



## LIMITNÍ FAKTORY VYUŽITELNOSTI VYBRANÝCH TYPŮ VEDLEJŠÍCH ENERGETICKÝCH PRODUKTŮ V ZEMNÍCH TĚLESECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

Zpracovali: Ing. Václav Mráz, Ing. Jan Suda, Ing. Jan Valentin, Ph.D. (Fakulta stavební ČVUT v Praze)

### Souhrn

Stmelení či úprava tuhých produktů po spalování uhlí pro aplikace v silničním stavitelství je efektivní metoda pro využití jinak obtížně uplatnitelných materiálů, často kvalifikovaných jako odpady. Mezi vedlejší energetické produkty (tzv. VEP) pocházející z technologií spalování a odsíření užívaných v elektrárnách a teplárnách řadíme mimo jiné různé druhy popílků, strusku, škváru, ložový popel nebo energosádrovec. Každoroční produkce VEPů je tak vysoká, že je nutné hledat alternativní cesty jejich využití. V rámci uplatnitelnosti v zemních konstrukcích silničních staveb se často používají VEPy upravené ve směsi s pojivem (např. vápnem nebo cementem) a vodou na projektem předepsaný stupeň zhutnění. Tyto upravené VEPy označujeme jako tzv. popílkové stabilizáty. Popílkový stabilizát lze vyrobit i zvlhčením směsi fluidních popílků, případně ložového popela [1]. Technický list se v tomto ohledu zaměřuje na možnosti úpravy popílkových stabilizátů využívajících fluidní popílky, materiály popílků či odpadních vápenců upravených mechano-chemickou aktivací. Pro posouzení přínosu těchto alternativních zlepšení byly provedeny zmrazovací zkoušky a posouzeno dlouhodobé bobtnání různých variant stabilizátů.

### Oblast použití

Popílkové stabilizáty zejména v případě využití fluidních popílků, které jsou z hlediska bobtnání a odolnosti proti účinkům vody a mrazu problematičtější, má potenciál širokého využití v zemních konstrukcích dopravních staveb, jakož i v podkladních vrstvách vozovek. Znalost bobtnavosti a případné přínosy alternativních pojiv či úprav (další typy vedlejších produktů či využití vysokorychlostního mletí) umožňují dále rozvíjet optimální využití těchto materiálů v daleko větší míře, a tím využít dnes dostupný technický, materiálový, ale i ekonomický přínos těchto materiálů, a to i ve vazbě na dřívější neúspěšné či chybně provedené aplikace.

### Metodika a postup řešení

Nejprve byly provedeny laboratorní zkoušky zhutnitelnosti popílkových směsí s využitím zkoušky Proctor standard dle ČSN EN 13286-2, která dobře reprezentuje zhutnění dosažené hutnicími prostředky na stavbách. Pro ověření odolnosti na účinky zatížení dopravou byly provedeny zkoušky pevnosti v prostém tlaku dle ČSN EN 13286-41. Pro stanovení odolnosti na účinky klimatických podmínek se posuzovala vhodnost z hlediska účinku působení vody a mrazu dle ČSN EN 14227-14. Největší pozornost nicméně byla věnována dlouhodobému vlivu sycení a vlivu příměsí ve zkoumaných směsích na objemové změny.

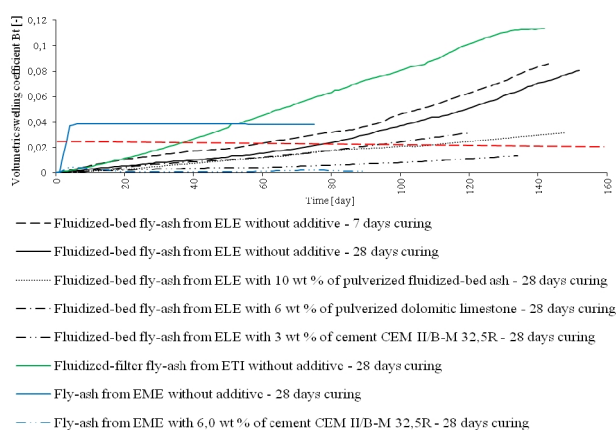
Pro potenciální možnost použití VEP v zemních konstrukcích má zásadní význam sledování objemových změn, a to s dopadem na míru trvanlivosti konstrukce vozovky. Objemové změny se mohou projevit smršťováním nebo roztažností a následně vést ke zhoršení technických i environmentálních parametrů a často až k úplné destrukci. Předmětem měření objemových změn popílkového stabilizátu je stanovení součinitele objemové bobtnavosti. Pro tuto zkoušku byl použit CBR hmoždíř dle ČSN EN 13286-47. Směs, zvlhčená na  $w_{opt}$  dle zkoušky Proctor Standard, se zhutnila ve válci CBR energií Proctor standard (PS). Popílkové stabilizáty zrály 7 nebo 28 dní ve formě při  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  v neprodyšném obalu a pak se sytily vodou až do odeznění deformací. V časových intervalech se měřila změna výšky povrchu zhutněného, syceného vzorku, zatíženého zátěží. Součinitel objemového bobtnání  $B_t$  byl stanoven v souladu s přílohou 3 TP 93).

V rámci experimentu byly připraveny vzorky fluidního ložového popela, fluidního filtrového (úletového) popílku bez aditiv a s různým podílem příměsí (10 hm. % mechano-chemicky aktivovaného fluidního popílku, 3 hm. % cementu CEM II/B 32,5 R, 6 hm. % mikromletého dolomitického vápence). Dále byly zkoušeny vzorky vysokoteplotního úletového popílku bez aditiv a s 6 hm. % cementu CEM II/B 32,5 R.

Pro identifikaci fázových změn posuzovaných popílků byly provedeny zkoušky rentgenové difrakce (spolupráce s VŠCHT), kdy vzorky byly před zkouškou vysušeny při 105 °C. Vlastní XRD zkouška byla provedena s využitím AXS D8  $\theta$ - $\theta$  difraktometru a Bragg-Brentanovou geometrií využívající radiaci  $\text{CoK}\alpha$  ( $\lambda = 1.79021 \text{ \AA}$ ,  $U = 34 \text{ kV}$ ,  $I = 20 \text{ mA}$ ) včetně scanování výsledků ultrarychlým detektorem a mezí pro detekci do 0,1 %-hm. Prvkové složení bylo posouzeno pomocí sekvenčního ARL 9400 XP WD-XRF spektrometru a příslušným software se zachycením peakových intenzit ve vakuu.

## Výsledky

Výsledky objemových změn popílkových stabilizátů jsou uvedeny na obrázku 1. Průběh vývoje objemových změn u popílkové směsi z technologie mokré vápencové vypírky bez aditiv a jejich hodnoty ukazují, že většina změn objemu proběhla během prvního týdne. U směsi vysokoteplotního úletového popílku bez aditiv docházelo po zalití vodou k objemovým změnám. Objemové změny při sycení ztuhnutých vzorků vysokoteplotního úletového popílku bez aditiv lze přičíst uvolňování negativních pórových tlaků. Nárůst hodnoty objemové změny v tomto případě dosahoval až 4% původního objemu. Vzhledem k tomu, že se nejedná o projev bobtnání, tj. změnu objemu v důsledku chemických reakcí, není nutné testovaný úletový popílek pro aplikace v dopravním stavitelství upravovat pojivy. Vzorky úletových popílků s 6 % hm. cementu lze považovat za objemově stálé.



Obr. 1 Časový průběh bobtnání posuzovaných popílkových stabilizátů.

Dalším zajímavým výsledkem je vliv doby zrání či kvality vytvrzení popílkového stabilizátu na vývoj objemových změn.

Důležitým zjištěním měření bobtnavosti během tuhnutí a tvrdnutí popílkového stabilizátu připraveného z produktů technologie fluidního spalování je skutečnost, že přidáním mechano-

chemicky aktivovaných fillerů (aditiv) do popílkových směsí dochází ke snížení bobtnavosti. Například efekt mechano-chemicky aktivovaného fluidního popílku (10 % hm.) a mechanicky aktivovaného dolomitického vápence (6 % hm.) aplikovaného do směsi s fluidním ložovým popelem ukazuje snížení hodnoty bobtnání až cca o polovinu.



Obr. 2 Popílkové stabilizáty po ukončení sledování – fluidní popílek ETI / fluidní ložový popel ELE / úletový popílek EME po 28 dnech zrání bez aditiv.

Odebrané vzorky popílkového stabilizátu byly posouzeny z hlediska výskytu a vzniku novotvořených sekundárních minerálů, především ettringitu a Ca karbonátů, důvodně podezřelých z dezintegrace a rozpadu konstrukční vrstvy. Případná mineralizace byla ve vzorcích zkoumána rentgenovou spektrální mikroanalýzou pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu XL 30 ESEM, EDX v tzv. environmentálním režimu – tj. v prostředí vodních par v komoře mikroskopu umožňující analýzu nevodivých preparátů. Z analýzy vyplývá, že se jedná o silně rozpadavou hmotu, tvořenou pojivem a agregáty. V žádném případě se nejedná o kompaktní C-S-H gel s nepodstatným výskytem mikropórů. Téměř všechny porézní struktury, ať již orbikulární či planární, jsou vyplněny sekundární mineralizací – především ettringitem, ale i portlanditem, jenž se posléze v daném prostředí transformoval na hydrogenuhličitán vápenatý –  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  a dále na uhličitán vápenatý  $\text{CaCO}_3$ . Z hlediska rizika porušení zemní konstrukce je proto důležité vždy zjistit, zda může v konstrukci dojít ke vzniku a růstu agregátů ettringitu [2].

## Literatura

- [1] Kresta F.: Secondary materials in highway engineering, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Pages 144, ISBN 978-80-248-2890-0, Ostrava, 2012.
- [2] Kopecký L.: Posouzení příčin poruch rozpadu popílkového stabilizátu polygonu Most na základě mineralogicko-chemické analýzy, Protokol 4. 1/2007, Praha, 2007.
- [3] Mráz V., Suda J, Valentin J., Kopecký L.: Experimental Assessment of Fly-Ash Stabilized and Recycled Mixes, Journal of Testing and Evaluation, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2015, pages 264 – 278.