

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



## **Vliv vápna na konzistenční meze prachovité zeminy**

Effect of Added Lime on Consistency Limits of Silty Clay

Viktor Sotorník

Vedoucí: Ing. Jan Boháč, CSc.

Konzultant: Mgr. Zdeňka Metelková

Praha, srpen 2011

## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Úvod a cíl práce</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Vápno</b> .....	<b>3</b>
2.1. Použití vápna v dějinách .....	3
2.2. Definice vápna .....	4
<b>3. Působení vápna v zeminách</b> .....	<b>5</b>
3.1. Okamžité reakce .....	5
3.2. Dlouhodobé reakce.....	6
<b>4. Vliv mineralogie zeminy na její konzistenční meze</b> .....	<b>7</b>
<b>5. Nejmenší množství vápna potřebné pro vznik pucolánových reakcí v zemině</b> .....	<b>9</b>
5.1. Stanovení pomocí konzistenčních mezí a jednoosé pevnosti.....	9
5.2. Stanovení pomocí měření pH.....	12
5.3. Jiné metody stanovení .....	13
5.4. Porovnání metod stanovení.....	14
<b>6. Konzistenční meze</b> .....	<b>15</b>
<b>7. Použité materiály</b> .....	<b>16</b>
7.1. Zemina .....	16
7.2. Vápno .....	17
<b>8. Laboratorní zkoušky</b> .....	<b>17</b>
8.1. Příprava vzorků .....	17
8.2. Stanovení konzistenčních mezí .....	19
8.2.1. Mez tekutosti.....	19
8.2.2. Mez plasticity.....	20
<b>9. Pozorování a výsledky</b> .....	<b>21</b>
9.1. Viditelné změny zeminy .....	21
9.2. Konzistenční meze .....	25
9.3. pH test .....	28
<b>10. Závěr</b> .....	<b>29</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>30</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>31</b>
<b>Příloha 1</b> .....	<b>33</b>

## 1. Úvod a cíl práce

V rámci své bakalářské práce jsem se podílel na projektu GAUK 62008 Vliv příměsi CaO na texturu a propustnost jílovitých zemin. Cílem této bakalářské práce je pozorování změn konzistenčních mezí u sprašové zeminy ze zemníku Horky nad Jizerou s množstvím přidaného vápna a dobou zrání. Z vývoje konzistenčních mezí bude stanoveno nejmenší množství vápna potřebné pro vznik pucolánových reakcí v zemině. Tato hodnota pak bude porovnána s hodnotou již dříve stanovenou pomocí pH testu.

## 2. Vápno

### 2.1. Použití vápna v dějinách

Jak uvádí Kotlík et al. (2001), první prokazatelné použití vápna pochází z Egypta, kde se vápno ve směsi se sádrou používalo při stavbě pyramid. Odtud se používání vápna rozšířilo do Mezopotámie, Řecka, Říma a Číny. Největší rozvoj použití vápna nastal v Římě, kde díky nalezištím vulkanických materiálů byla objevena hydraulická pojiva. Neznámějším materiálem s obsahem reaktivních minerálů byl vulkanický písek z okolí italského Puzzoli. Po pádu římského impéria také končí doba rozvoje použití převážně hydraulických druhů vápen. Jejich znovuobjevení a další rozvoj spadá až do 16. století

V Českých zemích je použití vápna známé až ze středověku. Podle Helana a Klementa (1960) poprvé použil vápno kníže Boleslav při stavbě hradu v roce 932. Již v roce 999 vlastnil Břevnovský klášter vápenku. Za Karla IV. došlo k rozvoji použití vápna, vyrábělo se hlavně v okolí Prahy. Od druhé poloviny 19. století se na našem území vápno začalo vyrábět průmyslovým způsobem. Rozšíření vápna do různých průmyslových odvětví pak spadá do doby po 2. světové válce.

Nejširší použití má vápno dnes v chemickém průmyslu při výrobě celé řady produktů (např. papíru, barviv), při úpravě vody nebo výrobě cukru. V zemědělství se vápno používá především pro úpravu pH půdy, v energetice se využívá při odsíření tepelných elektráren. Ve stavebnictví pak k výrobě malt, omítek, betonů a jiných hydraulických pojiv. Pro tuto práci je ale nejdůležitější použití vápna při úpravě zemin.

Jak uvádí Rogers a Glendinning (1996), ve stavební praxi se vápno používá hlavně pro úpravu vlastností zemin z hlediska zpracovatelnosti a dostupnosti pro stavební mechanizaci. Přidání vápna do zeminy způsobí její vysušení a s tím související změnu jejího stavu. Zemina se tak stane sjízdnou pro stavební stroje a také její zpracování je jednodušší.

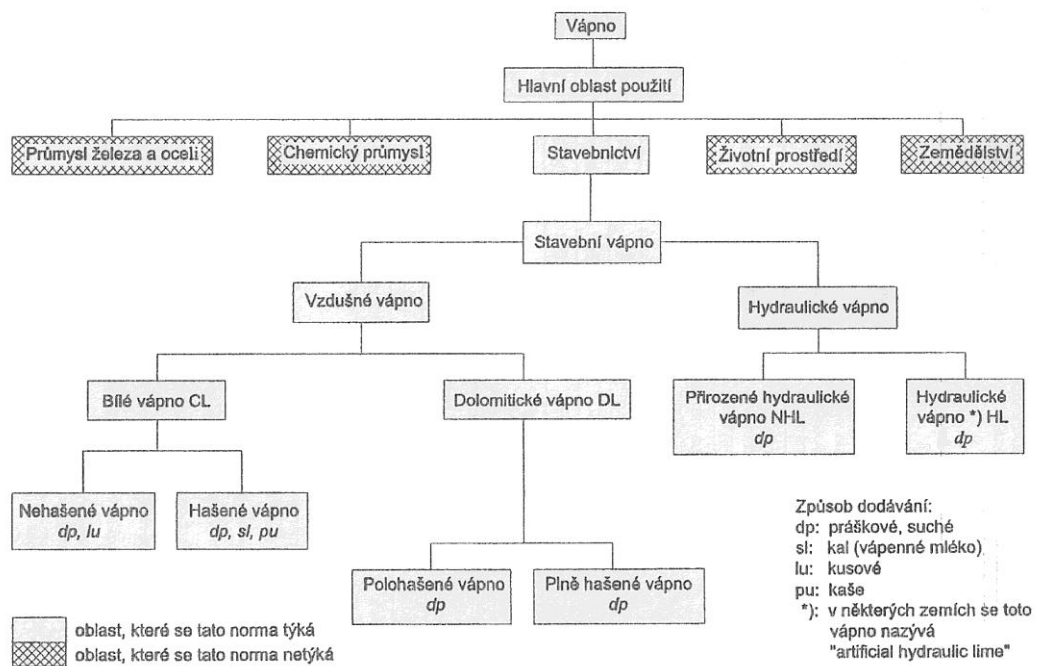
## 2.2. Definice vápna

Ve stavební praxi se podrobným dělením druhů vápna zabývá norma ČSN EN 459-1 (2002), která vápno popisuje jako látku zahrnující fyzikální a chemické formy, v nichž se může vyskytovat oxid vápenatý a/nebo hořečnatý ( $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ ) a/nebo hydroxidy ( $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{Mg(OH)}_2$ ).

Vápno se dělí v zásadě na 2 hlavní skupiny. První skupinou jsou vzdušná vápna. Jedná se o vápna sestávající převážně z  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  a jejich hydroxidů, tvrdnoucí pomalu na vzduchu reakcí se vzdušným  $\text{CO}_2$ , netvrdnoucí pod vodou (bez hydraulických vlastností). Vzdušná vápna zahrnují bílá vápna (velmi vysoký obsah  $\text{CaO}$ ), která mohou být nehašená ( $\text{CaO}$ ) nebo hašená ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Tato práce se zabývá pouze těmito dvěma typy vápna. Do vzdušných vápen ještě patří vápna dolomitická (složená z  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ ).

Druhou hlavní skupinu vápen představují vápna hydraulická. Vyrábí se ze slínovitých vápenců a právě díky jílovým příměsím v nich obsažených vykazují hydraulické vlastnosti. Podrobné dělení ukazují obr. 1.

Schematické znázornění druhů vápen a oblastí jejich použití



Obr. 1 - Druhy vápna ve stavebnictví (ČSN EN 459-1, 2002)

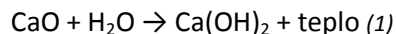
### 3. Působení vápna v zeminách

Přidání vápna do zeminy vyvolá okamžité a dlouhodobé reakce. Okamžité (modifikační) reakce jsou velmi dobře pozorovatelné a projeví se prakticky ihned po přidání vápna (v řádu minut až hodin). Naopak dlouhodobé (stabilizační) reakce se vyvíjejí v řádech týdnů, měsíců až let. Důsledky dlouhodobých reakcí se dají prokázat prakticky jen v laboratoři (např. zkouškami jednoosé pevnosti).

Popisem obou typů reakcí se zabývají např. Rogers a Glendinning (1996), Rogers et al. (1997), Boardman et al. (2001), TP – 94 (2009) nebo Al – Mukhtar et al. (2010).

#### 3.1. Okamžité reakce

Po přidání do zeminy začne vápno okamžitě hydratovat (podle reakce 1). Protože je tato reakce výrazně exotermická (65 kJ/mol), vzniklé teplo způsobuje odpařování vody ze zeminy. Kombinací těchto dvou faktorů se tak zemina výrazným způsobem vysušuje.



Druhým, velmi významným jevem v zemině je iontová výměna. Hydroxid vápenatý se v zemině rozpadá na ionty  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$ . Vápenaté ionty se vyměňují s ionty  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  z krystalové mřížky jílových minerálů v zemině obsažených. Zároveň v zemině roste pH díky přibývajícím hydroxylovým skupinám. Pozorovatelným důsledkem iontové výměny je flokulace částic. Jedná se o vytvoření shluků zeminy díky změnám nábojů na povrchu částic zeminy.

Okamžité reakce se na venek projevují změnami vlastností zemin. Jedná se o:

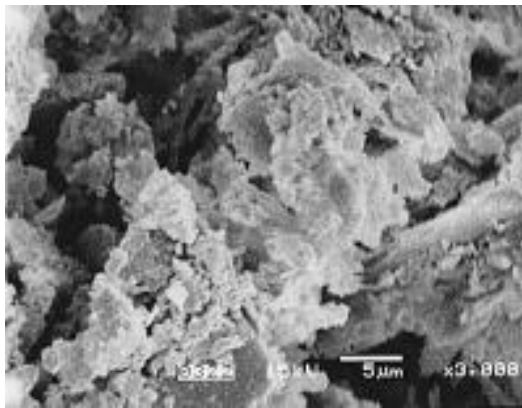
- výraznou změnu zrnitosti (pozorovali Osula (1996), Rajasekaran a Rao (1998) a Russo et al. (2007))
- změnu konzistenčních mezí (pozorovali např. Bell (1996), Osula (1996), Onitsuka et al. (2001) a de Brito Galvão et al. (2004))
- zvýšení pevnosti (TP – 94 (2009))
- snížení namrzavosti zeminy (TP – 94 (2009))

V této práci je pojednáváno hlavně o změnách konzistenčních mezí, také je ale zmíněna změna zrnitosti a její důsledky na konzistenční meze.

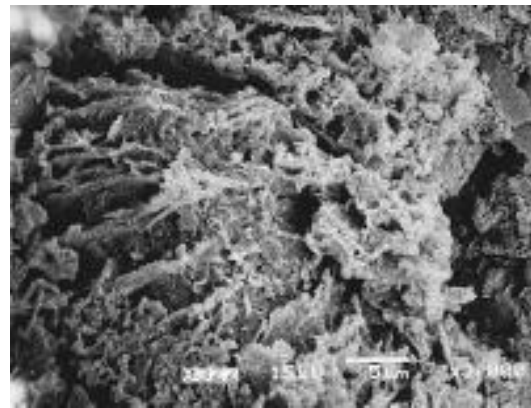
### 3.2. Dlouhodobé reakce

Hlavním dlouhodobým efektem je vznik pucolánových reakcí. Pokud díky koncentraci iontů ( $\text{OH}^-$ ) dojde k dosažení  $\text{pH} = 12,4$ , začne rozpuštění  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z jílových minerálů, živců a různých forem křemene. Tyto rozpuštěné minerály reagují s ionty vápníku za vzniku hydratovaných vápenatých křemičitanů a hlinitanů. Z gelové formy tyto minerály následně krystalizují a zeminu postupně prorůstají. Dochází tak k cementaci zemin, jejímž vnějším projevem je dlouhodobý nárůst její pevnosti. Při cementaci zároveň dochází ke snižování pórovitosti zemin, jak pomocí rtuťové porozimetrie prokázali Russo et al. (2007) a Metelková et al. (2010).

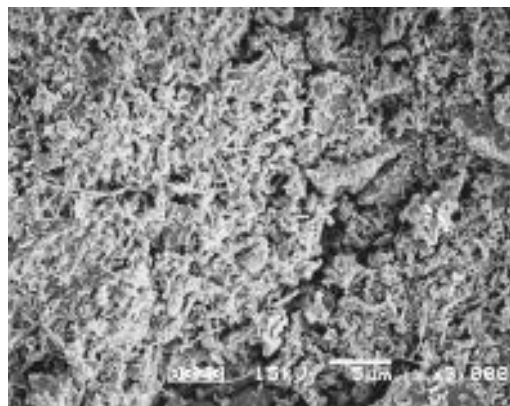
Pozorování novotvořených minerálů pomocí skenovacího elektronového mikroskopu prováděli Rajasekaran a Rao (1998) a Onitsuka et al. (2001). Růst novotvořených minerálů prokazuje srovnání snímků neupravené zemin – mořského jílu – (obr. 2) se snímkem zeminu upravené 10 % vápna po 7 (obr. 3) a 28 (obr. 4) dnech zrání.



Obr. 2 - Neupravená zemina (Onitsuka et al., 2001)



Obr. 3 - Zemina po 7 dnech zrání (Onitsuka et al., 2001)



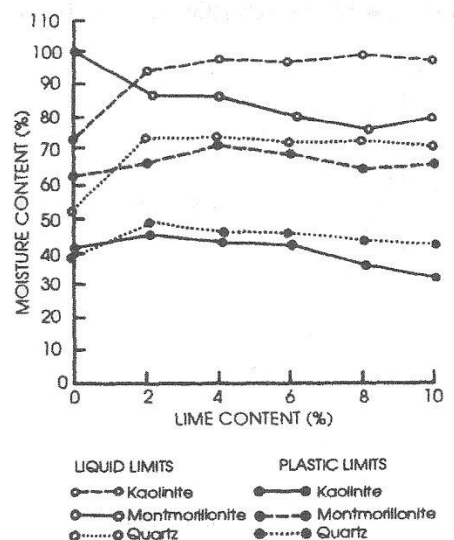
Obr. 4 - Zemina po 28 dnech zrání (Onitsuka et al., 2001)

## 4. Vliv mineralogie zeminy na její konzistenční meze

Přidání vápna do zeminy způsobí změnu jejích konzistenčních mezí. Chování jednotlivých mezí je přitom rozdílné, jak je popsáno v této kapitole. Zatímco mez plasticity ( $w_p$ ) vždy vzrůstá, mez tekutosti ( $w_l$ ) se u každé zeminy chová jinak. Díky tomu je také ovlivněn index plasticity.

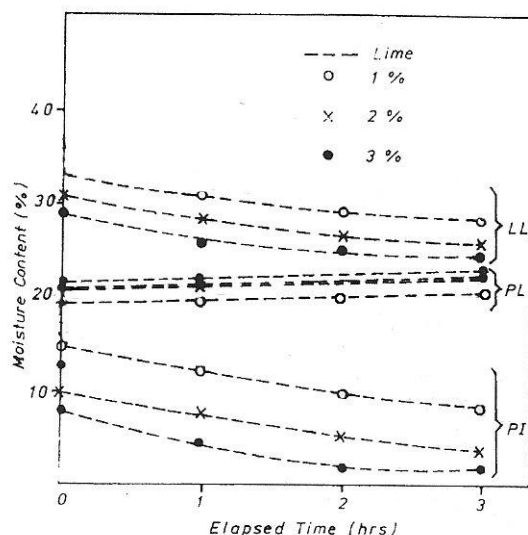
Vliv mineralogie zeminy na její chování po přidání vápna studoval Bell (1996). Při svých zkouškách použil kaolinit, montmorillonit a jemnozrný křemen. Vzorky byly připraveny smícháním 2 až 10 %  $\text{Ca(OH)}_2$  při optimální vlhkosti a byly ponechány rok zrát.

U montmorillonitu došlo ke zvýšení meze plasticity až do hodnoty 4 % vápna (vztaženo k suché hmotnosti zeminy). Mez tekutosti ale po přidání vápna klesá, stejně jako index plasticity. U kaolinitu rostla mez plasticity do 2 % vápna. Mez tekutosti při této hodnotě vápna vzrostla o 28 %. Výsledkem je rostoucí index plasticity. U křemene probíhal růst meze plasticity taktéž do 2 % vápna, rostla i hodnota meze plasticity a indexu plasticity. Výsledky měření shrnuje obr. 5.



Obr. 5 - Vývoj  $w_l$  (liquid limits) a  $w_p$  (plastic limits) s množstvím přidaného vápna (Bell, 1996)

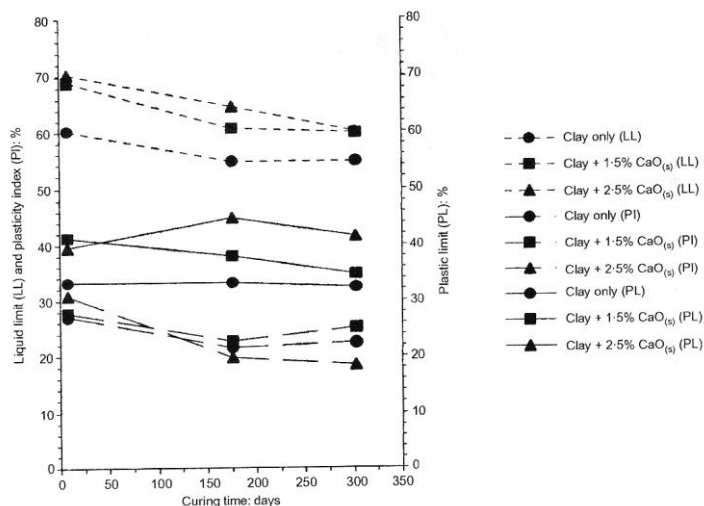
Osula (1996) srovnává působení vápna na nigerijský laterit. Pálené vápno (1, 2 a 3 %) bylo do zeminy zamícháno společně s vodou zednickou lžící a vzorky byly ponechány 1, 2 a 3 hodiny zrát. Poté bylo provedeno stanovení konzistenčních mezí. Byl pozorován růst meze plasticity a pokles indexu plasticity (obr. 6).



Obr. 6 - Vývoj konzistenčních mez v závislosti na době zrání (LL – mez tekutosti, PL – mez plasticity, PI – index plasticity, Osula, 1996, upraveno)

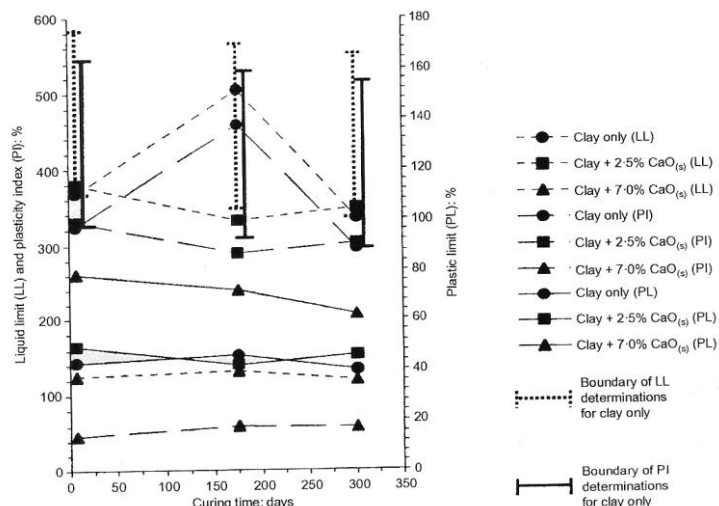
Podobné experimenty prováděli i Boardman et al. (2001). Použili přitom kaolinitický English China Clay (ECC) a montmorillonitický Wyoming Bentonite (WB). Pro stanovení konzistenčních mezí byly vzorky zemin smíchané s vodou a ponechány 24 hodin homogenizovat. Poté bylo vmícháno vápno a vzorky byly ztuhněny při vlhkosti o 2 % větší než optimální. Následovalo zrání po dobu 7, 175 a 301 dní.

ECC vykázal oproti neupraveným vzorkům růst meze plasticity (s časem zrání ale klesá – u vzorku se 2,5 % vápna až po 175 dnech zrání.) Roste i mez tekutosti, s časem zrání ale také postupně klesá. To vede ke vzrůstu indexu plasticity, taktéž klesajícím v čase (obr. 7). WB také vykázal růst meze plasticity klesající s dobou zrání. Mez tekutosti ale na rozdíl od ECC klesla, což vedlo i k poklesu indexu plasticity (obr. 8).



Obr. 7 - Změny konzistenčních mezí v závislosti na době zrání u ECC (LL – mez tekutosti, PL – mez plasticity, PI – index plasticity, Boardman et al., 2001)





Obr. 8 - Změny konzistenčních mezí v závislosti na době zrání u WB (LL – mez tekutosti, PL – mez plasticity, PI – index plasticity, Boardman et al., 2001)

## 5. Nejmenší množství vápna potřebné pro vznik pucolánových reakcí v zemině

Nejmenší množství vápna potřebné pro vznik pucolánových reakcí v zemině je velmi důležitou hodnotou. Rozhoduje totiž o tom, zda v zemině započnou stabilizační reakce. Pokud je množství přidaného vápna nižší, dojde jen k modifikaci zeminy, což je ale často ve stavební praxi dostačující. Pro stabilizaci zeminy musí množství přidaného vápna vždy odpovídat této minimální hodnotě, nebo musí být vyšší.

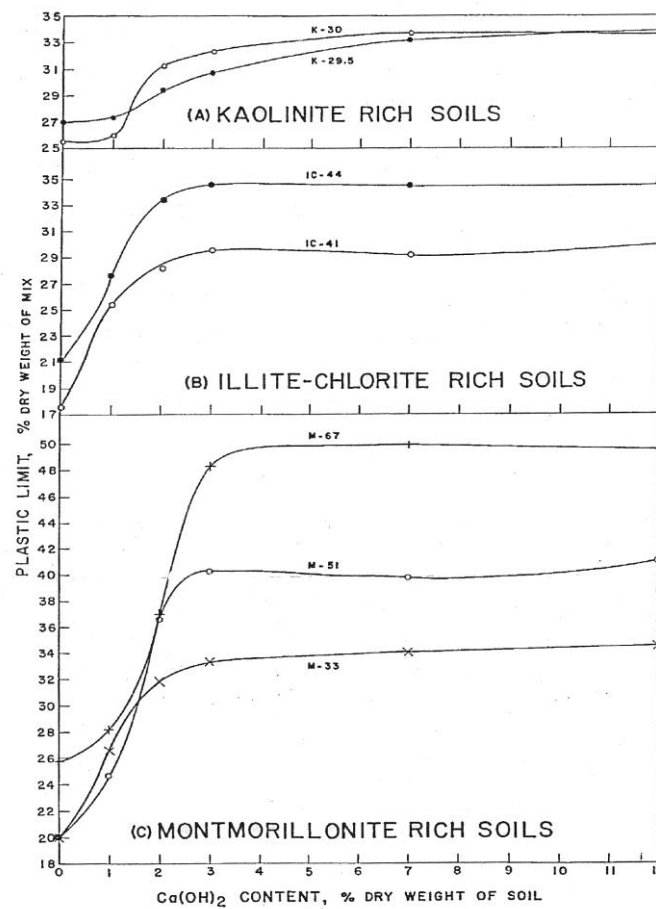
Rogers a Glendinning (1996) uvádí, že modifikace proběhne většinou do 24 hodin (někdy až do 72 hodin) od přidání vápna. Dochází ke změnám v zrnitosti a plasticitě zeminy. Poté, pokud byla dosažena hodnota minimálního množství vápna, začínají v zemině probíhat stabilizační reakce. Tato hodnota je ovlivněna mineralogií zeminy.

V dnešní době lze hodnotu minimálního množství vápna stanovit několika způsoby. Ty budou v této kapitole jednotlivě pojednány.

### 5.1. Stanovení pomocí konzistenčních mezí a jednoosé pevnosti

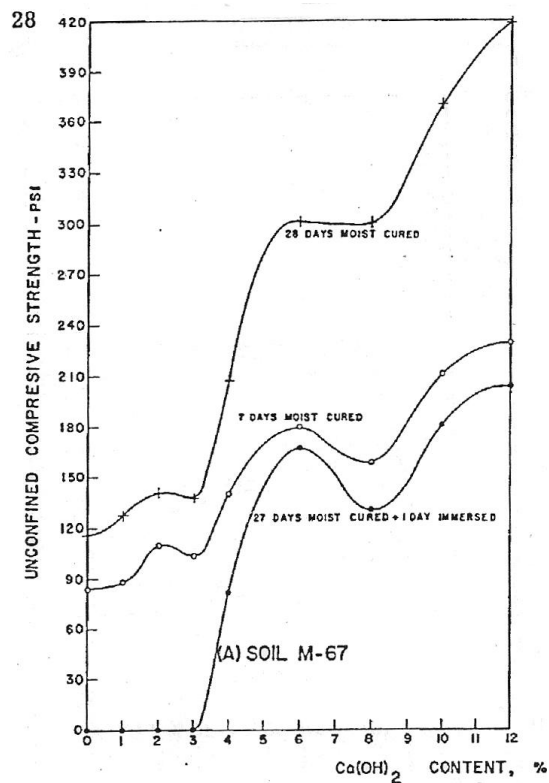
Hilt a Davidson (1960) zkoumali vliv vápna na chování pevnost kaolinitické, montmorillonické a illiticko – chlorotické zeminy. Po přidání 0 – 12 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a vody a po dané době zrání (2 až 28 dní) zkoušeli konzistenční meze a jednoosou pevnost. Pro stanovení nejmenšího množství vápna použili

graf závislosti meze plasticity na množství přidaného vápna, který má u všech zemin rostoucí trend. Největší přírůstek vykázala montmorillonitická zemina, střední přírůstek illiticko – chloritická zemina a nejmenší přírůstek pak kaolinitická zemina (obr. 9).



Obr. 9 - Vývoj meze plasticity po 2 dnech zrání v závislosti na množství přidaného vápna (Hilt a Davidson, 1960)

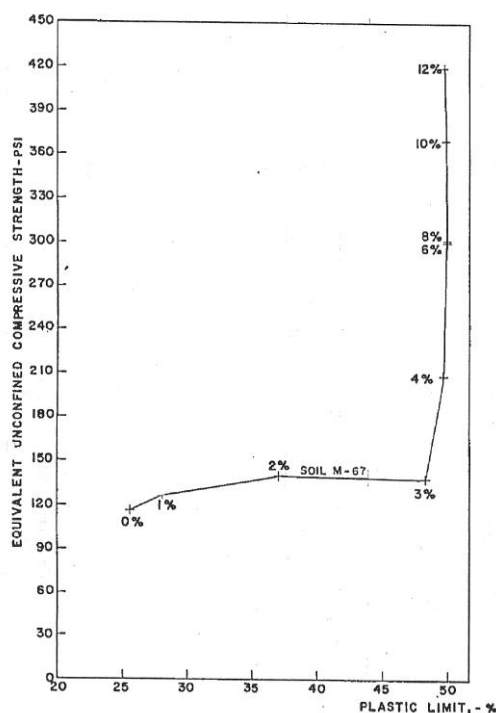
Jednoosá pevnost má také rostoucí trend. Největší přírůstek byl pozorován u montmorillonitické zeminy (obr. 10), střední přírůstek u kaolinitické zeminy a nejmenší přírůstek pak u illiticko – chloritické zeminy.



Obrázek 10 - Vývoj jednoosé pevnosti montmorillonické zeminy v závislosti na množství přidaného vápna (Hilt a Davidson, 1960)

Z grafů (obr. 9 a 10) vyplývá zásadní skutečnost – existence tzv. lime fixation point (LFP). Je to hodnota, do které při přidávání vápna do zeminy zemina absorbuje vápno pro iontovou výměnu, jejímž důsledkem je flokulace a následná změna konzistenčních mezí. Dokud není dokončena iontová výměna, nemohou v zemině nastat pucolánové reakce, protože v zemině není žádné volné vápno (vápno je fixováno do zeminy – odtud tedy lime fixation point). Jakmile ale množství vápna překročí LFP, v zemině se již vyskytne volné vápno a tak se mohou rozběhnout pucolánové reakce.

U grafů meze plasticity je LFP vidět jako bod největší změny meze plasticity (dále se mez mění jen minimálně). V grafu jednoosé pevnosti leží LFP v bodě, kde se křivka prudce zvedá a nastává výrazný nárůst pevnosti. Z grafů je patrné, že se hodnoty LFP pro mez plasticity a pevnost shodují. Do jednoho grafu toto shrnuje obr. 11.



Obrázek 11 - Porovnání vývoje jednoosé pevnost (equivalent unconfined compressive strength) a meze plasticity (plastic limit) u montmorillonitické zeminy (Hilt a Davidson, 1960, upraveno)

## 5.2. Stanovení pomocí měření pH

První výzkumy zabývající se měřením pH po přidání vápna do zeminy prováděli Clare a Cruchley (1957). Eades a Grim (1966) vyšli z výzkumu Illinoiské univerzity, která zjistila, že při smíchání radioaktivního cesia a čistých jílových minerálů proběhne iontová výměna do 1 hodiny. Inspirováni tímto výsledkem postavili svůj test na měření pH směsi zeminy s hašeným vápnem po jedné hodině loužení.

Autoři použili několik druhů zemin s rozdílnou mineralogií (illiticko – chloritické glaciální tilly, illiticko – montmorillonitický Porter Creek Clay a montmorillonitický Pierre Shale). Do 20 g v sušárně usušené zeminy prosáté sítem o velikosti oka 0,452 mm přidali 1 – 15 % vápna a zalili 100 ml vody. Protřepali a nechali reagovat 1 hodinu při pokojové teplotě. Poté bylo stanoveno pH. Též byly provedeny zkoušky konzistenčních mezí.

Autoři porovnávají zkoušky konzistenčních mezí s hodnotami pH po 1 hodině loužení. Minimální množství vápna odpovídá takovému množství vápna, které po 1 hodině působení vyvolá v zemině pH 12,4, a zároveň se dle indexu plasticity stává zemina neplastickou. Výsledky shrnuje tabulka 1.

Percent Lime	Glacial Till A-4(6)		Glacial Till A-6(9)		Porter Creek Clay		Pierre Shale	
	pH	PI	pH	PI	pH	PI	pH	PI
1	12.4	N. P. <sup>a</sup>	11.85	8.3	10.20	49.6	—	—
2	12.4	N. P.	—	—	—	—	—	—
3	—	—	12.3	N. P.	11.85	28.5	—	—
5	—	—	12.4	N. P.	12.20	19.2	11.90	56.7
7	—	—	12.4	N. P.	12.30	N. P.	12.20	28.2
9	—	—	—	—	—	—	12.3	N. P.

<sup>a</sup>Nonplastic

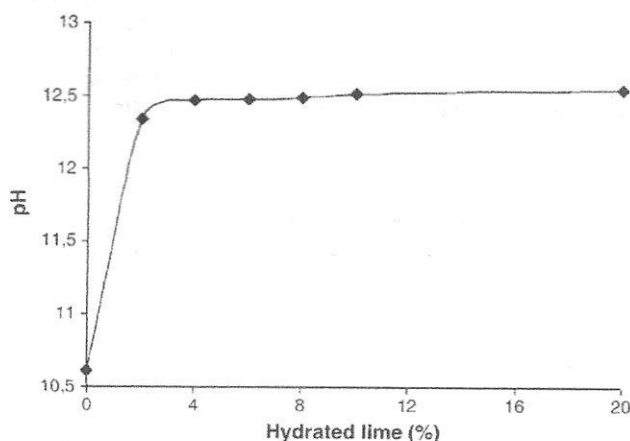
Tabulka 1 - Porovnání hodnot pH a indexu plasticity po 1 hodině zrání (Eades a Grim, 1966)

Tento test, dnes známý jako initial consumption of lime (ICL), používá např. britská norma BS 1924-2 (1990) nebo norma Design Procedures for Soil Modification or Stabilisation (2008) státu Indiana.

### 5.3. Jiné metody stanovení

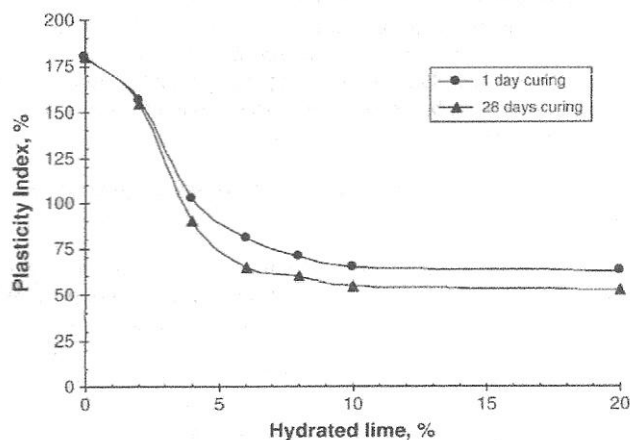
Al – Mukhtar et al. (2010) se ve své práci zabývali celou řadou metod stanovení minimálního množství vápna. Své pokusy prováděli na bentonitovém jílu, který upravovali až 20 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Jako první stanovili hodnotu ICL. Výsledky ukazuje graf na obr 12. Podle něj je hodnota ICL rovná 4 % vápna.



Obr. 12 - Výsledky ICL testu (Al - Mukhtar et al., 2010)

Jako druhé provedli autoři stanovení konzistenčních mezí. Soustředili se na index plasticity, z něhož vychází hodnota LFP 6 % vápna, jak ukazuje obr. 13.



Obr. 13 - Výsledky stanovení LFP (Al - Mukhtar et al., 2010)

Dále bylo provedeno stanovení pomocí měření bobtnacích tlaků. Minimální množství vápna pro vznik dlouhodobých reakcí je dosaženo u této metody při 6 % vápna, bohužel autoři neuvádí přesný způsob určení této hodnoty (tabulka 2).

Lime,%	0	4%	6%	10%
Curing time, day	SP (kPa)	SP (kPa)	SP (kPa)	SP (kPa)
0.0625	1060	293	106	9
7		196	33	0
28		142	6	0

Tabulka 2 - Vývoj bobtnacích tlaků (Al - Mukhtar et al., 2010)

Též byla provedena rentgenová difrakce (minimální množství vápna 4,7 %) a atomová absorpční spektroskopie (minimální množství vápna 5,3 %). Ani zde ale autoři neuvádí, jak hodnoty stanovili.

Průměrná hodnota minimálního množství vápna pro vznik dlouhodobých reakcí pro tuto zeminu tedy činí přibližně 5 % vápna.

## 5.4. Porovnání metod stanovení

Rogers a Glendinning (1996) uvádí, že přesnou hodnotu minimálního množství vápna lze nejlépe zjistit pomocí měření pH – ICL testem (kapitola 5.2.). Mez plasticity poslouží pro orientační stanovení množství vápna hlavně pro stavební praxi. Tam se většinou jedná o případy, kdy nám stačí vznik modifikačních efektů (a tudíž není nutné dosažení hodnoty ICL). Mez tekutosti není vhodným indikátorem, protože se u každé zeminy chová jinak. Index plasticity lze použít s vědomím, že je ovlivněn chováním meze tekutosti.

Rogers et al. (1997) poukazují na nevýhody ICL testu – počítá s tím, že stabilizace následuje až po skončení modifikace, s čímž někteří autoři nesouhlasí (Clare a Cruchley, 1957). Nezohledňuje rozdíly v postupech měření pH, nebere v potaz možnost hydratace vápna vzdušnou vlhkostí během skladování. Navíc některé jíly díky své mineralogii nikdy nedosáhnou pH 12,4. Svými pokusy autoři prokázali, že hodnota minimálního množství vápna zjištěná ICL testem může být vyšší, než je hodnota zjištěná metodou konzistenčních mezí (LFP). Autoři proto závěrem uvádějí, že zkoušky konzistenčních mezí (zjištění hodnoty LFP) jsou vhodným doplňkem při stanovení hodnoty ICL (měření pH).

V literatuře se též vyskytuje pojem lime modification optimum (LMO). McCallister a Petry (1992) definují LMO jako minimální množství vápna nutné pro dosažení maximální redukce plasticity zeminy. Hodnotu ověřovali pomocí zkoušek konzistenčních mezí a pomocí ICL testu. Tvrdí, že výsledky jsou stejné. To se ale neshoduje s měřením Rogerse et al. (1997) i s daty naměřenými v rámci této práce (kapitola 9). Proto je tedy lepší používat specifikované názvy LFP a ICL, které rovněž odkazují na použitou metodu, než souhrnný název LMO.

Zkoušky pevnosti jsou jistě vhodným způsobem stanovení hodnoty LFP. Jsou ale zdlouhavé, protože změny pevnosti v zemině jsou většinou měřitelné až po 7 dnech zrání.

Ostatní metody zkoušení (např. Al – Mukhtar et al. (2010)) nejsou pro praxi vhodné kvůli své náročnosti na čas a přístrojové vybavení.

## 6. Konzistenční meze

V české stavební praxi se konzistenční meze stanovují podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005). Při provádění zkoušek v této práci byla snaha o co největší dodržení normového postupu. Proto vychází zde uvedené definice právě z této normy.

Konzistenční meze se stanovují na pastě – rekonstituované zemině s odstraněnou vnitřní strukturou, prosáté na síť 0,4 mm nebo jemu nejbližším. Zemina se vlhčí pomocí destilované vody.

Mez tekutosti ( $w_l$ ) je empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází ze stavu plastického do stavu tekutého.

Mez plasticity ( $w_p$ ) je empiricky stanovená vlhkost, při které je zemina natolik vysušená, že přechází ze stavu plastického do stavu pevného.

Index plasticity ( $I_p$ ) je početní rozdíl mezi mezí tekutosti a mezí plasticity ( $I_p = w_l - w_p$ ).

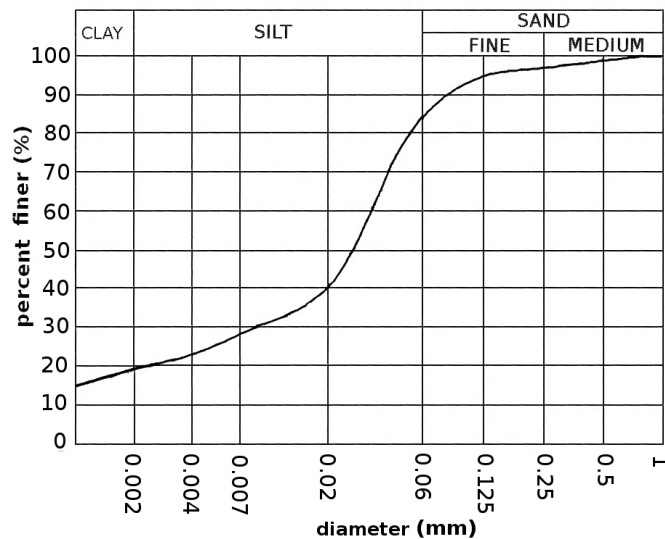
## 7. Použité materiály

### 7.1. Zemina

Použitá zemina pochází ze zemníku v obci Horky nad Jizerou. Jak uvádí Hrubeš (1991), ložisko je tvořeno sprašemi, jejichž mocnost se pohybuje většinou mezi 7 a 10 m, a sprašovými hlínami. Leží na podloží z křídové opuky. Zemina má hnědou až světle okrově hnědou barvu, je tuhá, slabě slídnatá a slabě písčité. Spraš je převážně vápnitá,  $\text{CaCO}_3$  se zde vyskytuje ve formě výkvětů a malých cicvárů. Dále je možné ve spraši najít železité záteky. Tabulka 3 ukazuje mineralogické složení zeminy, obr. 14 pak její zrnitostní křivku. Konzistenční meze zeminy jsou uvedeny v kapitole 9.2.

Minerál	Zastoupení (hm. %)
Křemen	38 – 44
Illit	29 – 31
Kalcit	15 – 19
Montmorillonit	4 – 10
Ortoklas	2 – 4
Kaolinit	2 – 4

Tabulka 3 - Mineralogické složení zkoušené zeminy (podle Metelková, 2007)



Obr. 14 - Křivka zrnitosti zkoušené zeminy (Metelková, 2007)



## 7.2. Vápno

Bylo použito bílé nehašené vápno CL 90 firmy Lhoist. Jeho základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Látka	Obsah (%)
CaO <sub>tot</sub>	95,99
CaO <sub>akt</sub>	92,92
MgO	0,82
CO <sub>2</sub>	2,41

Tabulka 4 - Vlastnosti použitého vápna (Lhoist, 2007)

## 8. Laboratorní zkoušky

Zkoušky konzistenčních mezí byly provedeny v akreditované Centrální laboratoři EUROVIA Services s.r.o. v Praze.

### 8.1. Příprava vzorků

Protože byly konzistenční meze stanoveny podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005), byl také při přípravě vzorků dodržen postup stanovený normou. Zemina vysušená na vzduchu byla rozpojena v třecí misce a prosáta sítím velikosti oka 0,4 mm. Byla provedena dvě stanovení vlhkosti, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.

Stanovení	Vlhkost (%)
Stanovení 1	2,42
Stanovení 2	2,46
<b>Průměr</b>	<b>2,44</b>

Tabulka 5 - Vlhkost zkoušené zeminy

Při přípravě vzorků byla prosátá zemina rozdělena na dvě části. Každá byla umístěna do vlastní plastové nádoby. První byla navlhčena destilovanou vodou na vlhkost kolem meze tekutosti, druhá na vlhkost kolem meze plasticity. Zeminy byly poté ponechány 24 hodin homogenizovat za teploty

21°C a 100 % vzdušné vlhkosti v místnosti sloužící ke zrání vzorků betonů a upravených zemin (obr. 15).

Po homogenizaci bylo přidáno pojivo. Pálené vápno, jehož procentuální hmotnost byla vztažena k suché hmotnosti vzorků zeminy, bylo ručně vmícháno do připravených past (0,5, 1, 2, 2,5 a 3 % CaO). Takto zhotovená směs pak byla ponechána zrát za výše uvedených podmínek po dobu 1, 2, 4, 8 a 24 hodin. Tabulka dob zrání a dávkování vápna včetně naměřených hodnot je uvedena v Příloze 1.

Po provedení první série zkoušek bylo z výsledkových grafů patrné, že pravděpodobně ještě nedošlo ke všem změnám v zemině. Proto bylo rozhodnuto o provedení další série zkoušek. Množství vápna zůstalo zachováno, přibyla ale doba zrání 48 a 72 hodin. Také byl změněn postup přípravy vzorků.

Každá ze dvou částí prosáté zeminy byla ručně smíchána s potřebným množstvím vápna za sucha. Účelem změny postupu bylo zlepšení promísení vápna a zeminy, což je za vlhka poměrně obtížné. Teprve potom bylo přidáno požadované množství vody – opět blízké mezi tekutosti a mezi plasticity. Následně byly vzorky výše uvedeným způsobem ponechány zrát.



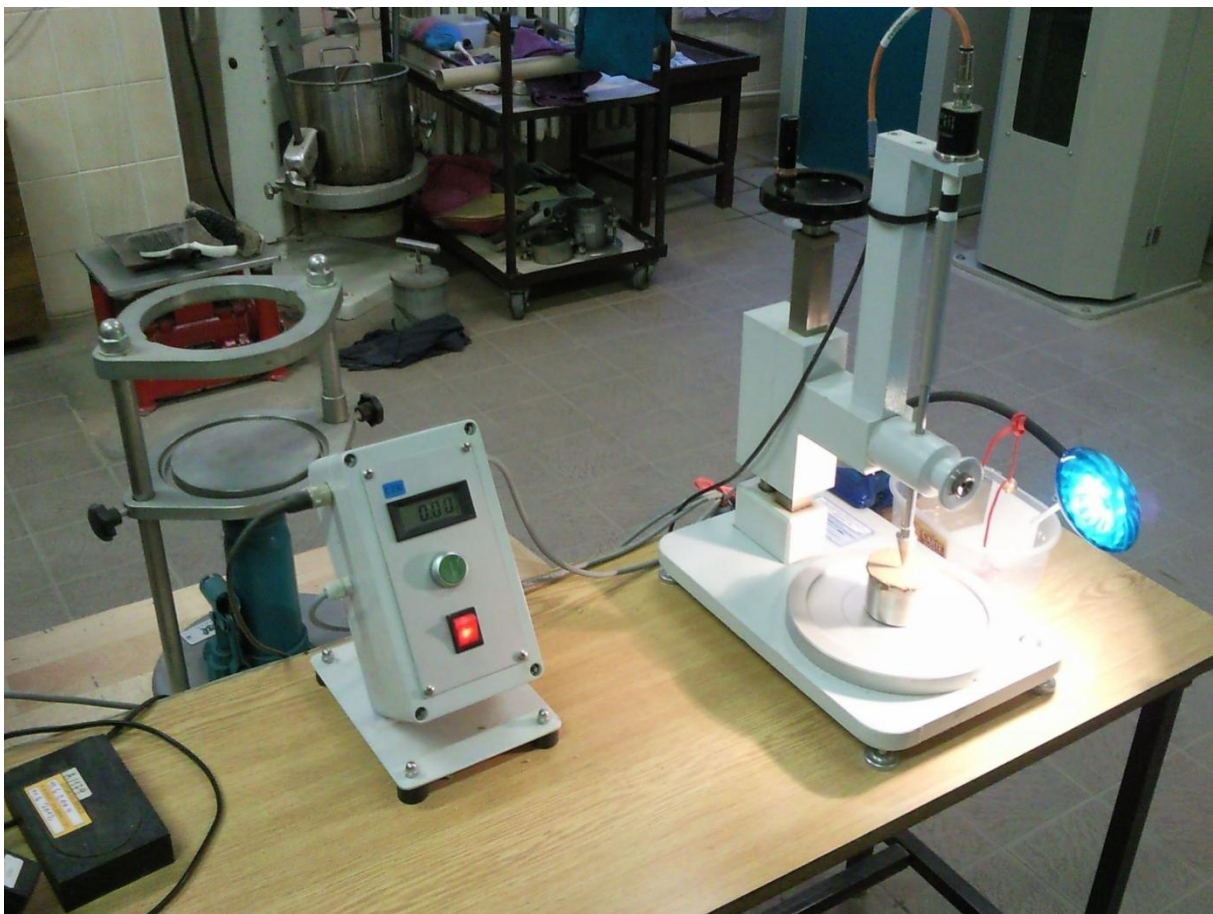
Obr. 15 - Vzorky ve zrací místnosti. Za povšimnutí stojí různý vzhled past odpovídající různému dávkování vápna, odspoda 0,5, 1 a 2 % CaO. ( $w_1$  velké nádoby,  $w_p$  malé nádoby)

## 8.2. Stanovení konzistenčních mezí

Konzistenční meze byly stanoveny podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005). Během zkoušek byla co největší snaha o dodržení postupu shodného s normou. Specifika materiálu ale v některých případech neumožnila normu dodržet (kapitola 9.1.).

### 8.2.1. Mez tekutosti

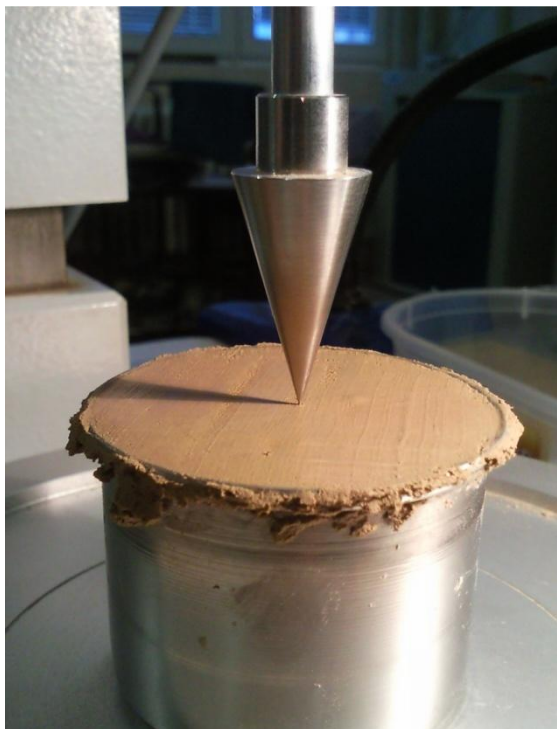
Při stanovení meze tekutosti byl použit automatický kuželový přístroj firmy infraTest Prüftechnik s kuželem 80 g/30° (obr. 31).



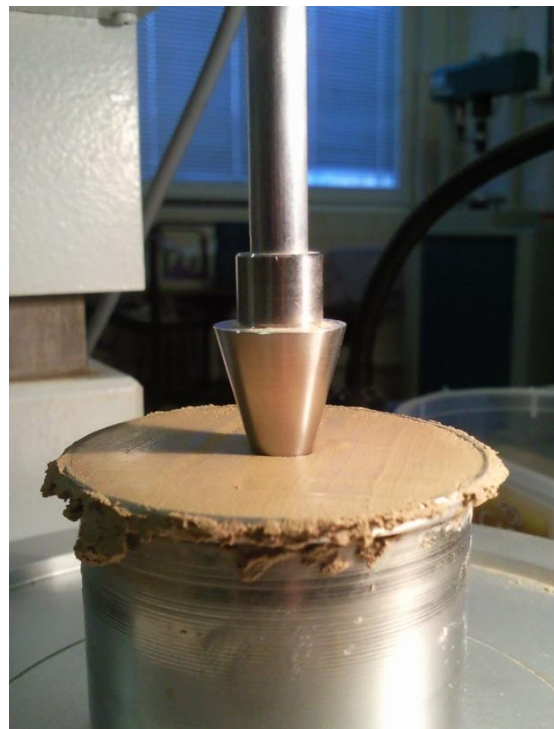
Obr. 16 - Automatický kuželový přístroj firmy infraTest Prüftechnik se vzorkem připraveným pro penetraci

Penetrační miska byla až po okraj naplněna pastou a vrchní okraj zarovnaný stěrkou s ostrou hranou. Miska byla umístěna pod zafixovaný penetrační kužel tak, aby se právě dotýkal povrchu zeminy, jak je patrné na obr. 17 (při mírném pohybu zanechá hrot v zemině viditelnou stopu). Kužel byl uvolněn po dobu 5 sekund – penetraci ukazuje obr. 18. Na displeji přístroje byla odečtena hodnota penetrace (přesnost 0,01 mm). Nakonec byl kužel zvednut, očištěn a připraven pro další penetraci.





Obr. 17 - Kužel připravený pro penetraci



Obr. 18 - Kužel po penetraci

Do misky bylo následně přidáno trochu vlhké pasty a měření se opakovalo, dokud rozdíl mezi dvěma po sobě následujícími penetracemi nebyl menší než hodnoty uvedené v tabulce 6.

Měření	Hodnota pro kužel 80 g / 30°
První penetrace	okolo 15 mm
Penetrační rozsah	15 až 25 mm
Maximální rozdíl mezi dvěma úspěšnými zkouškami	0,5 mm
Hloubka penetrace při $w_1$	20 mm

Tabulka 6 - Penetrační limity (podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005))

Z penetrační zóny byl odebrán vzorek pro stanovení vlhkosti (cca 10 g). Celý proces byl opakován nejméně třikrát. Výsledek byl vyneseno do grafu jako nejlepší přímková náhrada spojnice penetračních bodů.  $w_1$  je hodnota při penetraci 20 mm.

### 8.2.2. Mez plasticity

Z pasty byl odebrán vzorek (cca 20g). Vzorek byl vytvarován do tvaru koule a hněten mezi prsty a válen mezi dlaněmi, dokud se na vzorku neobjevily jemné praskliny. Poté byl vzorek rozdělen na dvě poloviny. Každá polovina byla ještě dále rozdělena na další čtyři části. Každá tato část byla hnětena mezi prsty. Nakonec byl mezi palcem a ukazováčkem vytvořen váleček o průměru přibližně 6 mm.

Váleček se dále válel prsty na nesavé podložce (od špičky prstů po druhý kloub). Meze plasticity bylo dosaženo, když se válečky o průměru přibližně 3 mm při max. 10 pohybech vpřed a vzad začaly rozpadat v podélném i příčném směru.

Tyto rozpadlé válečky se pak odebraly pro stanovení vlhkosti. To samé se povedlo na zbylých sedmi subvzorcích. Celý proces se opakoval ještě jednou.

Pro stanovení vlhkosti byly vzorky ve váženkách usušeny v sušárně Memmert s aktivní cirkulací vzduchu při teplotě 105°C po dobu minimálně 24 hodin.

## 9. Pozorování a výsledky

### 9.1. Viditelné změny zeminy

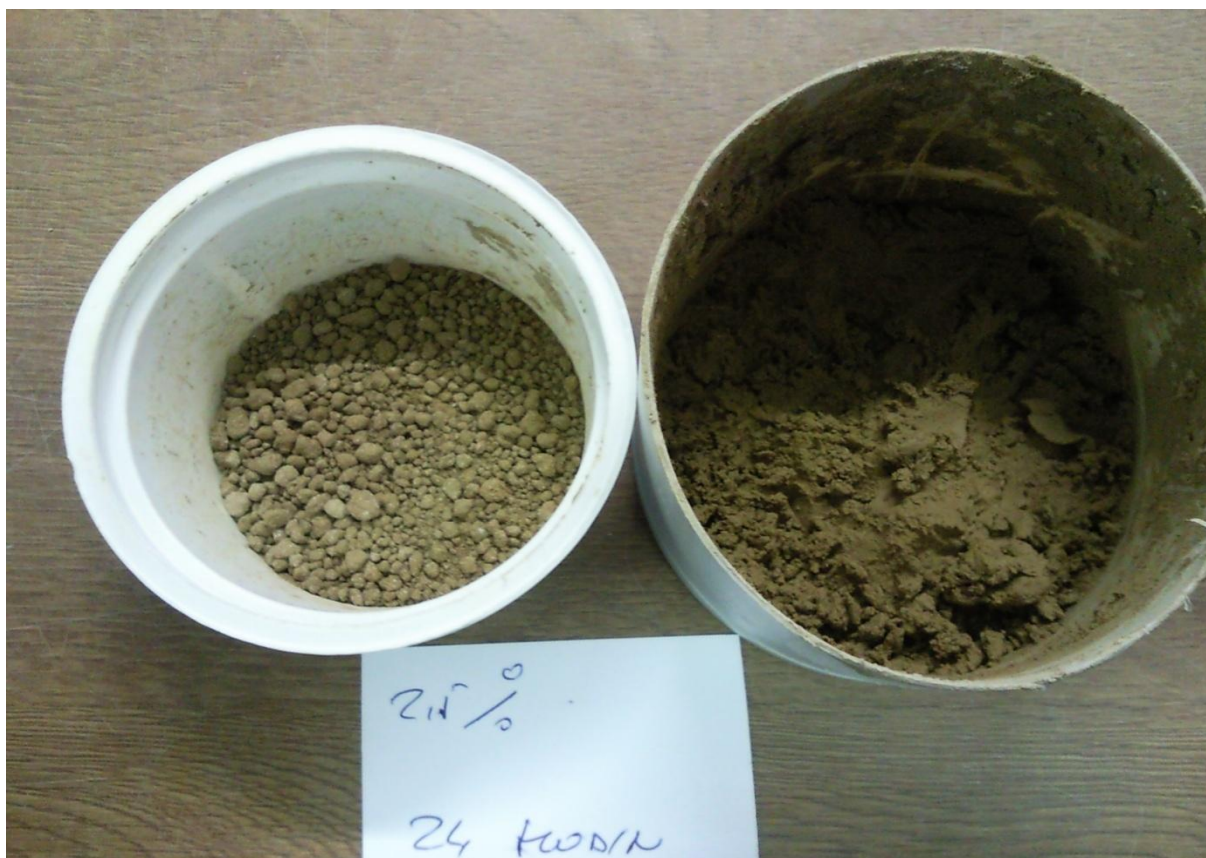
Po přidání vápna bylo jako první u všech vzorků možno pozorovat exotermicitu reakce. Po vmíchání vápna se nádoby začaly v závislosti na obsahu vápna intenzivně zahřívat.

Druhým pozorovaným jevem byla flokulace. Při koncentraci 0,5 % vápna ale nebyly pozorovány během žádného intervalu zrání větší viditelné změny.

Ty nastaly až při koncentraci vápna 1 %. Po 48 hodinách zrání již zemina pro  $w_p$  vzhledem připomínala převážně větší zrnka písku. Pasta pro  $w_l$  také začínala být velmi tuhou.

Při koncentraci vápna 2 % byla již flokulace ve vzorku pro  $w_p$  po 8 hodinách intenzivní. Začaly se tvořit velké shluky zrn, které bylo při přípravě měření nutno rozemnout mezi prsty. Po 48 hodinách začala být zemina pro zkoušku meze plasticity díky svému vysušení nezpracovatelná. To si vynutilo postupné přidávání destilované vody stříčkou. Tímto také došlo k odklonu od normového postupu.

Při koncentraci vápna 2,5 % byla rozptýlená flokulovaná zrnka pozorována již po 2 hodinách zrání, a to i ve vzorku pro  $w_l$ . Po 8 hodinách již byla ve vzorku pro  $w_p$  flokulace velmi intenzivní a po 24 hodinách tato zemina získala písčitého charakter, jak je vidět na obr. 19 (nádoba vlevo). I zde již bylo nezbytné přidávat vodu.



Obr. 19 - Stav zeminy se 2,5 % vápna po 24 hodinách zrání

Při koncentraci vápna 3 % bylo nutno vodu přidávat při každé zkoušce pro  $w_p$  i  $w_l$ . Po 1 hodině bylo po přidání vody pozorováno šumění směsi a výskyt bublinek. To zjevně značí, že v zemině nebyl dostatek vody, aby mohlo všechno vápno zreagovat. Po 2 hodinách se situace opakovala. I v zemině pro  $w_l$  se začala vyskytovat tvrdá flokulovaná zrnka, nerozemnutelná mezi prsty (obr. 21). Po 4 hodinách nastala po přidání vody do vzorku pro  $w_l$  značná flokulace. Zemina začala být špatně zpracovatelnou, opět se v ní vyskytovala tvrdá zrnka. Po 8 hodinách došlo po přidání vody opět k flokulaci, zrnka nabyly charakteru hrubého písku, jak ukazuje obr. 20. I přes snahu o umíchání hladké pasty toto nebylo možné, což mělo nepochybně vliv na výsledky konzistenčních mezí. Po 24 hodinách již vzorek pro  $w_p$  nabył charakteru písku – byl suchý a sypký v celém svém objemu.





Obr. 20 - Stav zeminy se 3 % vápna po 8 hodinách zrání

Obr. 21 v detailu ukazuje nerozemnutelná flokulovaná zrnka. Jejich výskyt v pastě jistě ovlivnil zkoušky meze tekutosti. Norma ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005) předpokládá hladkou pastu s částicemi menšími nebo rovnými 0,4 mm. Jak je ale z obrázku patrné, nově vzniklá zrnka měla velikost přes 3 mm. A to není jediný problém. Jak uvádí Eades a Grimm (1966), při dosažení pH 12,4 se zemina stává neplastickou. To se potvrdilo, protože při koncentraci vápna 2 % po 48 hodinách se zemina pro stanovení  $w_p$  stala díky vysušujícímu účinku vápna nezpracovatelnou. Aby mohla být zkouška konzistenčních mezí provedena, musela být do zeminy dodána další voda a flokulovaný vzorek musel být znovu rozmíchán. A to norma nepředpokládá. Navíc při koncentraci 3 % vápna bylo patrné, že původní obsah vody v zemině nebyl dost velký na to, aby všechno vápno mohlo zreagovat.

Problém s vysušením zeminy by se dal vyřešit použitím hašeného vápna –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , jak uvádí Rogers et al. (1997). Vápenný hydrát totiž v zemině dále nehydratuje, v zemině nedochází k exotermické reakci. Dojde jen k minimální ztrátě vody při vzniku novotvořených minerálů. Problém flokulace je ale společný pro všechna anorganická pojiva.



*Obr. 21 - Detail nerozemnutelných flokulovaných zrněk*

Změna způsobu aplikace vápna pro zkoušky s delším časovým intervalem (48 a 72 hodin) byla vedena snahou o co nejlepší smísení zeminy s vápnem. Vmíchávání vápna do pasty i přes veškerou snahu pravděpodobně nemůže dosáhnout takového rozptýlení, jako je tomu za sucha. Z hlediska výsledků zkoušek je ale zajímavé, že velké rozdíly mezi oběma postupy zapracování pojiva pozorovány nebyly.



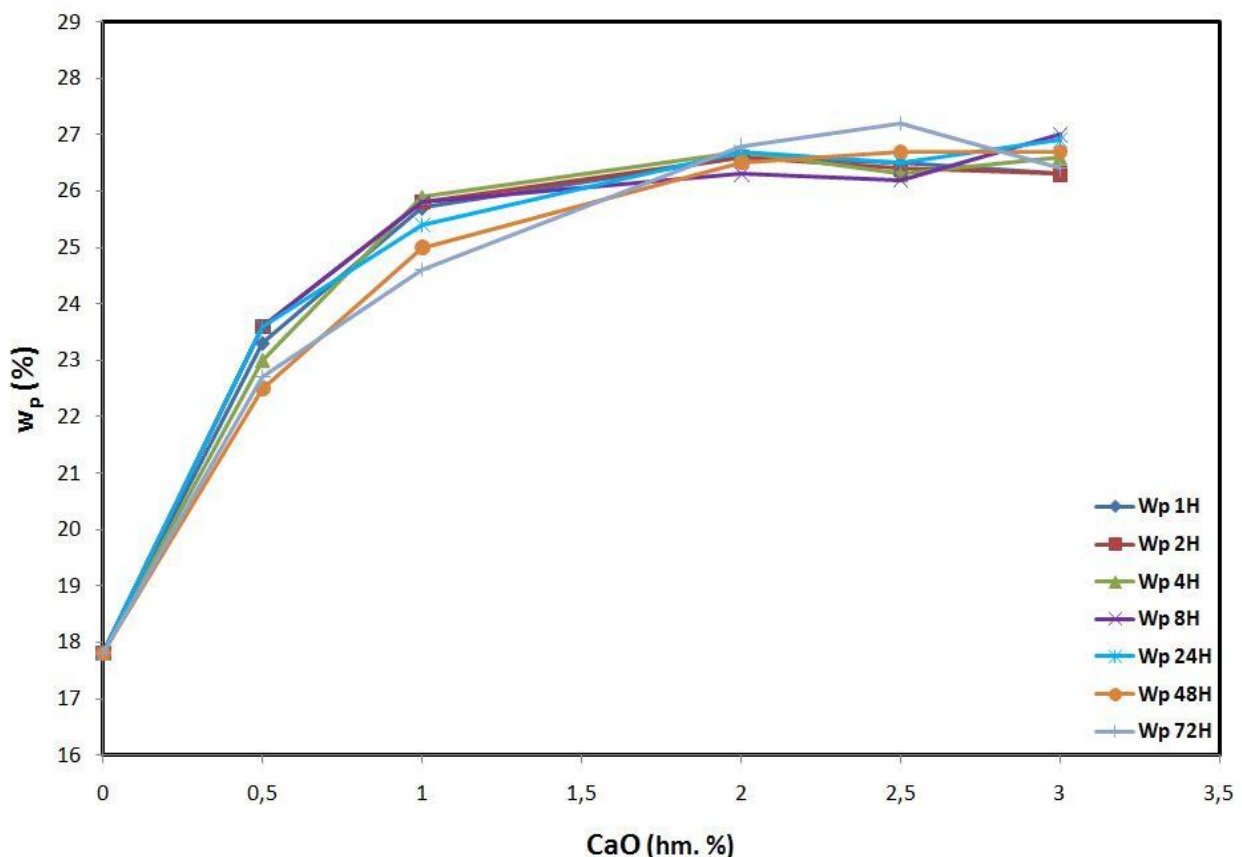
## 9.2. Konzistenční meze

Jako první byly stanoveny konzistenční meze neupravené zeminy. Tutéž zkoušku na stejné zemině prováděla i Metelková (2007). Výsledky obou zkoušek shrnuje tabulka 7. Zajímavý je rozdíl mezi hodnotami meze tekutosti. Je způsoben odlišnými metodami stanovení. Metelková (2007) totiž  $w_l$  stanovovala pomocí Casagrandeho misky. Jak ale uvádí norma ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (2005), je stanovení v misce ovlivněno celou řadou vlivů, jako je např. opotřebenost zařízení. Proto byla v této práci použita přesnější kuželová metoda s typem kužele 80 g / 30° dle výše uvedené normy.

Měření provedl/konzistenční meze (%)	Metelková (2007)	Vlastní měření
Mez tekutosti	35	39,4
Mez plasticity	18	17,8
Index plasticity	17	21,6

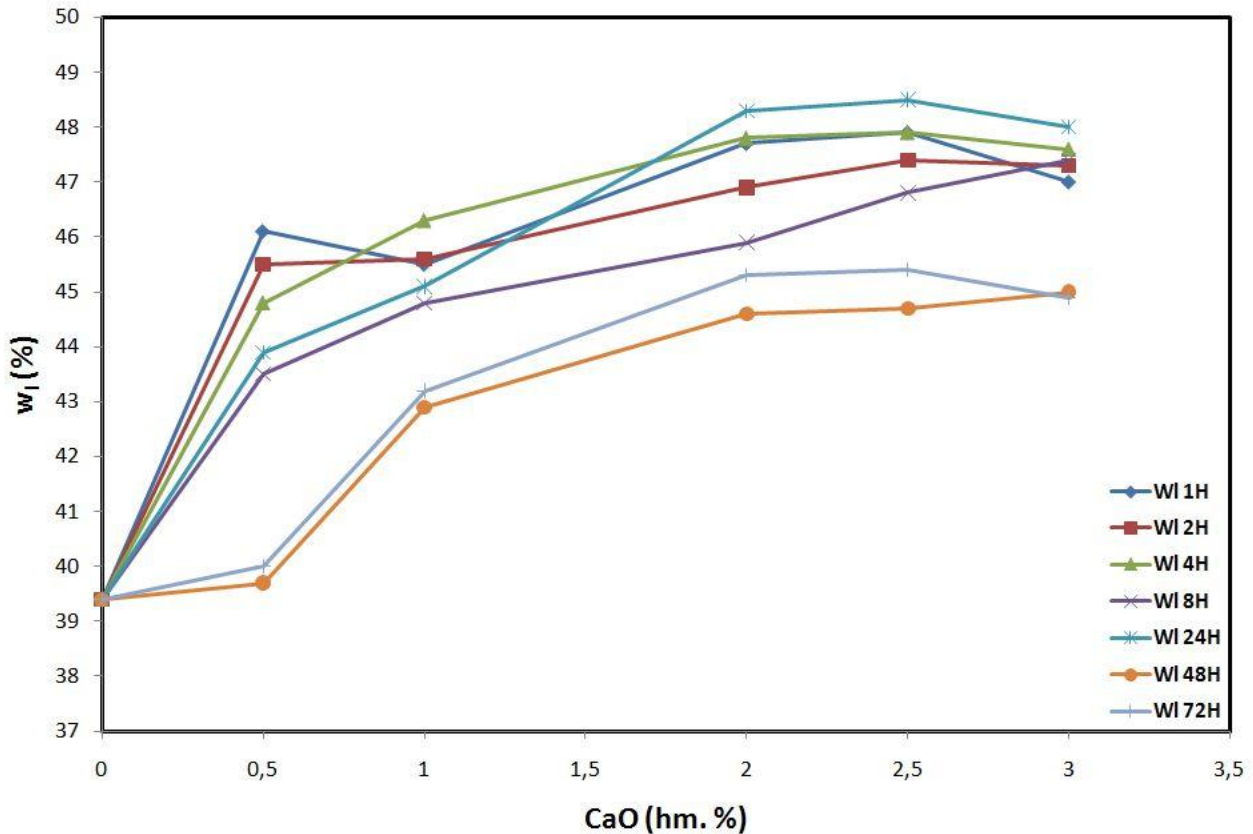
Tabulka 7 - Porovnání konzistenčních mezí neupravené zeminy

Graf na obr. 22 ukazuje vývoj meze plasticity v závislosti na množství přidaného vápna. Graf má zpočátku rostoucí trend, což odpovídá předpokladům uvedeným v kapitole 4. Křivky se ustalují kolem 2 % vápna. Právě kolem této hodnoty by se měl nacházet LFP. Zajímavé také je, že doba zrání nemá vliv na tvar křivek.



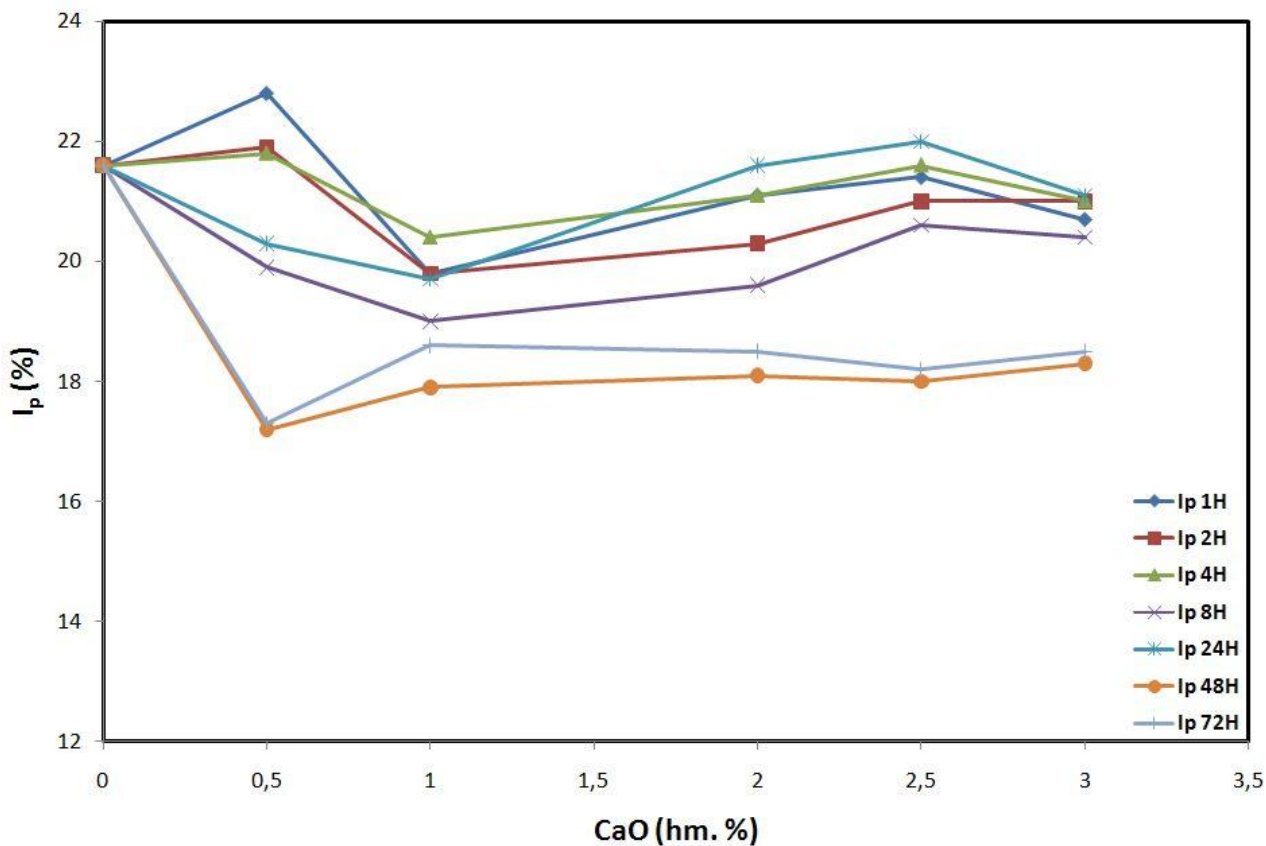
Obr. 22 - Vývoj meze plasticity v závislosti na množství přidaného vápna po 1 – 72 hodinách (H) zrání

Jak je vidět na obr. 23, graf vývoje meze tekutosti v závislosti na množství přidaného vápna ukazuje mnohem neuspořádanější chování. I to je ve shodě s teorií, podobné chování popisují např. Clare a Cruchley (1957) a Hilt a Davidson (1960). Celkově má také rostoucí charakter. Přesto je ale v grafu vidět ustálení křivek u hodnoty 2 % vápna, tedy u hodnoty LFP. Ani v tomto případě nejsou křivky ovlivněny dobou zrání.



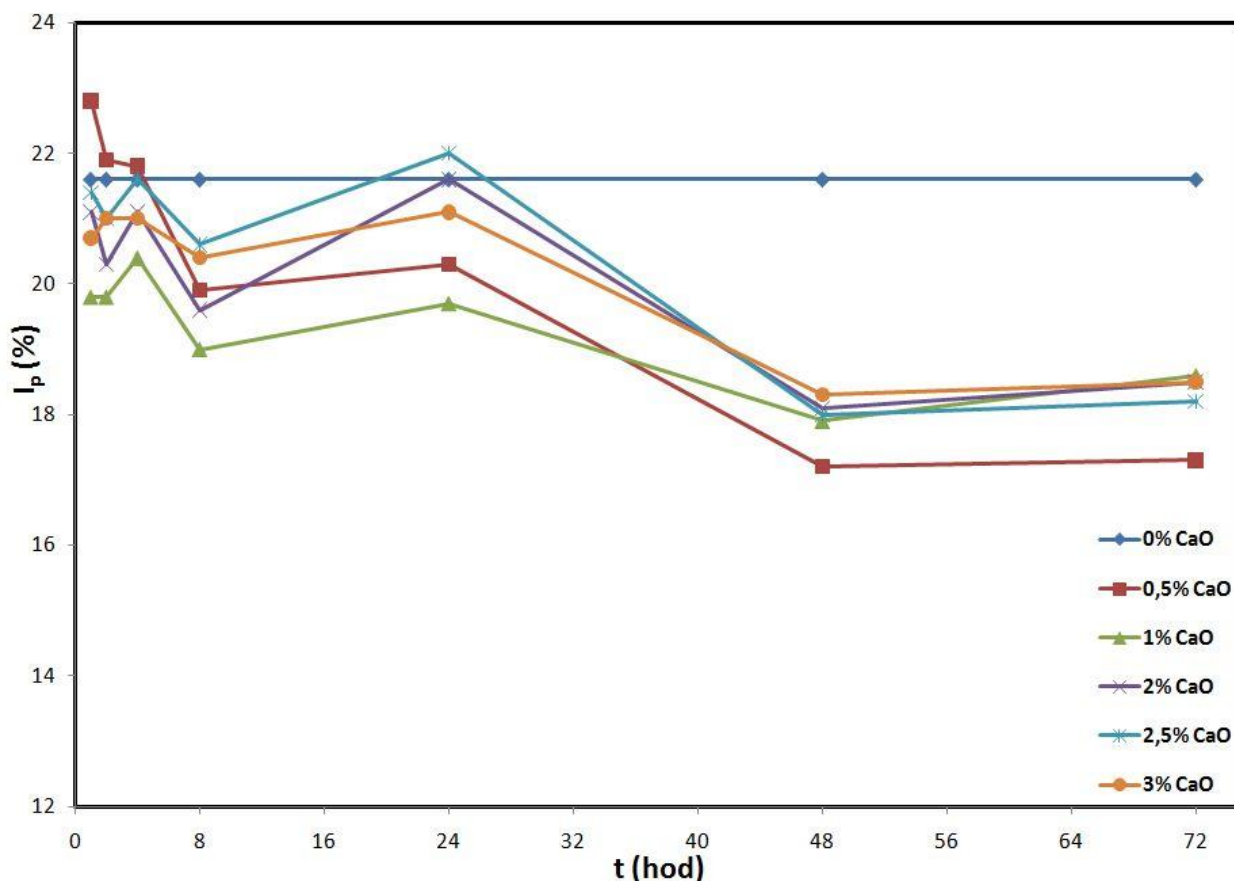
Obr. 23 - Vývoj meze tekutosti v závislosti na množství přidaného vápna po 1 – 72 hodinách (H) zrání

Obr. 24 ukazuje graf závislosti indexu plasticity na množství přidaného vápna. Hodnota LFP je z něj velmi špatně patrná, což je ale pochopitelné, jelikož je při jeho výpočtu použita mez tekutosti. Odpovídá to i poznatkům Rogerse a Glendinninga (1996) – kapitola 5.4.  $I_p$  má celkově klesající charakter.



Obrázek 24 - Vývoj indexu plasticity v závislosti na množství přidaného vápna po 1 – 72 hodinách (H) zrání

Obr. 25 ukazuje graf indexu plasticity v závislosti na době zrání.  $I_p$  má zde klesající charakter. Po 48 hodinách zrání se křivky ustalují. Z toho lze usoudit, že po této době jsou již krátkodobé reakce dokončené. I to odpovídá to poznatkům Rogerse a Glendinninga (1996) – viz kapitola 5. Není bez zajímavosti, že dokončení modifikačních reakcí není závislé na množství přidaného vápna.

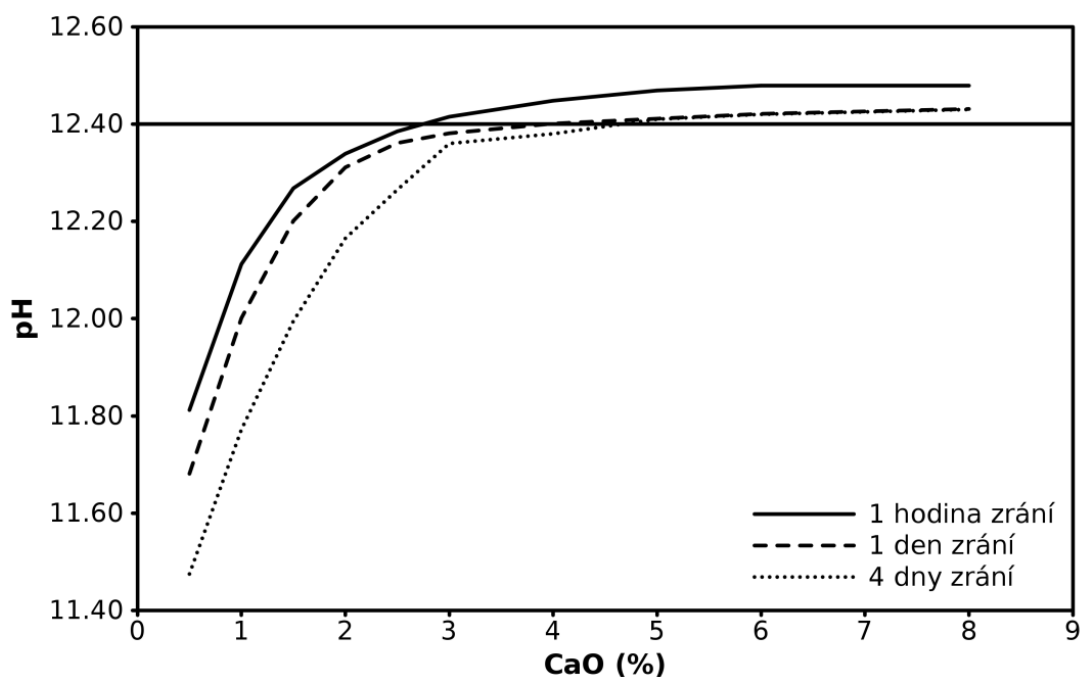


Obrázek 25 - Vývoj indexu plasticity v závislosti na době zrání

### 9.3. pH test

Stanovení hranice pro vznik dlouhodobých projevů úpravy vápnem pomocí pH testu prováděli Metelková et al. (2011). Postupovali při tom podle britské normy BS 1924-2 (1990). Jedná se o ICL test (Initial Consumption of Lime) Eadese a Grima (1966) – viz kapitola 5.2.

Na vzduchu vysušená zemina byla prosáta na síť o velikosti oka 0,4 mm. 20 g zeminy bylo smícháno s 0,5 – 8 % vápna (procentuální hmotnost byla vztažena k suché hmotnosti vzorků zeminy) a nasypáno do plastové lahvičky. Následně bylo přidáno 100 ml destilované vody. Vzorky byly umístěny do třepačky po dobu jedné hodiny. Po této době bylo pH změřeno pH metrem. Směs byla následně uložena při teplotě 22 - 25°C a pH bylo změřeno ještě po jednom a čtyřech dnech zrání. Výsledky měření jsou uvedeny na obr. 26, hodnotě ICL odpovídají 3 % vápna.



Obrázek 26 – Výsledky měření metodou ICL (Metelková et al., 2011)

Zkoušky konzistenčních mezí potvrdily tvrzení Rogerse et al. (1997) v kapitole 5.4., že ICL test může přinést vyšší požadovanou koncentraci vápna než stanovení LFP. V této práci provedené zkoušky indikují hodnotu LFP 2 % vápna, zatímco ICL test provedený Metelkovou et al. (2011) stanovuje 3 % vápna.

## 10. Závěr

V rámci této práce bylo provedeno laboratorní stanovení konzistenčních mezí prachovité zeminy upravené vápnem. Jejím hlavním cílem bylo stanovení LFP, dále byly pozorovány okamžité změny v zemině. Pozorování ukázalo

- výrazné zahřívání vzorků díky exotermicitě reakce (Reakce 1)
- rychlou flokulaci zeminy po přidání vápna
- růst meze plasticity v souladu s předpoklady uvedenými v kapitole 4.
- nepředvídatelné chování meze tekutosti, podobně jako v pracích Clarea a Cruchleyho (1957) či Hilta a Davidsona (1960)
- pokles indexu plasticity souladu s předpoklady uvedenými v kapitole 5.4.
- dokončení modifikačních reakcí po uplynutí 48 hodin zrání, což je v souladu s pozorováním Rogerse a Glendinninga (1996) (kapitola 5)
- nižší hodnotu konzistenčními mezemi stanoveného LFP oproti vyšší hodnotě ICL stanovené měřením pH, jak popisuje Rogers et al. (1997) (kapitola 5.4.)

Pro stavební praxi je lepší stanovení pomocí pH testu, který poskytne jasně stanovený postup a rychlý výsledek. Stanovení pomocí konzistenčních mezí je zdlouhavé, pracné a díky podstatě fungování vápna v zeminách též přináší riziko toho, že zemina bude nezpracovatelná dříve, než k LFP dojde. Zda se tak stane, záleží kromě dávkování pojiva hlavně na mineralogii zeminy. Praxi spíše vyhoví jistý výsledek dle pH testu, i s nadužitím vápna, než jeho nedostatečné množství s fatálními důsledky.

Téma působení vápna v zeminách je obsáhlé a jistě by se v něm dalo pokračovat. Při zvětšeném intervalu zrání v řádu měsíců by bylo možné pozorovat důsledky vzniklé díky pucolánovým reakcím, například pomocí zkoušek jednoosé pevnosti či pevnosti v trojosém přístroji. Zajímavé by také mohlo být použití hašeného vápna a srovnání jeho vlivů s páleným vápnem.

## Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Boháčovi a Mgr. Zdeňce Metelkové za odborné vedení práce, jejich připomínky a rady, bez nichž by tato práce nebyla kompletní. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a pomoc, které se mi dostalo. Díky patří i Bc. Janu Novákovi za pomoc s grafickou úpravou obrázků.

Práce byla finančně podpořena grantem GAUK 62008.

## Seznam použité literatury

- Al - Mukhtar, M., Lasledj, A. a Alcover, J. F. (2010) Behaviour and Mineralogy Changes in Lime - Treated Expansive Soil at 20°C. *Applied Clay Science*, Vol. 50, Issue 2, 191 - 198.
- Bell, F. G. (1996) Lime Stabilisation of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, Vol. 42, Issue 4, 223 - 237.
- Boardman, D. I., Glendinning, S. a Rogers, C. D. F (2001) Development of Stabilisation and Solidification in Lime - Clay Mixes. *Géotechnique*, Vol. 50, No. 6, 533 - 543.
- BS 1924-2 - Stabilised Materials for Civil Engineering Purposes, Part 2: Methods of Tests for Cement - Stabilised and Lime - Stabilised Materials (1990). British Standards Institution.
- Clare, K. E. a Cruchley, A. E. (1957) Laboratory Experiments in the Stabilisation of Clays with Hydrated Lime. *Géotechnique*, Vol. 7, Issue 2, 97 - 111.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-12 - Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí (2005). Český normalizační institut.
- ČSN EN 459-1 - Stavební vápno, Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody (2002). Český normalizační institut.
- de Brito Galvão, T. C., Elsharief, A. a Simões, G. F. (2004) Effects of Lime on Permeability and Compressibility of Two Tropical Residual Soils. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 130, No. 8, 881 - 885.
- Design Procedures for Soil Modification or Stabilisation (2008). Indiana Department of Transportation, Office of Geotechnical Engineering, Production Division.
- Eades, J. L. a Grim, R. E. (1966) A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilisation. HRB Bulletin No. 139, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 61 - 72.
- Helan, B. a Klement, K. (1960) Vápno: výroba a použití. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 2, 228 stran.
- Hilt, G. H. a Davidson, D. T. (1960) Lime Fixation in Clayey Soils. HRB Bulletin No. 304, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 20 - 32.
- Hrubeš, M. (1991) Závěrečná zpráva Horky nad Jizerou II. GMS Geoindustria Praha.
- Kotlík, P., Bláha, J., Doubravová, K., Heidingsfeld, V., Rovnániková, P., Vaněček, I. (2001) Vápno. Společnost pro technologie ochrany památek, Praha 1, 80 stran.
- McCallister, L. D. a Petry, T. M. (1992) Leach Tests on Lime - Treated Clays. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 15, No. 2, 106 - 114.
- Metelková, Z. (2007) Vliv zlepšování zpracovatelnosti zeminy na její propustnost. PŤF UK, Praha

Metelková, Z., Boháč, J., Sedlářová, I. (2010) Effect of Lime Treatment on Pore Size and Permeability of MSW Liners. 6th International Congress on Environmental Geotechnics, Vol. 1, 390 - 395.

Metelková, Z., Boháč, J., Sedlářová, I., Příklad, R. (2011) Changes of Pore Size and of Hydraulic Conductivity by Adding Lime in Compacting Clay Liners. 21st European Young Engineers Conference, in print.

Onitsuka, K., Modmoltin, Ch. a Kouno, M. (2001) Investigation on Microstructure and Strength of Lime and Cement Stabilised Ariake Clay. Reports of the Faculty of Science and Engineering, Saga University, Vol. 30, No. 1, 49 - 63.

Osula, D. O. A. (1996) A Comparative Evaluation of Cement and Lime Modification of Laterite. Engineering Geology, Vol. 42, Issue 1, 78 - 81.

Rajasekaran, G. a Rao, S. N. (1998) Particle Size Analysis of Lime - Treated Marine Clays. Geotechnical Testing Journal, Vol. 21, No. 2, 109 - 119.

Rogers, C. D. F. a Glendinning, S. (1996) Modification of Clay Soils Using Lime. Lime Stabilisation, C.D.F.Rogers, S. Glendinning and N. Dixon (eds.), Thomas Telford Ltd., London, 99 - 112.

Rogers, C. D. F., Glendinning, S. a Roff, T. E. J. (1997) Lime Modification of Clay Soils for Construction Expediency. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 125, 242 - 249.

Russo, G., Dal Vecchio, S., a Mascolo, G. (2007) Microstructure of a Lime Stabilised Compacted Silt. Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Proceedings in Physics, Vol. 112, Part I, 49 - 56.

TP 94 - Úprava zemin (2009). Ministerstvo dopravy České republiky, Odbor pozemních komunikací.



## Příloha 1

doba zrání (hod.) / dávkování vápna (%)	1			2			4			8			24			48			72		
	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	l <sub>p</sub>
0	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6	39,4	17,8	21,6
0,5	46,1	23,3	22,8	45,5	23,6	21,9	44,8	23	21,8	43,5	23,6	19,9	43,9	23,6	20,3	39,7	22,5	17,2	40	22,7	17,3
1	45,5	25,7	19,8	45,6	25,8	19,8	46,3	25,9	20,4	44,8	25,8	19	45,1	25,4	19,7	42,9	25	17,9	43,2	24,6	18,6
2	47,7	26,6	21,1	46,9	26,6	20,3	47,8	26,7	21,1	45,9	26,3	19,6	48,3	26,7	21,6	44,6	26,5	18,1	45,3	26,8	18,5
2,5	47,9	26,5	21,4	47,4	26,4	21	47,9	26,3	21,6	46,8	26,2	20,6	48,5	26,5	22	44,7	26,7	18	45,4	27,2	18,2
3	47	26,3	20,7	47,3	26,3	21	47,6	26,6	21	47,4	27	20,4	48	26,9	21,1	45	26,7	18,3	44,9	26,4	18,5

Příloha 1 - Tabulka s naměřenými hodnotami