

Úprava zemin – východiska, praxe, perspektivy

Doc. RNDr. František Kresta, Ph.D.

28.Silniční konference, Olomouc, 8.-9.9.2021

Obsah

- 1) Úvod
- 2) Terminologie
- 3) Pojiva
- 4) Principy úpravy zeminy a její účinky
- 5) Vlastnosti upravených zemin
- 6) Otevřené otázky a výzvy
- 7) Závěry

1. Úvod



Taky už historie?!

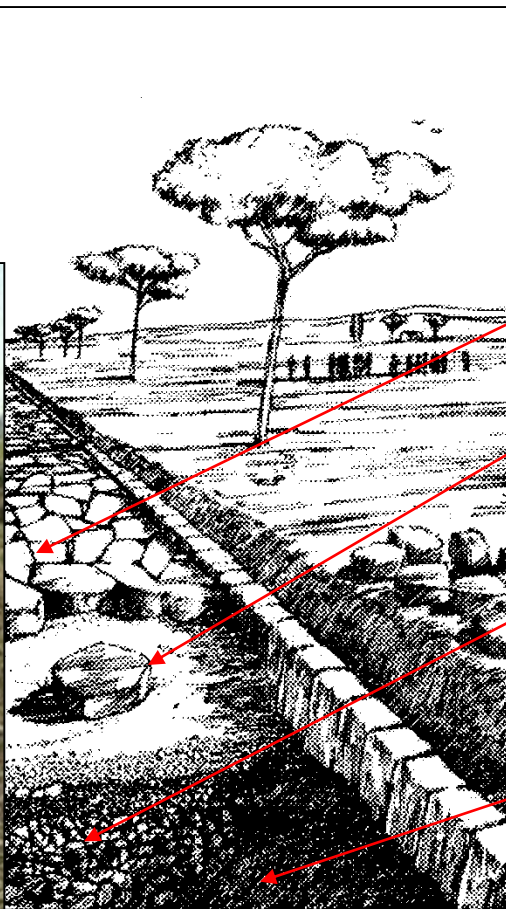
**Železniční stanice Polom,
kolej č. 2 – úprava zemin
zemní pláně (převlhčené
fluviální jíly, CI, CS)
vápnm (03/1999)**

1. Úvod

V posledních desetiletích se v oblasti zemních prací vyvinul nový obor věnující se úpravám vlastností zemin. Technologický rozvoj vždy předcházel normativní základnu, která se musela technologiím a zkušenostem z praxe přizpůsobit.

V roce 2018 byla přijata řada evropských norem pro zemní práce (ČSN EN 16907) a mezi nimi i norma ČSN EN 16907-4 Zemní práce – Část 4 Úprava zemin vápnem a/nebo hydraulickými pojivy, která si kladla za cíl pokusit se sjednotit postupy úpravy zemin pojivy z pohledu evropské praxe.

Úpravy zemin pojivy patří ke starým a časem osvědčeným technologiím.



Konstrukce silnice starých Římanů

summum dorsum - bloky
kamenů tmelené betonem

rudus - beton (štěrk, vápno) -
vyklenutý pro odvodnění

statumen - drť (úlomky 10-
20 cm), tmelené maltou

***pavimentum* - směs
zeminy a vápna**

Via Apia dnes

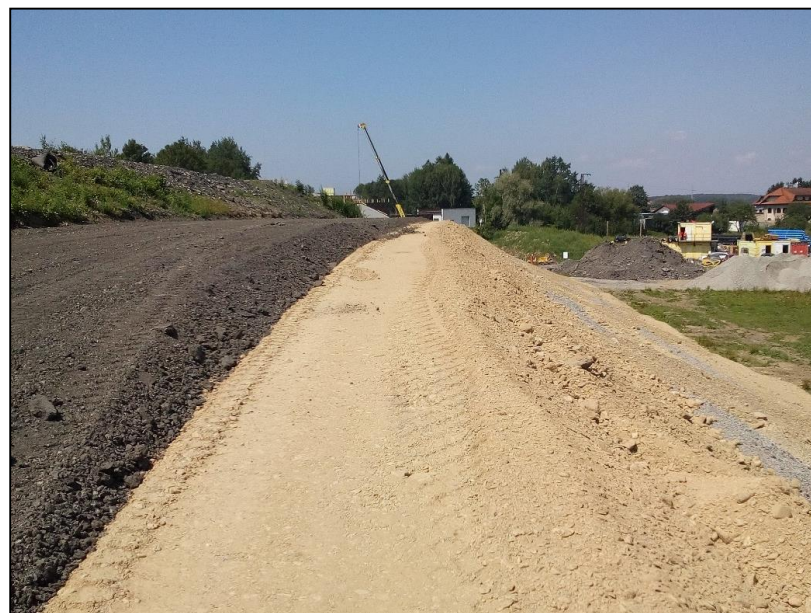
1. Úvod

Ve vyspělých zemích západní Evropy a v USA se technologie úpravy zemin pojiivy prosadila v zemních pracích zejména u velkých infrastrukturních projektů v 60.-80.letech 20.století a její rozvoj stále pokračuje.

Česká republika nezahálela a první pokusy s úpravami zemin započaly již na konci 50.let 20.století.



Kopaná sonda na dálnici D48 v Libhošti - pod asfaltovými vrstvami se nachází poloha cementové stabilizace, níže pak aktivní zóna ze štěrku a podložní glacigenní písky (leden 2018)



Výstavba vrstevnatého násypu tvořeného vrstvami asfaltového recyklátu a staré (podrcené) cementové stabilizace u Příbora (červenec 2018)

2. Terminologie

Die Terminologie ist ein zentraler Bestandteil der Kommunikation in der Informatik. Sie dient dazu, die Begriffe und Konzepte der Informatik präzise und einheitlich zu definieren, um Missverständnisse zu vermeiden und die Kommunikation zu erleichtern.

Die Terminologie ist ein zentraler Bestandteil der Kommunikation in der Informatik. Sie dient dazu, die Begriffe und Konzepte der Informatik präzise und einheitlich zu definieren, um Missverständnisse zu vermeiden und die Kommunikation zu erleichtern.

Die Terminologie ist ein zentraler Bestandteil der Kommunikation in der Informatik. Sie dient dazu, die Begriffe und Konzepte der Informatik präzise und einheitlich zu definieren, um Missverständnisse zu vermeiden und die Kommunikation zu erleichtern.

Die Terminologie ist ein zentraler Bestandteil der Kommunikation in der Informatik. Sie dient dazu, die Begriffe und Konzepte der Informatik präzise und einheitlich zu definieren, um Missverständnisse zu vermeiden und die Kommunikation zu erleichtern.

Die Terminologie ist ein zentraler Bestandteil der Kommunikation in der Informatik. Sie dient dazu, die Begriffe und Konzepte der Informatik präzise und einheitlich zu definieren, um Missverständnisse zu vermeiden und die Kommunikation zu erleichtern.

2. Terminologie

Úprava zemin (*soil treatment*) je obecný termín pro označení procesu, jehož cílem je modifikace určité zeminy tak, aby směs, která vznikne po přidání pojiva nebo kombinace pojiv, splnila požadovaný účel. Úprava zahrnuje jak zlepšení, tak stabilizaci zemin.

Zlepšení zemin (*soil improvement*) je operace, která zlepšuje fyzikální vlastnosti zeminy nebo obecněji materiálu jako jsou vlhkost, plasticita, namrzavost, odolnost proti vodě, zhutnitelnost a potenciál k bobtnání krátkodobě po přidání pojiva. Množství přidávaného pojiva nesmí být takové, aby došlo k dlouhodobým změnám vlastností zeminy.

Cílem zlepšení je umožnit, aby zemina splňovala jednu nebo více následujících vlastností:

- zpracovatelnost běžnou technikou pro zemní práce;
- dostatečné zhutnění v uložené vrstvě;
- možnost pojezdu vozidel a vytvoření pracovní plochy pro nadložní vrstvu;
- příprava materiálu pro následnou úpravu.

2. Terminologie

Stabilizace zemin (*soil stabilisation*) je operace, jejímž cílem je získání homogenní směsi zeminy s pojivem (pojivy) a případně s vodou, která po řádném zhutnění podstatně mění (obecně ve střednědobém nebo dlouhodobém horizontu) vlastnosti zemin tak, že jsou stabilní s ohledem na působení vody a mrazu. Směs získává trvalé vlastnosti, které lze měřit metodami pro pevné materiály.

Cílem stabilizace je umožnit, aby zemina splnila jednu nebo více následujících schopností:

- odolávat vertikálnímu, horizontálnímu nebo šikmému statickému zatížení;
- odolávat dynamickému zatížení;
- odolávat kontaktu s vodou;
- odolávat mrazu.

Jak vyplývá z definic ČSN EN 16907-4, pro odlišení termínů zlepšení a stabilizace hraje zásadní roli časový faktor ovlivňující vlastnosti původních zemin. Pro krátkodobé účinky se doporučuje termín zlepšení, pro dosažení dlouhodobých účinků pak termín stabilizace.

3. Pojiva

3. Pojiva

Pro úpravu zemin se používají vápno a hydraulická pojiva. Evropská norma ČSN EN 16907-4 zahrnuje mezi hydraulická pojiva cement, popílek, vysokopecní strusku a hydraulická silniční pojiva.

Typické použití pojiv je následující:

- vápno se obecně používá k vysušování vlhkých materiálů a/nebo k úpravě chování jemnozrnných (soudržných) materiálů;
- hydraulická pojiva se hlavně používají pro rychlý a významný nárůst mechanických vlastností hrubozrnných (nesoudržných) materiálů;
- v případě jemnozrnných materiálů a v závislosti na aplikaci se mohou vápno a hydraulická pojiva použít společně ve dvou krocích nebo přes předupravenou směs.

3. Pojiva

Hydraulická silniční pojiva

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 směr a snaha sjednotit terminologii vedly k definici hydraulického silničního pojiva. V případě normálně tvrdnoucích pojiv pak velmi vysoký počet hlavních složek vyplývá z faktu, kdy se evropská norma ČSN EN 13282-2 snažila reflektovat existující praxi a existující komerčně dodávaná pojiva. Norma byla přizpůsobena praxi v jednotlivých evropských zemích.

Silnice I/11 Oldřichovice – Bystřice –
úprava zemin (sprašové hlíny CI)
hydraulickým silničním pojivem RSS5
v zářezu (05/2015)



3. Pojiva

Popílky

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.

Na druhou stranu řada výzkumných pracovišť se zabývá možností použít popílky ze spalování jiných materiálů než uhlí jako pojiva pro úpravu zemin nebo v kombinaci s jinými pojivy.

Stabilizace starých konstrukčních vrstev popílkem ze spalování hořlavých břidelic v úseku Narva – Mustajoe v Estonsku (fotografii poskytla Marjo Koivulahti z Finska)



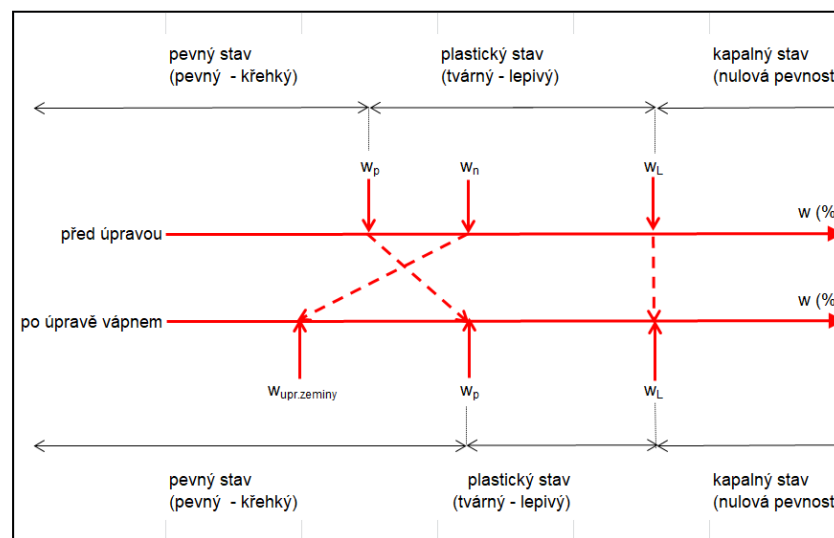
4. Principy úpravy zemín a její účinky

4. Principy úpravy zemin

Vápno

Úpravou jemnozrnných zemin vápnem dochází k okamžitým a dlouhodobým změnám jejich vlastností. Při reakci jílových minerálů s vápnem dochází ke kationtové výměně, kdy volné ionty Ca^{2+} nahrazují v krystalové struktuře jílu ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+). Intenzita reakcí závisí i na kationtech sorbovaných na povrchu jílových minerálů. Při tomto procesu dochází ke změně struktury výsledného materiálu z vrstevnaté, která je typická pro jílové minerály, na zrnitou, která umožňuje flokulaci a aglomeraci. Výsledný produkt již není plastický jíl, ale zrnitý (hrudkovitý) materiál.

Okamžité změny vlastností
vlhkých jílu po přidání
nehašeného vápna

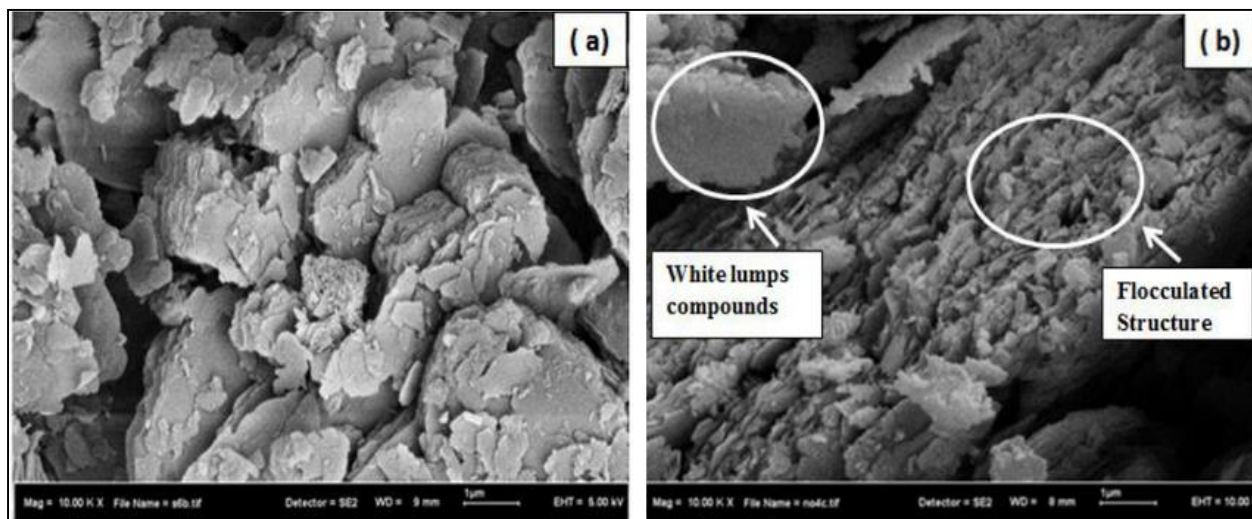


4. Principy úpravy zemin

Vápno

Z dlouhodobého hlediska dochází k postupné krystalizaci gelu vzniklého reakcí vápna s jílovými minerály, až vznikne pevný stmelený materiál. Hydroxylové ionty (OH^-) uvolněné působením vápna vytvoří prostředí s takovým pH, které umožní rozpouštění SiO_2 a Al_2O_3 z jílových minerálů a pucolánovou reakci. Oxidy SiO_2 a Al_2O_3 v jílových minerálech reagují s vodou a vápnem, a přitom vznikají gely hydrátů vápníku, křemíku a hliníku. Tyto gely postupně krystalizují a spojují strukturu navzájem. Výsledkem této reakce je stmelený materiál, který se po zhutnění stává pevnější než původní zemina.

Flokulace vápnem
upraveného
kaolinitického jílu
(Saeeda et al.
2015)



4. Principy úpravy zemin

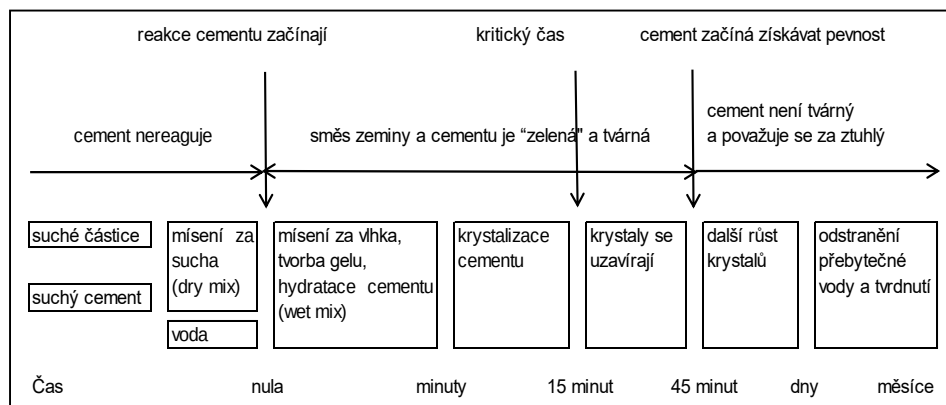
Hydraulická pojiva

Mezi okamžité účinky hydraulických pojiv patří podobně jako u vápna vysoušení zeminy a modifikace jílovité frakce v zemině.

Při hydrataci cementu v zeminách hraje velmi významnou roli přítomnost vody, bez které by hydratace bezvodých slinkových minerálů nebyla možná. Často při úpravě zemin cementem je nutno vedle vlastního cementu přidávat do zemin ještě vodu, aby se nastartovaly hydratační reakce.

Střednědobé a dlouhodobé účinky úpravy hydraulickými pojivy jsou výsledkem zpevňujících reakcí ovlivňujících pevnost upravovaných materiálů.

Schéma hydratace cementu při úpravě zemin (upraveno dle Montgomeryho 1998)



5. Vlastnosti upravených zemin

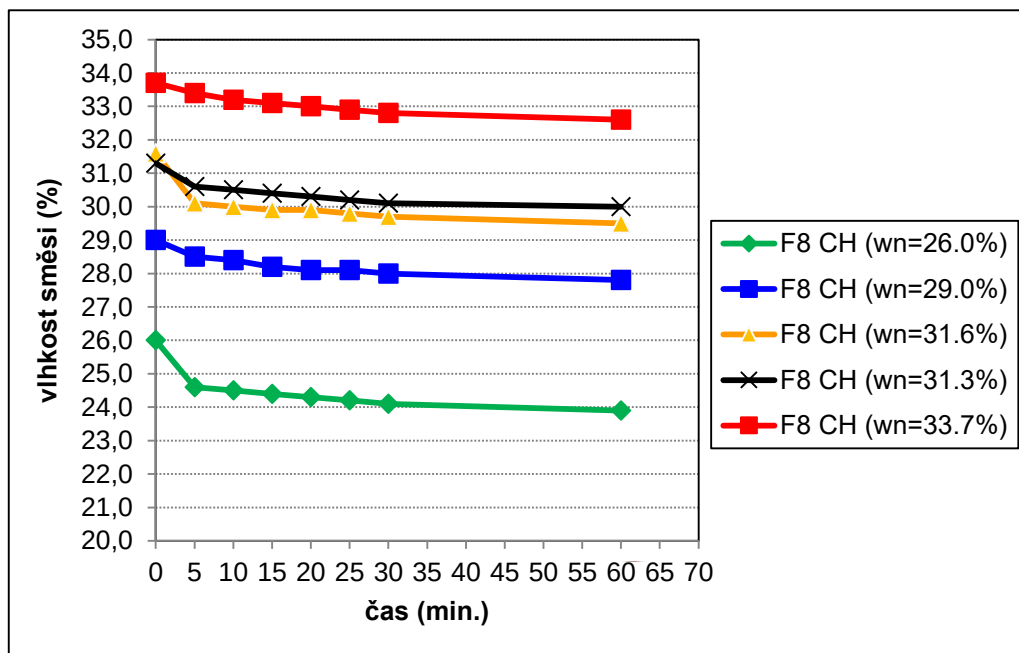
5. Vlastnosti upravených zemin

Vlhkost

Většina pojiv snižuje vlhkost původní zeminy.

Vlhkost upravené zeminy se má pohybovat v intervalu vlhkosti, kdy je možno tuto zeminu zhutnit na požadovanou míru zhutnění. Obecně platí zásada, že se vlhkost upravené zeminy bezprostředně před hutněním nemá lišit od vlhkosti optimální určené Proctorovou standardní zkouškou provedenou na vzorku upravené zeminy o více než jsou meze vlhkostí odpovídající požadované míře zhutnění.

Pokles vlhkosti směsi jílu s vysokou plasticitou s různou počáteční vlhkostí po zamísení s 1% CaO a zrání v délce 60 minut při teplotě 23°C (upraveno dle Pastyrikové et al. 2016)



5. Vlastnosti upravených zemin

Objemová hmotnost

Maximální suchá objemová hmotnost po přidání pojiva se snižuje. Důvodem je nižší objemová hmotnost vápna a cementu než zemin, do kterých se pojivá míchají.

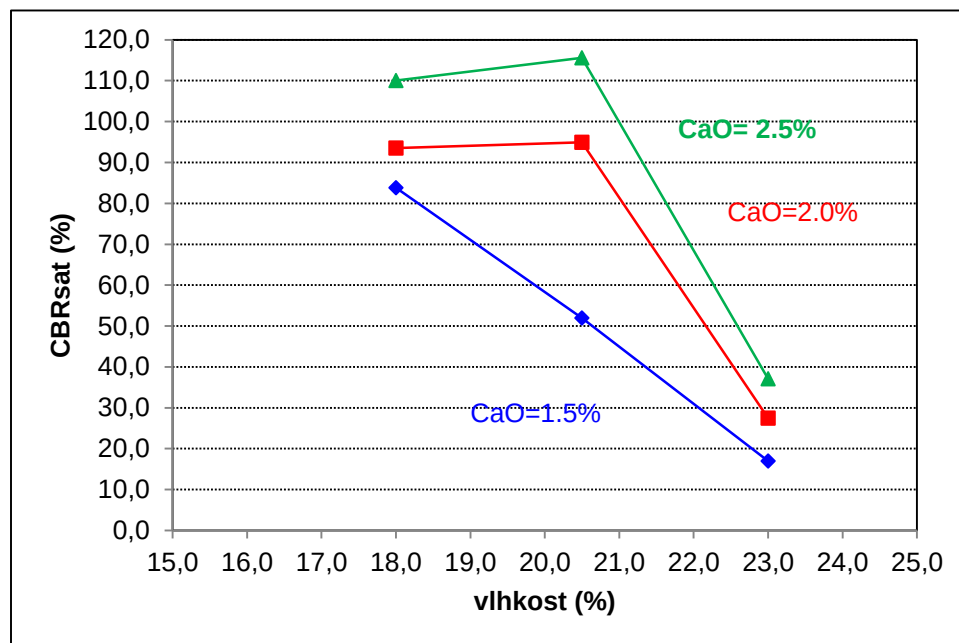
Upravená zemina	ρ_{dmax} (kg.m ⁻³)	rozdíl (kg.m ⁻³)	% změna
Hrabyně - deluviální jíl			
Cl	1853		100,00%
Cl+1.5% CaO	1789	64	96,55%
Cl+2.0% CaO	1787	66	96,44%
Cl+2.5% CaO	1786	67	96,38%
Mošnov - sprašová hlína			
CL	1750		100,00%
CL+1.5% CaO	1694	56	96,80%
CL+2.0% CaO	1701	49	97,20%
CL+2.5% CaO	1699	51	97,09%

Příklady změny objemové hmotnosti upravených zemin oproti zeminám bez úpravy

5. Vlastnosti upravených zemin

Hodnoty okamžitého poměru únosnosti (IBI) a kalifornského poměru únosnosti (CBR) se po přidání pojiva do směsi se zeminou zvyšují v důsledku změny struktury směsi zeminy s pojivem. Nárůst hodnoty okamžitého poměru únosnosti (IBI) a CBR směsi zemin a pojiv závisí na zrnitosti zemin a jejich plasticitě a na pracovní vlhkosti vzorku.

Závislost hodnoty CBR po 28 dnech zrání a 96 hodinách sycení na dávkování vápna pro jednotlivé vlhkosti zemin (CI) - podloží haly pro opravu letadel v Mošnově



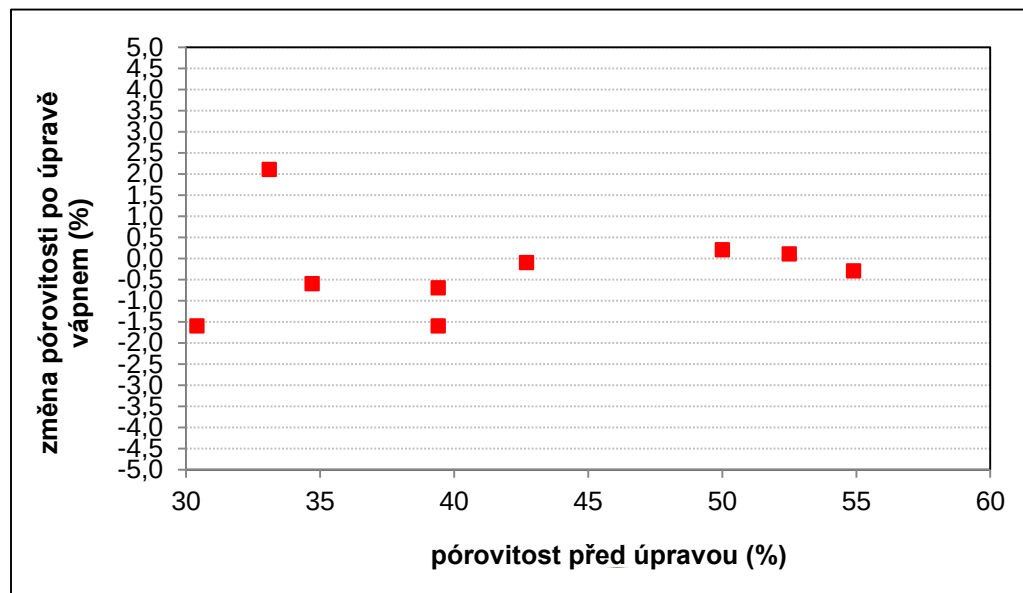
5. Vlastnosti upravených zemin

Pórovitost

Protože při úpravě zemin, především vápnem, dochází k vysušování, je sledování obsahu vzduchových pórů nutné, upravujeme-li zeminy s vlhkostí před úpravou nižší než vlhkost optimální.

Změny pórovitosti v případě zemin na vlhké straně Proctorovy křivky jsou nevýznamné a nemají žádnou závislost. Většina změn pórovitosti na vzorcích upravovaných zemin vápnem bylo do 2% oproti pórovitosti původních zemin. Častější bylo snížení pórovitosti po úpravě oproti pórovitosti před ní.

Závislost změny pórovitosti
před a po úpravě
převhčených zemin vápnem



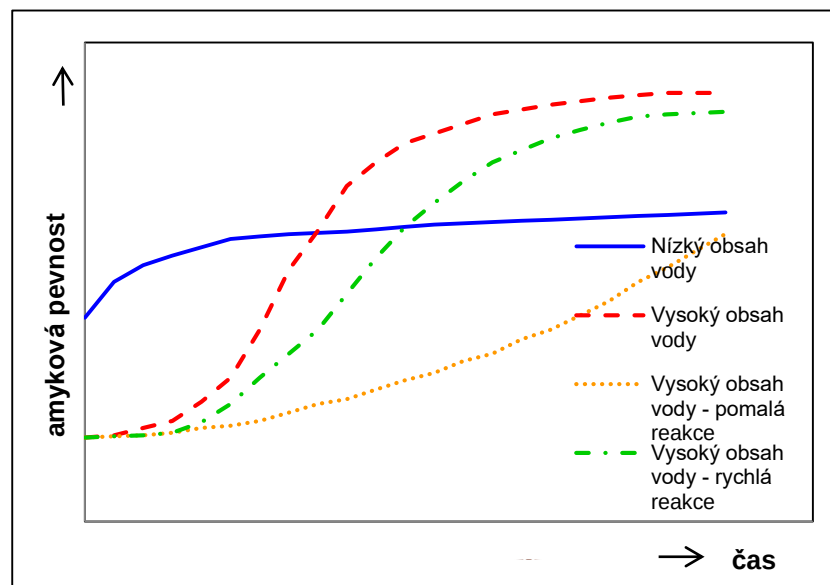
5. Vlastnosti upravených zemin

Smyková pevnost

Smyková pevnost zemin upravených pojivy je obvykle vyšší než smyková pevnost zemin neupravených. Bohužel, neexistuje žádná podrobná studie vlivu množství pojiv na smykovou pevnost v čase.

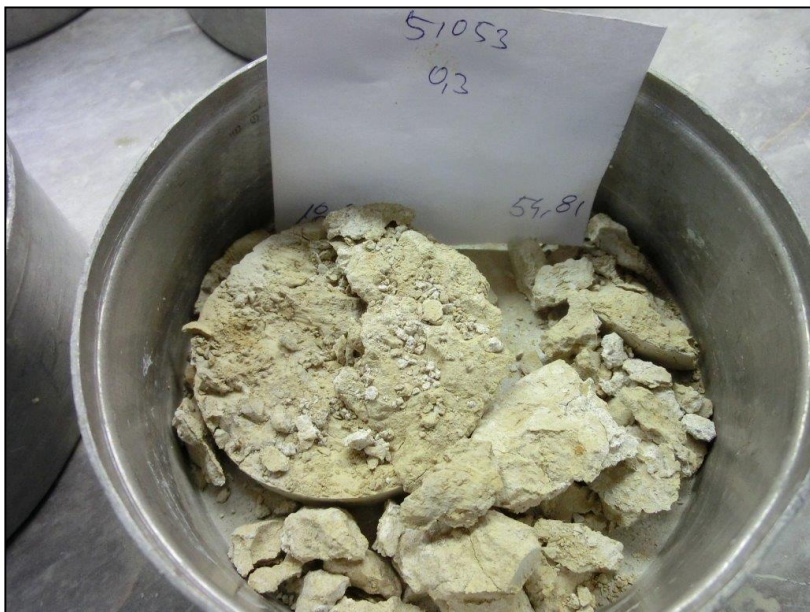
Dosud málo diskutovaným aspektem je volba smykové zkoušky. V případě stabilizovaných zemin, kdy s rostoucí dobou zrání dochází ke zpevňování zeminy s pojivy, je provedení krabicové smykové zkoušky velmi obtížné. Vhodnější pro ověření smykových vlastností zemin upravených pojivy je proto triaxiální zkouška.

Závislost vývoje smykové pevnosti v čase pro zeminy upravené vápnem s nízkou a vysokou vlhkostí a pro pomalé a rychlé pucolánové reakce (upraveno dle Beethema et al. 2013)

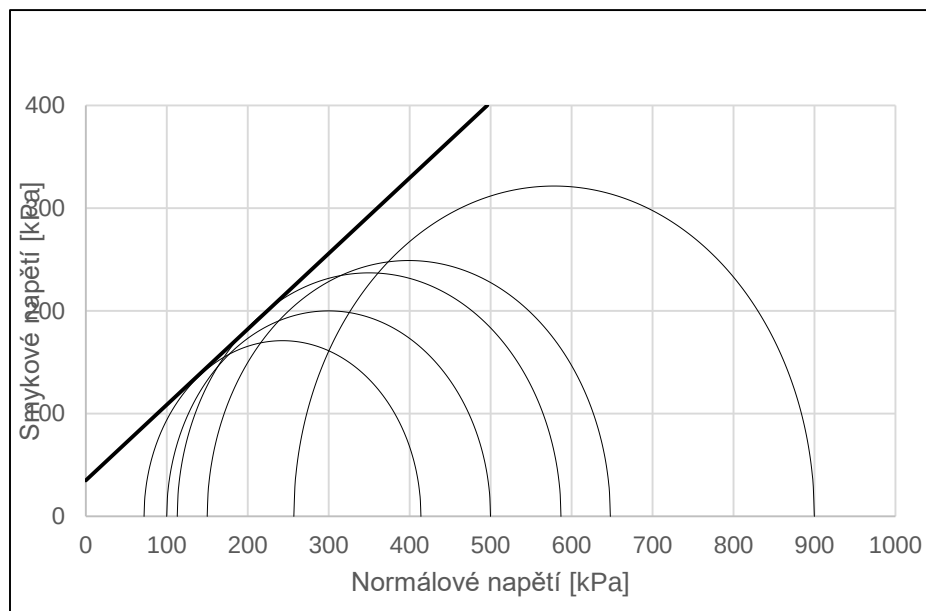


5. Vlastnosti upravených zemin

Smyková pevnost



Charakter vysoce plastického jílu (CH) upraveného 2.5% vápna (km 97.100 dálnice D1 Přerov – Lipník) po 7 dnech zrání a po provedení krabicové smykové zkoušky



Výsledky triaxiální zkoušky CIUP pro mořské jíly (ML) z lokality Aberdeen upravené 5% cementu (upraveno dle Muhunthana a Sarrioserriho 2008)

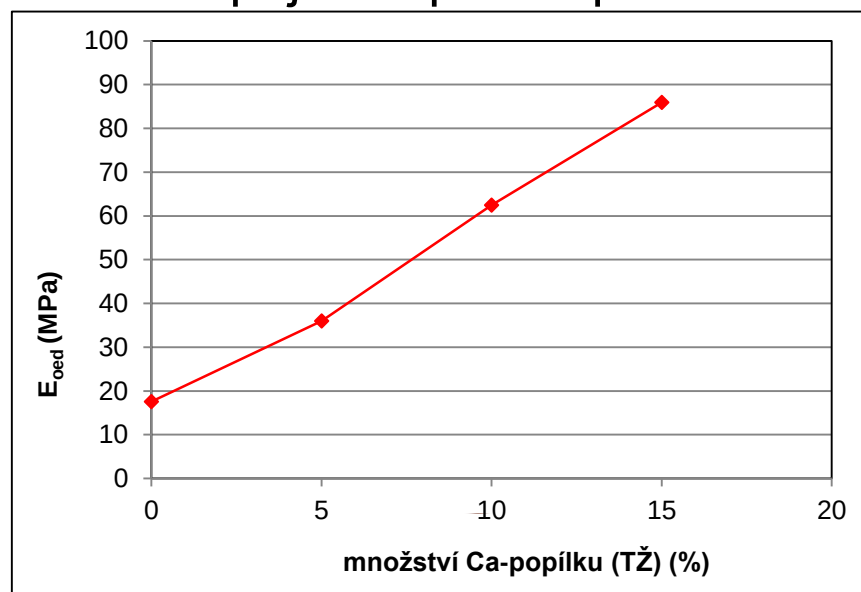
5. Vlastnosti upravených zemin

Modul deformace

Podobně jako existuje poměrně málo výsledků zkoušek smykové pevnosti zemin upravených pojivy, existuje rovněž poměrně málo výsledků zkoušek edometrických..

Ze znalosti procesů, ke kterým dochází při úpravě zemin pojivy (flokulace, chemické reakce, změny plasticitních mezí), můžeme předpokládat, že po úpravě pojivy budou mít zemin vyšší hodnoty modulu deformace, resp. modulu přetvárnosti. Růst hodnoty edometrického modulu závisí především na vlastnostech neupravené zeminy, množství pojiva a pravděpodobně nejméně na době zrání.

Závislost hodnoty edometrického modulu přetvárnosti sprašových hlín (CI) upravených vápenatým popínkem z TŽ Třinec na množství popínku v oboru napětí 200-300 kPa



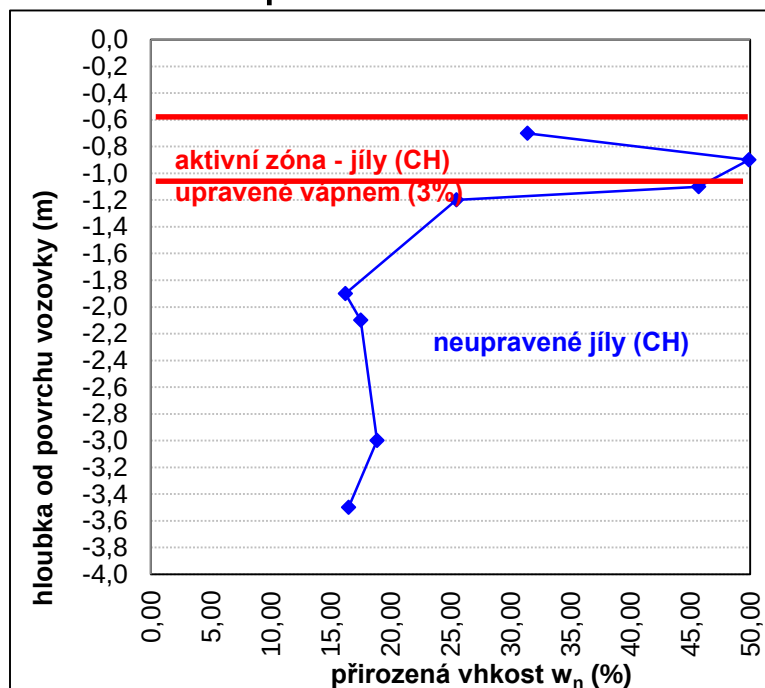
5. Vlastnosti upravených zemin

Sání

Problematika sání u upravených zemin není dosud dostatečně zpracována, ale platí pro ně stejná teorie jako pro ostatní zeminy, resp. partikulární látky. Není ani přesně znám hloubkový dosah sání od upravených zemin pro jednotlivé typy zemin, aby bylo možno stanovit, do jaké vzdálenosti od báze upravovaných zemin lze uvažovat dosah kapilární vztlínivosti za bezpečný.



Silnice I/56 Příbor – obchvat, deformace vozovky způsobené objemovými změnami eluviálních jíílů (11/2011)



Závislost přirozené vlhkosti zemin na hloubce od povrchu komunikace v místě deformací vozovky na silnici I/58 u Příbora

5. Vlastnosti upravených zemin

Objemové změny

Úprava zemin pojivy redukuje objemové změny. Příčinou objemových změn v zeminách upravených pojivy mohou být:

- úprava objemově nestálých zemin (např. bobtnavých jílů) jílů nebyla dostatečná;
- úprava zemin s vysokým obsahem sulfátů a sulfidů nebyla dostatečná;
- došlo k degradaci zeminy upravené pojivy jinými vlivy (např. vlivem sání).

Náchylnost k bobtnání jemnozrnných zemin se snižuje s rostoucím množstvím vápna při úpravě. Při úpravě vápnem se snižuje index plasticity a uvolňuje se voda vázaná v jílových minerálech. Vlivem flokulace se vytváří pevná kostra, která je odolná vůči objemovým změnám, což přispívá k redukci bobtnacího potenciálu.

5. Vlastnosti upravených zemin

Propustnost

Koeficient propustnosti zemin upravených pojivy ve srovnání se zeminami neupravenými závisí na množství pojiva, době zrání a úrovni, ze které je upravená zemina ve vrstvě odebírána. Výsledky zkoušek ukazují, že změny v propustnosti neupravených a upravených zemin se pohybují v rozmezí jednoho, případně dvou řádů.

Výsledky zkoušek propustnosti upravených zemin mají význam u zemních konstrukcí v kontaktu s vodou (zemní hráze, násypy v kontaktu s vodou apod.). U těchto konstrukcí je nezbytné posuzovat propustnost upravených zemin společně s posouzením jejich odolnosti proti mrazu a vodě.

Úsek kanálu Friant-Kern Canal (stav v listopadu 2010), v levé části se nacházejí upravené zeminy, v pravé části původní neupravené zeminy chráněné štěrkem (převzato z Herriera et al. 2014)



5. Vlastnosti upravených zemin

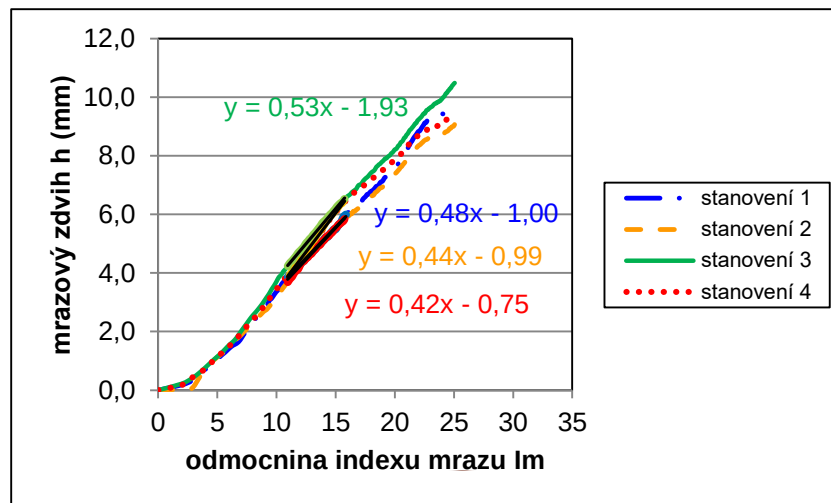
Namrzavost a odolnost proti účinkům mrazu

Namrzavost zeminy se projevuje postupným zvětšováním objemu při teplotách pod bodem mrazu při stálém přísunu vody. Výsledkem namrzavosti zemin je mrazový zdvih.

Účinek úpravy zemin vápnem na jejich namrzavost závisí na obsahu prachové složky. Zatímco v případě jílu jsou zeminy po úpravě vápnem povětšinou nenamrzavé, v případě siltů, čistých spraší a dalších zemin s převahou prachovité složky, je účinek vápna na jejich namrzavost velmi sporná. Ve většině popsanych případů jsou prachovité zeminy po úpravě vápnem namrzavé.

Závislost mrazového zdvihu na odmocnině indexu mrazu vzorku zvětralých jílovců (F6 CI) z výkopu tunelu Prchalov s podílem 50% prachových částic upravených 4% pojiva SM70 dle ČSN 72 1191).

Upravené zeminy byly hodnoceny jako namrzavé ($\beta=0.48$).



6. Otevřené otázky a výzvy

6. Otevřené otázky a výzvy

Třebaže se problematikou úprav zemin pojivy zabývá odborná veřejnost déle než 50 let, stále nejsou jednoznačně dořešeny zásadní otázky, které byly postulovány již v 60.letech 20.století. Z hlediska smykové pevnosti upravených zemin stojí před odbornou veřejností následující úkoly:

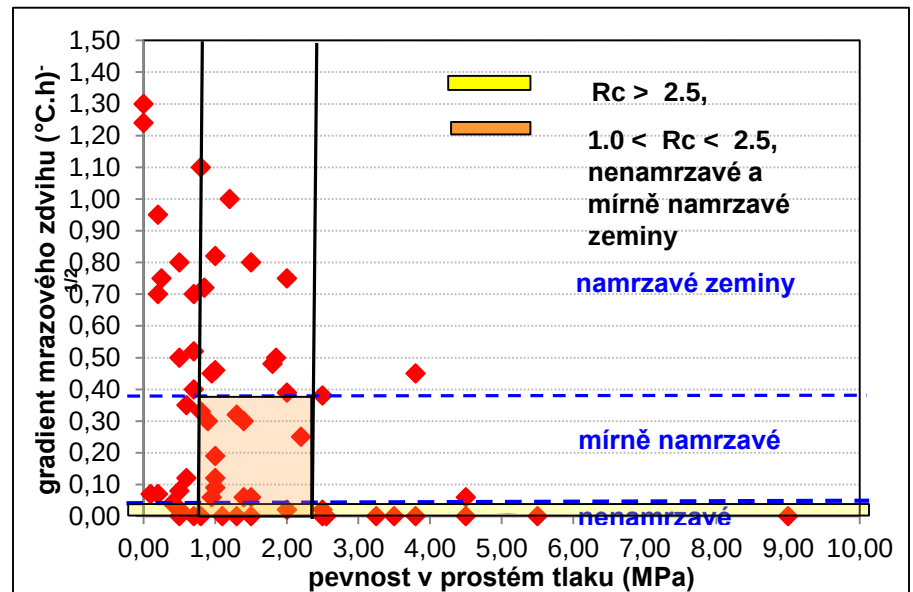
- upřesnit metodiku smykových zkoušek zemin upravených jednotlivými pojivy;
- stanovit doporučení, jaké parametry smykové pevnosti používat v numerickém modelování zemních těles;
- ověřit, jak se mění smyková vlastnosti upravených zemin jednotlivými typy pojiv v čase například pomocí zkoušek upravených zemin odebraných na stavbách po 20 a více letech od zabudování;
- jak se mění smykové vlastnosti zemin upravených jednotlivými typy pojiv vlivem účinků mrazu a jiných negativních faktorů.

6. Otevřené otázky a výzvy

Namrzavost zemin upravených pojivy

- Účinek úpravy zemin vápnem na jejich namrzavost závisí na obsahu prachové složky. Ve většině popsanych případů jsou prachovité zeminy po úpravě vápnem namrzavé. Namrzavost upravených zemin rovněž závisí na množství vápna či jiného pojiva.
- Vztah mezi hodnotou CBR a odolností zemin vůči účinkům mrazu nebyla jednoznačně prokázána. Bylo by ji možné aplikovat, pokud bychom znali závislost mezi hodnotami CBR a pevnosti v prostém tlaku.
- Francouzský výzkum prokázal, že upravené zeminy vápnem s pevností v prostém tlaku nad 2.5 MPa jsou nenamrzavé.

Závislost mrazového zdvihu na hodnotě pevnosti v prostém tlaku (R_c) vápnem upravených zemin spolu s hodnocením namrzavosti upravených zemin (upraveno dle Herriera et al. 2018)



7. Závěry

Závěry

Výzkum a vývoj jdou velmi rychle dopředu a v některých ohledech se jen velmi obtížně odhaduje budoucí směr.

Pojiva

I nadále zůstanou základními pojivy pro úpravu zemin nehašené vápno a cement. Lze předpokládat významný nárůst podílu hydraulických silničních pojiv, která budou obsahovat především podíly popílků a granulované vysokopecní strusky, případně jiných složek, které se v současnosti zatím ověřují pouze na experimentální bázi.

Zeminy a materiály určené pro úpravu

Určitě se rozšíří úpravy zemin i na zeminy, které se v současné době na stavbách neupravují hlavně z důvodu vysokých nákladů a nejistého výsledku úpravy, a výsledky jejichž úprav mají zatím akademický charakter. Jak dokazují prezentované výsledky výzkumů z celého světa, hledají se možnosti úpravy vlastností vysoce plastických jílů, organických zemin, zasolených zemin a dalších zemin na okraji zájmu (*marginal soils*).

Závěry

Popis principů vedoucích ke změnám vlastností zemin

Třebaže principy úpravy zemin jsou známy více než 50 let – vysušování, flokulace, tuhnutí a tvrdnutí, očekáváme podrobný výzkum na mikro a nano úrovni, který povede k detailnímu popisu jevů probíhajících při úpravě zemin podobně jako je tomu v případě tuhnutí a tvrdnutí cementu. Na rozdíl od cementové pasty je však systém pojivo – zemina velmi nehomogenní a při výzkumu procesů na mikro a nano úrovni obtížně popsatelný.

Vlastnosti upravených zemin

Ruku v ruce s výzkumem principů úprav zemin pojivy bude probíhat i výzkum vlastností zemin po úpravě jednotlivými pojivy. Pozornost bude určitě soustředěna na smykovou pevnost, odolnost proti účinkům mrazu, sání a další, dosud méně analyzované vlastnosti zemin po úpravě pojivy. Rozsáhlejší výzkumy očekáváme při pověřování vývoje vlastností upravených zemin v čase.

Závěry

Použití upravených zemin v zemních konstrukcích

Dominantní bude i v budoucnu aplikace upravených zemin v zemních pracích na dopravních a pozemních stavbách. Lze očekávat i prolomení konzervativního přístupu v oblasti vodohospodářských staveb, v nejbližší budoucnosti alespoň při výstavbě ochranných hrází nebo méně exponovaných hrází (např. suchých poldrů). Bude přibývat i aplikací s vyztuženými zemními konstrukcemi.

Technologie úpravy zemin

Zde lze očekávat postupný vývoj strojů a zařízení pro úpravy zemin, ať již jde o dávkovače a zemní frézy nebo o míchací centra.

Úprava zemin je úzce spjatá s udržitelným rozvojem lidské společnosti a optimálním využíváním zdrojů při zemních pracích. Je až s podivem, jak malá množství pojiv (často jen jednotky procent) postačí k modifikaci původní zeminy a ke změně jejich vlastností. Přejme si další rozvoj úprav zemin ku prospěchu všech aplikací v zemních pracích.

Děkuji Vám za pozornost