

Popílky jako pojivo a součást hydraulických silničních pojiv (praktické aplikace)

František Kresta, SG Geotechnika a.s. / VŠB Technická univerzita Ostrava, e-mail: frantisek.kresta@geotechnika.cz

Souhrn

Použití popílků v zemních pracích má v České republice dlouhou tradici. Používání popílků jako pojiva nebo součástí pojiv má kratší historii než jejich aplikace jako prostý násypový materiál. Pucolánové vlastnosti křemičitých popílků a hydraulické vlastnosti vápenatých popílků (obsah aktivního vápna) předurčily jejich možnost při využití jako pojiva nebo součástí pojiv. Vývoji nových hydraulických silničních pojiv musí předcházet poměrně dlouhá etapa laboratorních a terénních zkoušek, jako tomu bylo u pojiva RSS5, které využívalo vápenatých popílků z elektrárny TŽ Třinec nebo pojiv řady ViaCalco, které využívá popílků a vápenatých a cementárenských odprašků v Carmeuse v Mokré. V případě pojiva RSS5 trvala etapa od laboratorních a terénních zkoušek po jeho certifikaci od r. 2006 do r. 2013. Účinnost pojiva RSS5 byla prověřena úpravami převlhčených jemnozrnných zemin s přirozenou vlhkostí nad 30% (7-10% nad vlhkostí optimální a zemin s nízkou únosností (IBI pod 5%, E_{def2} pod 10 MPa). Po úpravě byly na povrchu upravené vrstvy původně převlhčených zemin změřeny hodnoty modulu přetvárnosti nad 60-90 MPa.

Popílky z fluidního spalování uhlí v teplárnách jsou ve většině případů vápenaté a pokud jsou certifikovány jako výrobky, pak je lze ve smyslu ČSN EN 16907-4 použít pro úpravu zemin. Důležitým parametrem pro posouzení vhodnosti vápenatých fluidních popílků pro úpravy zemin je obsah aktivního vápna, který by měl být dle ČSN EN 14227-4 minimálně 5% (čl. 4.3.3). Pro použití fluidních popílků pro úpravy zemin je nejdůležitější jejich stálé chemické složení bez kolísání obsahu aktivního vápna. Fluidními popílků lze upravovat jemnozrnné zeminy s nízkou a střední plasticitou s vlhkostí odpovídající vlhkosti optimální tak, že splňují požadavky ČSN 73 6133 pro uložení do násypu (IBI= min. 10%). V tomto případě lze volit dávkování do 3%. Na stavbě D49 Hulín – Fryšták byly v období 05-10/2022 použité pro úpravy zemin v podloží násypů, v násypech a v aktivní zóně fluidní popílky z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín (2850 tun z Teplárny Kladno, 1100 tun z Teplárny Zlín). Fluidní popílky z Teplárny Olomouc byly prověřeny při úpravě zemin na této stavbě při zhutňovací zkoušce. Výsledky průkazných a kontrolních zkoušek na stavbě D49 Hulín – Fryšták potvrdily, že zeminy upravené 2% fluidních popílků z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín plně vyhovují požadavkům norem a předpisů. Vápenaté popílky se tak mohou stát velmi vhodnou alternativou k tradičním pojivům, která se v zemních pracích používají. Nutno však upozornit, že používání popílků k úpravám zemin není bez omezení. Vždy je nutné kontrolovat homogenitu popílků a vlastnosti zemin určených k úpravě.

Klíčová slova: popílek, hydraulické silniční pojivo, volné vápno, aktivní vápno, úprava zemin

1. Úvod

Popílky patří do skupiny vedlejších energetických produktů (VEP), anglicky *coal combustion products* (CCP). Je zdůrazněna jejich geneze ze spalování uhlí. Vlastnosti popílků ze spalování jiných materiálů, např. komunálního odpadu, biomasy nebo papírenských kalů, jsou ve srovnání s vlastnostmi popílků ze spalování uhlí odlišné a ve smyslu ČSN EN 14227-15 se pro úpravu zemin neuvažují.

Použití popílků v zemních pracích má v České republice dlouhou tradici. Používání popílků jako pojiva nebo součástí pojiv má kratší historii než jejich aplikace jako prostý násypový materiál. Pucolánové vlastnosti křemičitých popílků a hydraulické vlastnosti vápenatých popílků (obsah aktivního vápna) předurčily jejich možnost při využití jako pojiva nebo součástí pojiv.

Vývoji nových hydraulických silničních pojiv musí předcházet poměrně dlouhá etapa laboratorních a terénních zkoušek, jako tomu bylo u pojiva RSS5, které využívalo vápenaté popílky z elektrárny TŽ Třinec, nebo pojiv řady ViaCalco, které využívá popílky a vápenaté a cementárenské odprašky

v Carmeuse v Mokrém. V případě pojiva RSS5 trvala etapa od laboratorních a terénních zkoušek po jeho certifikaci od r. 2006 do r. 2013 [1].

Popílků samotné pro úpravy zemin jsou méně časté, třebaže již od r. 2008 existuje evropská norma ČSN EN 14227-4, která definuje požadované vlastnosti křemičitých i vápenatých popílků pro potřeby úpravy zemin.

Úspěšné řešení projektu programu OP PIK "Komplexní využití produktů fluidního spalování v zemních pracích" a použití fluidních vápenatých popílků pro úpravu zemin a jejich ukládání do násypů na stavbě D49 Hulín – Fryšták předznamenalo obrovský boom zájmu o tyto materiály [2].

2. Vlastnosti popílků pro použití v oblasti úprav zemin

Vlastnosti popílků, jako konečného produktu ze spalování uhlí, ovlivňuje jak uhelně-petrografický typ spalovaného uhlí, obsah popela a mineralogické složení popelovin vnitřních i vnějších v uhlí, podíl hornin v uhlí, aditiva použita při spalování (vápenec, dolomit, vápno), tak především teplota a technologický režim spalování.

Kvalitu popílků, jejich složení, podíl sklovité fáze a zrnitost ovlivňuje i technologie jejich zachytu, technologie ukládání v suchém či mokřém stavu. Všechny tyto faktory znesnadňují klasifikaci a jednoznačné a jednoduché hodnocení popílků a dalších vedlejších energetických produktů jako materiálu.

Popílků ze spalování uhlí dělíme obvykle na dvě velké skupiny – křemičité a vápenaté. V případě křemičitých popílků jsou základní složky tvořeny silikáty, alumináty a oxidy železa. U vápenatých popílků jsou základní složky tvořeny silikáty, alumináty, oxidem vápenatým a sulfáty. Křemičitý popílek může mít pucolánové vlastnosti. Aby u něj došlo k hydraulické reakci, je nutné do něj přimíchat zdroj oxidu vápenatého (vápno nebo cement). Dle ČSN EN 16907-4 musí křemičité popílků splňovat buď požadavky ČSN EN 450-1, nebo křemičité a vápenaté popílků požadavky normy ČSN EN 14227-4 [17].

Pro výrobu směsí stmelovaných hydraulickými pojivy musí popílků vykazovat ztrátu žíháním po dobu jedné hodiny nižší než 10%. Před platností evropských norem byly požadavky na podíl nedopalu v popílků určeném pro úpravu zemin nebo pro výrobu pojiv například ve Velké Británii ještě přísnější – 8% [1].

Popílků pro úpravu zemin nesmí mít vyšší obsah SO_3 než 4.0% hmotnosti. Maximální obsah volného vápna v křemičitých popílcích může být 1.0%.

Důležitým parametrem pro posouzení vhodnosti vápenatých, obvykle fluidních popílků, pro úpravy zemin je obsah aktivního vápna, který by měl být dle ČSN EN 14227-4 minimálně 5% (čl. 4.3.3). Obsah aktivního vápna nelze zaměňovat s obsahem volného vápna, který se stanovuje u křemičitých popílků (čl. 4.2.4 ČSN EN 14227-4) [15].

Přehled požadavků na křemičité a vápenaté popílků pro úpravy zemin dle ČSN EN 14227-4 jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled požadavků na křemičité a vápenaté popílků pro úpravu zemin dle ČSN EN 14227-4

Parametr	Požadovaná hodnota	Zkušební norma
Křemičité popílků		
Propad zrn na síť 90 μm	$\geq 70\%$	EN 451-2
Propad zrn na síť 45 μm	$\geq 40\%$	EN 451-2
Ztráta žíháním	10%	EN 196-2
Obsah SO_3	4,0%	EN 196-2
Obsah volného CaO	$\leq 1,0\%$	EN 451-1
Objemové změny směsi popílků a cementu v poměru 30:70	10 mm	EN 196-3
Vlhkost	$\leq 1,0\%$	EN 13286-1
Pucolánová aktivita	deklarovaná hodnota	EN 196-5

Parametr	Požadovaná hodnota	Zkušební norma
Vápenaté popílky		
Propad zrn na síť 315 μm	$\geq 95\%$	EN 196-6
Propad zrn na síť 90 μm	$\geq 70\%$	EN 196-6
Objemové změny směsi popílku a cementu v poměru 30:70	10 mm	EN 196-3
Obsah aktivního CaO	$\geq 5\%$	EN 197-1
Vlhkost	$\leq 1,0\%$	EN 13286-1
Hydraulická aktivita	deklarovaná hodnota	

3. Popílky jako součást hydraulických silničních pojiv

Před tím, než byl definován pojem hydraulické silniční pojivo, se v mnoha zemích používaly různé směsi existujících pojiv, především vápna a cementu, případně popílků. Obrovská variabilita ve složení těchto směsí a snaha sjednotit terminologii vedly k definici hydraulického silničního pojiva.

Příkladem může být úprava zemin při výstavbě dráhy 9-27 na mezinárodním letišti v Houstonu, kdy byla pro úpravu zemin použita směs vápna, cementu a popílku v souladu s americkými předpisy EM1110-03-137 a TM 5-822 [1].

Hydraulické silniční pojivo se vyrábí kombinovaným mletím slínku a hydraulických složek dle normových specifikací. Hydraulické silniční pojivo rychle tvrdnoucí musí splňovat požadavky ČSN EN 13282-1, hydraulické silniční pojivo normálně tvrdnoucí musí splňovat požadavky ČSN EN 13282-2. Hydraulické pojivo po smíchání s vodou tvrdne na vzduchu a pod vodou a zachovává si svoji pevnost také pod vodou.

Hlavními složkami rychle tvrdnoucích hydraulických silničních pojiv (ČSN EN 13282-1) jsou ty s obsahem vyšším než 10% a zahrnují hlavní složky společné s normou pro cement (ČSN EN 197-1):

- portlandský slínek;
- granulovaná vysokopeční struska;
- pucolány; přírodní pucolán a přírodní kalcinovaný pucolán;
- popílek; křemičitý a vápenatý popílek;
- kalcinovaná břidlice;
- vápenec.

Hlavními složkami normálně tvrdnoucích hydraulických silničních pojiv (ČSN EN 13282-2) jsou ty s obsahem vyšším než 10% a zahrnují

a) hlavní složky dle ČSN EN 197-1:

- portlandský slínek;
- granulovaná vysokopeční struska;
- pucolány; přírodní pucolán a přírodní kalcinovaný pucolán;
- popílek; křemičitý a vápenatý popílek;
- kalcinovaná břidlice;
- vápenec.

b) další druhy popílků

1) křemičitý popílek vznikající při spalování uhlí ve fluidním loži s následujícími vlastnostmi

- i) $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3) \geq 70\%$ hmotnosti;
- ii) obsah volného CaO $\leq 2\%$ hmotnosti;
- iii) aktivní oxid křemičitý $> 20\%$ hmotnosti;
- iv) $\text{SO}_3 \leq 6\%$ hmotnosti;
- v) propad při prosévání sítím 315 μm = 100% hmotnosti.

2) nehašený vápenatý popílek složený nejméně z 15% hmotnosti aktivního oxidu vápenatého (CaO), který může být použit pouze jako složka normálně tvrdnoucího hydraulického silničního pojiva tříd N1 a N2.

c) popílek ze spalování papírenských kalů s následujícími vlastnostmi:

- i) celkový CaO $\geq 35\%$ hmotnosti;

- ii) $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3) \geq 15\%$ hmotnosti;
 - iii) $\text{MgO} \leq 5\%$ hmotnosti;
 - iv) obsah volného CaO $\geq 7\%$ hmotnosti (dle ČSN EN 451-1, [199]);
 - v) $\text{SO}_3 \leq 2\%$ hmotnosti.
- d) krystalická ocelářská struska (BOF) s následujícími vlastnostmi
- i) celkový CaO $\geq 35\%$ hmotnosti;
 - ii) $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3) \geq 35\%$ hmotnosti;
 - iii) $\text{MgO} \leq 9\%$ hmotnosti;
 - iv) obsah volného vápna v rozmezí 7-16% hmotnosti;
 - v) $\text{SO}_3 \leq 0,5\%$ hmotnosti;
 - vi) objemová stálost ≤ 30 mm při stanovená dle ČSN EN 196-3 při jemnosti mletí permeabilní metodou (Blaine) větší než 2000 cm²/g.
- e) bílé vápno (CL) a přirozené hydraulické vápno (NHL) dle ČSN EN 459-1. Může být použité nehašené bílé vápno (CL-Q) nebo hašené bílé vápno (CL-S).

Z výčtu hlavních složek vidíme, že hydraulická silniční pojiva mohou mít velmi variabilní složení. V případě normálně tvrdnoucích pojiv pak velmi vysoký počet hlavních složek vyplývá z faktu, kdy se evropská norma snažila reflektovat existující praxi a existující komerčně dodávaná pojiva. Norma byla přizpůsobena praxi v jednotlivých evropských zemích

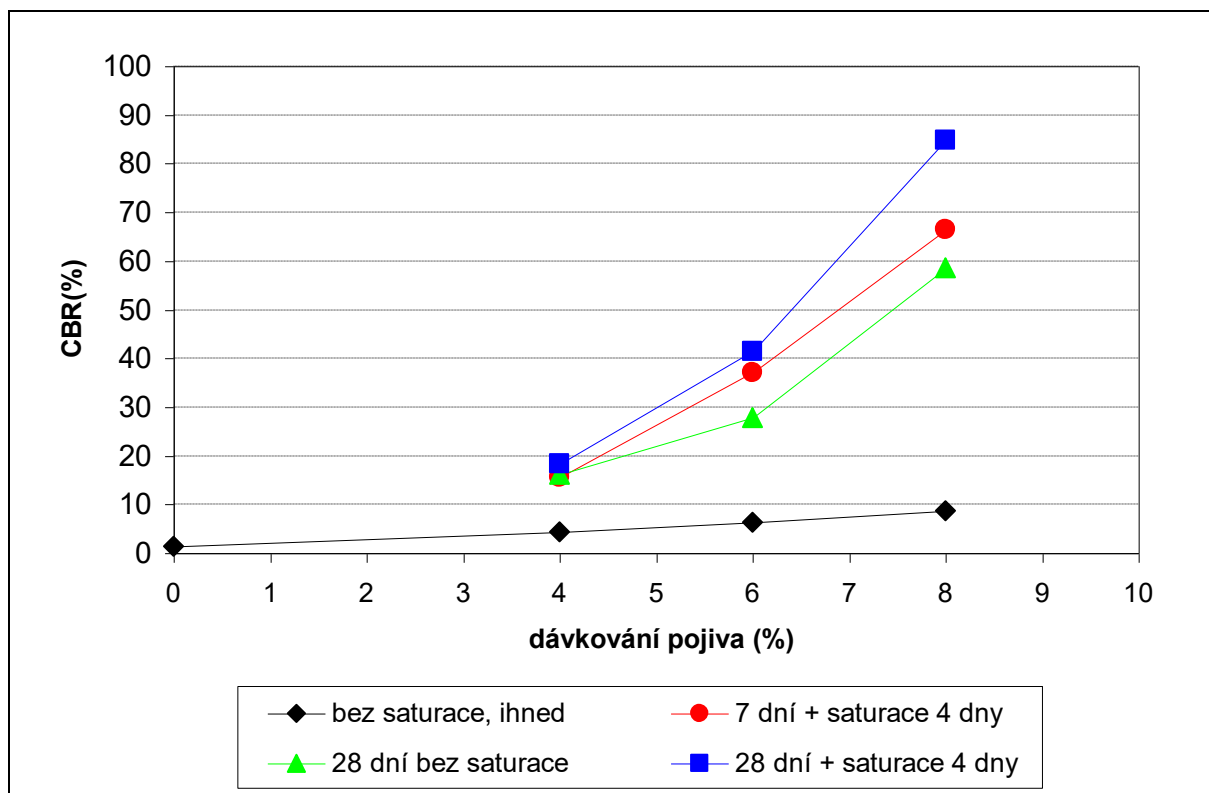
Třídy pevnosti hydraulických silničních pojiv doplňují řadu pevnostních tříd cementů pro obecné použití (32,5 MPa, 42,5 MPa a 52,5 MPa) dle EN 197-1. K určitému překrytí parametru pevnosti dochází ve třídách E4 a E4-R5 pro rychle tvrdnoucí hydraulická silniční pojiva.

Pokusy s využitím popílků pro úpravu zemin v České republice probíhaly již v 80. a 90. letech 20. století. Pomalu tuhnoucí pojiva na bázi popílku z Elektrárny v Třinci byla s úspěchem použita při výstavbě komunikací v areálu TŽ Třinec. I přes snahu producentů nenašla tato pojiva širší uplatnění. Nově se pojiva na bázi popílku z elektrárny TŽ Třinec ověřovala v r. 2006.

Laboratorními zkouškami byla ověřována receptura obsahu směsného pojiva pro úpravu jílu se střední plasticitou s vlhkostí $w = w_{\text{opt}} + 3\%$. Výsledky laboratorních zkoušek stanovení pevnosti CBR dle českých předpisů a norem jsou uvedeny na obrázku 1 [1].

S dobou zrání roste i hodnota únosnosti CBR, která již po 7 dnech zrání a 4 dnech saturace překročila u všech koncentrací pojiva hodnotu $\text{CBR} > 15\%$, což vyhovuje požadavkům českých norem a předpisů pro zeminy v aktivní zóně.

Tvar křivek závislosti hodnot CBR po saturaci pro jednotlivé koncentrace pojiva je podobný. Nárůst pevnosti CBR po 28 dnech zrání oproti pevnosti po 7 dnech zrání již nebyl tak výrazný jako v prvních sedmi dnech, přesto pevnost CBR rostla.

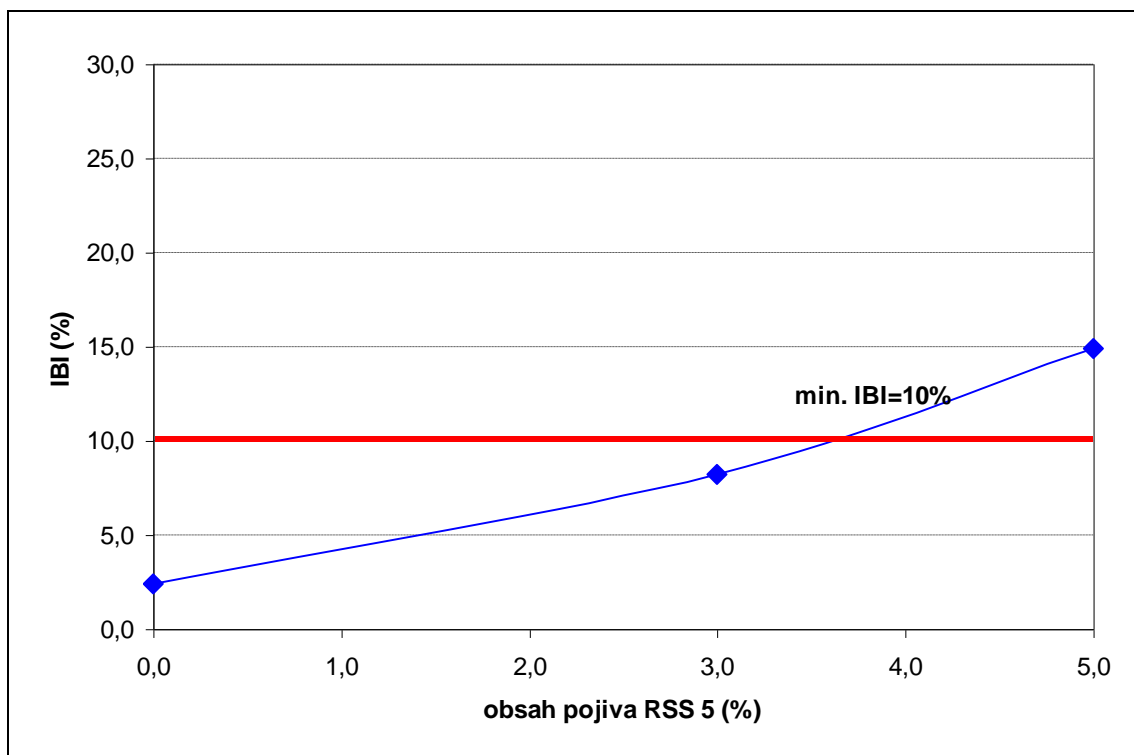


Obrázek 1 Závislost hodnoty CBR zeminy upravené pojivem RSS5 (popílek: vápno 80:20%) na saturaci vzorků, obsahu pojiva a době zrání

Pojivo bylo nasazeno v poloprovozních podmínkách na stavbě "Silnice I/11 Jablunkov – obchvat" a prověřena možnost úpravy jílu se střední plasticitou (F6 CI), tuhé konzistence na zkušebních úsecích. Pojivo tvořené směsí popílku z Třineckých železáren a vápna 80:20) bylo doporučeno použít pro úpravu zemín, které budou následně ukládány do násypů. Pojivo bylo posléze certifikováno a od r. 2013 je pod obchodní značkou RSS 5 nabízeno pro úpravu zemín nejen v České republice, ale i v Polsku.

Příkladem úspěšného použití pojiva RSS 5 může být úprava sprašových hlín (F6 CI) v podloží zpevněných ploch při výstavbě obchodní centra Globus v Havířově nebo pro úpravu zpevněných ploch pro servisní středisko MAN v Mošnově [1].

Pro převlhčené zeminy v Mošnově ($w=w_{opt}+5\%$) při dávkování 5% pojiva RSS 5 bylo dosaženo okamžitého indexu únosnosti IBI > 10% (požadavek TP 94) – viz obrázek 2.



Obrázek 2 Výsledky průkazných zkoušek úpravy zemin (F6 CI) směsným pojivem RSS 5 pro vlhkost $w=w_{opt}+5\%$ ($w=18.0\%$) – hodnoty IBI – Mošnov - MAN



Obrázek 3 Úprava zemin pojivem RSS na bázi vápenatých popílků, Havířov – Globus (2011)

Skutečnost, že se kvalita upravených zemin pojivem RSS 5 zvyšuje v čase, byla potvrzena například kontrolními statickými zatěžovacími zkouškami na zkušebním úseku v žst. Bludov. Hodnoty modulu přetvárnosti jílu se střední plasticitou (F6 CI) upravených tímto pojivem vzrostly mezi roky 2010 (1 rok provozu) a r. 2011 (2 roky provozu) z 59 MPa na 83 MPa, resp. ze 75 MPa na 112 MPa [1].

V roce 2016 probíhaly zkoušky nových hydraulických silničních pojiv s obsahem vápenatých popílků a odprašků z výroby vápna a cementu (*lime kiln dust*, *cement kiln dust*). 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.

Směsi byly připraveny z následujících vstupních surovin:

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

Pro ověření účinnosti úpravy byly připraveny a odzkoušeny následující směsi:

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

Jako referenční směs bylo zvoleno hydraulická 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 (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.

Cílem zkoušek bylo:

- Připravit směsi, které by se staly základem pro přípravu nového hydraulického silničního pojiva.
- Ověřit úpravu sprašových hlín (CI, 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. Výsledky průkazních zkoušek upravených zemin jednotlivými směsmi byly porovnány s požadavky TP 94, ČSN 73 6133 a TP 170.

IBI

Hodnota okamžitého poměru únosnosti (IBI) zeminy před úpravou byla velmi vysoká (28,73%). 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.

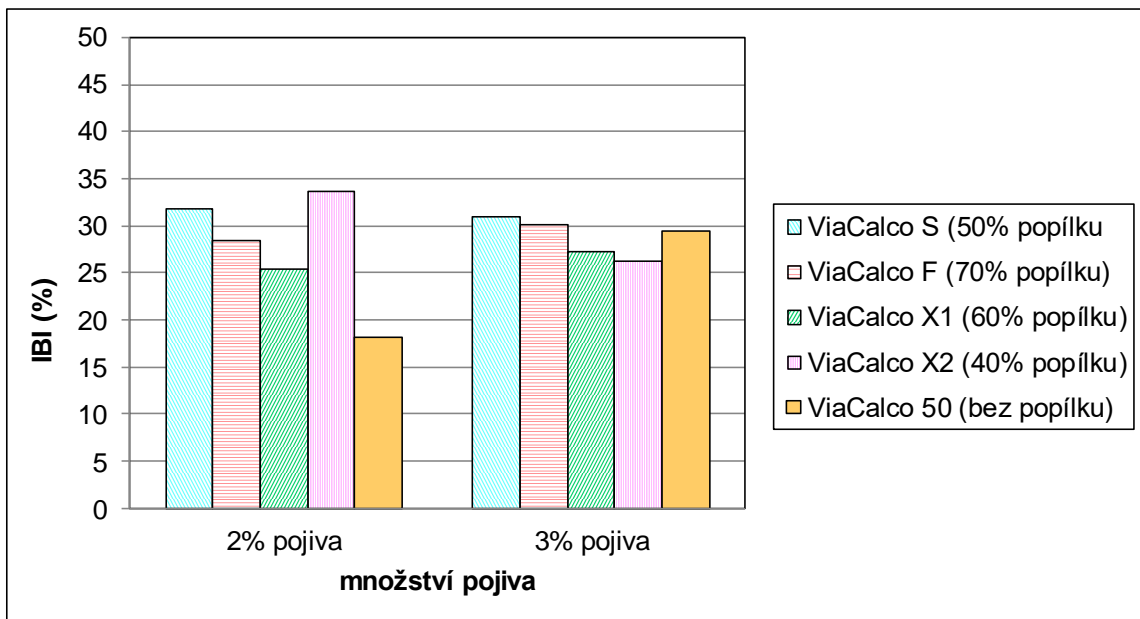
Efekt nových směsí při úpravě zemin na hodnoty IBI byl zanedbatelný. Pouze v případě směsi ViaCalco X2 (LKD, popílek, cement) byla hodnota IBI nižší ve směsi s 3% pojiva oproti směsi s 2% pojiva. Jednalo se o jedinou odchylku od očekávané závislosti, že s rostoucím množstvím pojiva roste i hodnota IBI. 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.

CBR

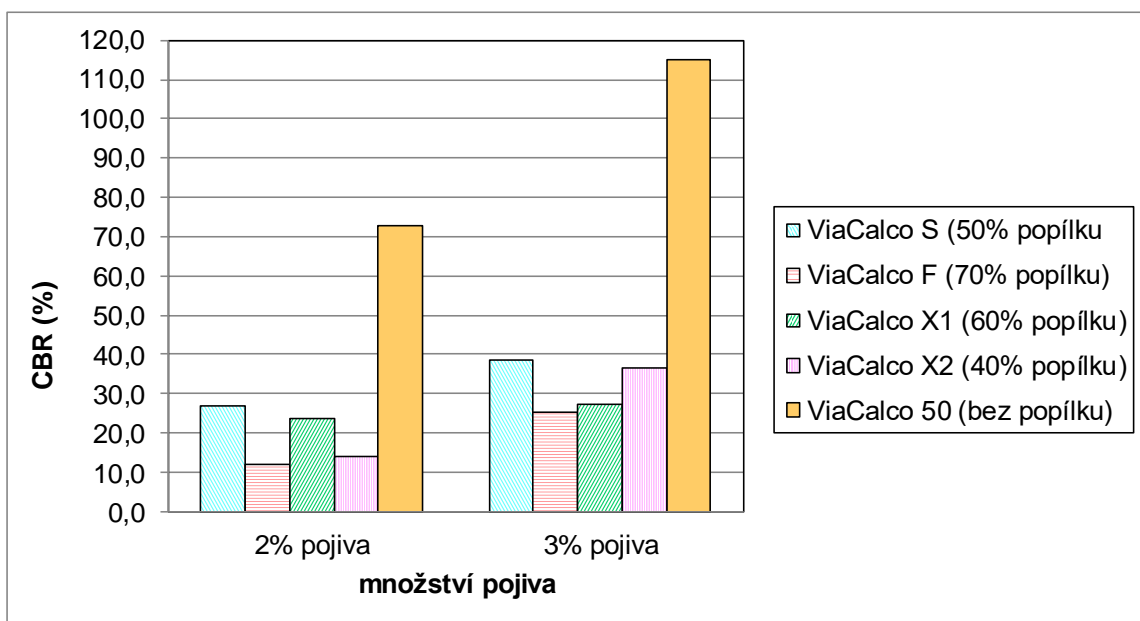
Hodnoty CBR po 96 hodinách sycení zeminu upravených nově připravenými směsmi rostly s rostoucím množstvím pojiva. Předpoklad, že s rostoucí dobou zrání poroste i hodnota CBR nebyl pozorován v případě směsí označených ViaCalco S, ViaCalco F, ViaCalco X1 a v případě referenční směsi s pojivem ViaCalco 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).

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.



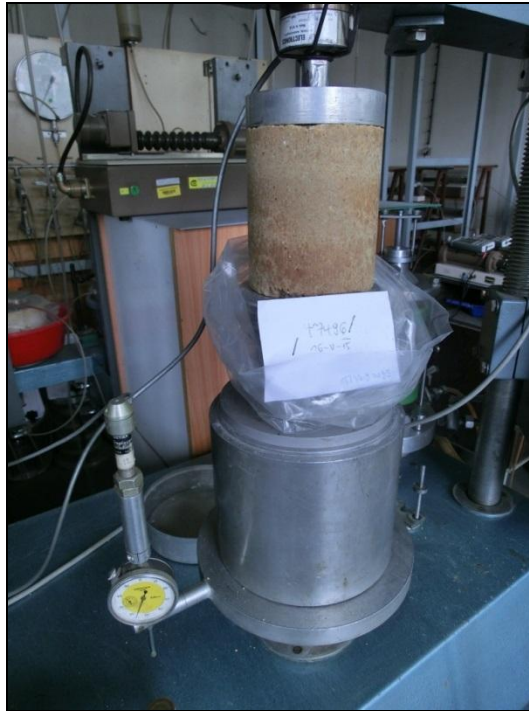
Obrázek 4 Závislost hodnoty IBI upravených zemin na dávkování pojiv



Obrázek 5 Závislost hodnoty CBR upravených zemin na množství pojiva po 7 dnech zrání a 96 hodinách sycení

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 6 Zkouška pevnosti v prostém tlaku směsi zemin s pojivem ViaCalco S

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 $L_s=1.9\%$, zeminy po úpravě pak jen $L_s=0.1-0.5\%$. Lineární bobtnání se měřilo při spodním sycení vzorku se zamezením odpařování.

Závěry laboratorních zkoušek zemin (sprašových hlín) upravených směsmi s obsahem popílku a odprašků z výroby vápna a cementu byly shrnuty 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%).

Bohužel, další etapa vývoje nových hydraulických silničních pojiv nebyla dosud zahájena.

4. Popílky jako pojivo

Pro použití produktů fluidního spalování pro úpravu zemin byly provedeny zkoušky v rozsahu dle TP 94 [21] a ČSN EN 16907-4 [17].

V případě zemin před úpravou byly stanoveny zrnitost, vlhkost, zhutnitelnost (Proctor Standard), okamžitý poměr únosnosti (IBI), CBR_{sat} (3 dny zrání a 96 hodin saturace), objemové změny – lineární bobtnání v CBR mozdíři.

Na směsích zeminy a produktů fluidního spalování byly provedeny průkazní zkoušky pro ověření účinnosti úpravy – zrnitost, vlhkost, zhutnitelnost (Proctor Standard), okamžitý poměr únosnosti (IBI), CBR_{sat} (3 dny zrání a 96 hodin saturace a 28 dnů zrání a 96 hodin saturace), objemové změny – lineární bobtnání v CBR mozdíři.

Níže je provedeno srovnání fyzikálně-mechanických vlastností zemin upravených produkty fluidního spalování z Teplárny Kladno, Teplárny Zlín a Teplárny Olomouc. Upravovány byly ve všech případech sprašové hlíny (F6 CL, CI), které patří k nejčastěji upravovaným zeminám pojivy v České republice. V případě fluidních popílků z Teplárny Olomouc byla navíc ověřována úprava písků jílovitých (S5 SC) glacigenního původu a deluviálních jílu a hlín s vysokou plasticitou (F7 MH, F8 CH). Účinky fluidních popílků z Teplárny Olomouc při úpravě zeminy byly porovnány s úpravou vápnem (CL90), hydraulickým silničním pojivem Drohart Plus HRB E3 a fluidním popínkem z TŽ Třinec, který je základní složkou hydraulického silničního pojiva RSS5. V jejich případě proběhlo rovněž srovnání pevnosti CBR po 7 a 28 dnech zrání [2].

Fluidní popílky splňovaly požadavky ČSN EN 14227-4 pro směsi stmelené hydraulickými pojivy (viz čl. 4.3 ČSN 14227-4) [15]:

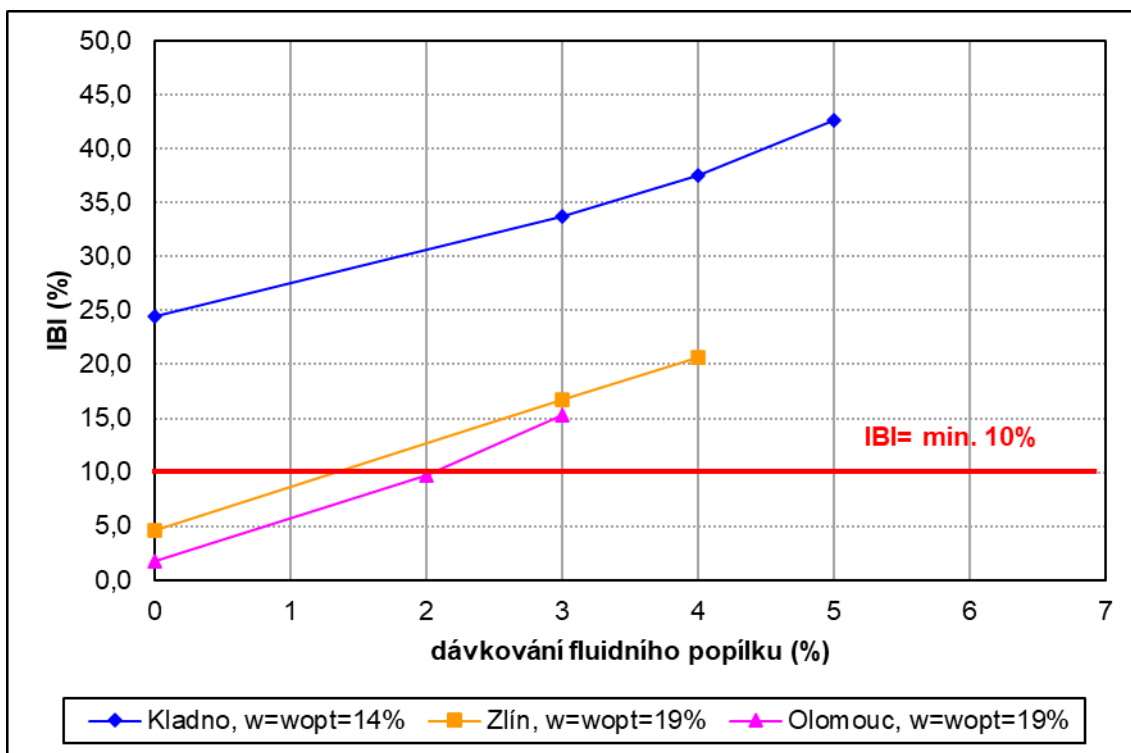
- zrnitost vápenatých fluidních popílků – podíl na síti 315 mm ³ 95%, podíl na síti 90 mm ³ 70% (viz obrázek 3);
- vlhkost do 1% (fluidní popílek z Teplárny Kladno $w_n=0,1\%$, fluidní popílek z Teplárny Zlín $w_n=0,1\%$);
- objemová stálost se dle ČSN EN 14227-4 byla nižší než 10 mm;
- obsah aktivního CaO – nad 5%.

Porovnávány byly výsledky po úpravě fluidními popínky s obsahem aktivního vápna vyšším než 10%:

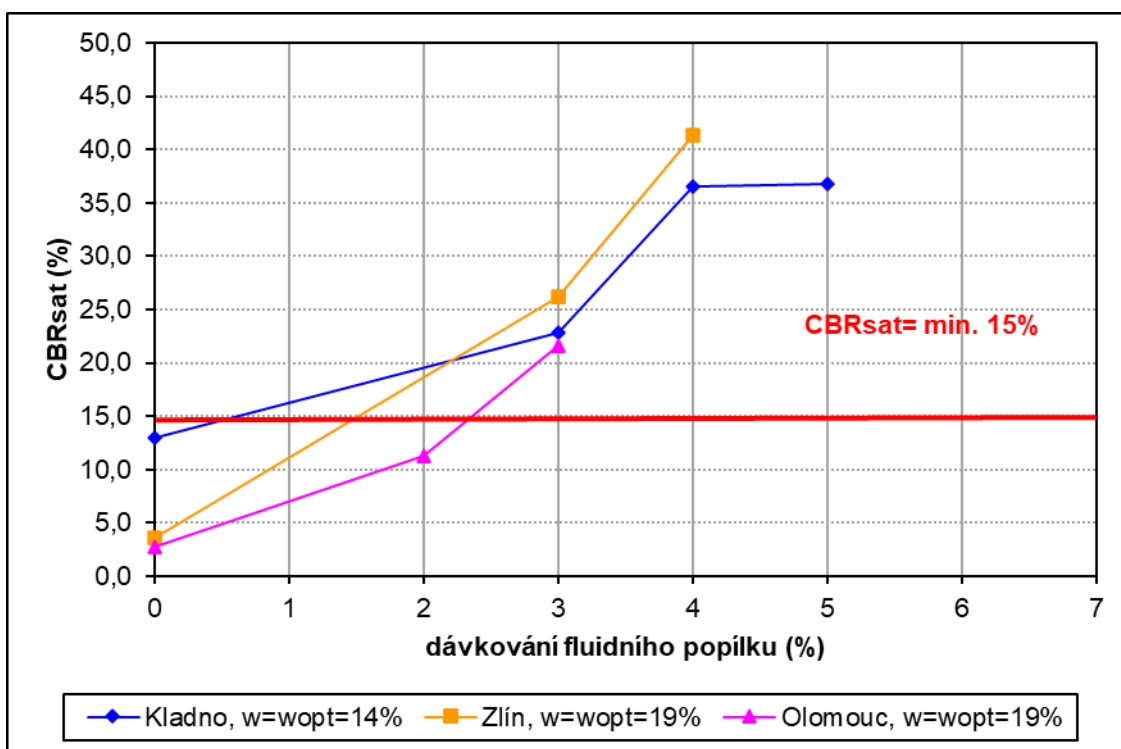
- Teplárna Kladno – fluidní popílek odebrán dne 20.7.2021, obsah aktivního vápna byl 13,59%;
- Teplárna Zlín – fluidní popílek odebrán dne 13.12.2021, obsah aktivního vápna byl 18,54%;
- Teplárna Olomouc – fluidní popílek odebrán dne 27.5.2022, obsah aktivního vápna byl 11,95% [2].

Obsah aktivního vápna může podstatným způsobem ovlivnit výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek zemin upravených fluidními popínky.

Souhrnné výsledky zkoušek okamžitého poměru únosnosti (IBI) a pevnosti CBR po 3 dnech zrání a 96 hodinách sycení upravených jílu s nízkou a střední plasticitou při optimální vlhkosti pro všechny zdroje popílků jsou shrnuty na obrázcích 8 a 9.

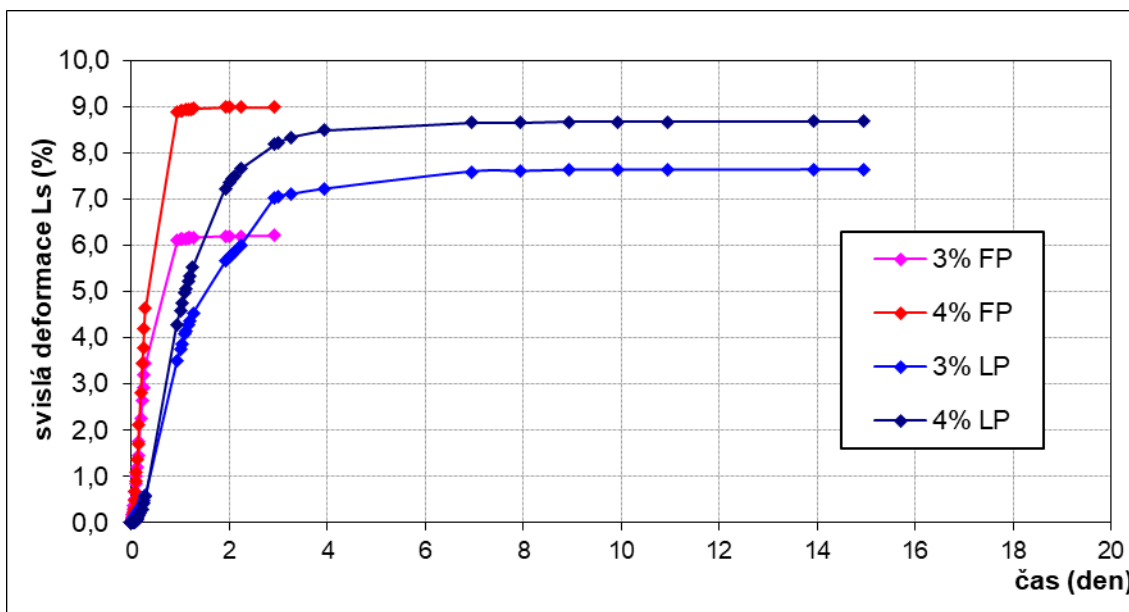


Obrázek 7 Závislost hodnoty okamžitého poměru únosnosti (IBI) na dávkování fluidních popílků při úpravě jílu s nízkou a střední plasticitou při optimální vlhkosti



Obrázek 8 Závislost hodnoty kalifornského poměru únosnosti (CBRs_{sat}) na dávkování fluidních popílků při úpravě jílu s nízkou a střední plasticitou při optimální vlhkosti

Hodnoty lineárního bobtnání směsi fluidních popílků a ložového popela z Teplárny Zlín se zeminami překročily limitní hodnotnou $L_s=3\%$. Pokud byly upravovány zeminy s vlhkostí $w=w_{opt}+3\%$ (22%), pak byly hodnoty lineárního bobtnání nižší.



Obrázek 9 Vývoj lineárního bobtnání směsí zemin (F6 CL) při optimální vlhkosti ($w_{opt}=19\%$) se 3% a 4% fluidního popílku (FP) a ložového popela (LP) z Teplárny Zlín

Pro ověření úpravy zemin fluidními popílky z jednotlivých zkoušených zdrojů v praxi na stavbě byla zvolena stavba dálnice D49 Hulín – Fryšták, kterou realizuje společnost Skanska a.s., která poskytla podklady z realizace.

V rámci zajištění systému jakosti na stavbách pozemních komunikací byly provedeny před zahájením úprav zemin fluidními popílky průkazní zkoušky dle platných norem a předpisů, jejichž součástí byly i zhutňovací zkoušky [3], [4], [5].

Na stavbě D49 Hulín – Fryšták bylo v období 05-10/2022 použito 2850 tun fluidních popílků z Teplárny Kladno a 1100 tun fluidních popílků z Teplárny Zlín pro úpravu podloží násypů, pro úpravu zemin do násypů a do aktivní zóny. Dávkování bylo 2% u obou zdrojů fluidního popílku.

Tabulka 2 Přehled úseků na stavbě D49 Hulín – Fryšták s použitými fluidními popílky z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín při úpravě zemin v období 05-10/2022

Část zemního tělesa	Stavební objekt	Úsek (km)	Délka (m)	Poznámka
Podloží násypu	SO 101.1	0,900-2,300	1400	
	SO 101.1	2,600-2,800	200	
	SO 101.33	15,200-16,970	1770	
Násyp	SO 101.33	15,200-16,780	1580	až 7 vrstev
Aktivní zóna	SO 191.31	0,130-0,430	300	



Obrázek 10 Mísení fluidních popílků z Teplárny Kladno zemní frézou v množství 2% se zeminou při zhutňovací zkoušce na stavbě D49 Hulín – Fryšták se zeminami dne 25.4.2022



Obrázek 11 Zhutněná vrstva zemin upravených fluidními popílků z Teplárny Zlín v množství 2% při zhutňovací zkoušce na stavbě D49 Hulín – Fryšták dne 3.5.2022

Všechny výsledky kontrolních zkoušek provedených na stavbě D49 Hulín – Fryšták na úsecích s úpravou fluidními popílků z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín vyhověly požadavkům projektové dokumentace a TKP staveb pozemních komunikací.

Celkem bylo provedeno 27 zkoušek IBI pro směsi zemin se 2% fluidních popílků z Teplárny Kladno a 8 zkoušek IBI pro směsi zemin se 2% fluidních popílků z Teplárny Zlín. Hodnoty IBI po úpravě se pohybovaly v rozmezí IBI=14-28% pro úpravu fluidními popílků z Teplárny Kladno a IBI=16-24% pro úpravu fluidními popílků z Teplárny Zlín.

Kontrola míry zhutnění byla prováděna stanovením objemové hmotnosti *in situ*. Celkem bylo provedeno v období 05-10/2022 101 zkoušek pro stanovení míry zhutnění, z toho 84 na zeminách upravených fluidními popílků z Teplárny Kladno a 17 na zeminách upravených fluidními popílků z Teplárny Zlín. Protože fluidní popílků z Teplárny Kladno byly používány i na úpravu zemin v podloží násypů s nižším požadavkem parametru D ($D = \min. 92\%$), byl u tohoto souboru pozorován větší rozptyl hodnot ($D = 93,3-101,2\%$), než v případě úpravy zemin fluidními popílkem z Teplárny Zlín ($D = 96,5-100,3\%$).

Do aktivní zóny byly použité zeminy upravené 2% fluidních popílků z Teplárny Kladno na místní komunikaci (SO 191.33) s požadavkem hodnoty modulu přetvárnosti $E_{def2} = \min. 45 \text{ MPa}$. Celkem bylo ve sledovaném období provedeno pět statických zatěžovacích zkoušek deskou, kdy byly naměřeny hodnoty modulu přetvárnosti v rozmezí $E_{def2} = 60,7-85,4 \text{ MPa}$.

Dosavadní výsledky ukazují velmi úspěšné použití zemin upravených fluidními popílků z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín v zemním tělese na stavbě D49 Hulín – Fryšták. Dávkování bylo 2% fluidních popílků. Nebyly zaznamenány nevyhovující výsledky kontrolních zkoušek. Výhodou této stavby byla úprava sprašových hlín charakteru jílu s nízkou až střední plasticitou s vlhkostí na suché straně Proctorovy křivky. Zatím nemusely být upravovány zeminy převlhčené nebo zeminy vysoce plastické.

5. Závěry a doporučení

Dosavadní závěry týkající se používání popílků jako složky hydraulických silničních pojiv a fluidních popílků pro úpravy zemin lze shrnout následovně:

- 1) V České republice se pro výrobu hydraulických silničních pojiv používají přednostně vápenaté popílků s určitým obsahem aktivního vápna, které napomáhají hydraulické reakci výsledného pojiva.
- 2) Nově vytvořená pojiva prokázala svou životaschopnost a uplatnila se na trhu.
- 3) Nejedná se však o pojiva univerzální, která by byla použitelná v každé situaci na stavbě. Vždy je nutné výběr pojiva přizpůsobit typu zeminy, její plasticitě a vlhkosti. Realizace průkazných a kontrolních zkoušek je nezbytná.
- 1) Pro úpravu zemin lze doporučit fluidní popílků ze spalování uhlí se spalovaným materiálem (do 40%) s obsahem aktivního vápna nad 10%. Při obsahu volného vápna nižším než 8% není zaručena dostatečná účinnost úpravy zemin, třebaže norma ČSN EN 14227-4 uvádí minimální hodnotu obsahu aktivního vápna ve vápenatých popílcích 5%.
- 2) Fluidními popílků lze upravovat jemnozrnné zeminy s nízkou a střední plasticitou s vlhkostí odpovídající vlhkosti optimální tak, že splňují požadavky ČSN 73 6133 pro uložení do násypu ($IBI = \min. 10\%$). V tomto případě lze volit dávkování do 3%.
- 3) Hodnota okamžitého poměru únosnosti (IBI) klesá s rostoucí hodnotou vlhkosti optimální. Důvodem je pomalejší nárůst pevnosti zemin ihned po zamíchání s fluidním popílkem způsobený vyšším obsahem vody v pórech. V případě pevnosti CBR (po 3 dnech zrání a 96 hodinách sycení) nejsou již rozdíly tak podstatné, protože pojivo má možnost působit v delším časovém horizontu.
- 4) S rostoucí plasticitou zemin klesá účinnost fluidních popílků při úpravě podobně jako při stejném dávkování vápna nebo hydraulických silničních pojiv. Příčinou je pomalejší flokulace jílovitých částic [2].
- 5) Praktická aplikace popílků jako pojiva na stavbě D49 Hulín – Fryšták (fluidní popílků z Teplárny Kladno a Teplárny Zlín) prokázala jejich použitelnost jako rovnocenné náhrady vápna nebo hydraulických silničních pojiv.
- 6) Výsledky laboratorních a terénních zkoušek a použití vápenatých fluidních popílků při úpravách zemin na stavbě potvrdily, že se mohou stát rovnocennou náhradou dosud používaných pojiv. Pozornost je nutné stále věnovat kontrole vstupních surovin i výsledných směsí na stavbě.

6. Literatura

- [1] Kresta F.: Úprava zemin. Česká silniční společnost z.s., 158 str., 2020, ISBN 978-80-02-02904-5
- [2] Kresta F.: Komplexní využití fluidních popílků v zemních pracích. Etapa 2 Úprava zemin fluidními popílků. Závěrečná zpráva. SG Geotechnika a.s., 11/2022.

- [3] Zhutňovací zkouška. Posouzení vhodnosti a způsobu hutnění upravené zeminy popílkem Kladno pro podloží násypu a vrstvu násypu, na stavbě „Dálnice D49, stavba 4901 Hulín -Fryšták". SO 101.1 a SO 101.33. QControl s.r.o., 29.4.2022.
- [4] Zhutňovací zkouška. Posouzení vhodnosti a způsobu hutnění upravené zeminy popílkem Zlín pro podloží násypu a vrstvu násypu, na stavbě „Dálnice D49, stavba 4901 Hulín - Fryšták". SO 101.1 a SO 101.33. QControl s.r.o., 9.5.2022.
- [5] Zhutňovací zkouška. Posouzení vhodnosti a způsobu hutnění upravené zeminy popílkem Olomouc pro podloží násypu, vrstvu násypu a zemní pláň, na stavbě „Dálnice D49, stavba 4901 Hulín - Fryšták". QControl s.r.o., 21.9.2022.
- [6] ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [7] ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti
- [8] ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [9] ČSN EN 450-1 Popílký do betonu
- [10] ČSN EN 451-1 Metoda zkoušení popílků - Část 1: Stanovení obsahu volného oxidu vápenatého
- [11] ČSN EN 451-2 Metoda zkoušení popílků - Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra
- [12] ČSN EN 933-10 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu).
- [13] 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
- [14] 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
- [15] ČSN EN 14227-4 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 4: Popílký pro směsi stmelené hydraulickými pojivy
- [16] ČSN EN 16907-1 Zemní práce – Část 1: Zásady a obecná pravidla
- [17] ČSN EN 16907-4 Zemní práce – Část 4: Úprava zemin vápnem a/nebo hydraulickými pojivy
- [18] ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin
- [19] ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací
- [20] TP 93 Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů
- [21] TP 94 Úprava zemin