup vycházel z předpokladu, že experimentálně sledované směsi budou v podloží vozovky jako technologická vrstva aktivní zóny. Z tohoto důvodu byly zvoleny pro ověření vlastností výše uvedené laboratorní zkoušky.

A. Stanovení zhutnitelnosti upravených zemin pro podloží vozovky

Stanovení závislosti objemové hmotnosti zhutněné upravené zeminy pojivem a optimální vlhkosti bylo provedeno metodou Proctor standard v souladu s ČSN EN 13286-2. Zemina F6 C1 byla u osmi z navržených devíti směsí navlhčena po jednotlivých dávkách s intervalem +2% vlhkosti předchozího dílčího vzorku. Zrání navlhčených dílčích vzorků jemnozrné zeminy bez pojiva bylo 24 hodin při relativní vzdušné vlhkosti větší než 90%. Pojivo bylo do jednotlivých dílčích vzorků dodáno cca 15 min. před zhutněním do válcové zkušební formy typu A.

B. Stanovení okamžitého indexu únosnosti (IBI) a kalifornského poměru únosnosti CBR

Stanovení závislosti zatlačení ocelového trnu průměru 50 mm do zhutněné upravené zeminy ve formě typu B o průměru 150 mm a výšce 120 mm a odporové síle stanovené v kN bylo v souladu s ČSN EN 13286-47. Okamžitý index únosnosti (IBI) se zkouší ihned po smíchání směsi a maximálním zhutnění při optimální vlhkosti. U kalifornského poměru únosnosti (CBR) je postup přípravy téměř totožný, velký rozdíl je ve zrání vzorku před zkouškou – 3 dny zrání při 90%ním vlhkém prostředí a 4 dny saturace celého objemu vzorku ve vodě. Takto připravené zkušební těleso (viz. obrázek 3) simuluje nejméně příznivý režim v podloží vozovky z hlediska vlhkosti.



Obrázek 3.: Zkušební vzorky F6 C1 při a po zkoušce CBR

C. Stanovení namrzavosti upravených zemin vápnem a popílky

Přímá zkouška namrzavosti zhutněných válcových zkušebních těles byla provedena podle ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin. Zkušební válcová tělesa byla zhutněna při optimální vlhkosti na maximální objemovou hmotnost metodou Proctor standard pro každou

zkoušenou směs. Všechna zkušební tělesa devíti směsí zrála po zhutnění v klimatizované komoře při relativní vzdušné vlhkosti min. 90% po dobu 28 až 30 dní. Před vlastní přímou zkouškou namrzavosti podle výše popsané normy byla zkušební válcová tělesa ve zkušebním přístroji saturována vodou při teplotě 5 °C po dobu 17-24 hodin.



Obrázek 4.: Zrání zkušebních válcových zkušebních těles na roštích v klimatizované komoře při 90% relativní vlhkosti vzduchu

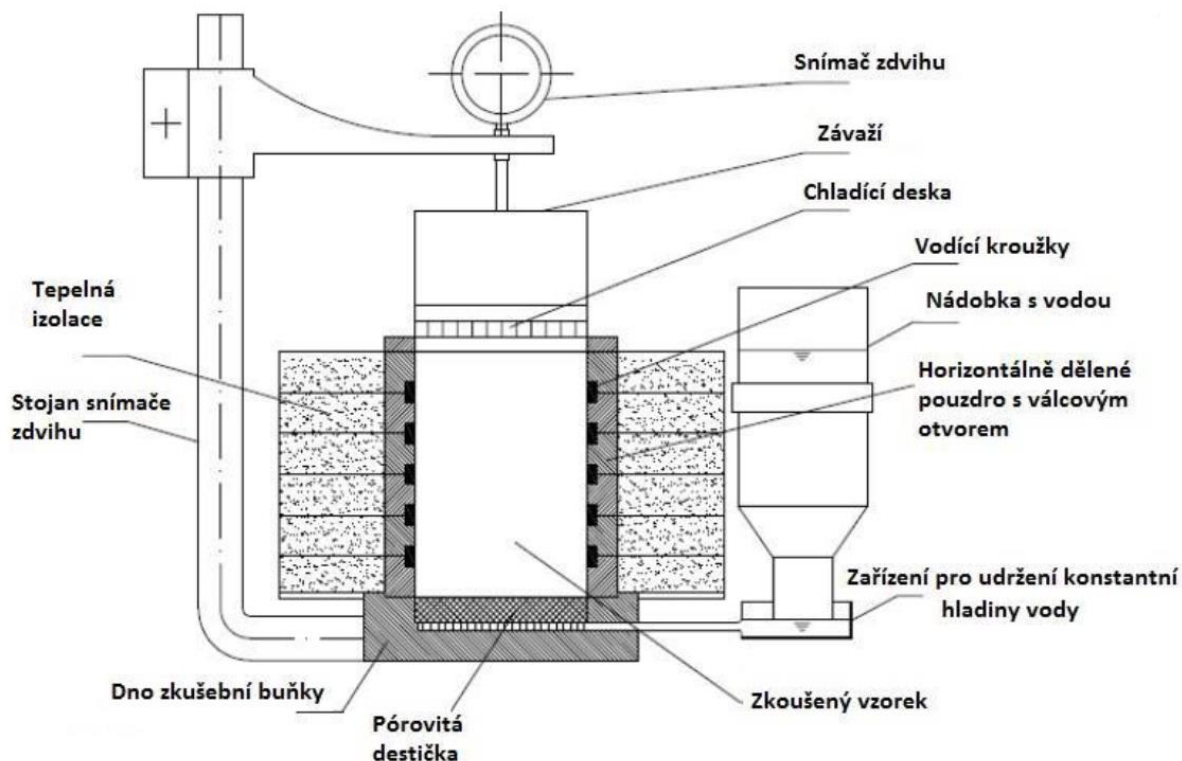
Stanovením míry namrzavosti přímou metodou se zabývá norma ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti zemin“. V roce 2013 došlo k nahrazení původního vydání normy z roku 1988. Jak již bylo zmíněno výše, toto zkoušení se provádí pro zeminy, recyklované materiály a vedlejší produkty a to jak neupravené, tak upravené, které se používají pro stavbu zemního tělesa a konstrukčních vrstev dopravních staveb. Míra namrzavosti se určuje jen pro materiály, které obsahují více než 5 % částic menších než 0,125 mm. Ostatní zeminy se považují za nenamrzavé.

Principem přímé laboratorní zkoušky stanovení míry namrzavosti je napodobení účinku mrazu na podloží vozovky nebo železničního spodku za nepříznivých podmínek kapilárního sycení, kde nárůst hodnot zdvihu zkoušeného vzorku odpovídá postupnému nárůstu ledových vrstviček. Při vyhodnocování se využívá lineární vztah mezi přírůstkem zdvihu (Δh) ze shora zmrazované zeminy při stálém teplotním spádu a sycení vzorku vodou zesponu a mezi přírůstkem druhé odmocniny indexu mrazu (Δ). Tento vztah ($\Delta h / \Delta$) určuje míru namrzavosti zkoušeného vzorku.

2.2.1. Popis zkušebního zařízení na stanovení namrzavosti upravených zemin

Zkušební zařízení se skládá z chladicí skříně umožňující udržování konstantní teploty vnitřního prostředí (4 až 8 °C), ze čtyř zkušebních buněk, ve kterých jsou umístěna zkoušená válcová tělesa zeminy a z regulačního systému teplot a měřidel zdvihu. V prostoru pod ní, který je spojen se zásobníkem na vodu, se pomocí zařízení automaticky udržuje hladina vody v úrovni dolní podstavy vzorku zeminy. Ke dnu je připevněn ukazatel zdvihu zkušebního tělesa s citlivostí minimálně 0,1 mm. Na dno je usazeno horizontálně dělené pouzdro s válcovým otvorem z tepelně málo vodivého materiálu (např. plastu). Přesné sestavení prstenců zajišťují tenké vodící kroužky. (obrázek 5) Zkoušený vzorek se může rozpínat při zmrazování jen ve svislém směru. Vzorek je ze shora zakryt mrazicí deskou, která musí vyvozovat a udržovat na horní podstavě vzorku teplotu $(-4 \pm 1)^\circ\text{C}$. Na mrazicí desce je

uloženo závaží o hmotnosti 8 kg, nahrazující tlak nadložních vrstev vozovky nebo tlak železničního svršku. Zkoušené vzorky zeminy se připraví a zhutní podle ČSN EN 13286-2 metodou Proctorovy standardní zkoušky při optimální vlhkosti na maximální objemovou hmotnost do pouzdra zkušební buňky. Při výrobě vzorků ze zemin upravených příměsí pojiva či stabilizátů se tyto vzorky nechají zrást obvykle po dobu 28 dní ve vlhkém prostředí a při laboratorní teplotě. Jestliže by vzorek zeminy nevyhověl jako nenamrzavý po 28 dnech zrání, určí se konečná hodnota míry namrzavosti zkouškou se vzorky po 90 denním zrání. Po zhutnění zeminy se pouzdro vsune do tepelně izolačního obalu a pak se celé zařízení vloží na dno zkušební buňky. Nasadí se mrazicí deska, přitížení a zařízení na měření zdvihu. Takto se připraví čtyři zkušební buňky, které se následně vloží do chladicí skříně, a zkoušení může začít. Po uložení zkušebních buněk do chladicí skříně se zkoušené vzorky ochlazují při teplotě (4 až 8) °C při možnosti nasávání vody zdola v průběhu nejméně 17 hodin. Mrazicí deska po tuto dobu není v činnosti. Neměří se ani zdvih vzorku, který by mohl nastat nabobtnáním. Zmrazování mrazicí deskou při teplotě (-4 ± 1) °C začíná až po této době nasávání. Ustálený konstantní vodnotepelný režim se udržuje 5 dní, tj. 120 hodin. V průběhu této doby se měří časový průběh zdvihu v mm ve středu horní kruhové plochy vzorku průběžně v závislosti na čase minimálně po 2 hodinách, obvykle po 10 minutách s vyhodnocením v hodinových intervalech.



Obrázek 5.: Schéma jedné ze čtyř zkušebních buněk přístroje pro stanovení míry namrzavosti upravených zemin do podloží vozovky podle ČSN 72 1191

D. Stanovení modulu pružnosti z cyklické triaxiální zkoušky

Stanovení modulu pružnosti bylo provedeno podle ČSN EN 13286 – 7, zkušební metodou B – zjednodušený režim napětí s cyklickým osovým deviátorem napětí a konstantním komorovým tlakem.

Modul pružnosti byl stanoven pouze na vzorcích jemnozrnné zeminy F6 CI (směs č.1), jemnozrnné zeminy F6 CI upravené 2% hm. vápna (směs č.2) a jemnozrnné zeminy F6 CI s 25 % hm. ECHVA (směs č.4), černouhelného (směs č.6) a fluidního popílku (směs č.8). Moduly pružnosti zvolených směsí s větším podílem popílků se měly projevit výraznější změnou pružného chování směsi. Zkoušeny byly vždy tři zkušební tělesa jedné směsi, zhutněné při optimální vlhkosti stanovené Proctorovou standardní zkouškou a zhutněné pomocí ručního hydraulického lisu do forem válcového tvaru o průměru 100 mm a výšce 200 mm. Maximální tlak lisu pro hutnění byly 180 kg/cm^2 a vzorky byly lisovány cyklováním 3x 5 minut. Zhutněná zkušební tělesa byla ponechána v klimatizované komoře při vysoké relativní vzdušné vlhkosti po dobu 7 dní. Následně byla na každém zkušebním tělese provedena cyklická triaxiální zkouška s impulzním zatížením frekvencí 1 s. Pro zkoušení všech zkušebních těles uvedených směsí byla použita metoda B s konstantním stálým bočním tlakem 20 kPa. Zvolená metoda odpovídá umístění zkoušené směsi v aktivní zóně podloží vozovky. Úroveň nízkého napětí simuluje pomalou těžkou nákladní dopravu o nízké intenzitě (rychlost vozidel do cca 40 km/h jedoucí např. na místních komunikacích).



Obrázek 6.: Hutnění zkušebních těles a cyklické triaxiální zkoušení upravených zemin, experimentálně podle ČSN EN 13286-7

3. Zhodnocení výsledků a posouzení namrzavosti upravených zemin

Míra namrzavosti vychází u většiny výsledků zkoušených směsí upravených zemin, stanovená přímou metodou podle ČSN 72 1191, jako nebezpečně namrzavá (viz. tabulka 1). Citlivost na vývoj mrazových zdvihů a porušení zhutněné vrstvy se nezmění přidáním jakéhokoliv

popílku, jako hydraulického pojiva do nevhodné zeminy typu sprašová hlína. Naopak v polovině případů dochází ke zvýšení koeficientu β . To je způsobeno zejména vysokým obsahem jemnozrnných částic výsledných úprav zemin a stejnozrnným charakterem částic, ze kterých je složen popílek. Ty jsou důvodem vysoké nasákavosti, tak charakteristické pro popílky. Vysoká hodnota nasákavosti zapříčiní saturaci velkého objemu vody, který je poté k dispozici při působení teplot pod bodem mrazu a vytváření zdvihu. Lze pozorovat, že koeficient β směsí zeminy s popínkem hnědouhelným, který má nejjemnější zrnitost dosahuje nejvyšších hodnot namrzavosti a naopak hodnota namrzavost (β) směsí s popínkem černouhelným, který má ze zkoušených popílků největší zrna, je relativně nejnižší. Při úpravě jemnozrnné zeminy přidáním 2 % hm. vzdušného vápna došlo podle očekávání ke snížení hodnoty koeficientu namrzavosti β a zemina se stala mírně namrzavou až namrzavou. Tento výsledek potvrzuje známý fakt, že se namrzavost zeminy upraví přidáním hydraulického pojiva jako je vápno, ale toto tvrzení nelze bez ověření aplikovat na jakékoliv hydraulické pojivo, což se potvrdilo například výsledkem namrzavosti zeminy upravené, hydraulicky velmi aktivním, fluidním popínkem. Z výsledků nelze uspokojivě stanovit závislost mezi mírou namrzavosti zkoušených upravených zemin a jejich ostatními běžně zkoušenými charakteristikami.

Jediná možná spojitost je mezi hodnotami CBR a modulem pružnosti zeminy upravené popílky a vápnem, kdy se při snižující se hodnotě CBR směsí snižuje i hodnota modulu pružnosti E_r . Zemina s vápnem má nejvyšší hodnotu CBR i modulu pružnosti, což potvrzuje také nejčastější použití této úpravy v praxi.

Tabulka 1.: Shrnutí výsledků laboratorních zkoušek upravených zemin vápnem a popínky

Směs upravené zeminy č.	$\rho_{d,max}$ [kg/m ³]	w_{opt} [%]	IBI [%]	CBR [%]	β	E_r [MPa]
1 F6 Cl	1750	14,5	26	4	0,55	130-180
2 F6 Cl+2% hm. CaO	1760	16,0	23	120	0,32	200-300
3 F6 Cl+15% hm. ECHVA	1637	15,0	23	5	1,07	-
4 F6 Cl+25% hm. ECHVA	1565	16,0	21	2,5	0,69	65-160
5 F6 Cl+15% hm. EDE	1725	16,5	19	14	0,53	-
6 F6 Cl+25% hm. EDE	1660	15,5	16	20	0,49	130-190
7 F6 Cl+15% hm. EPO	1560	16,5	35	90	0,53	-
8 F6 Cl+25% hm. EPO	1480	18,5	35	115	0,83	160-220
9 ECHVA	1240	33,0	45	2	0,59	-

Pozn.

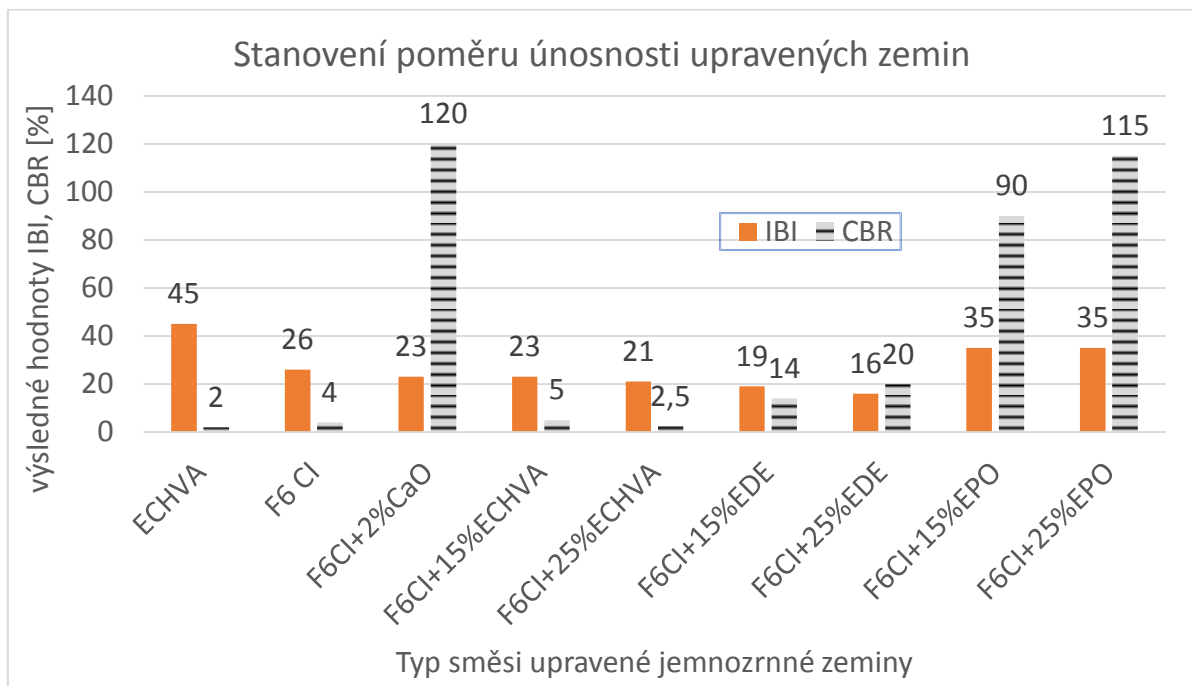
$\rho_{d,max}$ maximální objemová hmotnost suché zeminy podle ČSN EN 13286-2

w_{opt} optimální vlhkost pro maximální zhutnění zeminy podle ČSN EN 13286-2

IBI okamžitý index únosnosti podle ČSN EN 13286-47

CBR kalifornský index únosnosti podle ČSN EN 13286-47

β součinitel míry namrzavosti stanovený přímou metodou měření mrazových zdvihů zkušebních válcových těles podle ČSN 72 1191, $\beta \leq 0,25$ zemina nenamrzavá, $0,25 < \beta \leq 0,50$ zemina mírně namrzavá až namrzavá, $\beta > 0,50$ zemina nebezpečně namrzavá



Obrázek 7.: Porovnání výsledných hodnot poměrů únosnosti IBI a CBR sledovaných úprav.

4. Závěr

Dle očekávání bylo zkouškou namrzavosti zjištěno, že úpravou zeminy vápnem dojde ke snížení míry namrzavosti z nebezpečně namrzavé zeminy na zeminu mírně namrzavou. Při úpravě jemnozrnné zeminy popílký tomu tak však nebylo. Všechny směsi byly po zkoušce vyhodnoceny jako nebezpečně namrzavé, až na směs zeminy s 25 % popílký černouhelného, která byla hodnocena na hranici mírně namrzavé a nebezpečně namrzavé zeminy. Přestože některé popílký (zejména fluidní) vykazují vlastnosti hydraulického pojiva, jejich užití k úpravě zeminy nepřinese snížení její namrzavosti. Naopak u poloviny zkoušených směsí s popílký se hodnota namrzavosti zvýšila, týkalo se to zejména směsí zeminy s popílkem hnědouhelným, který je z používaných popílků nejjemnější. Potvrdilo se tedy, že namrzavost souvisí se zrnitostí materiálu, zejména s obsahem jemných částic, který ji negativně ovlivňuje, a větší množství použitých popílků ve směsi působí jako plnivo jemných částic. Dále byl zkoušen okamžitý index únosnosti IBI a kalifornský poměr únosnosti CBR. Kromě hodnocení únosnosti směsí upravených zemin je někdy tento parametr nesprávně používán pro nepřímé hodnocení namrzavosti zemin a upravených zemin. Nejvyšších hodnot IBI dosáhl vzorek samotného popílký hnědouhelného a to IBI 45%. Druhých nejvyšších hodnot IBI potom dosahovaly směsi zeminy s popílkem fluidním a nejnižších hodnot dosáhly vzorky zeminy s popílkem černouhelným. Výrazně nejvyšších hodnot CBR dosáhly vzorky zeminy upravené vápnem a zeminy s 15 % a 25 % fluidního popílký, přičemž hodnoty CBR se oproti hodnotám IBI zvýšily přibližně 5x u zeminy upravené vápnem a průměrně 3x u zeminy s fluidním popílkem. Tento nárůst únosnosti lze tedy přičítat hydratačním reakcím vápna během doby zrání vzorků. Únosnost samotného popílký hnědouhelného značně klesla po

době zrání a saturaci ve vodě, kdy z původní výrazně nejvyšší hodnoty IBI 45% došlo k poklesu poměru únosnosti na CBR 2%, příčinou je velká nasákavost popílků ve ztuhnutém stavu. Hodnoty CBR vzorků zeminy s 15 % a 25 % popílku hnědouhelného také zřetelně klesly oproti hodnotám IBI. Pro upravené zeminy byl experimentálně stanoven modul pružnosti E_r , jehož výsledná hodnota byla stanovena jako interval hodnot, kterých modul pružnosti směsí nabýval při zatížení vzorku různými hodnotami svislého napětí při komorovém tlaku 20 kPa, což je vodorovné napětí působící v konstrukci vozovky od těžké dopravy právě v úrovni podloží vozovky. Zkouška byla provedena pouze na vzorcích zeminy, zeminy upravené vápnem a na vzorcích zeminy s 25 % podílem jednotlivých popílků. Nejvyšších hodnot modulů pružnosti dosahovala směs zeminy upravená vápnem a to 200 až 300 MPa a druhých nejvyšších hodnot dosáhla směs zeminy s fluidním popílkem 160 až 220 MPa. Tento nárůst lze opět vysvětlit vyšším obsahem volného vápna reagujícího v upravené zemině. Obsah popílku hnědouhelného v zemině zapříčinil pokles hodnot modulů pružnosti. Při snižující se hodnotě CBR směsí se snižovala i hodnota modulu pružnosti E_r . Zemina s vápnem má tedy nejvyšší hodnotu CBR i modulu pružnosti.

Poděkování

Tento příspěvek byl vypracován za podpory Technologické agentury České republiky, č. TE01020168 Centra kompetence dopravní infrastruktury (CESTI).

Literatura

- [1] SOKOLOVÁ, V., Namrzavost zemin a druhotných materiálů v podloží vozovek. VUT Brno: diplomová práce, 2015.
- [2] ČSN EN 13286 – 2 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška
- [3] ČSN 72 1191 – Zkoušení míry namrzavosti zemin, (2011)
- [4] ČSN EN 13286 – 47 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání
- [5] ČSN EN 13286 – 7 – Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.
- [6] ZAJÍČEK, Jan. Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014. 392 s. ISBN 978-80-87438-59-6.

UTILIZATION OF CFBC FLY ASH IN AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

VYUŽITIE POPOLČEKA V PÓROBETÓNE

Alena Struhárová, Svetozár Balkovic, Jakub Hodul

Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava
Porfix - pórobetón, a.s.

Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology

Annotation:

Circulating fluidized bed combustion (CFBC) fly ash has different physical and chemical properties compared to pulverized coal combustion (PCC) fly ash. Amorphous – glass phase is main component (approximately 80 %) of PCC fly ash, which also content mineral mullit and content of SO_3 is less than 1 %. CFBC fly ashes due to lower temperature of combustion of coal contain minimum amorphous phase, but typical for them is high content of free lime and calcium compounds, especially anhydrite ($CaSO_4$), so these fly ashes are slightly hydraulic. Main aim of this work is to examine possibilities of using CFBC fly ash for production of autoclaved aerated concrete (AAC). The most important examination within this work is monitoring the influence of CFBC fly ash to the physical-mechanical properties of AAC, such as moisture content and coefficient of thermal conductivity.

Keywords:

Fly ash from circulating fluidized bed combustion (CFBC fly ash), bottom ash from circulating fluidized bed combustion (CFBC bottom ash), fly ash from pulverized coal combustion (PCC fly ash), autoclaved aerated concrete, moisture content, bulk density,

Introduction

Fly ash is characterized as a fine powder consisting of the particles resulting from the combustion of lignite. It shows pozzolana characteristics and within chemical composition it is mostly composed of SiO₂ and Al₂O₃ oxides. The fly ash is captured by electrostatic or mechanic separation of flue gases arising as a result of combustion of fine ground coal – lignite with/without combusted components. In lignite combustion, a limestone sorbent is used to capture SO₂. The lignite minerals agglomerated during combustion forming bottom ash particles with a wide range of compositions. Sorbent particles, which capture SO₂ are after combustion mainly present as CaSO₄ and free CaO [1].

It is a heterogeneous material consists of particles with different physical, chemical, mineralogical and morphological properties determined and influenced by a quality of burned lignite and the technology of combustion process [3,4,5].

Varied chemical composition results mainly from the fact that during burning of the fine ground lignite all mineral components are exposed to the high surrounding temperature in different time. Furthermore these fine particles go through the oxidative and reductive environment causing the melting, agglomerative, condensing and sublimate processes. Except mineral residues, the fly ashes contain also rests of the original or partially transformed coal. Chemical composition of fly ashes provides information about structure and composition of the original coal. Fly ashes makes approximately 75 – 85 % of a whole amount of energetic waste from combustion of fossil fuels [2,3,4,5].

Phase composition of inorganic fly ash components following the size is very similar among all fractions except the one with biggest - organic parts. Concerning the technological aspect the quantity of biggest - organic parts will define the fly ash suitability for production of an autoclaved aerated concrete (AAC). Strength characteristics of the AAC depend on the structure and phase composition, and on the fly ash treatment. Richer the glass phase of a fly ash is, the stronger, more crack-resistant and contraction-resistant the concrete is.

As a result of circulating fluidized bed combustion, two types of by-products with different granulometry and chemical composition are produced: fly ash from circulating fluidized bed combustion (CFBC fly ash) and bottom ash from circulating fluidized bed combustion (CFBC bottom ash) which amount and composition are mainly dependent on type of combustor and type of burning coal. [5,6,7].

CaO and SO₃ amount is significantly higher in CFBC fly ash than in fly ash from pulverized coal combustion (PCC fly ash). CFBC fly ash have hydraulic properties just as CFBC bottom ash, however it is characterized by higher share of the anhydrite. The dominant components are SiO₂ and CaO (ratio 1 : 1), that make 50 to 60 % of the ash substance. Other important components are SO₃ and Al₂O₃ (dozens of %). An ability of sharing Fe₂O₃, MgO and K₂O oxides ranges around units of %, the sharing of TiO₂ and Na₂O ranges around dozens of %, and the sharing of MnO and sulphates ranges around hundreds of %. The Sulphur is present mostly as sulphate compounds. Unexpanded CaCO₃ represents CO₂ (in units of %) in dependence on the type and regime of combustion, however the figures vary due to type of CFBC ash – bottom or fly ash. As a result of low combustion temperature – around 850 °C – CFBC fly ash contains minimum of glass phase [2,3,4,5,6].

The use of CFBC fly ash for the production of the autoclaved aerated concrete (AAC) is necessary to confirm by proper experiments.

Experimental part

Input materials. As suitable input material (by-products) for experimental preparing of AAC was used mixture of CFBC ash and PCC fly ash. Used CFBC ash is mix of the CFBC bottom ash and the CFBC fly ash (ratio bottom ash: fly ash = 2:1). Chemical composition of used CFBC fly ash and PCC bottom ash is shown in Table 1. The fly ash is best characterised by its habitus. Difference in habitus of a CFBC fly ash and PCC fly ash is visible in Fig. 1 and Fig.2. While PCC fly ash is characterised by fine particles in glass state (round spherulites) due to higher combustion temperature, the components of CFBC fly ash are almost without glass phase.

Table 1: Chemical composition of used fly ashes in [%]

Component	CFBC fly ash	PCC fly ash
Al ₂ O ₃	18.83	28.83
CaO	21.56	2.02
SO ₃	7.64	0.27
Fe ₂ O ₃	5.95	9.40
MgO	1.06	1.25
MnO	0.07	0.04
K ₂ O	1.33	1.52
Na ₂ O	0.04	0.34
TiO ₂	1.39	1.88
SiO ₂	37.1	53.09
Loss on ignition (at 850 °C)	4.44	0.83

Autoclaved Aerated Concrete (AAC). For experimental preparation of the autoclaved aerated concrete (AAC) CFBC fly ash, CFBC bottom ash and PCC fly ash were used. AAC without CFBC fly ash was taken as a comparing sample. Experimental samples of size 100x100x100 mm were cut from produced blocks. The samples were placed in the environment with temperature 20 + 2 °C and in a dry condition (placed under roof) as well as in conditions with an increased relative humidity (placed in a chamber under water).

We investigated the process of drying within a long-term horizon (Fig. 3 and Fig. 4) and also the development of humidity (H) and compressive strength (CS) in a dry and wet conditions (Table 2). On chosen samples there was determined the coefficient of thermal conductivity λ of AAC with various humidity. The measurement results of coefficient of thermal conductivity λ is shown in Fig. 5.

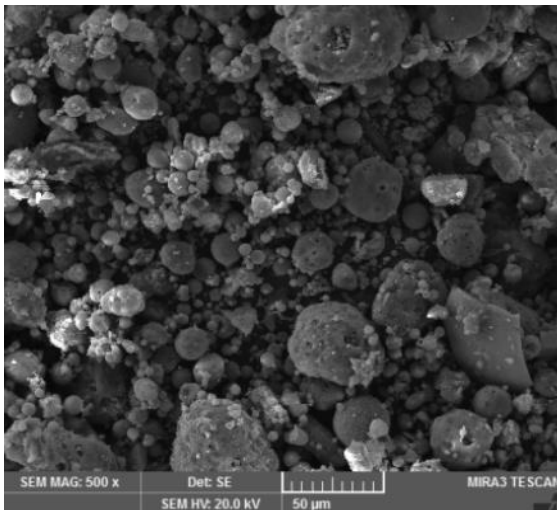


Fig. 1: SEM of PCC fly ash

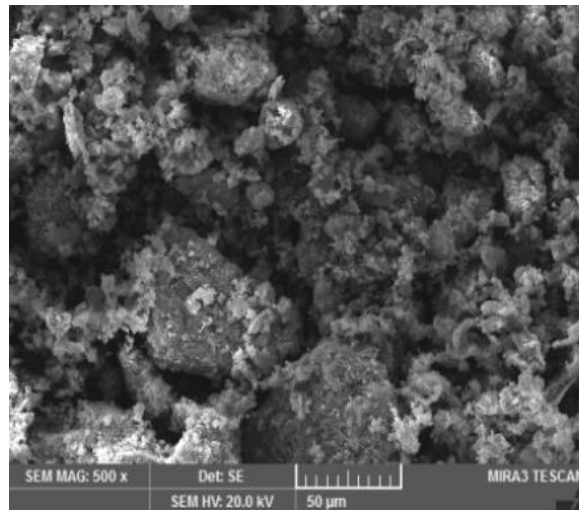


Fig. 2: SEM of CFBC fly ash

Table 2: Basic properties – Humidity (H) and Compressive strength (CS) of AAC samples (long-term monitoring).

Sample	Test dates (age of samples)									
	At least 01/2008		03/2008		06/2008		12/2008		12/2009	
	H* [%]	CS** [MPa]	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]
AI	14.87	4.13	8.35	4.73	7.81	4.28	7.86	4.01	7.16	3.51
AII	10.03	3.79	6.78	3.96	6.82	3.44	6.92	3.12	6.55	2.98
AIII	13.59	3.67	9.37	3.33	6.17	3.05	5.62	3.37	5.67	3.25
BI	29.68	4.42	28.79	4.53	30.32	4.64	38.22	4.72	46.10	4.00
BII	33.02	3.91	33.27	4.04	35.22	3.85	37.36	3.34	44.38	3.00
BIII	26.59	3.39	32.68	3.82	28.17	3.44	33.65	3.32	47.39	2.61
Sample	Test dates (age of samples)									
	03/2010		06/2010		09/2010		12/2010			
	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]	H [%]	CS [MPa]		
AIII	4.03	3.24	5.62	2.90	4.88	2.74	3.73	2.62		
BIII	46.96	3.17	45.90	3.22	42.99	2.39	46.82	2.59		

*H – Humidity, **CS – Compressive strength

Identification of the samples:

A – AAC placed in dry conditions,

B – AAC in wet conditions,

I – 100 % PCC fly ash,

II – 70 % PCC fly ash, 30 % CFBC fly ash and bottom ash,

III – 100 % CFBC fly ash and bottom ash.

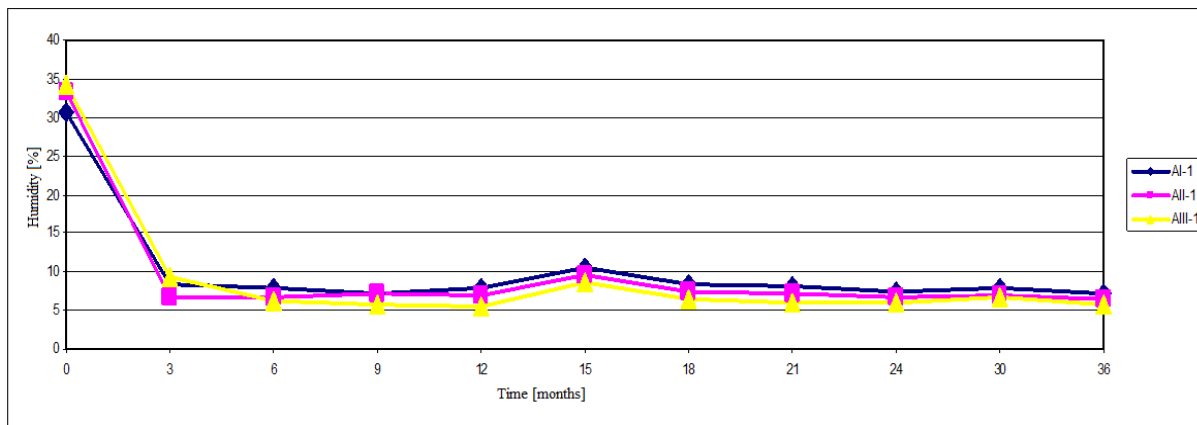


Fig. 3: Humidity development in samples at dry conditions

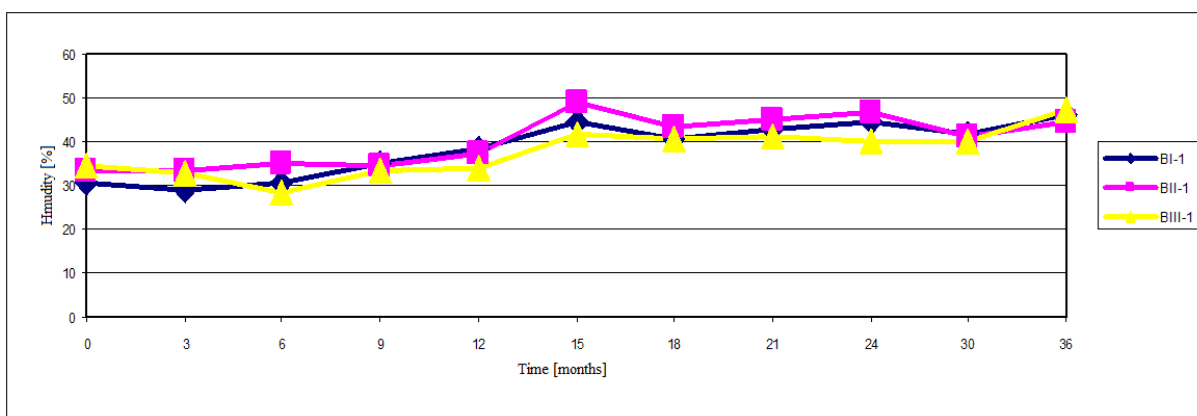


Fig. 4: Humidity development in samples at wet conditions

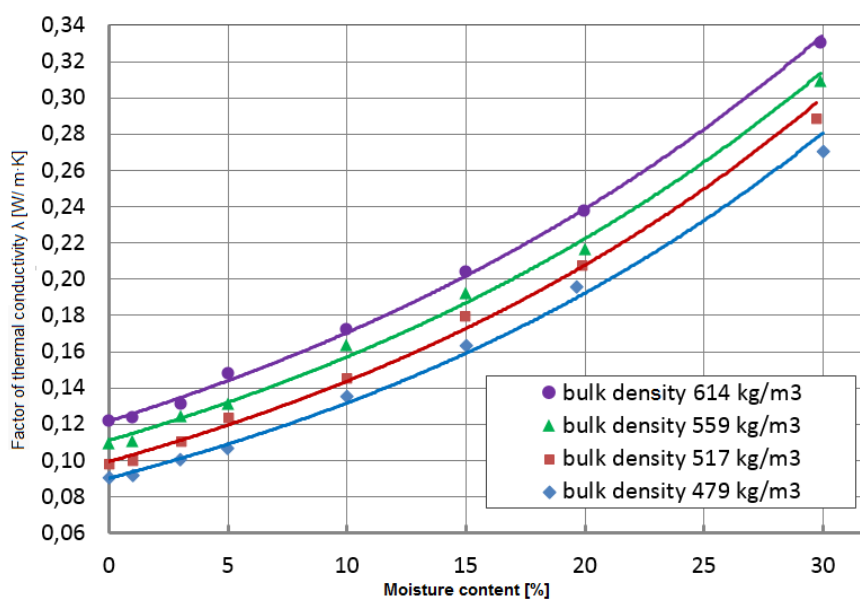


Fig. 5: Relation between the factor of thermal conductivity λ and moisture content of AAC with different bulk density in dried conditions.

Results and discussion

Mathematical and graphic evaluation of the curves exactly proves drying of autoclaved aerated concrete (AAC) in dry conditions. The AAC placed under roof dries quite fast– from approximately 35 % to 8 % of post-autoclaved humidity after three months of placement. The state of fixed humidity 8 % in AAC is achieved only after 3 months of placement in dry conditions that allows to assume similar way of drying within building construction. Further drying will proceed more slowly. After 1-year exposition, the humidity of AAC made of 100 % PCC fly ash was 7.5 % and the humidity of AAC made of 30 % CFBC ash was 7 %. The humidity of AAC made from 100% of CFBC fly ash and bottom ash was 6 %. In the spring time of second year, the humidity in dry conditions temporarily increased up to approximately 11.5 % (15th month) due to increase of relative humidity (R.H.) of the environment and then it was returned to original level. Similar fluctuation also occurred in wet conditions (100 % R.H.). The humidity rises from original post-autoclaved humidity 30 – 35 % to 40 – 45 % and increases at least within ACC made of 100 % CFBC ash [3,4,5,6,7].

From Fig. 3 it is visible the reverse wetting and drying of AAC while changing R.H. From graphic dependencies in the Fig. 5 there is clear that the AAC moisture content has dominant influence on the coefficient of thermal conductivity λ . The rate of λ rose sharply with increasing moisture content of the material. For example, dried AAC with bulk density 479 kg/m³ was characterized by λ approximately 0,09 W/m·K, at 5% material moisture content the value of $\lambda = 0,11$ W/m·K, at 10 % moisture content 0,14 W/m·K and at 30% moisture content up to 0.27 W/m·K. AACs of higher bulk density showed similar tendency.

The compressive strength of AAC made of 100 % PCC fly ash in wet conditions rises a little and AAC strength made of 30 % and 100 % CFBC ash drops a little. We may state that a wet condition does not deteriorate the AAC strength characteristics [3,4,5,6,7].

Summary

Long-term monitoring of autoclaved aerated concrete (AAC) from PCC fly ash and CFBC ash (3 years) confirmed the premises about drying of AAC. The state of fixed humidity 8 % is achieved after 3 months in dry placement that allows to assume similar way of drying within building construction. Further drying progresses more slowly. After 1-year exposition, the humidity of AAC from 100 % of PCC fly ash was 7.5 %, and the humidity of AAC from 30 % of CFBC ash was 7 %. The humidity of autoclaved aerated concrete (AAC) made of 100 % CFBC ash was lowest, 6 %.

Measurement results confirmed significant influence of moisture content on the coefficient of thermal conductivity λ . The value of λ rose sharply with increasing moisture content. Dried AAC with bulk density 520 kg/m³ was characterized by value of λ approximately 0.1 W/m·K. At the humidity matching the fixed state (approximately 8 %) λ increased to rate approximately

0.13 W/m·K, and at R.H. 20 % it increased to value 0.21 W/m·K.

The lowest compressive strength was at autoclaved aerated concrete (AAC) from 100 % CFBC ash. Lower overall strength of AAC made of 100 % CFBC ash is connected with increase of available SiO_2 in the mixture due to 30 % share of CaSO_4 .

The strength of AAC in dry conditions decreases from 12 % concerning 100 % PCC fly ash up to approximately 27 % concerning 100 % CFBC ash. Therefore it is necessary to watch the strength of AAC for longer period than 3 years.

It is necessary to optimize mixture of CFBC ash that will be economically and operationally acceptable and which will have minimal impact on the compression strength of the autoclaved aerated concrete (AAC) as well as other physical-mechanical properties. The tools for such actions are experiments and test in the period mentioned above.

Acknowledgements

This work has been supported by University Science Park of STUBA (ITMS 26240220084).

References

- [1] T. Lind, Ash formation in circulating fluidized bed combustion of coal and solid biomass, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 378, Espoo, 1999.
- [2] S. Balkovic, M. Peteja, M. Drábik, Production of autoclaved aerated concrete produced from fluid fly ash. V. Technical Conference MALTOVINY 2007, Brno, 2007, pp. 13-22.
- [3] S. Balkovic, M. Peteja, M. Drábik, Aerated autoclaved concrete production from fluid fly ash, XI. International Conference: "Ecology and new building materials and products", Telč, 2007, pp. 120-124.
- [4] R. Mróz, M. Gawlicki, J. Malolepszy, The sulphate corrosion of mortars containing FBC Ash, 12th International Congress on the Chemistry of Cements, Montreal, 2007, pp. 1-12.
- [5] M. Drábik, S. Balkovic, M. Peteja, Durability of autoclaved aerated concrete produced from fluid fly ash, In: 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, Securing a sustainable future, to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland, Bydgoszcz 2011, pp. 433-440.
- [6] M. Drábik, S. Balkovic, M. Peteja, Long-term investigation of autoclaved aerated concrete produced from fluidized fly ash. In: Proceedings of 13. Int. Congress on the Chemistry of Cement. AREA 8 - Oral Communication. Paper 281. Editado por el Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". CSIC Serrano Galvache. 4.28033 Madrid 2010, pp. 335-342.
- [7] M. Drábik, S. Balkovic, M. Peteja, Durability of autoclaved aerated concrete produced from fluidized ash, In: Cement-Wapno-Beton, pp. 29-33, Special Issue, 2011, pp. 28-37.
- [8] R. Janovský, P. Suchý, J. Najmanová, S. Balkovic, The use of fluidized fly ash from generating station Ledvice, X. Technical Conference MALTOVINY 2011, Brno, 2011, pp. 95-102.
- [9] K. Hanečka, O. Koronthályová, P. Matiašovský, The carbonation of autoclaved aerated concrete, CCR, 27 (1997), pp. 589-599.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

[10] F. Matsushita, Y. Aono, S. Shibata: Carbonation degree of autoclaved aerated concrete, CCR 30 (2000), pp. 1741-1745.

[11] L. Jiang, B. Lin, Y. Cai, A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete, CCR 30 (2000), pp. 699-702.

[12] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat, A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Constr. Build. Mat. 20 (2006), pp. 744-753.

Contact

Alena STRUHÁROVÁ, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovak Republic, alena.struharova@stuba.sk

Svetozár BALKOVIC, Porfix - pórobetón, a.s., Zemianske Kostolany, Slovak Republic, balkovic@porfix.sk

Jakub HODUL, Institute of Technology of Building Materials and Components, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic, hodul.j@fce.vutbr.cz

STANDARDNÍ A MIKROMLETÉ FLUIDNÍ POPÍLKY V PODKLADNÍCH VRSTVÁCH VOZOVKY

STANDARD AND MICROMILLEED FLY ASH FOR PAVEMENT STRUCTURES

Šedina Jakub, Valentin Jan, Suda Jan

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Anotace:

Příspěvek je zaměřen na využití fluidních popílků v podkladních vrstvách vozovky. V běžně dodávané podobě spatřujeme využití v oblasti úpravy zemin. Druhou zkoumanou oblastí je alternativní zpracování fluidního popílku na mechano-chemicky aktivované jemně mleté pojivo s využitím v hydraulicky stmelených směsích. Cílem je poukázat na možné přínosy, ale i některá úskalí, která lze při těchto aplikacích laboratorně identifikovat.

Annotation:

This paper focuses on utilization of coal combustion by-products, especially fly ash from coal power plant in pavement structures. At first, paper presents possible uses of fly ash from different power plants in mixtures of local soil. Second part focuses on alternative binder, which originates from mechanically modified fly ash from fluid combustion. On the end, paper comments possible uses of these mixtures, their benefits and their potential negatives.

Klíčová slova:

Fluidní popílek; Mikromleté pojivo; Odolnost vůči mrazu a vodě; Pevnost v tlaku; Recyklace za studena.

Keywords:

Coal combustion by-product; Cold recylation, Compressive strength; Fly ash; Fluidized bed; Micromilling binder; Water and frost resistance.

1. Úvod

I přes snahu získávat čím dál tím více energie z obnovitelných zdrojů, je uhlí spalované v uhelných elektrárnách jedním z hlavních zdrojů elektrické energie. Celosvětově se uhlí na produkci elektrické energie podílí 44 %, v České republice dokonce 55 % [3]. Samotný proces spalování se v posledních desetiletích výrazně proměnil. Samotnou kapitolou je technologie fluidního spalování, která umožňuje efektivnější spalování při nižších teplotách, a má za následek snížení množství vypouštěných SiO_2 , NO_x , pevných částic popílku a dalších škodlivých látek, které jsou zachyceny, a je tak nutné je dále zpracovávat. Ročně vyprodukují uhelné elektrárny na území České republiky přibližně 13 miliónů tun odpadního materiálu z uhelného spalování [1], který se s rozvojem moderních technologií pomalu stává cenným zdrojem materiálu. V současné době poměrně dobře umíme tento druhotný materiál využít při zavážce starých důlních děl, rekultivaci krajiny, případně jako výplň náspů v rámci protipovodňových opatření. I přesto zůstává nemalé množství tohoto materiálu nevyužito. Všeobecnou snahou je tedy hledat další uplatnění poměrně velkého množství materiálu, který je v současné době znehodnocován na skládkách a nenachází dalšího uplatnění. Využití elektrárenských popílků je celospolečenským problémem, o čemž svědčí i snaha a tlak na jejich využívání v mnoha odvětvích stavebnictví, kdy se snažíme nalézt cestu pro jejich smysluplné uplatnění nejen v oblasti silničního stavitelství. Článek je zaměřen na možné využití těchto druhotných produktů pro konstrukce pozemních staveb, zejména potom na využití fluidního popílku, který v ČR tvoří asi 13 % všech odpadů uhelných elektráren [1]. Příspěvek poukazuje na možnou substituci přírodních materiálů v podkladních vrstvách vozovky, kdy je využito hydratační schopnosti fluidních popílků, které jsou spojeny s procesem fluidního spalování v uhelných elektrárnách. Část příspěvku je zaměřena na zpracování fluidních popílků pomocí vysokorychlostního mletí, které ze své podstaty podporuje hydratační schopnosti fluidních popílků a fluidní popílek je procesem mechanochemické aktivace přeměněn na hydraulické pojivo s širokou škálou využití.

2. Fluidní spalování

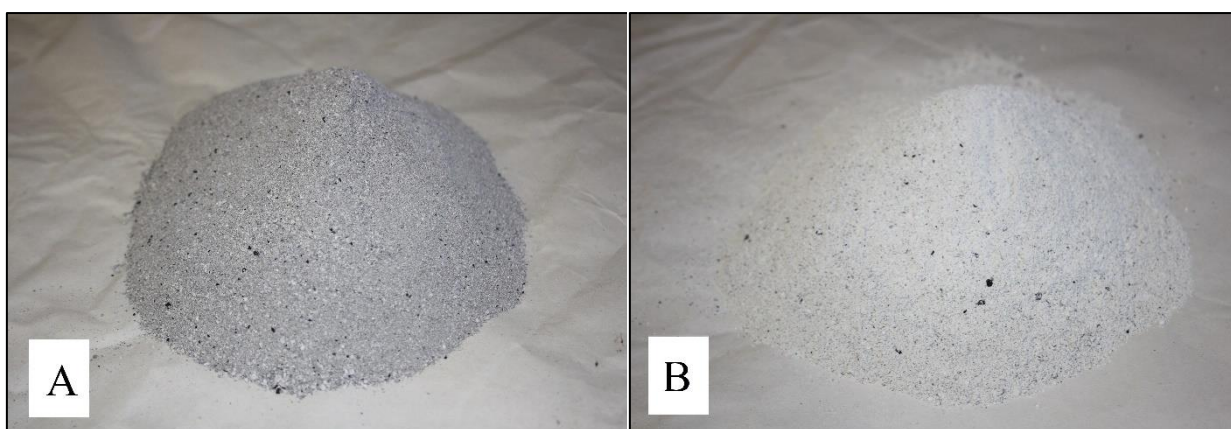
Fluidní popílek je odpadním produktem fluidního spalování v uhelné elektrárně. Hlavním přínosem tohoto druhu spalování je nižší teplota spalování (800 - 900 °C), možnost regulovat výkon elektrárny, vyšší účinnost a nižší emise škodlivých látek do ovzduší, kdy samotný proces spalování zabraňuje vzniku škodlivých látek. Ke spalování dochází na tzv. fluidním loži, kdy je palivo (černé nebo hnědé uhlí) předrceno na zrnitost okolo 20 mm a společně s vápencem vháněno proudem vzduchu do kotle, kde dochází k turbulentnímu proudění této směsi, a tím k účinnému vyhoření paliva (až 90 %). Přidaný vápenec (CaCO_3), případně dolomit, reaguje přímo v kotli s oxidem siřičitým (SO_2), a tuhý produkt (CaSO_4) je tak součástí popela (viz chemické vyjádření - rov. 1,2[2]). Vzniklý produkt pak představuje směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO_3), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Zbytkové vápno je přítomno v popelu ve formě měkce páleného vápna [5], které vykazuje

schopnost dále hydratovat. V České republice je tento typ kotlů instalován v elektrárnách Tisová, Ledvice, Hodonín a Poříčí [3].



Fluidní popílek lze dále rozdělit na tzv. úletový a ložový popílek. Úletový popílek je popílek zachycený ve filtrech (cyklonové, elektrostatické, textilní, nebo kombinace předchozích). Ložový popílek je potom popel tvořený hrubšími částicemi, který zbyde na roštu po vyhoření paliva. Oba druhy popílků mají odlišné fyzikální (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypná hmotnost), chemické a mineralogické vlastnosti.

Mineralogické složení popílků je závislé především na druhu a obsahu minerálů ve spalovaném uhlí a na stupni jejich tepelné přeměny. Fyzikální a chemické vlastnosti jsou závislé na velikosti popílkových zrn, kterou významně ovlivňuje obsah nespáleného podílu. Podle granulometrie se nejvíce klasickým popílkům podobá fluidní popílek z cyklónů, naopak fluidní popílek z lůžka svou nestejnorodostí chemických vlastností připomíná spíše písek. Rozhodující faktor, který výrazně ovlivňuje granulometrii popílků, je obsah prchavých složek a macerálové složení spalovaného uhlí. Z hlediska posuzování vyluhovatelnosti je důležitý měrný povrch, jehož velikost je ovlivňována množstvím nedopalu v popílku.



Obrázek 1 - Fluidní popílků A. ložový elektrárna Ledvice; B. ložový elektrárna Tisová

3. Mechano-chemicky aktivované jemně mleté pojivo

Vysokorychlostní mletí je jedním z typů vysokoenergetického mletí, které se vyznačuje velkým množstvím předané energie na jednotku upravovaného materiálu. Pojem vysokoenergetického ani vysokorychlostního mletí není nikde v literatuře přesně definován. S mletím v klasickém pojetí má společné všechny základní vlastnosti, tedy zjemnění zrnitosti, zvětšení měrného povrchu, otevření zrn atd. Na rozdíl od klasického mletí dochází při vysokorychlostním mletí k určitým jevům (efektům), které nebyly pozorovány u běžného mletí. A právě na tyto efekty je přeměněna určitá část vynaložené energie, která se

u běžného mletí bez užitku přeměnění na teplo. Tyto jevy jsou u anorganických materiálů například:

- mechano-chemická (mechanická) aktivace,
- tvorba vyšších podílů mikronových částic a nanočástic,
- v některých případech vyšší efektivita využití spotřebované energie na tvorbu nových povrchů.

Efekt mechano-chemické aktivace využívaný vysokorychlostním mletím umožňuje významně lepší využití energie vynaložené na mletí látky. To je dáno díky akumulaci její části v podobě zvýšené entalpie upravované látky. Efekt mechano-chemické aktivace umožňuje ve vysokorychlostních mlecích zařízeních:

- vyvolat chemické reakce v pevném stavu materiálu při mletí (např. oxidace či výměnné reakce),
- iniciovat fázové změny (nejen amorfizaci) v různých látkách,
- vytvořit mechanické slitiny kovových materiálů v procesu mletí,
- iniciovat katalytické reakce v organických i anorganických systémech v procesu mletí.



Obrázek 2: Vysokorychlostní mlýn (vlevo rozevřené mezikruží rotorů pro osazení mlecích elementů)

4. Pojivo DASTIT

DASTIT je v souladu s platným patentem suché anorganické hydraulické pojivo, vyrobené pomocí mechano-chemické aktivace na bázi popílku z fluidního spalování a dalších přísad. Pomocí technologie vysokorychlostního mletí se dosahuje zvýšení hodnoty vnitřní energie materiálu, vytvoření aktivních povrchů na zrnech materiálů při současném zvýšení velikosti měrného povrchu (zjemnění zrnitosti) materiálů tak, že se jeho chemická reaktivita výrazně zvyšuje. Ze vstupních surovin tak vznikne alternativní hydraulické pojivo, použitelné samostatně nebo spolu s plnivem (např. různými druhy kameniva) pro aplikace v pozemním

či dopravním stavitelství (např. pro zlepšování zemin, při výrobě vibrolisovaných stavebních prvků, pro kamenivo stmelené hydraulickým pojivem, pro stabilizaci kalů apod.). Pojivo vykazuje velmi vysoké hodnoty pucolanity a lze je rovněž výhodně použít jako aktivní příměs do betonů (zejména betonů podkladových, betonů pro výrobu vibrolisovaných výrobků a maltovin s obsahem cementu), která umožňuje ušetřit v řadě případů (podle receptury a nároků na vlastnosti) značné množství cementu v betonové směsi (množství 30-70 %-hm.). V případě stabilizace kalů je možná substituce až na úroveň 100 %-hm. Přitom základní mechanické parametry betonů zůstávají zachovány a dlouhodobá trvanlivost těchto výrobků není limitována požadavkem na relativně vysoké hodnoty relativní vlhkosti prostředí. Základní fyzikální parametry suchého hydraulického pojiva DASTIT obvykle nabývají hodnot v rozmezí: sytná hmotnost cca. 680 - 860 kg/m³, objemová hmotnost cca. 2100 - 2200 kg/m³, měrný povrch cca. 800 - 900 m²/kg.

DASTIT typ AX2 byl připraven z úletového popela FBC elektrárny Poříčí (ČR). Jemný granulační popel byl odebrán z elektrofiltrů elektrárny Mělník III (ČR)

5. Výsledné parametry substituce zemin popílkou

Využití fluidních popílků lze spatřovat v částečné substituci přírodních nebo recyklovaných materiálů určených pro další využití v konstrukci vozovky. V článku je popsána substituce staré cementové stabilizace získané z rekonstrukce dálnice D1 72km. Dále substituce přírodního materiálu, klasifikovaného jako písek jílovitý (S5), pocházejícího z modernizace železničního koridoru z lokality Veselý nad Lužnicí. Tyto dva materiály byly z 50 % nahrazeny popílkem z elektráren Mělník, Ledvice a Tisová. Množství přidávaného pojiva bylo stanoveno na základě klasifikace zeminy a výsledků testu. Hutnění probíhalo v proctorově pěchu dle ČSN EN 13286-50. Vzhledem k zrnitosti materiálu byla zvolena proctorova forma o průměru 100⁺1 mm a výšky 120⁺1 mm. Hutnění probíhalo dle proctor modifikovaný. Optimální vlhkost zjištěna dle proctor modifikovaný byla dále upravena vzhledem k množství přidávaného pojiva a množství přidávaného popílku. Hodnoty optimální vlhkosti a množství přidávaného pojiva (cement CEM II/B-M 32,5R) jsou uvedeny v tabulce 1. Po zhutnění byla tělesa uchována dle požadavků příslušných norem 28 dní v neprodyšném obalu, následně zkoušena na pevnost v tlaku a odolnost vůči mrazu a vodě. Pro zkoušku odolnosti vůči mrazu a vodě bylo z hlediska normy přistoupeno ke krajně nevhodným podmínkám, tělesa byla zatížena 13 cykly, 18 h uložena při laboratorní teplotě na plstěné podložce částečně ponořené ve vodě a 6 h uložena v mrazící skříni při -20 °C.

Tabulka 1 - Optimální vlhkosti a množství přidávaného pojiva pro jednotlivé směsi

	Optimální vlhkost	Pojivo (cement)
Jílovitý písek S5 100 %	8,50 %	6 %
Fluidní popílek Tisová lože : Jílovitý písek (50:50)	15,69 %	6 %
Fluidní popílek Tisová úlet : Jílovitý písek (50:50)	23,37 %	6 %
Fluidní popílek Ledvice lože : Jílovitý písek (50:50)	20,75 %	6 %
Cementová stabilizace D1 100 %	11,20 %	3 %
Popílek z klasického spalování Mělník úlet : Cementová stabilizace D1 (50:50)	16,10 %	3 %
Fluidní popílek Tisová lože : Cementová stabilizace D1 (50:50)	16,79 %	3 %
Fluidní popílek Tisová úlet : Cementová stabilizace D1 (50:50)	24,10 %	3 %
Fluidní popílek Ledvice lože : Cementová stabilizace D1 (25:75)	16,53 %	3 %
Fluidní popílek Ledvice lože : Cementová stabilizace D1 (50:50)	21,85 %	3 %

5.1. Cementová stabilizace D1

Množství cementu CEM II/B-M 32,5R přidávaného ke staré cementové stabilizaci, která byla následně substituována jednotlivými popílkami, bylo stanoveno na 3 %. Optimální vlhkost byla stanovena dle proctor modifikovaný.

Tabulka 2 - Pevnostní charakteristiky cementové stabilizace substituované popílkami

Matriál	Pojivo	Objemová hmotnost	28 Rc	Odolnost proti mrazu a vodě	
		[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Cementová stabilizace D1	3 % cement	2,01	2,23	0,82	36,65 %
Cementová stabilizace D1: Popílek Mělník úlet (50:50)	3 % cement	1,63	1,52	0,38	24,99 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	3 % cement	1,93	2,28	0,66	29,04 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	3 % cement	1,74	6,22	5,14	82,62 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (75:25)	3 % cement	1,87	7,07	4,05	57,25 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	3 % cement	1,75	8,67	7,25	83,62 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	Bez pojiv	1,74	6,21	1,83	29,40 %

Prvotní posouzení bylo zaměřeno na stanovení optimálního množství substituovaného materiálu, kdy byla stará cementová stabilizace nahrazena z 25 % a 50 % fluidním popílkem. V obou případech došlo k navýšení pevnostních charakteristik po 28 dnech. S ohledem na výsledky pevnosti po zmrazovacích cyklech byla pro další posouzení vybrána varianta, kdy je substituováno 50 % materiálu fluidním popílkem.

Z výsledků uvedených v tabulce 2 je patrný vliv jednotlivých popílků na výsledné parametry směsi. Vcelku očekávaný je spíše negativní vliv popílku získaného z elektrárny Mělník, který je produktem klasického spalování, a nelze od něj očekávat další přidanou hodnotu. Obdobných výsledků dosahoval fluidní ložový popílek z elektrárny Tisová, kdy pevnost v tlaku po 28 dnech a odolnost vůči mrazu a vodě dosahovala výsledků referenční směsi.

V toto ohledu by substituce byla možná, nicméně samotný popílek nijak nezlepšuje zkoumané parametry, a šlo by tak pouze o substituci materiálu bez další přidané hodnoty.

Pozitivní přínos popílku lze spatřovat u fluidních popílků Tisová úlet a Ledvice lože. Přínos této substituce je zcela jednoznačný, pevnost po 28 dnech vzrostla na tři až čtyřnásobek pevnosti naměřené u referenční směsi bez popílků a odolnost vůči mrazu a vodě téměř splnila podmínku normy, která vyžaduje min. pevnost po zmrazovacích cyklech vyšší jak 85 % pevnosti po 28 dnech.

Velice zajímavým faktem je i nezbytnost přidání hydraulických pojiv, kdy směsi bez přídavku cementu vykazovaly řádově nižší hodnoty odolnosti vůči mrazu a vodě. Nicméně tento požadavek lze splnit optimalizací směsi a přidáním většího množství hydraulických pojiv.

Neméně zajímavým přínosem těchto substitucí je i vylehčení celé konstrukce, kdy objemová hmotnost materiálu poklesla oproti referenční směsi cca o 12 %, směsi s přídavkem popílků tak můžou být vítaným řešením při problémech s únosností podloží vozovky.

5.2. Jílovitý písek (S5)

Pro potvrzení výsledků popsaných v kapitole 5.1 byly vybrané popílků použity pro substituci přírodního materiálu. Množství cementu a optimální vlhkost hutnění směsi popílku a jílovitého písku je uvedena v tabulce 1.

Tabulka 3 - Pevnostní charakteristiky jílovitého písku substituovaného popílků

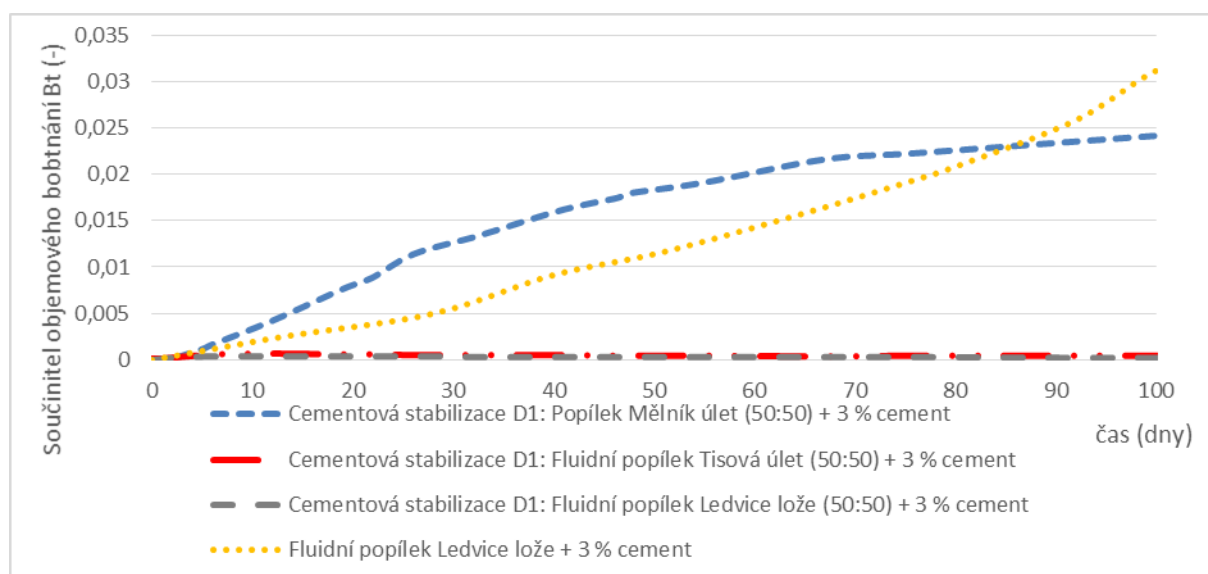
Materiál	Pojivo	Objemová hmotnost	28 Rc	Odolnost proti mrazu a vodě	
		[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Jílovitý písek S5	6 % cement	2,20	5,37	5,71	106,41 %
Jílovitý písek S5: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	6 % cement	2,05	2,74	1,47	53,70 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	6 % cement	1,84	8,37	8,09	96,60 %
Jílovitý písek S5: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	6 % cement	1,85	9,98	10,88	108,96 %

I v případě přírodního materiálu substituovaného fluidním popílkem z elektrárny Ledvice lože a Tisová úlet byl patrný nárůst pevností a odolnosti vůči mrazu a vodě. V tomto případě lze doporučit popílek jako vhodnou náhradu přírodních materiálů, kdy vedlejším efektem této substituce je i nárůst pevnostních charakteristik. Varianta s ložovým fluidním popílkem z elektrárny Tisová se ukázala jako krajně nevhodná. Došlo k degradaci směsi, kdy poklesla jak pevnost v tlaku po 28 dnech, tak směs nevyhověla na odolnost vůči vodě a mrazu.

5.3. Objemové změny

Objemové změny bývají jedním z častých jevů pozorovaných u směsí na bázi fluidních popílků a je kladen velký důraz na objemovou stálost těchto směsí. Pro zkoumání objemových změn, nebo tzv. bobtnavosti dle normy ČSN EN 14 227-4, byly vybrány následující směsi popílku a staré cementové stabilizace z dálnice D1 stmelené 3 % cementu CEM II/B-M 32,5R. Směs s ložovým fluidním popílkem z elektrárny Ledvice, směs s úletovým fluidním popílkem z elektrárny Tisová a směs s úletovým popílkem z elektrárny Mělník. Pro potvrzení vhodnosti kombinace fluidní popílek, zemina a hydraulické pojivo byly objemové změny laboratorně testovány i pro variantu fluidní popílek ložový z elektrárny Ledvice stmelený 3 % cementu.

Výsledky objemových změn, prezentované na obrázku 3, doplňují poznatky o pevnostních charakteristikách směsí a podtrhují vhodnost kombinace popílku, jemnozrnné zeminy (stará cementová stabilizace) a hydraulického pojiva. V případě ložového fluidního popílku z elektrárny Ledvice byla prověřena jak kombinace se zeminou, tak pouze samotný fluidní popílek. Výsledky jasně deklarují vhodnost kombinace zeminy a popílku. V tomto případě docházelo k minimálním objemovým změnám, oproti tomu samotný popílek vykazoval výrazné objemové změny. Obdobné výsledky lze pozorovat i u kombinace s úletovým popílkem z elektrárny Tisová.



Obrázek 3 – časový průběh bobtnání

6. Výsledné parametry směsí stmelných pojivem DASTIT

Posouzení možné substituce standardních hydraulických pojiv alternativním mikromletým pojivem DASTIT bylo provedeno na směsích studené recyklace, kdy byly porovnány dvě varianty, které jsou popsány v tabulce 4. V obou případech došlo k substituci hydraulického pojiva, v tomto případě cementu, mikromletým pojivem DASTIT. Navržená substituce odpovídá předpokládanému vyššímu dávkování mikromletého pojiva, koresponduje s ekonomickými aspekty výroby mikromletých pojiv a nákladů na standardní hydraulická pojiva.

Výroba těles a zrání těles probíhala dle technických podmínek TP 208. Z hlediska zmrazovacích cyklů se přistoupilo ke krajně nevhodným podmínkám, kdy byla tělesa zatížena 13 zmrazovacími cykly, 18 h uložena při laboratorní teplotě na plstěné podložce částečně ponořené ve vodě a 6 h uložena v mrazící skříni při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabulka 4 – Navrhované varianty

Varianta 1			Varianta 2		
	REF1	R1		REF2	R2
ŠD 0/32	50,0 %	50,0 %	Recyklát 0/63 - 1	50,0 %	50,0 %
REC 0/22	50,0 %	50,0 %	Recyklát 0/63 - 2	50,0 %	50,0 %
Voda	5,5 %	5,5 %	Voda	4,5 %	5,0 %
Cement 32,5	3,0 %	1,0 %	Cement 32,5	4,0 %	1,0 %
DASTIT	0,0 %	4,0 %	DASTIT	0,0 %	4,0 %

U varianty 1 byla použita směs přírodního drceného kameniva ŠD 0/32 v kombinaci s asfaltovým R-materiálem 0/22 Středokluky. V druhém případě bylo použito asfaltového recyklátu 0/63 pocházejícího z lokality Nouzov. Odlišný byl i způsob posuzování, kdy v prvním případě bylo cíleno na pevnost v tlaku C3/4, v druhém případě byla rozhodujícím faktorem pevnost v příčném tahu R_{it} a odolnost vůči vodě ITSR.

Tabulka 5 – Pevnostní charakteristiky varianta 1

Směs	Pevnost v tlaku		Odolnost proti mrazu	
	(MPa)		(MPa)	
REF1	3,57		3,52	98,5 %
R1	3,61		3,01	83,2 %

Výsledky uvedené v tabulce 5 poukazují na možnost substituce cementu pomocí mikromletého pojiva DASTIT, kdy v případě pevnosti po 28 dnech dosahujeme shodných výsledků s referenční směsí. Problematickým parametrem je odolnost směsi vůči mrazu a vodě, která by dle současně platných technických podmínek TP 208 měla dosahovat min. 85 % pevnosti po 28 dnech. V tomto ohledu by mělo do budoucna dojít k úpravě návrhu směsi tak, aby odolnost vůči mrazu a vodě dosahovala požadovaných hodnot.

Tabulka 6 – Pevnostní charakteristiky varianta 2

Směs	Rit	ITSR	
	(MPa)	(MPa)	
REF2	0,29	0,20	69,3 %
R2	0,33	0,26	79,5 %

Výsledky uvedené v tabulce 6 prokazují vhodnost použití mikromletého pojiva DASTIT, kdy oproti referenční směsi stmelené cementem dochází k nárůstu jak pevnosti v příčném tahu, tak odolnosti vůči vodě. Směs stmelená mikromletým pojivem DASTIT tak vykazuje lepší parametry než referenční směs, a v tomto ohledu lze mikromleté pojivo považovat za plnohodnotnou náhradu cementu.

7. Závěr

Článek poukazuje na možné využití vybraných fluidních popílků a produktů z nich a snaží se upozornit na neopodstatněnost nedůvěry, se kterou jsou fluidní popílků jako stavební materiály odmítány odbornou veřejností. V praxi samozřejmě nelze globalizovat chování fluidních popílků, kdy jednotlivé elektrárny mají odlišné vstupní zdroje (uhlí, vápenec a další) a i samotná technologie fluidního spalování není jednotná. Je potřeba pečlivě rozlišovat popílků z jednotlivých elektráren a zohlednit kvalitu vstupních materiálů. Využití fluidních popílků v praxi tak bude vyžadovat individuální přístup a pečlivý návrh směsi.

Získané poznatky poukazují na vhodnost kombinace fluidní popílek, zemina a hydraulické pojivo, kdy kromě samotné úspory materiálu na jedné straně a využití odpadních produktů na druhé, byla prokázána i přidaná hodnota této kombinace v podobě zlepšení výsledných parametrů směsi (nárůst pevnosti v tlaku po 28 dnech, dostatečná odolnost proti mrazu a vodě, objemová stálost). Do budoucna je třeba zpřesnit nastavení poměru mezi popílkem a zeminou, a to jak pro směsi, které vykazují uspokojivé výsledky, tak především pro směsi, pro které byla navrhovaná substituce nevhodná. Rovněž je žádoucí optimalizovat množství přidávaných hydraulických pojiv.

Při zpracování fluidních popílků pomocí procesu vysokorychlostního mletí byla opakovaně prokázána aktivace a zvýšení pucolanity materiálu a současně došlo k eliminaci vzniku ettringitu, který má za následek degradaci výsledných parametrů směsi. Patrný potenciál substituce standardně používaných hydraulických pojiv byl prokázán zejména u směsí studené recyklace, kdy směsi stmelené pojivy na bázi fluidních popílků dosahují lepších parametrů než směsi stmelené cementem, dochází k rychlejšímu nárůstu pevností a zároveň nedochází k výraznějším poklesům pevnosti v důsledku účinků vody. Zkoumané pojivo tak má, z hlediska technologií studené recyklace, poměrně velký potenciál pro uplatnění v praxi.

Poděkování

Příspěvek vznikl za přispění Centra pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI) - TE01020168 a za podpory grantu studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS17/059/OHK1/1T/11.

Literatura

- [1] Politika druhotných surovin České republiky, ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Převzato z: <http://www.mpo.cz/dokument153352.html> (12/12/2015)
- [2] WANG H. a kol.: Temperature dependence on reaction of CaCO₃ and SO₂ in O₂/CO₂ coal. *Journal of Central South University* (2009) 16: 0845–0850
- [3] CEZ uhelné elektrárny, Převzato z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny.html> (31/1/2016)
- [4] MRÁZ V. a kol.: Limiting Factors for the Applicability of Specific Types of Energetic By-products in the Roadbed Structures. In *Geo-China 2016: Innovative and Sustainable Use of Geomaterials and Geosystems: American Society of Civil Engineers*, pp. 69-78. ISBN 978-0-7844-8006-9.
- [5] FRÝZOVÁ R.: Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů, Diplomová práce Brno 2012
- [6] ŠEDINA J., MONDSCHHEIN P.: Mixtures with fly ash in pavement structures modified by modern additives, In *Young scientist 2016*
- [7] ŠEDINA J., VALENTIN J.: Standardní a mikromleté fluidní popílký ve stmelovaných směsích pro podkladní vrstvy. In *Podkladní vrstvy a podloží vozovek*. Praha 4: PRAGOPROJEKT,a.s., 2016, pp. 45-52. ISBN 978-80-903925-8-8.
- [8] VALENTIN J. a kol.: Jaký je potenciál mechano-chemické aktivace u vybraných vedlejších produktů či recyklátů? In *Podkladní vrstvy a podloží vozovek*. Praha 4: PRAGOPROJEKT,a.s., 2016. pp. 53-65. ISBN 978-80-903925-8-8.

Kontakt

Ing. JAKUB ŠEDINA, e-mail: sedinjak@fsv.cvut.cz, Fakulta stavební ČVUT v Praze - katedra silničních staveb, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6 Dejvice

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

DOPAD SNCR NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI POPÍLKŮ

INFLUENCE OF SNCR ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FLY ASH

Martin Ťažký, Rudolf Hela

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Anotace:

Rokem 2016 vstoupila v platnost legislativa upravující emisní limity produkovaných spalin, zejména s ohledem na redukci oxidů dusíku. Publikované články se opírají o skutečnost, že popílký, které prošly reduktivním mechanismem SNRC obsahují zvýšené množství amonných solí. Otázkou zůstává, zdali proces SNRC sebou nepřináší další negativní dopady na popílek, zejména například na morfologii jeho zrn spojenou s dopadem na reologii kompozitu.

Annotation:

Since 2016 were validated legislative regulation of emission limit of produced flued gas with respect on reduction of nitrogen oxide. Published articles are based on reality the fly ashes, which were go throught the proces of the reduction mechanism SNRC consist higher content of ammonium salts. There is a question if proces SNRC can't bring a negative influence to fly ash mainly for example morphology with influence on rheology of composite.

Klíčová slova:

Vysokoteplotní úletový popílek, SNRC, morfologie, reologie, index účinnosti

Keywords:

High temperature fly ash, SNRC, morphology, rheology, efficiency factor

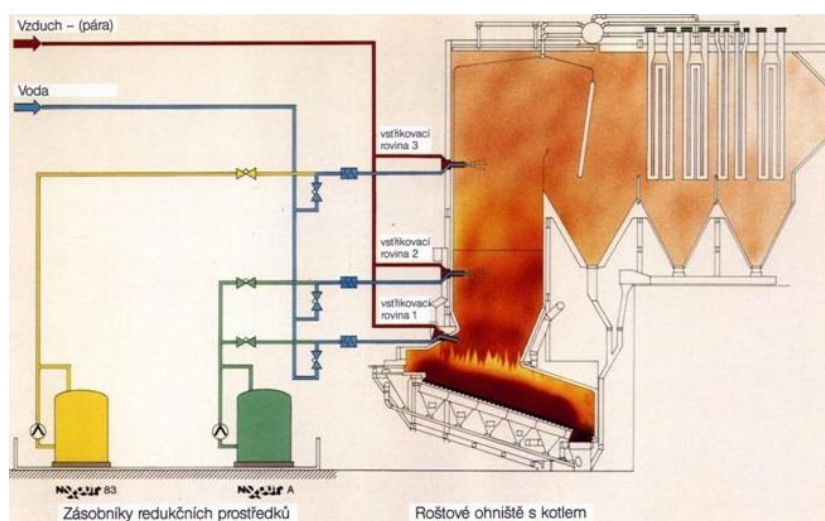
1. Snižování emisí oxidů dusíku a SRNC (selektivní nekatalytická redukce oxidů dusíku)

Začátkem roku 2016 vstoupila v platnost legislativa upravující emisní limity produkovaných spalín. [1] Díky stále se zvyšujícím nárokům na kvalitu produkovaných zplodin, jsou zejména výrobci elektrické energie, pocházející z energetických jednotek spalujících uhlí, nuceni zavádět dodatečné ekologizační technologie. V tomto případě se poté jedná zejména o emise oxidů dusíku, které ještě v nedávných dobách stály mimo stranu zájmů.

Ačkoliv existuje několik způsobů nových ekologizačních technologií v rámci zkvalitnění redukce oxidů dusíku, většina tepelných elektráren a spaloven na území České republiky se ubírá cestou SNRC, tedy selektivní nekatalytické redukce, a to zejména z ekonomických důvodů.

Zmíněná metoda je založená na redukcí oxidů dusíku pomocí nastříkání roztoku močoviny nebo čpavkové vody do spalovací komory agregátu. Po nástřiku činidel dochází k velkému množství chemických reakcí redukujících škodlivé NO_x až na dusík na vodu. [2]

V rámci příspěvku se budeme dále zabývat dopadem popsané technologie redukce oxidů dusíku na jeden ze zásadních VEP, kterým jsou úletové vysokoteplotní popílky. Na základě popisu principu SNRC, který dále ilustruje přiložený obrázek. Je jisté, že při tomto procesu úletový vysokoteplotní popílek přichází do přímého styku se vstříkovaným médiem.



Obrázek 1.: Schéma tepelné elektrárny se systémem SRNC

Již několik publikovaných článků se opírá o skutečnost, že popílky, které prošly popsáním mechanismem SNRC obsahují zvýšené množství amonných solí. Tyto amonné soli poté velice rychle reagují s látkou alkalické povahy, jako je například vápno nebo cement za úniku NH₃, který je spojen s velice nepříjemným zápachem. [3] Ačkoliv může být zápach po čpavku velice nepříjemný z pohledu výrobce například betonové směsi s tímto typem popílků, jeho dopad na pevnostní parametry takového kompozitu nebyl doposud jednoznačně prokázán.

Otázkou však zůstává, zdali samotný proces SNRC sebou nepřináší i další negativní dopady na produkovaný úletový popílek, zejména poté například na morfologii jeho zrn spojenou s dopadem na reologické chování kompozitu.

2. Kvalita popílků po SNRC s ohledem na ČSN EN 450-1

Vysokoteplotní úletový popílek jako jeden ze základních VEP podléhá několika legislativním předpisům dle předpokládaného využití. Z hlediska výrobců betonových směsí poté popílek musí naplňovat požadavky normy ČSN EN 450-1. [4]

Jmenovaná norma vyjmenovává požadavky na popílek z pohledu jeho chemických, fyzikálních i mechanických parametrů. Obecně je poté popílek spojován s několika pozitivními přínosy při jeho použití pro výrobu betonové směsi. Jmenovat lze zejména jeho pozitivní dopad na reologii cementové pasty díky jeho vhodné morfologii zrn, regulaci vývinu hydratačních teplot a pucolánovou reakci s pozitivním dopadem na mechanické parametry kompozitu.

Některé z jmenovaných vlastností by však mohly být negativně ovlivněny působením SNRC.

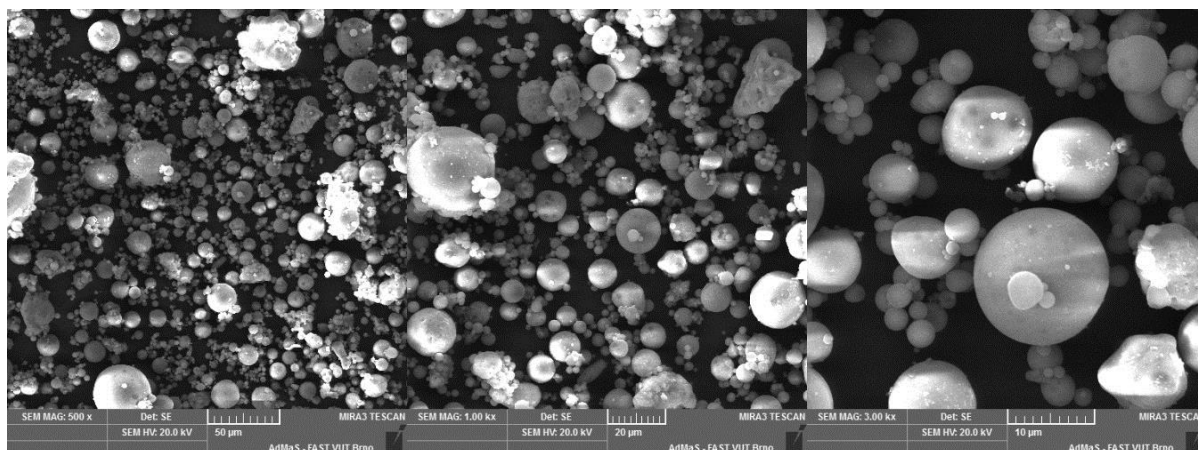
2.1. Dopad SNRC na morfologii zrn popílků

Vysokoteplotní úletový popílek je téměř vždy spojen s pozitivním dopadem na reologii cementové pasty vyrobené za jeho použití. Tato skutečnost je dána vhodnou morfologií zrn, které jsou téměř kulovité povahy a disponují z velké části zeskelněným povrchem. Taková zrna v kompozitu dokáží působit jako kuličková ložiska. [5] Vznik těchto zrn je dán zejména vysokou teplotou spalování a principem jejich separace ze spalin během pozvolnějšího chlazení.

Je-li však do systému spalování aplikována navíc technologie redukce oxidů dusíku SNRC, během které je redukční činidlo nejčastěji vstřikováno přímo do prostor spalovací komory při teplotě 900 až 1100 °C, lze očekávat změnu morfologie popílku unášeného spalinami během takového náhlého teplotního šoku. Náhlý teplotní šok by mohl způsobit až explozi a rozpadavost zrn popílku a následné shlukování těchto drobných částíček.

Dopad SNRC na morfologii zrn vysokoteplotního úletového popílku byl ověřen za použití elektronové rastrovací mikroskopie, kdy byly porovnány zrna popílku bez uplatnění SNRC a při uplatnění SNRC během spalovacího procesu. Pro samotnou analýzu byl použit mikroskop Tescan Mira3 a zrna popílku byla pro analýzu naprášena zlatem.

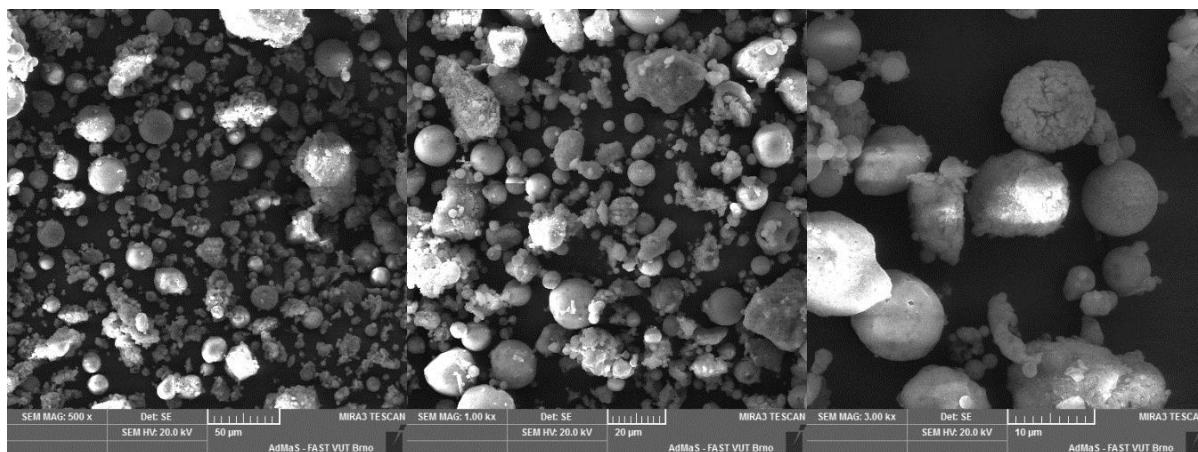
Následující fotografie zobrazují v prvním případě zrna standartního vysokoteplotního úletového popílku, který neprošel SNRC.



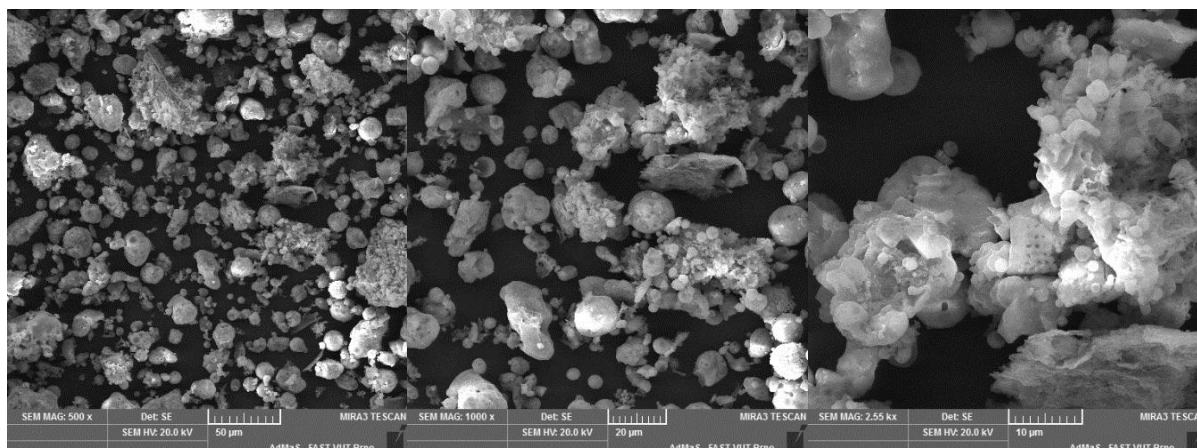
Obrázek 2.: Zrna popílku **bez** SNRC (zvětšeno 500, 1000 a 3000 krát)

Na fotografiích jsou zřetelná téměř pravidelně kulovitá zrna popílku. Lze tedy říci, že analyzovaný popílek, který neprošel SNRC, svou morfologií zrn potvrzuje obecné závěry zmíněné výše. Takový popílek by měl poté svou vhodnou morfologií zrn působit pozitivně taktéž na reologii cementového kompozitu.

Na následujících fotografiích budou zrna popílků z produkce stejné tepelné elektrárny, avšak po uplatnění SNRC. Pro porovnání byly analyzovány zrna popílků odebraných v různých datech. Popílků se od sebe taktéž liší množstvím aplikovaného redukčního činidla.



Obrázek 3.: Zrna popílku **po** SNRC (zvětšeno 500, 1000 a 3000 krát) – vzorek A



Obrázek 4.: Zrna popílku **po** SNRC (zvětšeno 500, 1000 a 3000 krát) – vzorek B

Přiložené fotografie zrn popílků po SNRC poukazují na rozdílnost jejich tvaru oproti zrnům popílku z produkce tentýž elektrárny, avšak bez aplikace SNRC. Po podrobnější analýze fotografií lze spatřovat skutečnost, že popílků po SNRC disponují značně nestejnorodými tvary zrn, přičemž původ těchto zrn by mohl být spojen s rozpadavostí zrn původních. Drobné úlomky původních zrn se poté navíc nejspíše shlukují a tvoří nová značně porézní zrna nepravidelných tvarů.

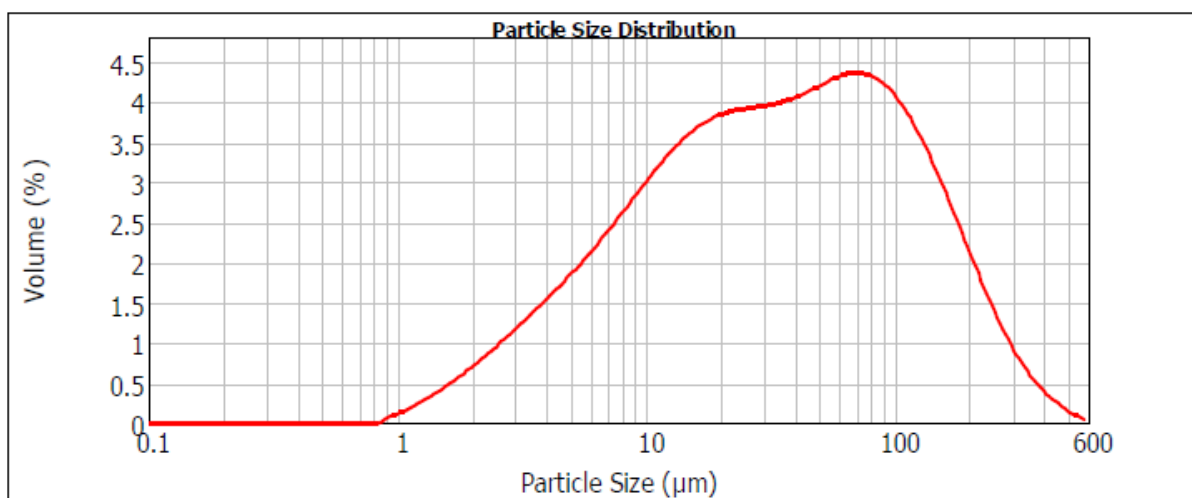
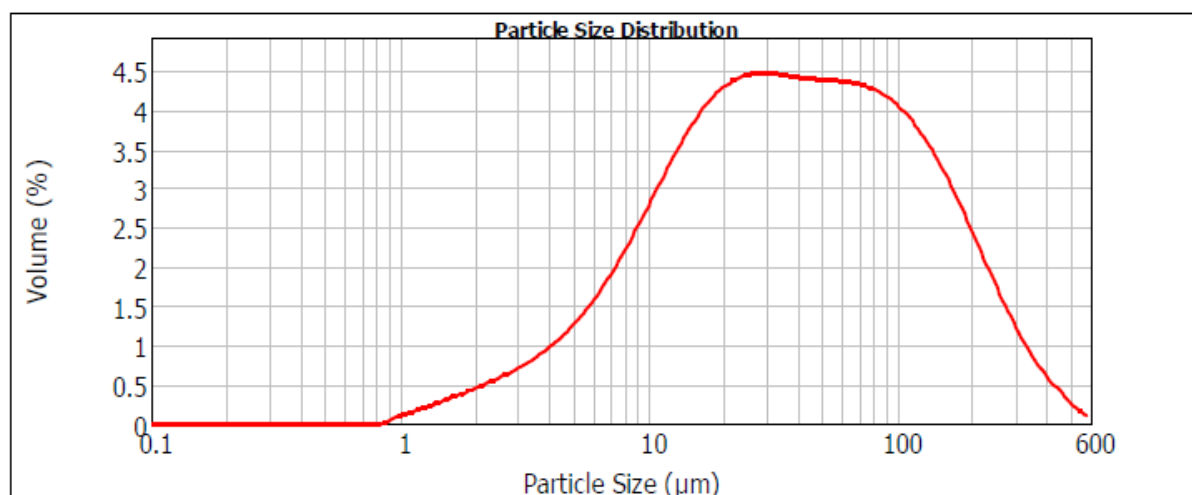
Z tohoto hlediska je patrné, že SNRC, tedy selektivní nekatalytická redukce oxidů dusíku má negativní dopad na morfologii zrn vysokoteplotního úletového popílku. Popílek disponující takto narušenými zrny, která se do jisté míry mohou stávat vysoce nasákovými, by již nemusel působit pozitivně na výslednou reologii kompozitu, a naopak by mohl zvyšovat jeho vodní součinitel pro dosažení požadovaného stupně konzistence. Vysokoteplotní úletový popílek by tak ztratil jednu z jeho vlastností, pro kterou je ve velké míře využíván. Tato teorie byla dále ověřena.

Na snímcích z elektronového mikroskopu je rovněž patrné, že nová zrna nepravidelného tvaru, která nejspíše vznikla rozpadavostí a následným shlukováním zrn původních, přičemž rozpadnutí původních zrn může být připisováno náhlému teplotnímu šoku pro zrna během SNRC, jsou menších rozměrů. Takový popílek by rovněž mohl vykazovat rozdílnou granulometrii.

2.2. Dopad SNRC na granulometrii popílků

Granulometrie popílků má přímou souvislost s jejich jemností dle ČSN EN 450-1. Většina vysokoteplotních úletových popílků produkovaných v rámci České republiky naplňuje požadavky citované normy pro jemnost popílků třídy N. Dle fotografií z elektronového mikroskopu lze soudit, že ani popílků, které prošly SNRC nebudou překračovat povolenou jemnost.

Jejich granulometrie byla stanovena pomocí laserového granulometru Malvern Mastersizer 2000, přičemž samotná analýza byla provedena suchou cestou. Výsledky zobrazují následující grafy.

Obrázek 5.: Granulometrie popílku **bez** SNRCObrázek 6.: Granulometrie popílku **po** SNRC

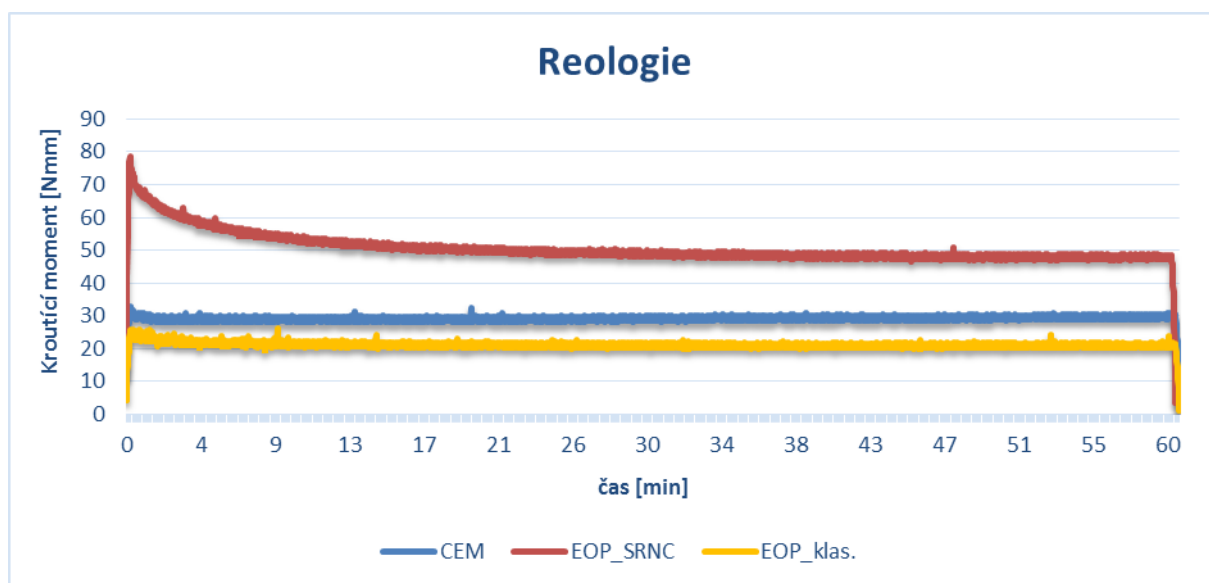
Z grafů je patrné, že popílek, který prošel denitrifikací spalin disponuje mírně odlišnou granulometrií oproti popílku klasickému. Popílek po SNRC obsahuje vyšší množství menších zrn, což je v přímé souvislosti s tvrzením vyplývajícím z analýzy morfologie jejich zrn. Otázkou však zůstává, do jaké míry popílek s takto modifikovanými fyzikálními vlastnostmi bude mít negativní dopad na cementový kompozit z hlediska jeho výroby a následných mechanických parametrů.

2.3. Dopad SNRC na reologii cementové pasty

Předešlé analýzy popílků poukázaly zejména na negativní dopad SNRC na jejich morfologii zrn. Fotografie zrn těchto popílků poukázaly na výskyt zrn nepravidelného tvaru působícího dojemem zvýšené pórovitosti. V této části experimentu proto byl ověřen dopad SNRC na samotnou reologii cementové pasty modifikované kontaminovaným popílkiem, tedy popílkiem, který prošel denitrifikací spalin. Reologie cementové pasty se přímo pojí

s morfologií zrn. Pro její analýzu bylo užito rotačního viskozimetru Viskomat NT od společnosti Schleibinger Geräte.

Pasta modifikovaná popílkem obsahovala náhradu 25 % hmotnosti cementu daným popílkem, přičemž množství vody zůstávalo neměnné. Pasta vyrobená za použití normového postupu dle ČSN EN 196-3, [6], byla po dobu zkoušky temperována vodní lázní o teplotě 20 °C. Rychlost otáček viskozimetru byla po celou dobu měření nastavena na konstantní hodnotu 100 otáček za minutu.



Obrázek 7.: Reologie analyzovaných popílků

Výsledky reologie potvrzují výše psané závěry. Z grafického průběhu zkoušky reologie je patrné, že mezi popílkem, který prošel SRNC a mezi popílkem, který nebyl SRNC podroben, je patrný značný rozdíl z hlediska jejich dopadu na reologii cementové pasty. Dle očekávání a obecně platných úsudků popílek, který neprošel SRNC působí pozitivně na konzistenci cementové pasty a snižuje tak kroučící moment z hlediska provedené zkoušky. Naopak popílek, který prošel SRNC reologii cementové pasty ztlačně zhoršuje. Potvrzuje se tak, že zrna nepravidelného tvaru, popřípadě shluky vytvořené nejspíše z úlomků rozpadlých zrn popílku po SRNC, jsou značně porézní a vodonáročnější.

Pro dosažení stejného stupně konzistence cementové pasty by bylo nutné navýšit vodní součinitel takového kompozitu. Každé navýšení vodního součinitele však může působit negativním dopadem na výsledné mechanické parametry kompozitu.

2.4. Dopad SNRC na index účinnosti

V poslední fázi experimentu bude sledován dopad SRNC na pevnostní parametry vyrobených malt z hlediska jejich indexů účinnosti dle ČSN EN 450-1. Na základě publikovaných prací některých výzkumníků lze předpokládat, že při výrobě těles pro stanovení indexu účinnosti dle výše zmíněné normy, tedy při zachování konstantní dávky vody, nebudou mechanické parametry vyrobených malt nijak negativně ovlivněny. Všechny již publikované výzkumy se

taktéž shodují, že popílky, které projdou SRNC obsahují jisté množství amonných solí, které se po styku s cementem uvolňují v podobě silně zapáchajícího čpavku.

Do jisté míry by však mohl popílek, který prošel SRNC vykazovat rychlejší nástup pucolánové reakce. Tato teorie se opírá o morfologii zrn tohoto popílku, které by se díky své narušené struktuře mohly rychleji účastnit hydratačních procesů. Z tohoto důvodu byl index účinnosti analyzovaných popílků stanoven ve staří 2, 7 a 28 dnů normového zrání.

Výsledky zobrazuje následující tabulka.

Tabulka 1.: Indexy účinnosti analyzovaných popílků

Index účinnosti [%]	EOP bez SRNC	EOP po SRNC
2-denní	46,0	55,7
7-denní	57,0	58,8
28-denní	83,7	73,2

Při výrobě směsí s kontaminovaným popílkem amonnými solemi byl dle předpokladů cítit výrazný zápach po čpavku. S delší dobou od výroby směsi se však zápach ztrácel. Lze tudíž očekávat, že reakce amonných solí je natolik rychlá, že v řádech několika minut dojde zcela k ukončení reakce, a tím i k ukončení vývoje nepříjemného zápachu. U směsí modifikovaných tímto popílkem byl taktéž sledován negativní dopad na konzistenci, což je v přímé souladu s výsledky reologie cementových past.

Výsledky indexů účinnosti poté zcela nepotvrzují závěry publikované některými výzkumníky, že SRNC je bez dopadu na mechanické parametry kompozitů modifikovaných těmito popílkem. Ačkoliv kontaminované popílky amonnými solemi po SRNC vykazují výrazně vyšší indexy účinnosti v počátečních dnech zrání kompozitu, po 28 dnech tyto směsi již dosahují nižších hodnot indexu účinnosti než popílky, které SRNC neprošly.

Z pohledu ČSN EN 450-1 a indexu účinnosti se analyzovaný popílek po SRNC pohybuje na hranici využitelnosti dle zmíněné normy.

3. Závěr

Z pohledu provozovatelů většiny tepelných elektráren na území České republiky se zavedení SRNC do spalovacího procesu jeví jako nejjednodušší varianta, jak naplnit emisní limity. Z pohledu užití vysokoteplotních úletových popílků dle ČSN EN 450-1 však může být jejich využitelnost omezena.

Pomocí několika metod bylo prokázáno, že SRNC má negativní dopad na morfologii zrn produkovaných popílků, což sebou přináší zároveň ovlivnění reologie čerstvých cementových past.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. FAST-J-17-4639 „Optimalizace využitelnosti fluidních úletových popílků pro výrobu betonu.“

Literatura

- [1] Vyhláška č.415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování ovzduší a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.
- [2] MACHAČ, P.; VÁVROVÁ, J.: Co víme o nekatalytické redukci oxidů dusíku. In Aprochem 2013. Kouty nad Desnou, VŠCHT Praha. 2013.
- [3] SNOPEK, R.: Vliv technologie SNRC z pohledu zpracovatele a distributora popílků. In Popílký ve stavebnictví 2015. Brno, FAST VUT v Brně. 2015. p. 189-195.
- [4] ČSN EN 450-1. Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha. ÚNMZ, 2013.
- [5] AHMARUZZAMAN, M.: A review on the utilization on fly ash. In Progress in Energy and Combustion Science. 2010, Volume 36. pp. 327-363. ISSN 0360-1285
- [6] ČSN EN 196-3. Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. Praha. ÚNMZ, 2005.

Kontakt

Ing. MARTIN ŤAŽKÝ, tel: +420 541 148 063, e-mail: tazky.m@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

Prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc., tel: +420 541 147 508, e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

POHLED DO MIKROSTRUKTURY SILIKÁTU S POPÍLKOVÝM PLNIVEM

VIEW INTO MICROSTRUCTURE OF SILICATE WITH FLY ASH FILLER

Eva Tůmová, Rostislav Drochytka

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Anotace:

Příspěvek pojednává o mikrostruktuře silikátu, kde byl jako plnivo použit plavený popílek v podobě mikrosfér.

Annotation:

The paper deals with the microstructure of silicate, where cenospheres were used, as filler.

Klíčová slova:

Cenosféry, silikát, popílek.

Keywords:

Cenospheres, silicate, fly ash.

1. Úvod

Silikátový materiál použitý při provádění mikrostrukturních analýz byl nově vyvíjený lehčený podlahový potěr. Při vývoji tohoto potěru bylo otestováno několik metod přímého a nepřímého vylehčení. Tento příspěvek je věnován potěru vylehčenému pomocí lehkého plniva s matricí na bázi pěnobetonu, v tomto případě s přidavkem plaveného popílku – cenosfér – mikrosfér.

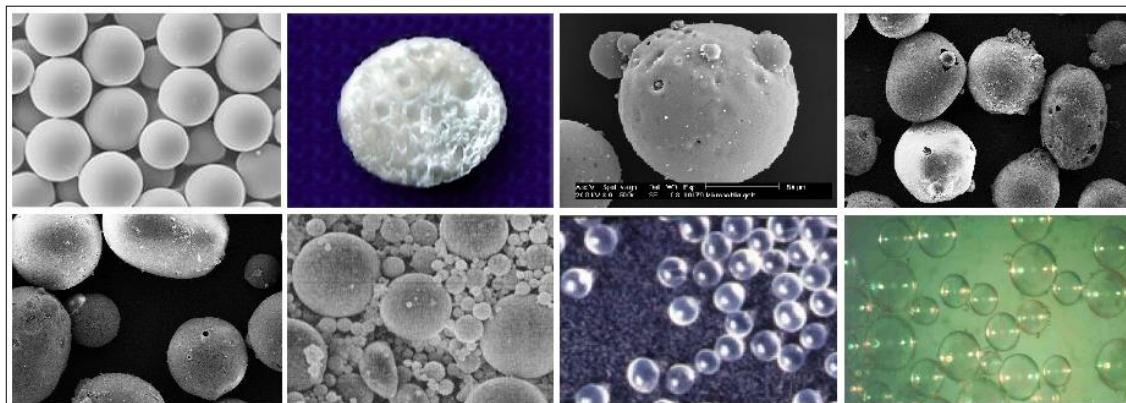
2. Mikrosféry

Plavený popílek je separovaný křemičitý materiál kulového tvaru o nízké objemové hmotnosti s uzavřenou pórovitostí či zcela dutý. Na trhu jsou plavené popílkové uvažovány pod názvem mikrosféry, které dále dělíme na cenosféry a plerosféry. Cenoféry nalézají využití v podobě vylehčujícího a často i multifunkčního plniva různých zpracovatelských odvětvích. Hlavními kvalitativními přínosy pro použití cenofér ve stavitelství jsou jejich hmotnostní, tepelně i zvukově izolační vlastnosti a dále zvýšení žáruvzdornosti prvku. Plavený popílek je nízkoreaktivní a lze jej považovat za inertní surovinu vzhledem k alkalicko-křemičité reakci. Z mineralogického hlediska se jedná o amorfní oxid křemičitý vykazující pucolánovou aktivitu.

2.1. Základní rozdělení mikrosfér

Měrná hmotnost cenofér se pohybuje v rozmezí 450 – 750 kg.m⁻³, sypaná hmotnost volně sypaná v rozmezí 350 – 450 kg.m⁻³.

V ČR operuje na trhu s plaveným popílkem firma Jet Company, s r.o. s výrobkem Cenoféry, jedná se o základní plavený popílek. v zahraničí se setkáváme s plaveným popílkem Fillite firmy Omya CZ s.r.o. i s různými jinými dodavateli cenofér. Významným dodavatelem je firma Omega Minerals vystupující na trhu s pestrou škálou mikrosfér (obr. 1). Produkt E- Spheres SL nalézá mnoha využití a má vysokou teplotní i mechanickou stabilitu. Dodáván je čistě bílý, částečně průhledný. Výrobek Omega Bubbles má oproti ostatním mnohobuněčnou strukturu a značnou velikost zrn 0,04 až 4 mm. Cenově přijatelný je lehčený filler Isospheres velikosti zrna 110 až 310 μm a funkční filler Omega-Sil velikosti zrna 1 až 90 μm. v nabídce jsou multifunkční fillery Q-Cel a Spherical či lehčené fillery Omega Spheres s velikostí zrna 60 až 550 μm a Omega Spheres W s velikostí zrna 60 až 230 μm. Tržní cena mikrosfér se pohybuje v rozmezí 11 000 až 38 000 Kč.t⁻¹.



Obrázek 1 Mikrosféry firmy Omega (postupně zleva doprava: E-Spheres SL, Omega Bubbles, IsoSpheres, Omega Spheres, Omega Spheres W, Omega-Sil, Q-Cel, Sphericel).

2.2. Vybrané cenosféry

Pro použití v námi vyvíjeném potěru vybyl vybrány cenosféry Omega-SPHERES W300 a cenosféry Q-CEL-7014.

V případě cenosfér Omega-SPHERES W300 a cenosfér Q-CEL-7014 byl zaznamenán barevný odstín, dále pH výluhu, sypná hmotnost volně sypaných cenosfér, odolnost proti drcení a teplota tání (tab. 1).

Tabulka 1: Základní vlastnosti vybraných mikrosfér.

Plnivo	pH	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	Odolnost proti drcení [N.mm ⁻²]	Teplota tání [°C]	Barva
Omega-SPHERES W300	7 - 9,9	400	3,5	1200 - 1600	šedobílá
Q-CEL-7014	7,9	80	0,2	350	bílá

3. Studium mikrostruktury vzorků s plaveným popílkem

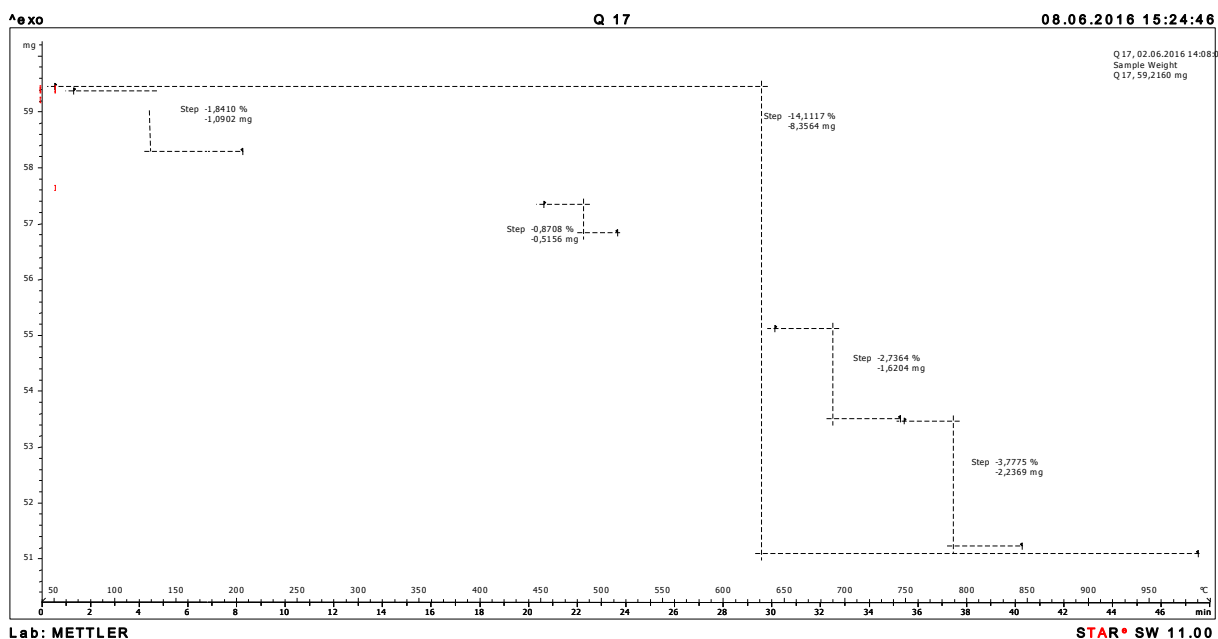
3.1. Receptury

Pro studium mikrostruktury receptur obsahujících mikrosféry byly vybrány dvě receptury obsahující také pěnotvorné látky.

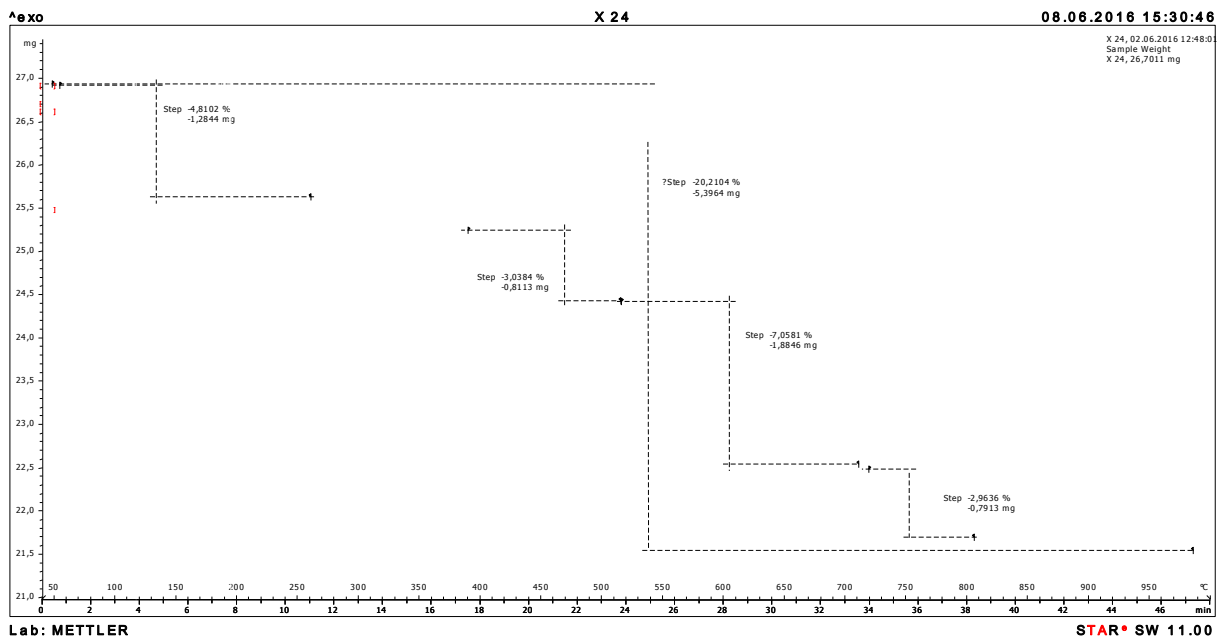
Tabulka 2 Receptury vzorků obsahujících mikrosféry použité pro studium mikrostruktury

Receptura	CEM I 42,5 R [g]	Popílek [g]	Liaver 0-4 mm [g]	Vermikulit [g]	Q-CEL-7016 [g]	W-300	Pěnidlo Hostapur + Tylovis EP 28 (1:1) [g]
REC Q17	330	80	420			170	0,1
REC X24	440	120	160	120	160		0,1

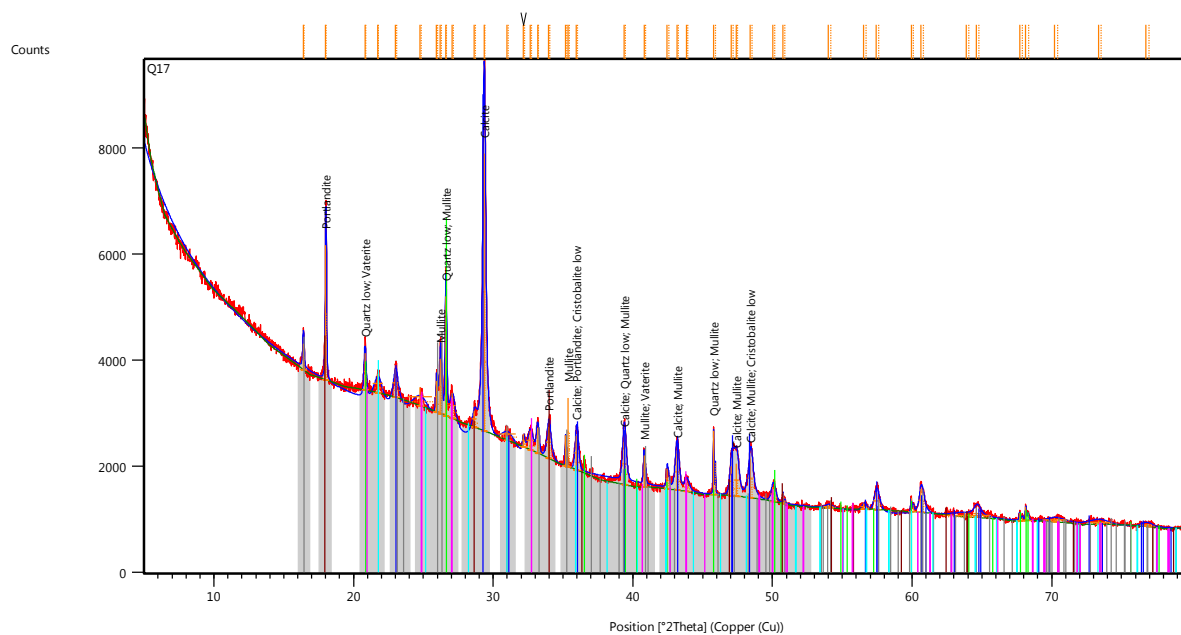
Výsledky DTA analýzy u vzorku Q17 je vidět pík ukazující na přítomnost portlanditu, vateritu a kalcitu. Všechny tyto minerály byly prokázány i pomocí RTG analýzy. Vzorek X24 vykazuje dramatictější křivku DTA, na vině je především složení plniv, kde byly kromě mikrosfér a Liaveru přidány i další, např. vermikulit. Na křivce je opět přítomen rozpad portlanditu a kalcitu s píkem ukazujícím na křemen a vaterit.



Graf 1 DTA směsi Q17



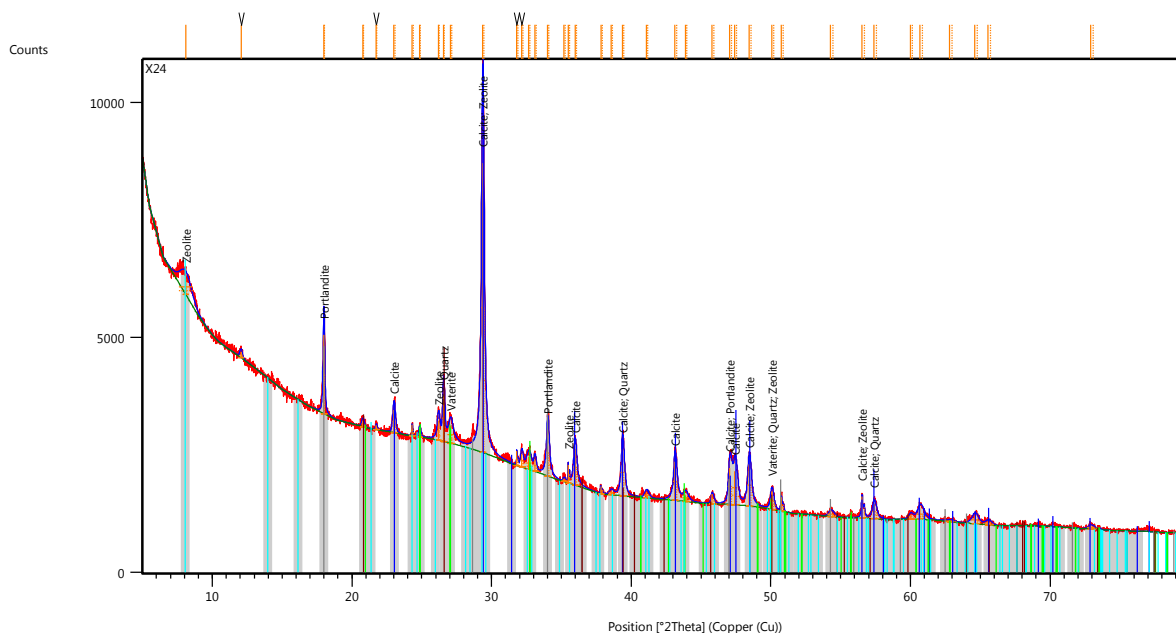
Graf 2 DTA směsi X24



Graf 3 RTG směsi Q17

Tabulka 3 Vyhodnocení RTG analýzy směsi Q17

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	CaCO_3	Vápenec
zelená	SiO_2	Křemen
šedá	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	Mullit
hnědá	Ca(OH)_2	Portlandit
tyrkysová	SiO_2	Cristobalit
fialová	CaCO_3	Vaterit



Graf 4 RTG směsi X24

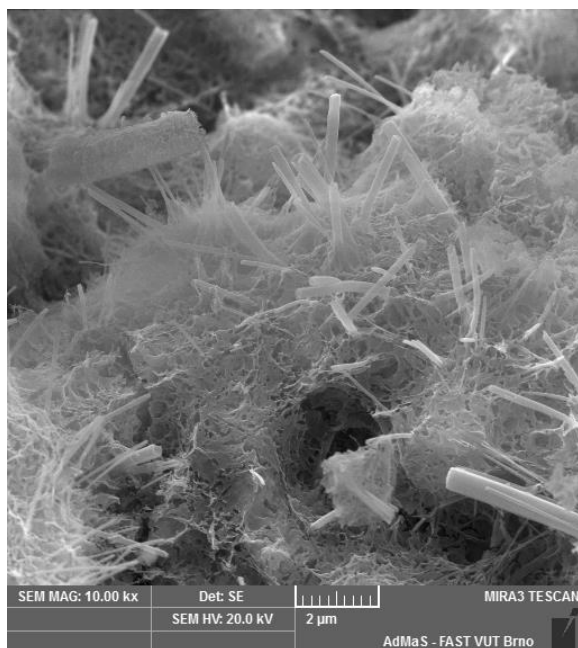
Tabulka 4 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu X24

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	CaCO_3	Vápenec
zelená	CaCO_3	Vaterit
šedá	Ca(OH)_2	Portlandit
hnědá	SiO_2	Křemen
tyrkysová	$\text{SiO}_2 +$	Zeolit

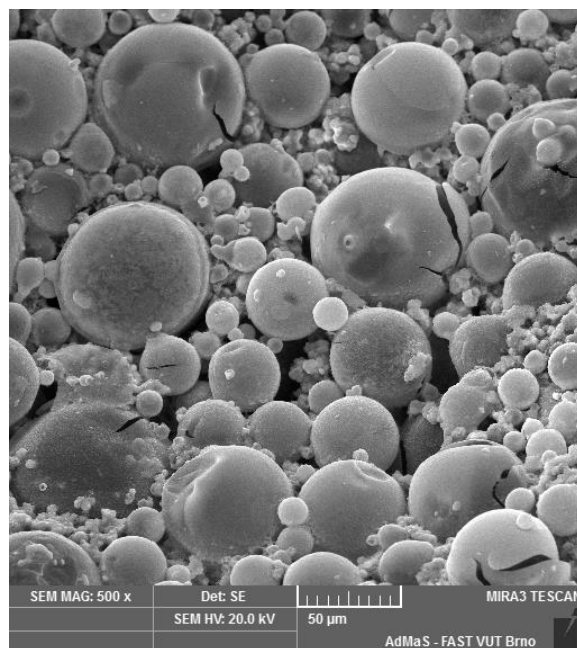
Na snímcích z elektronového mikroskopu je možné pozorovat drobné jehličky vyrůstající z krystalů kalcitu a ztvrdlého tmele. Jsou také patrné kuličky - mikrosféry, které, jak je vidět mají sklon k praskání. Jejich vnitřní povrch je dokonale hladký. Tam, kde došlo k ukotvení jednotlivých sfér do tmele, je možné vidět obalení celé kuličky filmem s drobnými výrůstky tmele. Ettringit je opět přítomen jen v malém množství. Mikrosféry se bohužel rády shlukují, viz obr. 3, a není možné je lépe rozmíchat. Dochází tak ke tvorbě měkkých shluků, které nejsou vůbec spojeny tmelem a mají tendenci vypadávat. Na obrázku 4 je možné pozorovat prasklé kuličky – mikrosféry, na jejichž povrchu je vidět obalení tmelem v tenké vrstvě. Oproti tomu shluk mikrosfér na obrázku 3 ukazuje na hladký povrch mikrosfér bez obalení tmelem.

Na obrázcích z optického mikroskopu můžeme pozorovat drobné průhledné kuličky, to jsou právě rozmíšené mikrosféry do tmele. V případě, kdy byl použit pouze tmel, Liaver a mikrosféry je struktura vzorku výrazně kompaktnější a i póry vytvoření napěňovacími aditivami jsou menší, okolo 100 μm . Na obr. 7 lze pozorovat hrubší strukturu, póry jsou větší cca 150 - 300 μm . Je také vidět hezky ukotvené zrno vermikulitu. Pro porovnání, na obr. 5, jsou vidět póry a mikrosféry při zvětšení 50 \times v elektronovém mikroskopu, na obr. 7 jsou mikrosféry viditelné při stejném zvětšení, jako průhledné bublinky. Lze tedy tvrdit, že i při

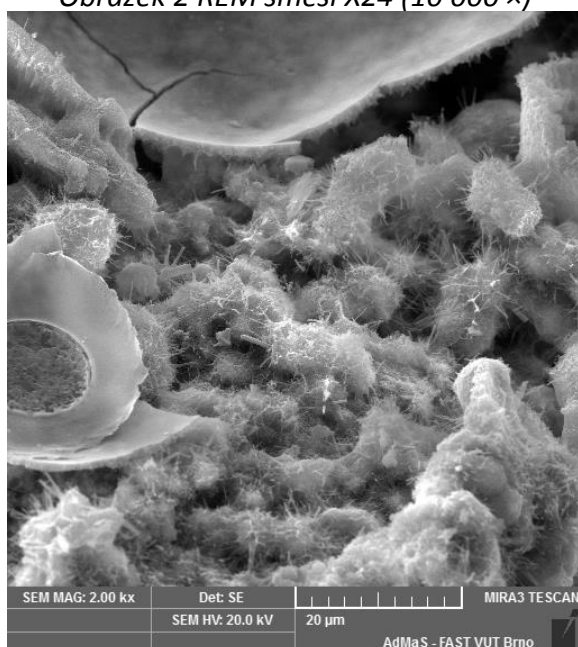
malé dávce je vzorek mikrosférami zcela prosycen. Na fotografiích (obr. 8 a 9) je vidět kompaktní struktura vzorků s drobnými, rovnoměrně rozmístěnými póry. U receptury X24 lom probíhá zrovna shlukem cenosfér. Tyto shluky se vyskytovaly volně na náhodných místech trámečku, a také na jeho povrchu.



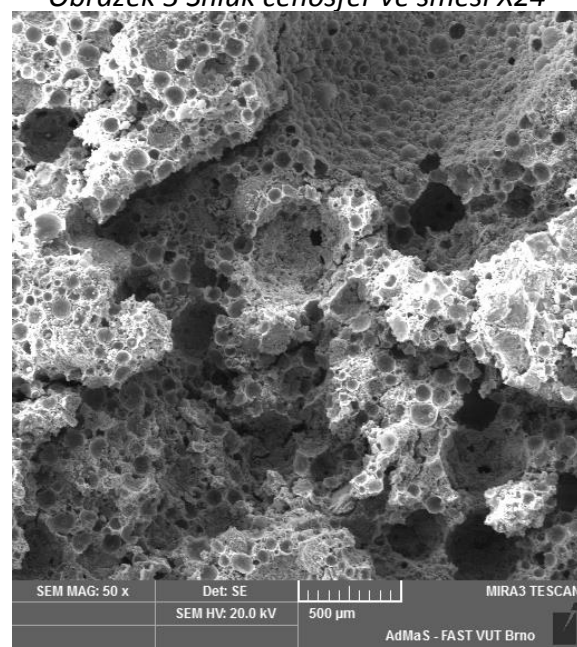
Obrázek 2 REM směsi X24 (10 000 x)



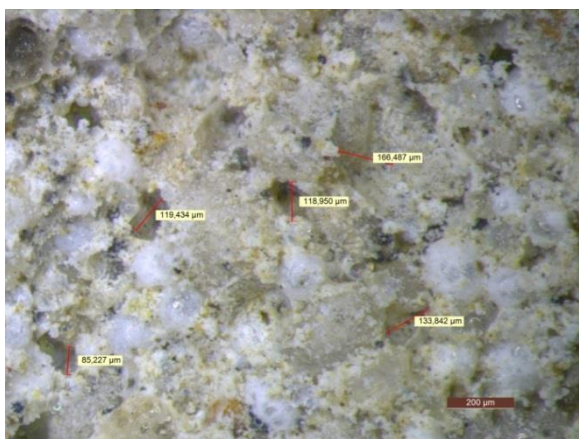
Obrázek 3 Shluk cenosfér ve směsi X24



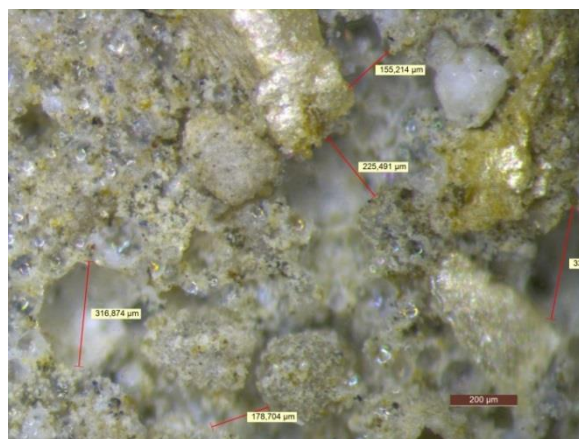
Obrázek 4 REM směsi Q17 (2 000 x)



Obrázek 5 REM směsi (50 x)



Obrázek 6 OM směsi Q17 (50 ×)



Obrázek 7 OM směsi X24 (50 ×)



Obrázek 8 Foto směsi Q17 (50 ×)



Obrázek 9 Foto směsi X24 (50 ×)

4. Závěr

Mikrosféry Q-CEL-7014 zlepšují zpracovatelnost hmoty a zároveň snižují množství potřebné záměsové vody, kvůli jejich vysoké ceně je možné je dávkovat jen do 5 % náhrady plniva. Tyto mikrosféry mají také tendenci se shlukovat a dají se špatně rozmáchat ve směsi. Mikrosféry W 300 mají podobný vliv jako mikrosféry Q-CEL-7014, dají se ale lépe rozmíchat ve směsi a tvorba shluků je v jejich případě minimální.

Přídavek popílku a mikrosfér způsobil jemnější strukturu vzorků, s velikostí pórů pouze okolo 100 μm. Ve vzorcích, kde byl přidán vermikulit, byla pozorována hrubší struktura a vytvořené póry mají velikost cca 50 – 300 μm.

Analýzami byl prokázán kalcit, vaterit, portlandit a křemen. Do vzorku obsahujícího vermikulit byl zavlečen zeolit, který byl prokázán i mikroskopicky. Dále byly v elektronovém mikroskopu, dle předpokladu, pozorovatelné mikrosféry ve formě kuliček, jejichž vnitřní povrch je dokonale hladký a vnější povrch je pokryt vrstvou tmele (je možné pozorovat

zplstěnou strukturu krystalů). Pokud byly mikrosféry pozorovány ve shluku, bez přítomnosti tmele, byl jejich vnější povrch také hladký. V optickém mikroskopu byly mikrosféry pozorovány jako drobné číré kuličky připomínající bublinky.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Literatura

- [1] SVOBODA, P., DOLEŽAL, J., Průmyslové podlahy v objektech pozemních staveb, Bratislava JAGA GROUP 2007, ISBN 978-80-8073-054-0
- [2] NEVŘIVOVÁ, L.: „Cenosféry, nová možnost lehčení žárovzdorných materiálů“, příspěvek s podporou vědeckovýzkumného záměru VVZ MSM 261100008
- [3] <http://www.nationalslag.org>
- [4] <http://kgs.uky.edu>
- [5] <http://www.omegaminerals.de/>
- [6] PYTLÍK, P., Technologie betonu, VUTIUM Brno 2000, ISBN 80-214-1647-5
- [7] BYDŽOVSKÝ, J., Vybrané statě z technologie stavebních hmot, Studijní opory pro studijní program stavební inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2008
- [8] NARAYANAN, N. & RAMAMURTHY, K., 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 22(5), pp.321–329.

Kontakt

Ing. EVA TŮMOVÁ, tel: +420 541 148 068, e-mail: tumova.e@fce.vutbr.cz, Centrum AdMaS, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA., tel: +420 541 147 501, e-mail: drochytka.r@fce.vutbr.cz, Centrum AdMaS, FAST VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VYUŽÍVAJÍCÍCH ELEKTRÁRENSKÉ POPÍLKY

THE PROPERTIES OF CEMENT BASED COMPOSITES CONTAINING FLY ASHES

Nikol Žižková, Lubomír Sokola

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Ústav technologie stavebních hmot a dílců,
STOMIX spol. s r. o.

Anotace:

Tepelné elektrárny spalující uhlí jsou celosvětově rozšířené a proto je rovněž celosvětově řešena otázka využití vznikajících vedlejších energetických produktů. PopílkY jsou ve výrobě cementových kompozitů používány jako částečná náhrada cementu, ale lze je využít také jako jemné plnivo. Jednu z moderních hmot, u které lze popílek aplikovat jako náhradu plniva, představují samonivelační stěrky.

Annotation:

Coal-burning thermal power plants are spread throughout the world, which is why the usage of by-products generated during their operation is being addressed on a global scale. Fly ashes are used as a partial substitute of cement in cement composites; however, they can also be used as a fine filler. One of the modern applications of fly ash as a fine filler is in self-levelling screeds.

Klíčová slova:

Elektrárenský popílek, samonivelační stěrka, jemné plnivo.

Keywords:

Fly ash, self-levelling screed, fine filler.

1. Úvod

Cílem této práce byl návrh samonivelační stěrky s náhradou plniva odpadem z praní drceného vápence I i II (dále označeno jako odpadní vápenec I a II) a také popílkem s následujícími parametry (dle ČSN EN 13813 [1]): pevnostní třídy C30 a F10, odolnost proti obrusu A22 a třída přídržnosti alespoň B1,5.

2. Použité suroviny

S ohledem na požadované vlastnosti samonivelačních hmot (vysoké počáteční i konečné pevnosti) je pojivová složka tvořena cementem portlandským a hlinitanovým, dále anhydritem a vápenným hydrátem. Kromě polymerní přísady EVA (kopolymer ethylenu s vinylacetátem) bylo u samonivelační stěrky nutné použít také další aditiva: superplastifikátor, odpěňovač, methylhydroxyethyl celulosu, retardér tuhnutí hydraulických pojiv (kyselina vinná), akcelerátor tuhnutí portlandského cementu (mravenčan vápenatý) a akcelerátor tvrdnutí směsných hydraulických pojiv (uhličitan lithný).

2.1. Použité alternativní suroviny

Jako částečná náhrada plniva byla použit popílek z provozovny Dětmárovice a dva typy odpadů z praní drceného vápence. První, jemnější I, typ odpadního vápence byl použit jako náhrada jemně mletého vápence a druhý, hrubší II, byl použit pro náhradu části mletého vápence.

Z mineralogického hlediska byl majoritní složkou odpadu z praní drceného vápence (jemnější I a hrubší II) kalcit. Mineralogické složení popílku Dětmárovice bylo tvořeno křemenem, mullitem, hematitem, maghemitem a anortitem.

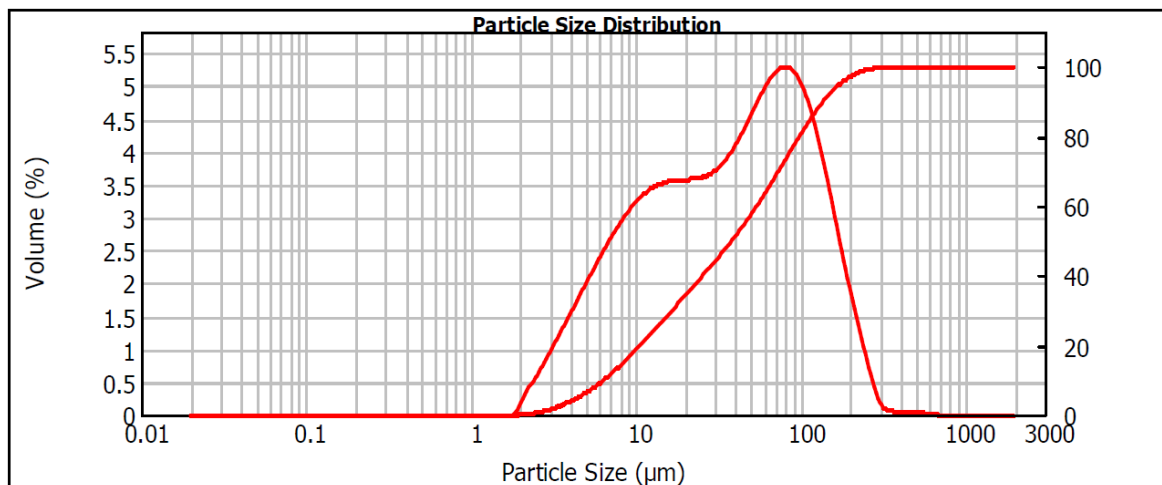
Chemické složení alternativních surovin je uvedeno v tabulkách č. 1–2, křivky zrnitosti jsou uvedeny na obrázcích č. 1–3.

Tabulka 1: Chemické složení použitého popílku Dětmárovice.

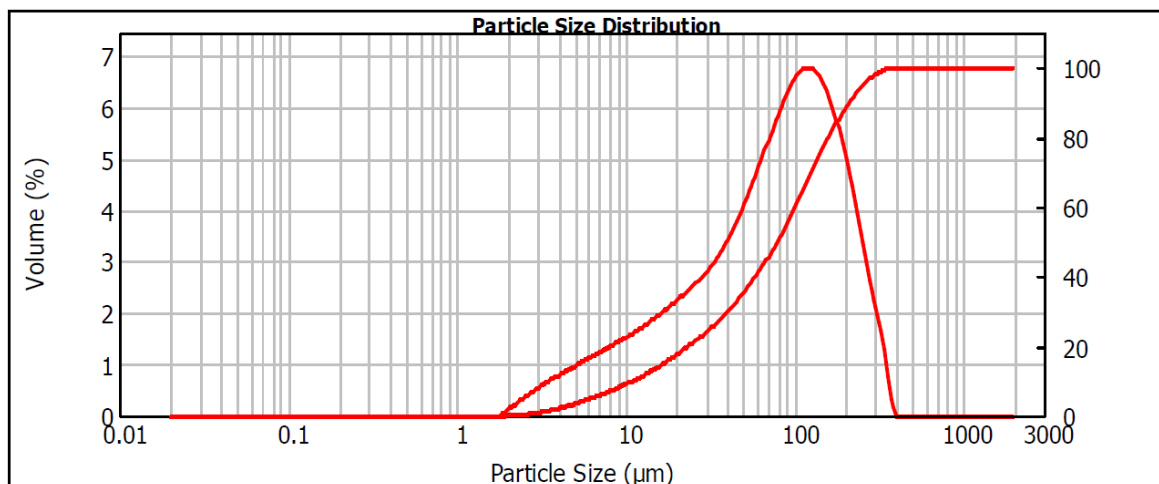
Popílek	Chemické složení [%]									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Dětmárovice	43,95	26,57	12,43	0,00	5,30	2,05	2,08	1,03	0,59	0,29

Tabulka 2: Chemické složení odpadu z praní drceného vápence (I a II).

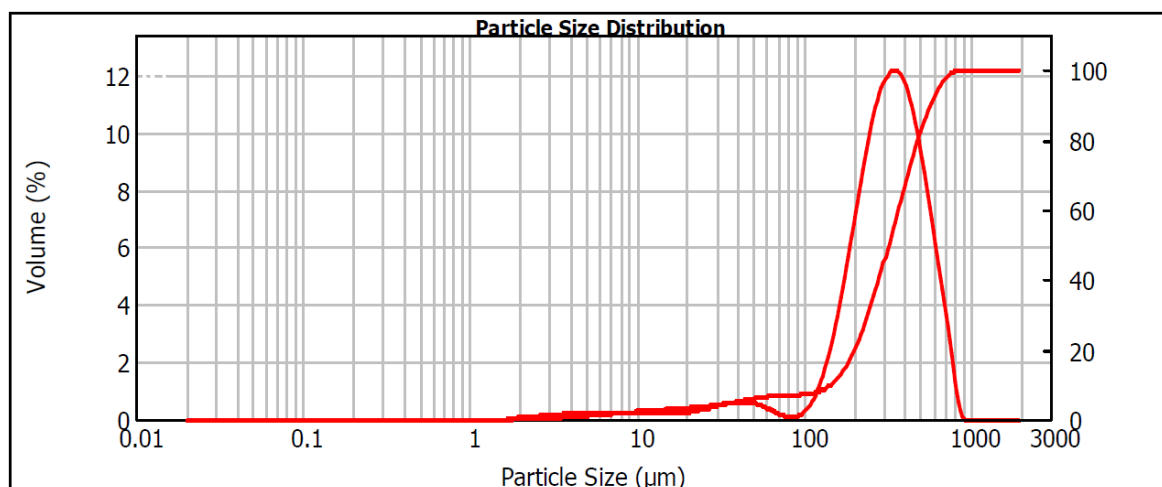
Chemické složení [%]									
CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	MnO	K ₂ O	ZŽ
55,54	0,6	0,08	0,10	0,87	0,01	0,01	0,01	0,02	42,01



Obrázek 1: Křivka zrnitosti použitého popílku z provozovny Dětmarovice.



Obrázek 2: Křivka zrnitosti použitého odpadu z praní drceného vápence I (jemný).



Obrázek 3: Křivka zrnitosti použitého odpadu z praní drceného vápence II (hrubší).

2.2. Složení testovaných směsí

Složení směsí pro samonivelační stěrky je uvedeno v tabulce č. 2, objemové hmotnosti po 28 dnech udává tabulka č. 3.

Tabulka 2: Složení samonivelačních stěrek s odpadním vápencem a popílkem.

Složení samonivelační stěrky	Složení receptury v g/1000 g suché směsi								
	Ref.	20V1	40V1	40V2	20V1/20V2	20V1/50V2	50P/V1V2	30P/V1V2	10P/V1V2
Cement CEM I 42,5 R	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0
Hlinitanový cement Ciment Fondu	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Anhydrit	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Vápenný hydrát	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Křemenný písek	339,0	339,0	339,0	339,0	339,0	170,0	0,0	170,0	282,0
Mletý vápenec 0,2–0,5 mm	112,0	112,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mletý vápenec Omycarb 40 VA	112,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Popílek Dětmárovice	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	282,0	169,0	57,0
Odpadní vápenec I	0,0	112,0	224,0	0,0	112,0	112,0	57,0	112,0	112,0
Odpadní vápenec II	0,0	0,0	0,0	224,0	112,0	281,0	224,0	112,0	112,0
Kopolymer EVA a další aditiva	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0

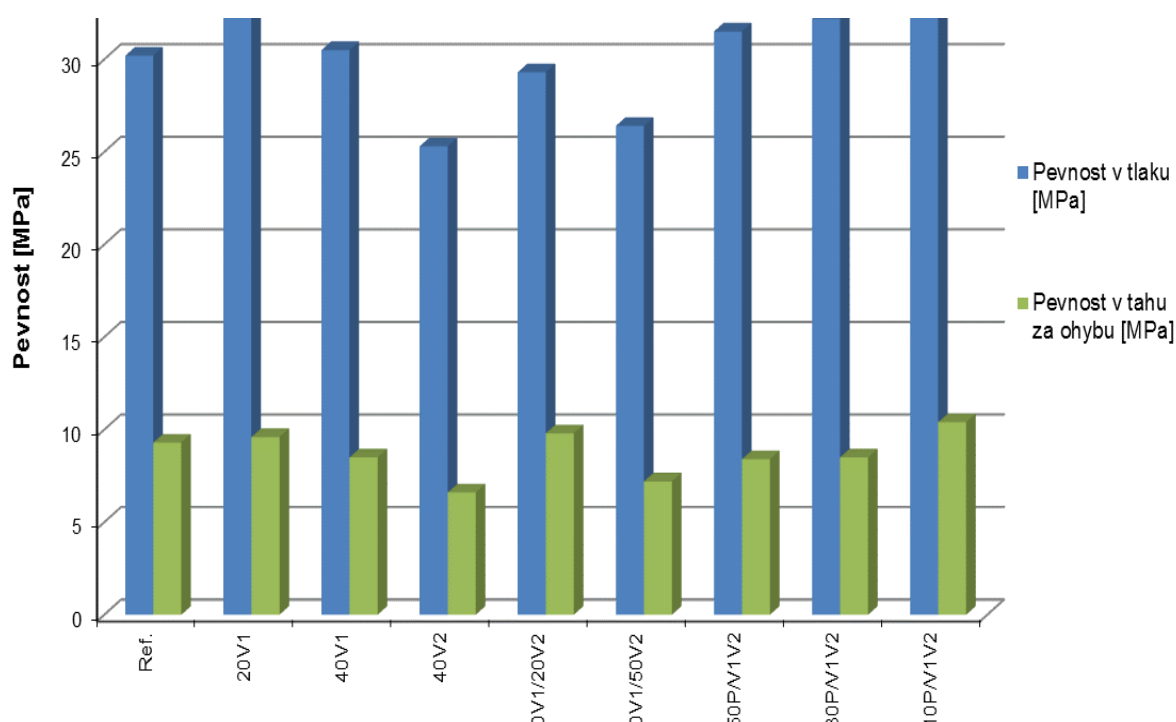
Tabulka 3: Objemové hmotnosti samonivelačních stěrek s odpadním vápencem a popílkem.

Ozn. stěrky	Ref.	20V1	40V1	40V2	20V1/20V2	20V1/50V2	50P/V1V2	30P/V1V2	10P/V1V2
Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	1890	1940	1930	1890	1900	1900	1880	1900	1920

3. Vybrané výsledky

V důsledku použití odpadních vápenců a popílků bylo nutné upravit množství záměsové vody nutné k zachování požadované hodnoty rozlivu směsi, což se projevilo jak na hodnotách objemových hmotností, tak na hodnotách pevností. Jak je patrné z obrázku č. 4, kombinace obou typů odpadních vápenců a popílků s křemenným pískem je z pohledu dosažených pevností nejvhodnější.

S ohledem na dosažené hodnoty pevností byla pro další testování vybrána hmota s označením 10P/V1V2, sledované parametry této samonivelační stěrky a stěrky referenční jsou uvedeny v tabulce č. 4 a 5.



Obrázek 4: Pevnosti v tlaku a tahu za ohybu samonivelačních stěrek s odpadním vápencem a popílkem.

Tabulka 4: Další sledované vlastnosti vybraných samonivelačních stěrek.

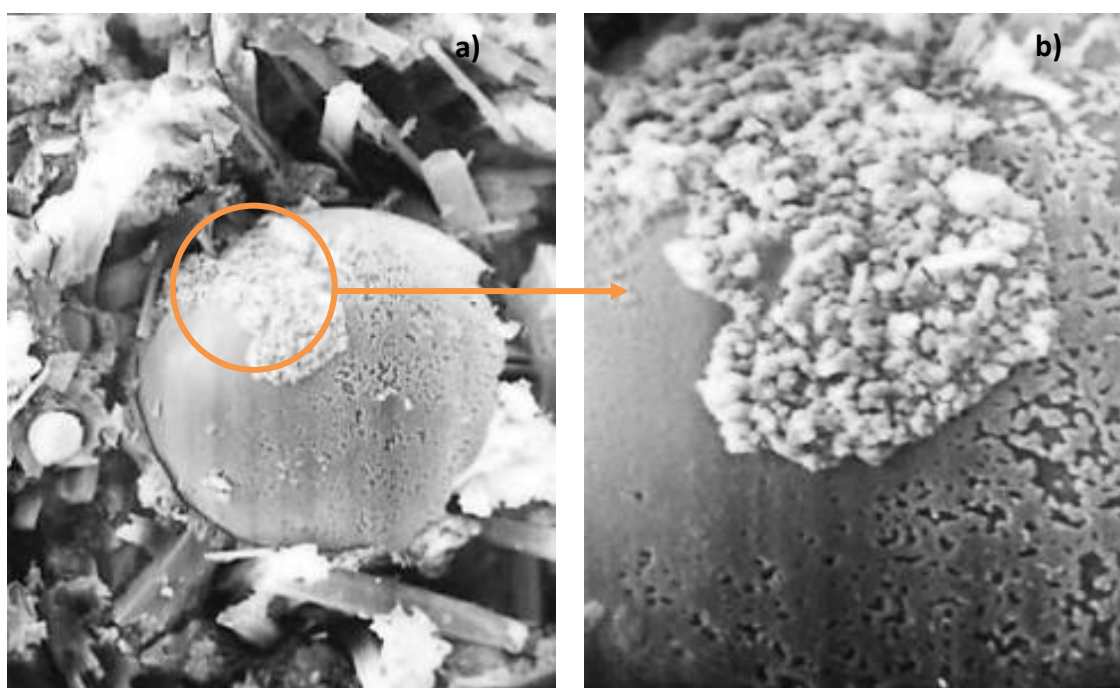
Ozn. stěrky	Součinitel tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Pevnost v tlaku ve stáří		Dynamický modul pružnosti ve stáří	Statický modul pružnosti ve stáří	Odolnost proti obrusu metodou Böhme	Přidržnost k betonu
		[MPa]		[GPa]	[GPa]	[cm ³ /50 cm ²]	[MPa]
		1 den	7 dnů	28 dnů	28 dnů	28 dnů	28 dnů
Ref.	0,743	4,5	9,7	15,5	11,6	22,5	1,8
10P/V1V2	0,754	4,6	10,2	18,6	11,8	19,4	2,1

Tabulka 5: Výsledky stanovení pórovitosti vybraných samonivelačních stěrtek.

Označení směsi	Celkový objem pórů [mm ³ ·g ⁻¹]	Celková plocha pórů [m ² ·g ⁻¹]	Měrná hmotnost [g·cm ⁻³]	Celková pórovitost [%]
Ref.	158,55	7,426	2,281	26,56
10P/V1V2	154,99	8,136	2,424	25,36

Použitím kombinace popílku a obou typů odpadních vápenců byla snížena porozita odpovídající kapilárním pórům o velikosti 0,25–0,1 μm. Ovšem u hmoty 10P/V1V2 byl zjištěn nárůst objemu pórů v oblasti středních kapilárních pórů o velikosti 50–75 nm, což se projevilo také na hodnotě smrštění. Rozměrová změna stanovená dle ČSN EN 13872 [2] byla u referenční stěrky po 28 dnech – 0,76 mm/m (smrštění 0,076 %) a u stěrky 10P/V1V2 tato hodnota činila – 1,28 mm/m (smrštění 0,128 %). Sledované parametry stěrky 10P/V1V2, uvedené v tabulce č. 4 a 5, byly srovnatelné s referenční stěrkou.

Na níže uvedených snímcích z REM samonivelační stěrky obsahující kombinaci popílku a odpadních vápenců jsou patrné jehličky ettringitu, C-S-H a C-A-H fáze. Počátek pucolánové reakce na povrchu zrna popílku je viditelný na snímcích z REM, viz obrázek č. 5.



Snímky stěrky 10P/V1V2 z REM (a) zachycující počátek pucolánové reakce na povrchu zrna popílku, zvětšení 3000x, (b) detail C-S-H fáze zvětšený 10 000x (foto B. Novotný).

4. Závěr

V současnosti jsou upřednostňovány v případě oprav a rekonstrukcí samonivelační a samozhutnitelné směsi díky jejich aplikační jednoduchosti a mechanickým vlastnostem. Cement, stejně jako ostatní složky směsi pucolánové nebo inertní povahy, plastifikační a další

příspěvky musí být zvoleny tak, aby byla vytvořena vhodná granulometrie směsi umožňující samozhutnitelnou schopnost [3]. Autoři [3] potvrdili možnost využití vápencového filleru a popílku, kde se v případě pevností po 1 a 7 dnech jako více efektivní jeví vápencový filler, zatímco u 28denní pevnosti je díky pucolánové reakci pevnost vyšší u hmot s popínkem. Také autoři v práci [4] potvrdili, že vápencová moučka je relativně inertní a obvykle nevstupuje do reakce s produkty vznikajícími při hydrataci cementu, ale přispívá ke zvýšení pevností a doporučují její použití v kombinaci se sekundárními pucolánovými materiály, jako např. popínkem. Také v případě samonivelačních stěrky navržených a testovaných v rámci této práce se kombinace popílku a odpadních vápenců, z nichž jeden je velmi jemný (měrný povrch $1585 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), ukázala jako nejvhodnější.

Cílem práce bylo navržení samonivelační stěrky pevnostní třídy C30 a F10, s odolností proti obrusu třídy A22 a třídou přídržnosti B1,5. Navržená a testovaná samonivelační stěrka s označením 10P/V1V2, kde byla použita kombinace popílku a obou typů odpadních vápenců jako složky plniva, tyto požadavky splnila: C30 (pevnost v tlaku 33,4 MPa), F10 (pevnost v tahu za ohybu 10,4 MPa), A22 ($19,4 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$) a přídržnost odpovídala nejvyšší třídě B2,0 definované normou ČSN EN 13813 [1], protože byla dosažena hodnota přídržnosti 2,1 MPa.

Ve srovnání s referenční hmotou bylo u samonivelační stěrky 10P/V1V2 obsahující popílek Dětmárovice a odpadní vápence dosaženo:

- zvýšení hodnoty pevnosti tlaku i tahu za ohybu (o 12 %),
- zvýšení hodnoty přídržnosti (o 17 %),
- zvýšení odolnosti proti obrusu (o 14%),
- snížení porozity (o 1,2 %).

Výsledky této práce potvrdily vhodnost popílku také pro použití s dalšími typy alternativních surovinových zdrojů v rámci tzv. „Green technologies“.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Literatura

- [1] ČSN EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky, ÚNMZ, 2003.
- [2] ČSN EN 13872 Metody zkoušení hydraulicky vytvrzovaných podlahových stěrkových hmot - Stanovení rozměrových změn, ÚNMZ, 2004.
- [3] FELEKOGLU, B., TOSUN, K., BARADAN, B., ALTUN, A., UYULGAN, B. The effect of fly-ash and limestone filler on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, Cement and Concrete Research Vol. 36, 2006, p. 1719–1726.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9

[4] RIZWAN, S., A., BIERB, T., A., Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 27, 2012, p. 398–403.

Kontakt

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D., tel: +420 541 147 515, e-mail: zizkova.n@vutbr.cz, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST VUT, Veveří 95, 602 00 Brno.

Ing. Lubomír Sokola, tel: +420 584 484 318, e-mail: sokola@stomix.cz, STOMIX spol. s r.o. Skorošice 197, 790 65 Skorošice.

18. – 19. 5. 2017

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

ISBN 978-80-214-5498-9



Sborník recenzovaných přednášek
3. mezinárodní konference Popílký ve stavebnictví
18. - 19. 5. 2017

Vydavatel: Vysoké učení technické v Brně

Tisk: Tribun EU s.r.o., Cejl 32, Brno

Editor: Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.

Náklad: 70 ks

Rok vydání: 2017

www.popilky.cz

ISBN 978-80-214-5498-9