

Úprava vlastností zemin vápnem a volné vápno obsahujícími produkty

*Projekt TAČR s názvem FR-TI4/714
Výzkum a inovace úprav horninového
prostředí vápennými aditivy*



Když jsou podceněny přírodní podmínky a nejsou plně známy vlastnosti a chování zeminy v dané lokalitě, může již za plného provozu dojít k nepříjemnému překvapení.

Problémům je třeba předcházet. Proto vznikl projekt FR-TI4/714, na němž VÚ maltovin spolupracuje s firmami ARCADIS a Valbek.

Na snímku je odběr vzorků na sesuvu svahu zářezu D11 v lokalitě Dobřenice

Cílem projektu je mimo jiné nalézt spolehlivé postupy ke zjištění chování zemin při úpravách vápnem, optimalizovat spotřebu vápenných aditiv a nalézt a vyzkoušet nová vápenná aditiva. K tomu účelu je prováděna řada zkoušek jak v laboratořích Výzkumného ústavu maltovin Praha a Centra materiálového výzkumu v Brně, tak v geomechanických laboratořích firmy ARCADIS.

Přídavek vápna do zeminy se projeví třemi způsoby:

- 1. Okamžitý pokles obsahu volné vody v důsledku chemické reakce vody s volným vápnem**
- 2. Změna obsahu pevně vázané vody a s tím spojená flokulace jílových částic**
- 3. Chemická reakce volného CaO s reaktivní formou SiO₂**

Naše aktivity v rámci projektu jsou směřovány hlavně na reakce SiO₂ a dalších reaktivních složek zemin s volným CaO, tedy především reakce pucolánového charakteru.

Obsah reaktivního SiO_2 v zeminách je velmi proměnlivý. Zeminy nejsou pucolány v pravém slova smyslu, při zkoušce podle ČSN EN 196-5 projevují prokazatelnou pucolanitu až při obsahu reaktivního SiO_2 nad 25 %. Vysoký obsah reaktivního SiO_2 se mimo jiné projevuje zvýšenou hodnotou optimálního množství vápna, stanoveného metodou měření pH (OMV).

Seznam testovaných zemin a jejich chemické složení včetně obsahu reaktivního SiO_2 je v následujících tabulkách.

Jako alternativní zdroj volného CaO byly zkoušeny odprašky z by-passu cementářské rotační pece (BPD LCČ) a pro obsah volného CaO současně s reaktivním SiO_2 fluidní popílek z elektrárny Komořany.

Tabulka č. 1: Přehled problémových lokalit, kde byly odebrány vzorky

dopravní stavba	úsek	lokalita	zatřídění podle ČSN 73 6133	makroskopická charakteristika
D 11	Chýšť - Osičky	Dobřenice	F6 CI až F8 CH	jíl, střední až vysoká plasticita
žel. trať č. 270	Třebovice v Č. – Rudoltice v Č.	Třebovice	F8 CV	jíl, velmi vysoká plasticita
výstavba D 8	Lovosice – Řehlovice	Řehlovice	S4 SM	hlinitý písek
výstavba D 3	Tábor - Soběslav	Planá n. L.	F7 MV	hlína, velmi vysoká plasticita
výstavba R7	Droužkovice – Spořice	Spořice	F8 CE	jíl, extrémně vysoká plasticita
žel. trať č. 270	Lipník n. B. – Drahotuše	Lipník n.B.	F8 CH	jíl, vysoká plasticita
žel. trať č. 300	Brno Chrlice – Sokolnice	Sokolnice, křížení žel. trati se silnicí	F6 CI	jíl, střední plasticita

Tabulka č. 2: Zeminy a další vzorky – chemický rozbor

stanovení	jednotka	vzorek č. - nalezeno									
		Dobřenice B 2013/27	Třebovice A 2013/30	Řehlovice 9 2013/34	Planá S4-1 2014/2	Spořice S1-4 2014/3	Lipník S1-9 2014/4	Sokolnice S1-1 2014/5	FP EKo 2014/18	BPD LCČ 2014/122	BPD Hranice 2014/172
ztráta sušením 40 °C	% hm.	15,39	23,39	30,41	1,40	1,51	1,06	0,52			
ztráta sušením 105 °C	% hm.								0,38	0,49	0,32
ztráta žháním 1000 °C	% hm. suš.	7,60	12,24	16,56	8,66	8,41	10,14	18,52	3,65	17,84	34,41
SiO ₂ veškerý	% hm. suš.	72,07	54,86	48,95	55,28	55,41	56,66	45,25	41,07	2,17	10,72
Al ₂ O ₃	% hm. suš.	9,88	15,63	12,85	21,45	20,79	13,52	8,75	21,11	3,66	2,96
Fe ₂ O ₃	% hm. suš.	3,99	5,52	11,01	7,09	6,51	5,71	3,44	6,71	1,41	2,08
TiO ₂	% hm. suš.	0,73	0,82	3,98	1,28	1,15	0,80	0,60	1,32	nest.	nest.
CaO	% hm. suš.	1,41	5,23	1,96	0,54	1,34	6,73	17,26	17,88	43,48	40,20
MgO	% hm. suš.	0,73	1,74	2,90	0,96	1,14	1,75	2,73	0,94	0,67	0,65
Na ₂ O	% hm. suš.	0,54	0,16	0,14	0,13	0,19	0,56	0,59	0,27	0,43	0,25
K ₂ O	% hm. suš.	2,11	3,17	1,41	2,43	2,39	2,35	1,81	1,30	15,38	10,30
Cl ⁻	% hm. suš.	0,05	< 0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	12,47	5,38
F ⁻	% hm. suš.	0,14	0,07	0,16	0,23	0,67	0,37	0,70	0,10	0,92	0,29
S ^{veškerá} jako SO ₃	% hm. suš.	0,07	0,45	0,01	0,90	0,10	0,01	0,03	4,98	5,73	3,42
KNP (KOH)	% hm. suš.	55,34	30,37	6,24	23,89	26,09	38,37	36,23	8,04	2,07	7,19
SO ₄ ²⁻ jako SO ₃	% hm. suš.	< 0,01	0,23	< 0,01	0,83	< 0,10	< 0,10	< 0,10	4,82	nest.	nest.
S ²⁻ jako SO ₃	% hm. suš.	< 0,05	0,20	< 0,05	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	nest.	nest.
SO ₃ ²⁻ jako SO ₃	% hm. suš.	nest.	nest.	nest.	nest.	nest.	nest.	nest.	0,10	nest.	nest.
SiO ₂ akt.	% hm. suš.	16,73	24,49	42,71	31,39	29,32	18,29	9,02	33,03	0,10	3,53
CaO _{volné}	% hm. suš.	< 0,10	0,28	< 0,10	< 0,10	0,56	0,56	0,56	5,33	13,81	5,40
TOC	mg/kg suš.	9740	7380	< 500	3240	1910	2440	2970	14270	nest.	nest.
Na ₂ O _{ekv.}	mg/kg suš.				1,73	1,76	2,11	1,78	1,45	10,55	7,03

Projevy pucolánové reakce jsou závislé na obsahu reaktivního SiO_2 v dané zemině. Pucolánová reakce byla testována podle ČSN EN 196-5 tak, že byla porovnávána reakce čistého CEM I s reakcí směsí CEM I s 30 % zkoušené zeminy. Kde zeminy měly nižší obsah reaktivního SiO_2 , tam byla zemina obohacována přídatkem popílku nebo spongilitu. Popílek sám se ukázal jako málo účinný, obsah reaktivního SiO_2 prakticky nezvyšoval. Daleko lepší je spongilit s téměř 50 % reaktivního SiO_2 .

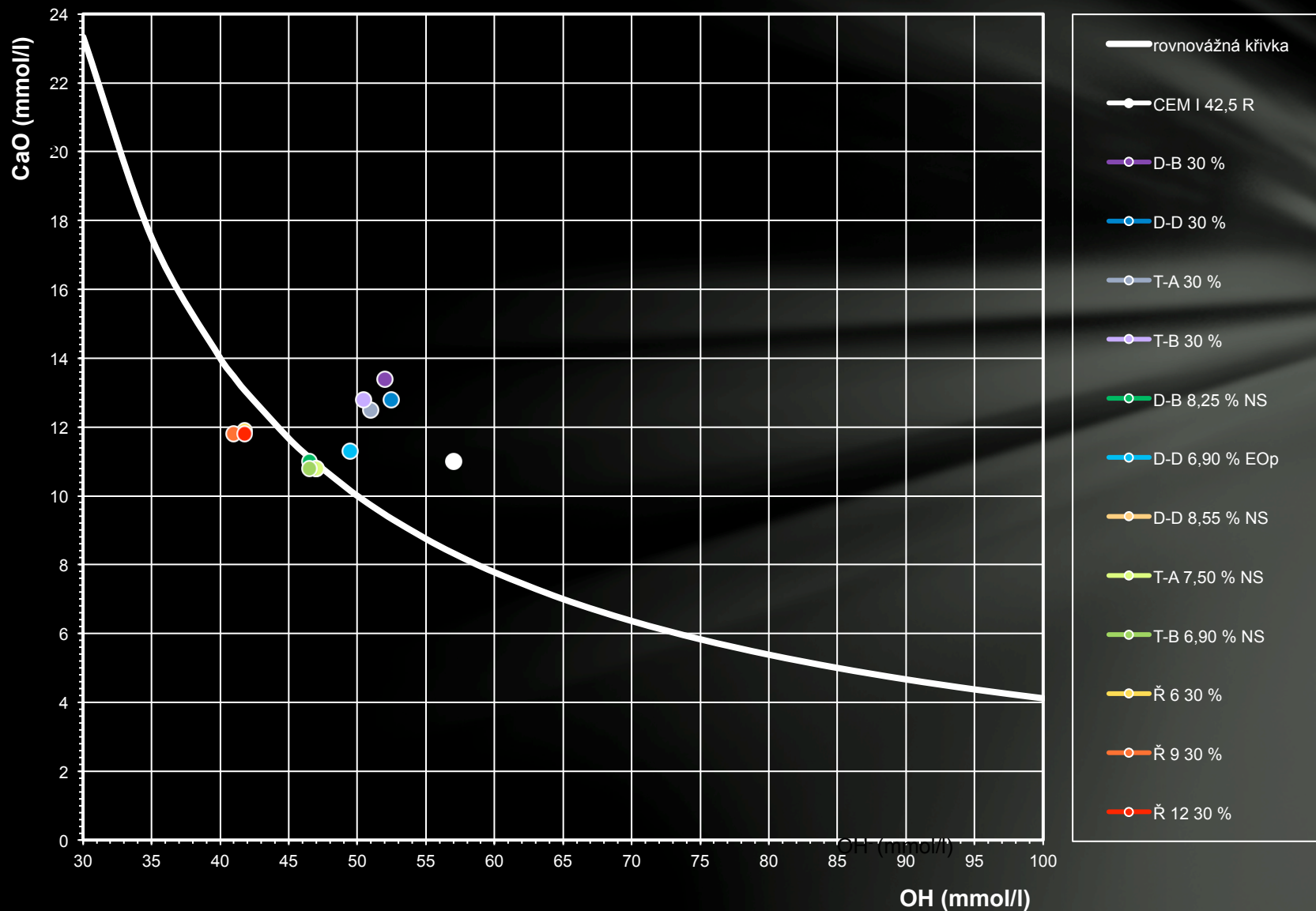
Obsah reaktivního SiO_2 :

Popílek Opatovice: 23,08 % hm. suš.

Spongilit Nové Strašecí: 46,83 % hm. suš.

Nejvýraznější pucolánovou reakci vykazuje samotná zemina z lokality Řehlovice, následují pak zeminy s přídatkem spongilitu. Přídatkem popílku prakticky nevedl ke změnám. U spongilitu byla velikost přídatku volena tak, aby obsah reaktivního SiO_2 byl mezi 25 a 30 % hm. suš. Body těchto směsí leží v těsném sousedství rovnovážné izothermy (viz následující graf.

Obr. č. 1: Výsledky zkoušek pucolanity



S obsahem amorfního reaktivního SiO₂ souvisí kromě pucolánové aktivity i sorbční kapacita zemin. Ta je ale také závislá na obsahu a druhu přítomných jílových minerálů, zejména pak montmorillonitu. Amorfní SiO₂ a montmorillonit mají rozhodující vliv na vlastnosti a chování jemnozrnných zemin tříd F a M.

Sorbční kapacita (SK) se stanovuje upraveným postupem podle ČSN 17 1076. Podle tohoto postupu se ve výluhu ze zeminy stanovuje množství sorbčně vázaných zásad (SZ) a množství iontů rozpustných solí (SS). Sorbční kapacita se vypočítá jako rozdíl mezi množstvím sorbčně vázaných zásad a množstvím iontů rozpustných solí:

$$\text{SK} = \text{SZ} - \text{SS} \text{ (mmol/100 g)}$$

Tabulka č. 3: Sorbční kapacita vzorků

SZ [mmol/100 g vzorku]	SS [mmol/100 g vzorku]	SK [mmol/100 g vzorku]	označení vzorku
10,9	0,68	10,2	Dobřenice B (2013/27)
9,8	0,79	9,0	Dobřenice D (2013/28)
22,3	0,26	22,0	Řehlovice 6 (2013/33)
23,6	0,23	23,4	Řehlovice 9 (2013/34)
22,0	0,25	21,8	Řehlovice 12 (2013/35)
10,1	0,49	9,6	Třebovice A (2013/30)
8,8	0,44	8,4	Třebovice B (2013/31)
15,7	0,75	14,9	270 Lipník 2014/4
10,3	0,66	9,6	300 Sokolnice 2014/5
16,1	0,24	15,9	D3 Planá n. L. 2014/1
13,8	0,16	13,6	D3 Planá n. L. 2014/2
14,3	0,36	13,9	R7 Spořice 2014/3

Z hlediska vzniku pucolánových reakcí je úplně jedno, z jakého zdroje volné či reaktivní vápno pochází. Důležité je, aby jeho množství bylo dostatečné pro nastartování a další průběh reakce mezi CaO a reaktivními formami Al_2O_3 a SiO_2 . Stejně tak je jedno, zda reaktivní SiO_2 je přirozenou součástí zeminy nebo bylo do ní dodáno např. ve formě popílku, mikrosiliky či jiných materiálů.

Obohacení zeminy o reaktivní SiO_2 lze jednoduše realizovat přidavkem popílku. Musí se ale jednat o popílek na reaktivní SiO_2 bohatý. To bývají většinou popílky z fluidního topeniště. Pro naše zkoušky jsme zvolili popílek z elektrárny Komořany.

Jako vápenatý materiál vhodný k úpravě vlastností zemin jsou v současné době zkoušeny odprašky z by-passu z cementářské rotační pece. Kromě toho, že obsahují volné CaO (tabulka č. 2), mají zároveň i hydraulické vlastnosti, což má za důsledek zlepšení fyzikálně mechanických vlastností ošetřené zeminy.

Patrný vliv na vlastnosti zemin byl zjištěn u hutnitelnosti a únosnosti v tlaku. Jsou sledovány i další veličiny, výsledky nejsou ale zatím vyhodnoceny.

Hutnitelnost byla zkoušena metodou Proctor standard. Vzorek o předem stanoveném obsahu vody je v normalizované nádobě hutněn pěstem za použití definované hutnicí energie. Zkouška se provádí při různých obsazích vody. Po zhutnění a vysušení vzorku se stanovuje jeho objemová hmotnost. Závislost objemové hmotnosti na obsahu vody se vynáší do grafu a stanovuje se tak optimální obsah vody pro hutnění.

Únosnost v tlaku se stanovuje jako tzv. kalifornský poměr únosnosti (CBR). Metoda je založena na vtlačování speciálního válečku do zhutněné zeminy při optimální vlhkosti dle výsledku zkoušky Proctor standard. Měří se síla nutná k dosažení normou určené hloubky penetrace, přičemž rychlost penetrace se má udržovat na hodnotě 1,27 mm/sec. Hodnota CBR je pak poměr mezi naměřenou silou a referenční silou pro hloubku penetrace 2,5 mm, vyjádřený v %. Za vyhovující se považuje hodnota CBR 15 % a vyšší.

Obr. č. 2: Zkoušky hutnitelnosti Proctor standard

Řehlovice

w (%):	53,4	46,1	41,1	37,0	50,4	50,4
ρ_d (kg/m ³):	1111	1197	1151	1127	1154	1155

Řehlovice + 30% popílku Komořany

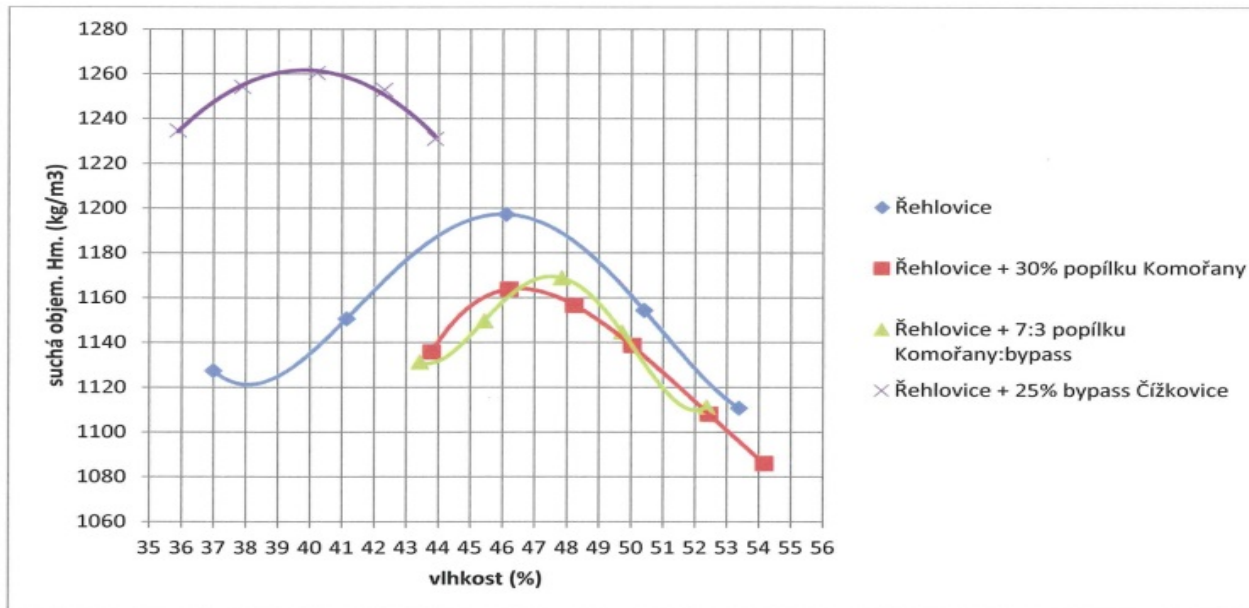
w (%):	48,2	50,0	54,2	52,4	46,2	43,8
ρ_d (kg/m ³):	1157	1139	1086	1108	1164	1136

Řehlovice + 7:3 popílku Komořany:bypass

w (%):	43,4	45,4	47,8	49,7	52,4
ρ_d (kg/m ³):	1131	1150	1169	1145	1111

Řehlovice + 25% bypass Čížkovice

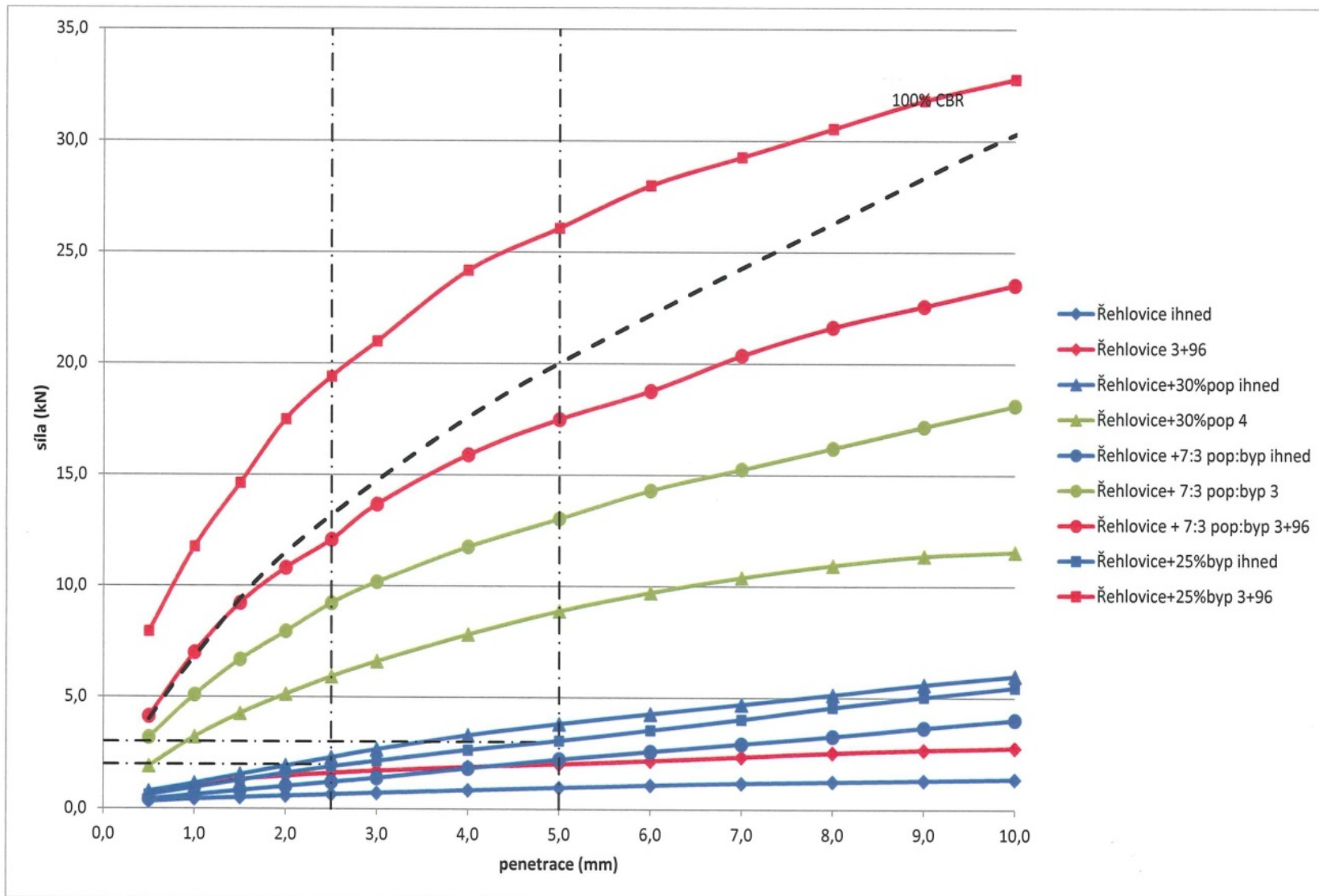
w (%):	37,9	40,2	42,3	43,9	35,9
ρ_d (kg/m ³):	1254	1261	1253	1231	1235



Tabulka č. 4: Výsledky zkoušek únosnosti CBR

	Řehlovice		Řehlovice + 30% popílku		Řehlovice +7:3 popílek:bypass			Řehlovice+25% bypass	
hloubka	penetrace		penetrace		penetrace			penetrace	
penetrace	ihned	3 dny zrání a 96 h satur.	ihned	4 dny zrání nesyceno	ihned	po 3 dnech zrání	po 3 dnech zrání a 96 h saturace	ihned	3 dny zrání a 96 h satur.
(mm)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)	síla (kN)
0,5	0,3	0,58	0,76	1,90	0,41	3,18	4,14	0,61	7,95
1,0	0,4	1,03	1,13	3,21	0,61	5,09	7,00	0,94	11,77
1,5	0,5	1,30	1,53	4,26	0,81	6,68	9,23	1,27	14,63
2,0	0,6	1,47	1,91	5,13	0,99	7,95	10,82	1,59	17,50
2,5	0,6	1,60	2,29	5,92	1,18	9,23	12,09	1,88	19,40
3,0	0,7	1,71	2,65	6,61	1,38	10,18	13,68	2,14	21,00
4,0	0,8	1,88	3,29	7,82	1,81	11,77	15,91	2,63	24,18
5,0	1,0	2,02	3,81	8,89	2,22	13,04	17,50	3,05	26,09
6,0	1,1	2,17	4,27	9,72	2,57	14,31	18,77	3,54	27,99
7,0	1,2	2,35	4,70	10,40	2,92	15,27	20,36	4,02	29,27
8,0	1,2	2,54	5,14	10,95	3,27	16,22	21,63	4,56	30,54
9,0	1,3	2,67	5,60	11,38	3,65	17,18	22,59	5,03	31,81
10,0	1,4	2,76	5,98	11,56	4,01	18,13	23,54	5,46	32,77
CBR (%)	4,8	12,10	19,10	44,90	11,10	69,9	91,60	15,30	147,00
Zdánlivá hustota pevných částic (odhad)	2883	2883	2700	2700	2700	2700	2700	2760	2760
Vlhkost	46,5	46,7	45,5	45,5	48,3	48,0	48,7	42,8	43,5
Objemová hmotnost vlhká	1751	1754	1692	1692	1725	1714	1722	1794	1803
Objemová hmotnost suchá	1196	1196	1163	1163	1163	1158	1158	1257	1257
Pórovitost	58,5	58,5	56,92	56,9	56,92	57,12	57,1	54,5	54,5
Stupeň nasycení	0,95	0,95	0,93	0,93	0,99	0,97	0,99	0,99	1,00

Obr. č. 3: Výsledky zkoušek únosnosti CBR



Jednoznačně nejlepších výsledků zde bylo dosaženo s čistým BPD LCČ a bude velmi zajímavé porovnání s odpovídající dávkou vápna VČS. Tyto zkoušky zatím ještě nejsou ukončeny. Kromě toho vzorky po těchto zkouškách budou dále zkoumány, bude zjišťována přítomnost možných produktů pucolánových reakcí pomocí rtg-difrakce, případně dalšími zkouškami. Záměrem je vypracování použitelných metod předpovídání chování problémových zemin ještě před zahájením zemních prací na dané konkrétní stavbě.

DĚKUJI ZA POZORNOST