VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení závislosti meze tekutosti a plasticity zemin na typu zeminy

Determination of Liquid and Plastic Limits od Soil Based on Its Character

Student: Radek Bednář

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Hrubešová Eva, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Bednář**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R017 Geotechnika

Téma: Stanovení závislosti meze tekutosti a plasticity zemin na typu zeminy

Determination of Liquid and Plastic Limits of Soil Based on Its Character

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky, definice konzistenčních mezí zemin
2. Metody stanovení mezí tekutosti a plasticity zemin
3. Stanovení meze tekutosti a plasticity pro variantní typy zemin
4. Vyhodnocení výsledků zkoušek, srovnání pro jednotlivé typy zemin
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1.Hulla, J., Turček, P. *Zakladanie stavieb.* Jaga: Bratislava, 1998. ISBN 80-88905-05-2.
2.Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* SNTL Praha, 1990.
3.*ČSN 72 1012 Laboratorní stanovení vlhkosti zemin.* Praha: Český normalizační institut, 2005.
4 .*ČSN 72 1014 Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin.* Praha, ÚMN, 1968.
5 .*ČSN CEN ISO/ TS 17892 – 12 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí.* Praha: Český normalizační institut, 2005.
6.*ČSN CEN ISO/TS 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti zemin.* Praha: Český normalizační institut, 2005.
7. Mohajerani, A.*A suggested calibration for the cone penetrometer liquid limit.* In:Australian Geomechnics, 1999. Dostupné z: http://australiangeomechanics.org/admin/wpcontent/uploads/2015/03/34_4_6.pdf.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ……. …….

Podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ……

Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje především na stanovení dvou základních konzistenčních mezí zemin. Mez tekutosti je v této práci laboratorně určena pomocí Casagrandeho přístroje a pomocí Vasiljevova kužele. Mez plasticity je laboratorně stanovena pomocí metody tzv. válení válečků. Cílem této práce je nejen stanovení těchto konzistenčních mezí, ale taky sledování vývoje těchto mezí pro tří různé zeminy. Bude se jednat o jíl s různě velkou příměsí jemnozrnného písku. Dalším cílem je bližší seznámení s nedostatky, které tyto metody mají. Na základě novějších výzkumů dojde ke zpřesnění stanovení těchto mezí, které právě berou v potaz nedostatky těchto zkoušek. Dále srovnání a stanovení součinitele pro přepočet mezi Casagrandeho a Vasiljevovou metodou.

Annotation

This bachelor thesis is focused on determination two basics consistency limits of soils. Liquid limits are determined by Casagrande method and cone penetration method (Vasil'ev cone). Plastic limits are determined by thread rolling method. The main goal of this paper is not only determination of these consistency limits, but also tracking trends for changing liquid and plastic limits of three different soils. It will be clay with different admixtures of fine grained sand. Next goal is examination of weaknesses, which these methods have. Based on newer research in this field, this paper tries to determinate these consistency limits more accurately. Next thing will be determination of correlation coefficient between Casagrande method and cone penetration method.

Klíčová slova:

Mez tekutosti, mez plasticity, Casagrandeho přístroj, Vasiljevův kužel, jíl, jemnozrnný písek

Key words:

Liquid limit, Plastic limit, Casagrande device, Vasil'ev cone, clay, fine grained sand

Seznam použitého značení

značení	význam	jednotka
I_c	Index konzistence	[-]
I_L	Index tekutosti	[-]
I_p	Index plasticity	[-]
c_u	Neodvodněná smyková pevnost zeminy na mezi tekutosti	[kPa]
w	Vlhkost zeminy	[%]
w_L	Vlhkost zeminy na mezi tekutosti	[%]
w_p	Vlhkost zeminy na mezi plasticity	[%]
w_s	Vlhkost zeminy na mezi smrštění	[%]

Obsah

1. Úvod 1

2. Definice konzistenčních mezí zemin 1

2.1. Konzistenční stavy zemin 1

2.2. Konzistenční meze zemin 3

3. Metodika laboratorních zkoušek pro stanovení meze tekutosti a plasticity zemin 5

3.1. Postup stanovení meze tekutosti Vasiljevovým kuželem 5

3.2. Postup stanovení meze tekutosti Casagrandeho přístrojem 8

3.3. Postup stanovení meze plasticity 12

4. Realizace vlastních laboratorních zkoušek a jejich statistické vyhodnocení 13

4.1. Vlastní laboratorní zkoušky meze tekutosti a plasticity 15

4.2. Statistické vyhodnocení zkoušek 19

4.3. Srovnání zkoušek Casagrandeho misky a Vasiljevova kužele 21

4.4. Zahraniční studie zabývající se problematikou stanovení meze tekutosti a meze plasticity zemin 23

5. Závěrečné srovnání provedených zkoušek 28

6. Závěr 30

7. Seznam použitých zdrojů 32

1. Úvod

Mez tekutosti zemin se laboratorně určuje pomocí metodiky Vasiljevova kužele a Casagrandeho přístroje. Druhá jmenovaná metoda je v současné době dle ČSN (české technické normy) neplatná. Obě tyto zkoušky mají své klady a zápory. V této práci se objeví srovnání těchto metod a využití novějších poznatků z výzkumu, které se snaží eliminovat nedostatky těchto zkoušek. Ke stanovení meze plasticity bude použita metoda tzv. válení válečků podle současně platné normy a rovněž nový (experimentální) způsob stanovení meze plasticity pomocí Vasiljevova kužele. V této práci jsou zpracované výsledky ze tří různých vzorků. Samotný jíl, jíl s příměsí 25 % jemnozrnného písku a dále jíl s příměsí 50 % jemnozrnného písku. Výsledkem pak bude sledování vývoje konzistenčních mezí na základě různého poměru jílu a jemnozrnného písku, dále také zhodnocení a statistické vyhodnocení jednotlivých zkoušek a jejich porovnání.

2. Definice konzistenčních mezí zemin

2.1. Konzistenční stavy zemin

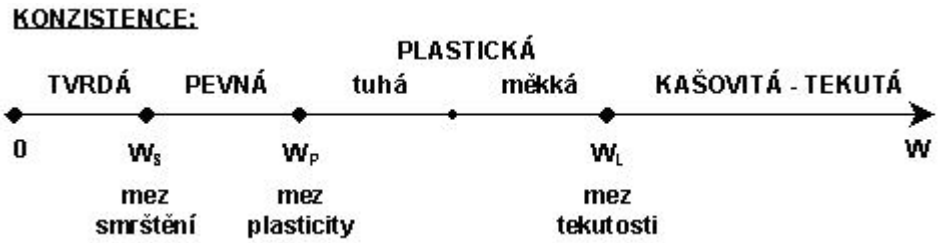
Konzistenční stavy zemin popisují vliv kapalné fáze na vlastnosti soudržných (jemnozrnných) zemin. Vlhkost a plasticita jsou v tomto případě důležitými parametry, které výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti jemnozrnných zemin. Když má zemina kašovitou konzistenci (je tekutá), tak nemá žádnou pevnost a tedy není schopna přenášet žádná zatížení. Stejná zemina s velmi malou vlhkostí může mít tvrdou konzistenci a má tedy vysokou pevnost a je tudíž schopna přenášet poměrně velká zatížení.

Soudržné zeminy jsou směsí jílovitých, prachovitých a často i písčitých zrn. Voda v těchto zeminách může různě působit na její fyzikální vlastnosti, může být volná nebo vázaná. *Množství vázané vody narůstá v zemině s podílem a typem jílového minerálu a výměnných kationtů* (viz. [2]). Na základě vlhkosti pak určujeme konzistenci soudržné zeminy, tedy stanovíme její konzistenční stav.

Tyto stavy rozlišujeme na stav tvrdý, pevný, plastický a kašovitý (tekutý). Plastický stav rozdělujeme dále na tuhoplastický a měkce plastický. V polních podmínkách můžeme určit konzistenční stav jednoduchými zkouškami:

- *Tvrdá zemina je suchá, má světlou barvu, chová se jako pevné těleso, které můžeme rozbíjet na ostrohranné kusy.*
- *Pevná zemina má nízkou vlhkost, tmavší zabarvení, hrudky nejsou ostrohranné, zemina je drobivá, nelze z ní vyválet válečky v průměru 3 mm.*
- *Tuhoplastická zemina se těžce hněte, ale lze z ní vyválet válečky o průměru 3 mm.*
- *Měkce plastickou zeminu můžeme lehce hníst.*
- *Kašovitá (tekutá) zemina ztrácí pevnost, chová se jako hustá, viskózní tekutina.* (viz. [2]).

Souhrnně lze jednotlivé konzistence ve vztahu ke konzistenčním mezím zobrazit pomocí vlhkostní osy.



Obrázek 1 – Zobrazení konzistence soudržných zemin na vlhkostní ose

Nachází-li se konkrétní vlhkost, v rozsahu vlhkosti na mezi tekutosti a plasticity, zemina vykazuje plastické chování. Zemina v tomto stavu má určitou smykovou pevnost, po jejímž překročení se však začne plasticky přetvářet. To znamená, že zvětšuje své přetvoření, aniž dále roste smykové napětí.

Při zvýšení vlhkosti nad mez tekutosti w_L se chování zeminy mění a její stav se označuje jako kašovitý až tekutý. Zemina v tomto stavu klade minimální nebo nulový odpor proti smykovému přetvoření. Při sevření se taková zemina protlačuje mezi prsty. Naopak při snížení vlhkosti pod mez plasticity začíná nabývat charakteru látky křehké, neboť při přetváření se poruší. Tento stav je označován jako pevný. *Skutečně křehkého chování zeminy je dosaženo až dalším snížením vlhkosti pod mez smrštění w_s, do stavu tvrdého, tj. tehdy, je-li vlhkost zeminy tak malá, že se voda stahuje kapilárními a sorpčními silami dovnitř, barva je světlá a zeminu lze lámat a rozbíjet na ostrohranné kusy.*

Konzistence soudržných zemin ovlivňuje jejich stlačitelnost a pevnost, a rozhoduje o vhodnosti zeminy jako základové půdě pro plošné a pilotové základy. (viz. [2]).

2.2. Konzistenční meze zemin

Přechod z jednoho konzistenčního stavu do jiného nastává v určité konkrétní soudržné zemině vždy za stejných charakteristických vlhkostí, které označujeme jako meze konzistence. Podle norského keramického odborníka Atterberga, který je první použil pro charakterizování zemin, je také označujeme jako Atterbergovy meze.

Rozeznáváme tyto konzistenční meze:

- Mez smrštění w_s (přechod mezi tvrdým a pevným konzistenčním stavem);
- Mez plasticity w_p (přechod mezi pevným a plastickým konzistenčním stavem);
- Mez tekutosti w_L (přechod mezi plastickým a tekutým konzistenčním stavem).

Hranici mezi tvrdým a pevným stavem tvoří tzv. **mez smršťování w_s**, která odpovídá vlhkosti, při které postupně vysušovaná zemina přestává zmenšovat svůj objem nebo délkový rozměr.

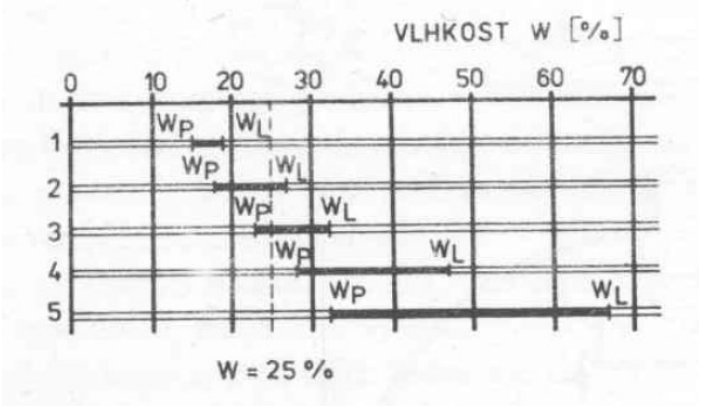
Přechod z pevného do plastického stavu udává **mez plasticity w_p**, definovaná jako vlhkost, při níž se zemina vyválená na válečky v průměru 3 mm začíná rozpadávat na kusy dlouhé asi 1 cm. Nebo jednodušeji jako vlhkost, při níž je zemina natolik vysušená, že ztrácí svou plasticitu.

Mez tekutosti je definována jako vlhkost zeminy, při níž zemina přechází ze stavu měkce plastického do stavu tekutého. Při zvyšujícím se množství vody v zemině, dochází ke zvětšení mezer mezi jejími částicemi a snížení jejich vzájemných interakcí, což má za následek změnu mechanických vlastností. Určuje se pomocí Casagrandeho přístroje nebo Vasiljevovým kuželem. Při první metodě získáme mez tekutosti tehdy, když se koláček zeminy, s vodorovným a uhlazeným povrchem umístěný v misce přístroje a rozdělený normovým nožem na dvě části, slije po 25 úderech misky o podložku v délce přibližně 12,5 mm, a to při rychlosti dvou úderů za sekundu. Použijeme-li kužel, odpovídá mezi tekutosti ta vlhkost, při níž se hladký kovový kužel se středovým úhlem 30° a s hmotností 80 g, položený na uhlazený povrch vzorku, zaboří vlastní tíhou do hloubky 20 mm během 5 vteřin.

Na základě hodnoty meze tekutosti a hodnot dalších konzistenčních mezí se určují důležité geotechnické vlastnosti soudržných zemin, jako je například:

- Index plasticity – I_p (číslo plasticity)
- Index konzistence - I_c
- Index tekutosti - I_L

Číslo plasticity vyjadřuje v procentech rozsah vlhkosti, v němž je zemina plastická. Čím větší je specifický povrch zeminy, čím více a čím aktivnější jílové minerály a výměnné kationty zemina obsahuje, tím větší je její schopnost vázat a udržet vodu, a tím větší je i její číslo plasticity. Index plasticity je rovněž rozhodující při posuzování rychlosti konsolidace dané zeminy – zeminy s nižším indexem plasticity konsolidují rychleji. Atterberg využil číslo plasticity k přibližné klasifikaci zemin (viz. Obrázek 2).



Legenda: 1 – písčitá hlína, 2,3 – prachovité hlíny, 4 – jílovitá hlína, 5 - jíl

Obrázek 2 – Plastická oblast různých zemin.

Na obrázku 2 je vyznačen rozsah plastické oblasti různých zemin. Z obrázku 2 vyplývá, že číslo plasticity I_p ani absolutní hodnota vlhkosti nás neinformují o konzistenčním stavu zeminy. Například při vlhkosti 25% je první zemina již v kašovitém stavu, druhá je měkce plastická, třetí tuhoplastická, čtvrtá pevná nebo tvrdá. Vzorec pro výpočet čísla plasticity:

$$I_p = w_L - w_p \quad (1)$$

Pomocí **indexu konzistence** rozlišujeme konzistenční stav zeminy na tvrdý, tuhý, měkký a tekutý. Hodnoty indexu se pohybují v rozmezí 1 – 0,05. Více v tabulce 1

Stupeň konzistence Ic	konzistence
Větší nebo roven 1	Pevná až tvrdá
1,0 – 0,5	tuhá
0,5 – 0,05	měkká
Menší než 0,05	Kašovitá - tekutá

Tabulka 1 – tabulka stupně konzistence zemin (viz. [1])

Vzorec pro stanovení indexu konzistence:

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} = \frac{w_L - w}{I_p} \qquad (2)$$

Index tekutosti určujeme podle vzorce:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \qquad (3)$$

$$I_c + I_L = 1 \qquad (4)$$

Spolehlivé stanovení konzistenčních mezí je tedy z hlediska stavební praxe velmi důležitá charakteristika, která vyžaduje podrobný výzkum.

3. Metodika laboratorních zkoušek pro stanovení meze tekutosti a plasticity zemin

Příprava zkušebního vzorku zeminy:

- Vysušený vzorek zeminy se proseje na sítě o průměru oka 0,4 mm nebo jemu nejbližším a vloží se do misky (cca 200 g).
- Za důkladného míchání se přidává destilovaná voda a vzorek zeminy se nožem či špachtlí prohněte (alespoň 5 minut) až do stavu homogenní pasty. Zrna zeminy se tak rovnoměrně obalí vodou. Při nedostatečném promíchání nebo vmíchání vzduchových bublin do vzorku zeminy je výrazně ovlivněna výsledná hodnota meze tekutosti.
- U jílovitých zemin je nutné nechat připravený a prohnětený vzorek uležet po dobu 24 hodin, aby se vlhkost rovnoměrně rozdělila v zemině.

3.1. Postup stanovení meze tekutosti Vasiljevovým kuželem

Resumé norem:

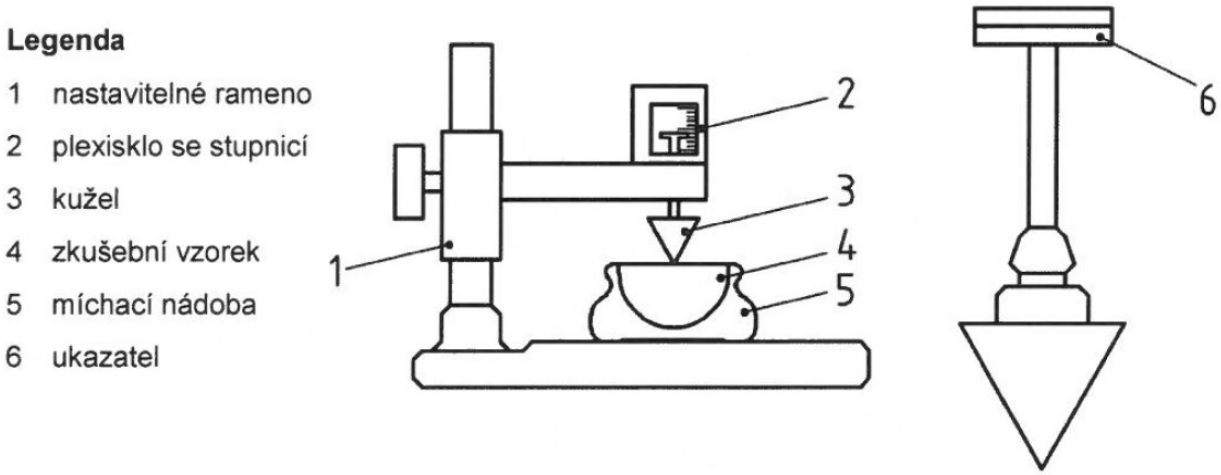
ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (72 1007)

Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí

Norma umožňuje používat dva typy kuželů (60 g/60° a 80 g/30°). Bylo prokázáno, že získané výsledky zkoušek meze tekutosti pomocí těchto kuželů jsou shodné. Při zkouškách pro tuto bakalářskou práci byl použit kužel o hmotnosti 80 g při vrcholovém úhlu 30°. Kužel musí být vyrobený z nerezové oceli nebo duralu a drsnost jeho povrchu musí být menší než 0,8 μm. Metoda Vasiljevova kužele je založena na stanovení vlhkosti, při níž se dosáhne smluvní penetrace, která odpovídá vlhkosti na mezi tekutosti, při níž má zemina smluvní smykovou pevnost (cca 2 – 3 kPa).

Potřebné zařízení:

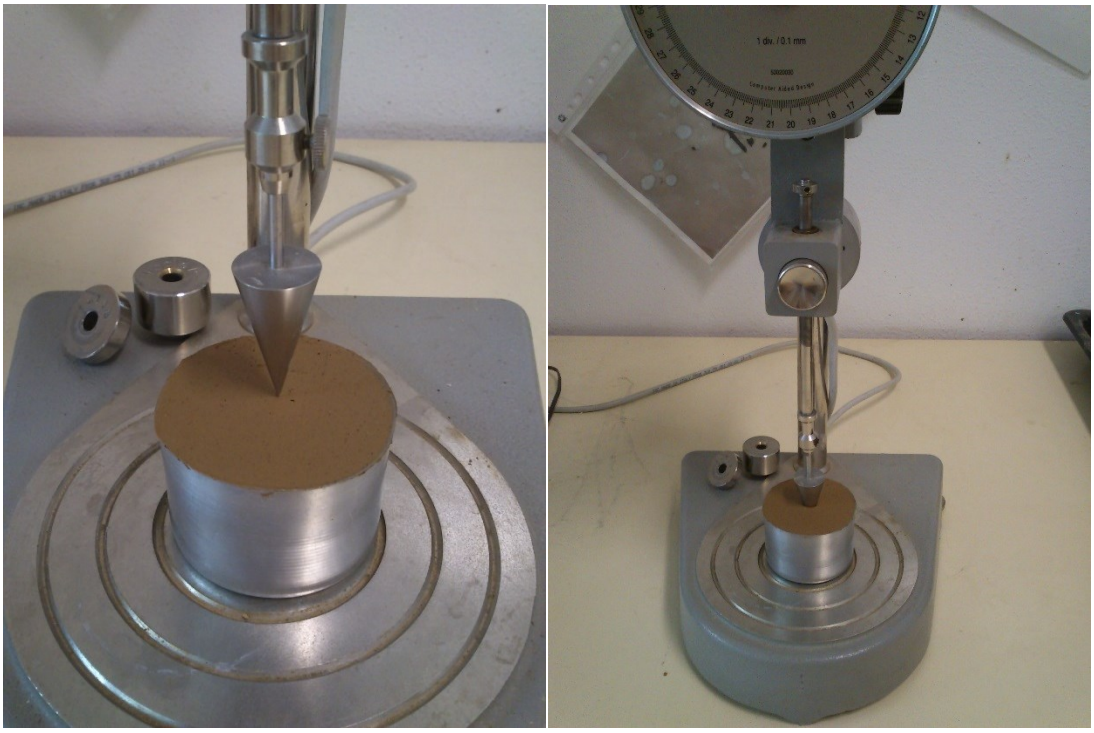
1. Kuželový přístroj
2. Laboratorní váha (přesnost 0,03 g, rozlišení 0,01 g)
3. Laboratorní nůž
4. Zařízení pro stanovení vlhkosti podle CEN ISO/TS 17892-1
5. Míchací nádoby
6. Stěrka pro hnětení zeminy
7. Plastová střička s destilovanou vodou
8. Váženky



Obrázek 3 – Kuželový přístroj

Postup:

1) Připravená promíchána zemina se vloží do nádoby (bez vzduchových bublin). Její povrch se zarovná s okrajem misky pomocí laboratorního nože.
2) Nádoba se zeminou se umístí pod penetrační kužel. Tento kužel je potřeba výškově nastavit tak, aby jeho hrot byl v těsném kontaktu se zeminou (při pohybu misky je viditelná stopa v zemině).
3) Na stupnici přístroje se provede počáteční čtení výšky kužele s přesností na 0,1 mm.
4) Kužel se uvolní na dobu 5 vteřin. Ze stupnice kuželového přístroje se s přesností 0,1 mm zaznamená zaboření kužele do zeminy a rozdíl mezi touto hodnotou a počáteční výškou kužele je hloubka penetrace. Ta by měla být pro kužel 80 g/30° mezi 10 – 30 mm. Kužel se vyjme ze zeminy a jemně očistí.

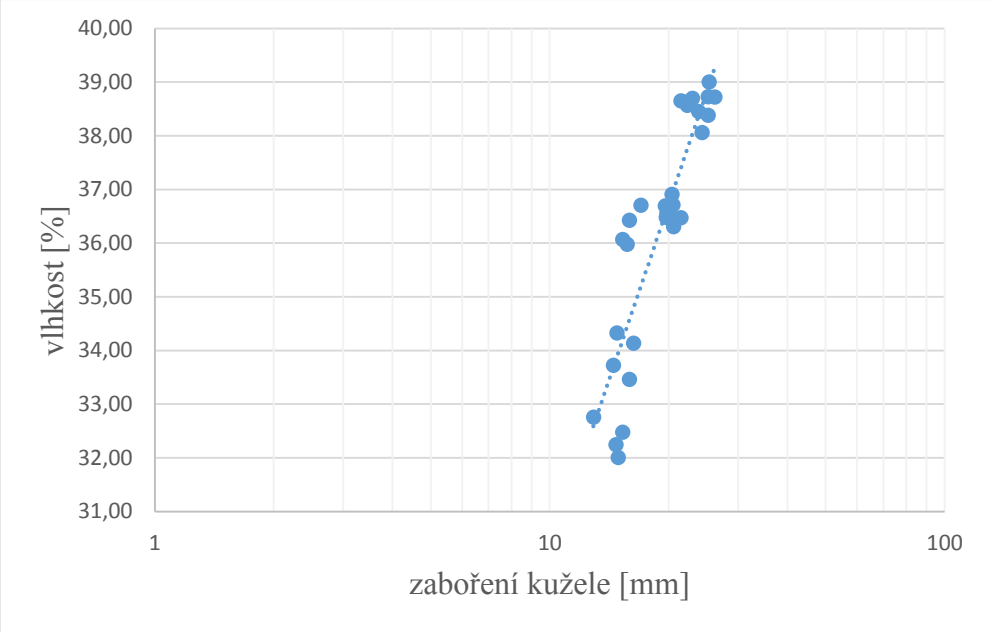


Obrázek 4 a 5 – Kuželový přístroj při stanovení meze tekutosti (foto autor)

5) Celý postup zkoušky se musí opakovat ještě nejméně třikrát (celkem 4 zkoušky) za použití stejného vzorku při různých vlhkostech. Ta závisí, je-li hloubka penetrace v prvním měření:
   a) Menší než 20 mm, do vzorku se přidá voda
   b) Větší než 20 mm, následné měření se provádí po částečném vysušení vzorku
6) Z penetrační zóny kužele se odebere vzorek zeminy (± 10 g) pro stanovení její vlhkosti dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1. Pro zeminy s velmi vysokou mezí tekutosti jako jsou organické

jíly a amorfní rašeliny se má vlhkost, z důvodu získání přesnějších hodnot, stanovovat na vzorku nejméně 20g zeminy.

7) Závislost vlhkosti [%] a penetrace kužele [mm] se vynese do grafu v semilogaritmickém měřítku: na vodorovnou osu hloubka penetrace v logaritmickém měřítku a na svislou osu příslušné vlhkosti v měřítku lineárním. Těmito body se následně proloží přímka. Vlhkost na mezi tekutosti pro kužel 80 g/30° odpovídá hloubce zaboření 20 mm (pro kužel 60 g/60° odpovídá vlhkost na mezi tekutosti hloubce zaboření 10 mm). Hodnota meze tekutosti má být vyjádřena na dvě platné číslice.



Graf 1 – Příklad vyhodnocení kuželové zkoušky

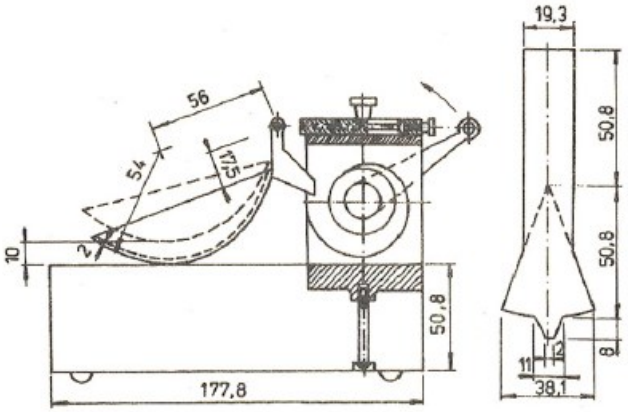
3.2. Postup stanovení meze tekutosti Casagrandeho přístrojem

ČSN 72 1014 - Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin

Tato zkouška je v současné době alternativní metodou stanovení meze tekutosti (na našem území byla platná do června roku 2006). Její postup byl poprvé představen v roce 1932 Arthurem Casagrandem (28. srpna 1902 – 6. září 1981). Hledá se vlhkost, při níž se poruší svah zářezu zeminy v patě smluveným způsobem, která odpovídá vlhkosti na mezi tekutosti, při níž má zemina smluvní smykovou pevnost (cca 2 – 3 kPa).

Potřebné zařízení

1. Casagrandeho přístroj
2. Normovaný nůž
3. Laboratorní váha s rozlišením 0,01 g
4. Laboratorní sušička
5. Keramická miska
6. Stěrka pro hnětení zeminy
7. Plastová střička s destilovanou vodou
8. Váženky

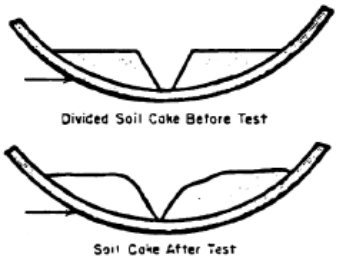


Obrázek 6 – Casagrandeho přístroj

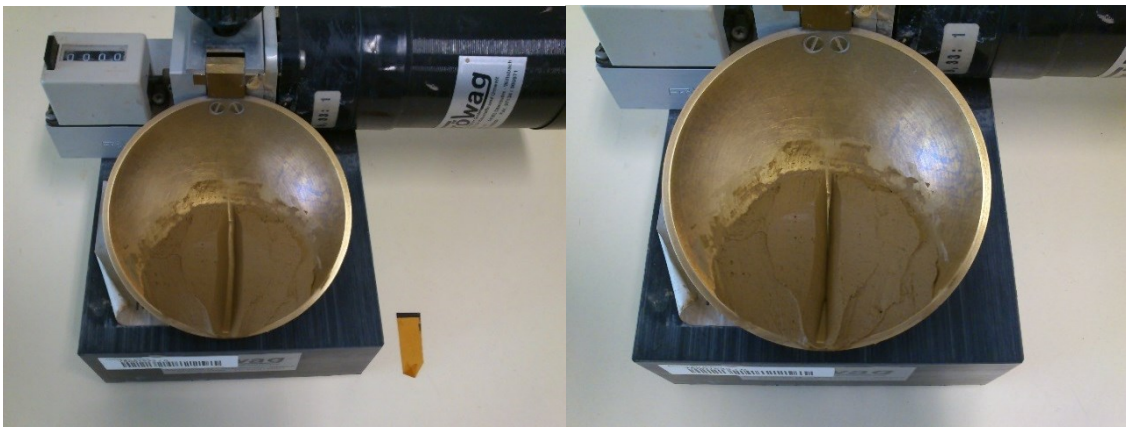
Postup

1. Vzorek zeminy promísený s destilovanou vodou se pomocí nože či stěrky nanese do suché a čisté misky přístroje na její dno, kde se miska opírá o podkladní desku.
2. Zemina se uhladí do roviny rovnoběžné s podkladovou deskou, co nejmenším počtem tahů. Ve vzorku nesmí zůstat uzavřené bublinky vzduchu. Vytvořený koláček zeminy má mít maximální tloušťku 10 mm.
3. Vyřezávacím nožem předepsaného tvaru (normovaným nožem) se vyřízne uprostřed koláčku zeminy rýha, která jej rozdělí na dvě poloviny

4. Miska Casagrandeho přístroje se poté nechá volně dopadat na podkladní desku z výšky 10 mm rychlostí dvou otáček za vteřinu, přičemž se počítají dopady (rozmezí počtu úderů 15 až 35). Toto se provádí, dokud se obě poloviny koláčku slijí v dolní části rýhy na délku přibližně 12,5 mm. Zaznamená se konečný počet úderů.

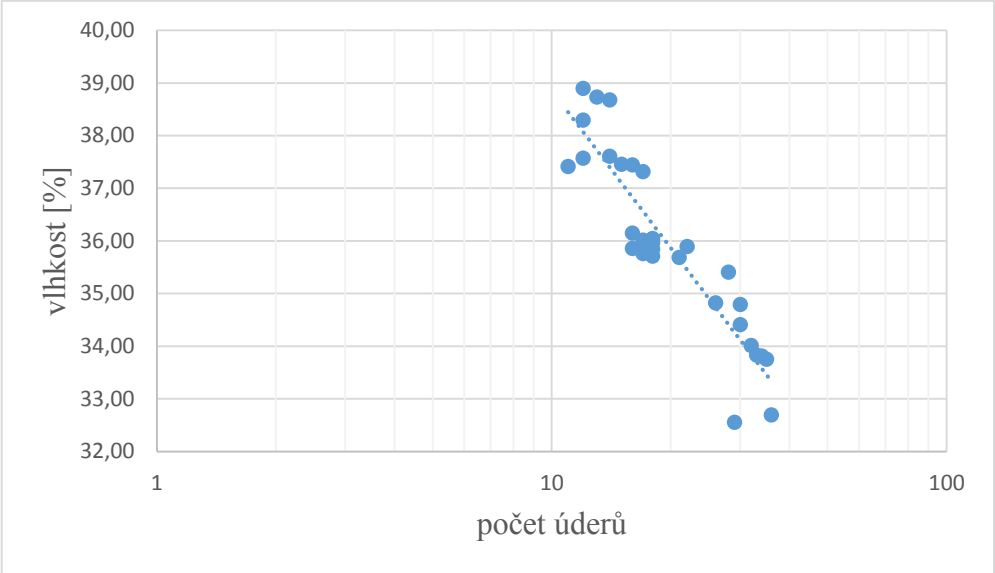


Obrázek 7 – Stav koláčku před a po zkoušce



Obrázek 8 a 9 – Casagrandeho přístroj při stanovování meze tekutosti (foto autor)

5. Z obou polovin koláčku se odebere vzorek pro stanovení vlhkosti (v množství přibližně 10 g) dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1.
6. Celkem se provedou alespoň čtyři měření počtu úderů, přičemž se zpravidla postupuje od nižší vlhkosti vzorku k vlhkosti vyšší (do připravené zeminy se nesmí přidávat vysušená zemina). Data se průběžně zapisují do formuláře.
7. Závislost mezi vlhkostí [%] a příslušným počtem úderů se vynese v semilogaritmickém měřítku. Na vodorovné ose se v logaritmickém měřítku vynese počet úderů a na svislé ose se v lineárním měřítku vynese vlhkost. Získanými body se proloží přímka
8. Z přímky se stanoví vlhkost na mezi tekutosti, která odpovídá 25 úderům. Výsledek se zaokrouhlí na celá procenta.



Graf 2 – Příklad vyhodnocení Casagrandeho zkoušky

Zkouška v Casagrandeho přístroji je citlivější na různé faktory realizace zkoušky i její vyhodnocení než je tomu u Vasiljevova kužele. Obecně tato zkouška závisí na následujících základních faktorech:

a) Energie úderu (včetně charakteru podložky);
b) Rychlost úderu o podložku;
c) Množství testované zeminy na misce;
d) Způsob nandání zeminy do misky a následná rovnost a uhlazení povrchu koláče zeminy
e) Kvalita vytvoření rýhy (dodržení předpokladu kolmosti rýhy na podklad, pod normovým nožem by nemělo docházet k přílišnému stlačení apod.);
f) Spolehlivé posouzení délky spojení obou částí koláče zeminy;
g) Jedná se o výrazně dynamickou zkoušku, přičemž různé zeminy mohou být různě citlivé vůči dynamickým vlivům (např. i v důsledku různě velkých částic ve vzorku zeminy).

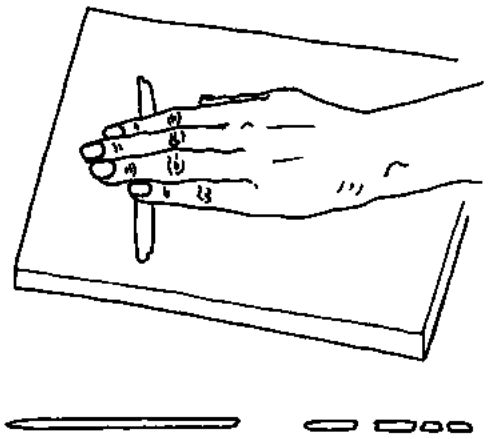
Dále má Casagrandeho zkouška větší tendenci k chybě způsobené lidským faktorem. Velmi důležitý je osobní přístup laboranta, který danou zkoušku provádí. Casagrandeho metoda má mnoho nedostatků, jako jsou složitost vytvoření ideální drážky, nutnost odhadu spojení zeminy a pomalá rychlost operace. Doba potřebná pro provedení zkoušky pomocí Vasiljevova kužele je značně kratší ve srovnání s metodou A. Casagrandeho.

Při vlhkosti na mezi tekutosti má zemina určitou smluvní neodvodněnou pevnost. U Casagrandeho přístroje jde o pevnost související se stabilitou svahu zářezu vytvořeného v misce přístroje. U Vasiljevova kužele jde o pevnost ve smyku, více v další kapitole.

Výsledky těchto dvou metod nejsou rovnocenné. Podle platné ČSN je pro stanovení meze tekutosti upřednostňována metoda Vasiljevovým kuželem, z důvodu lepší opakovatelnosti a jednoduchosti provádění. Vasiljevův kužel má také větší rozsah použitelnosti u různých typů zemin.

3.3. Postup stanovení meze plasticity

Podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 se navlhčený vzorek zeminy hněte mezi prsty, z důvodu rovnoměrného rozložení vlhkosti. Tyto válečky se poté válí mezi prsty ruky od špičky po druhý kloub a povrchem míchácí nebo válecí desky.



Obrázek 10 – Laboratorní zkouška pro stanovení meze plasticity

Musí se přitom použít tlak působící zmenšení průměru válečku na zhruba 3 mm po 5ti až 10ti pohybech ruky vpřed a vzad při rychlosti zhruba 1 pohybu (vpřed a vzad) za 1 vteřinu. Je důležité neustále zachovávat stejný rolovací tlak. Opakujeme postup, dokud se válečky s průměrem blížícím se k 3 mm, nerozpadávají jak v podélném tak příčném směru. Kousky zeminy se nemohou sbírat a znovu válet poté, co popraskají. První bod rozdrobení indikuje dosažení meze plasticity. Části rozpraskaných válečků zeminy se umístí do váženky a stanoví se vlhkost.

Obrázek 11 – Výsledek zkoušky na mez plasticity

4. Realizace vlastních laboratorních zkoušek a jejich statistické vyhodnocení

Stručná charakteristika testované zeminy:

Obrázek 12 – Zkoumaný vzorek zeminy (foto autor)

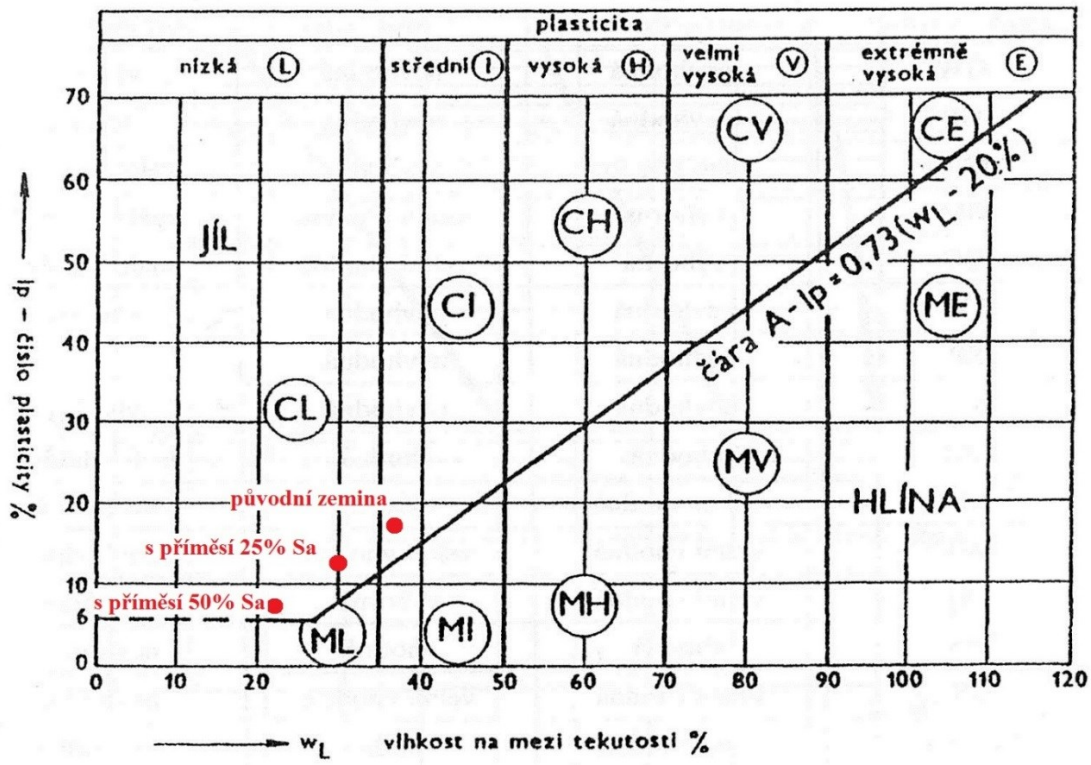
Zkoumaná zemina pochází z areálu VŠB-TUO fakulty stavební, z podloží zkušebního standu, který slouží pro experimentální zkoušky interakce základových konstrukcí a podloží. Jedná se o jílovitou zeminu hnědošedé barvy. Zemina vykazuje v suchém stavu poměrně vysokou

pevnost, ale na vzduchu tyto pevnostní vlastnosti rychle degradují. Danou zeminu smíchám v různém poměru s jemnozrnným pískem a budu sledovat, jak se mění meze tekutosti a plasticity v závislosti na poměru písku. Napodobím tak různé zrnitostní složení zemin. Ve výsledku tedy budou provedeny zkoušky na mez tekutosti a plasticity u tří zemin:

a) Samotná zemina (dále jako vzorek č. 1)
b) Zemina s 25 % podílem jemnozrnného písku (dále jako vzorek č. 2)
c) Zemina s 50 % podílem jemnozrnného písku (dále jako vzorek č. 3)

Zrnitostní složení zeminy nebylo realizováno z důvodu, že nebylo k dispozici zařízení pro separaci jednotlivých částic zeminy a realizaci standardní hustoměrné zkoušky ve fakultní laboratoři mechaniky zemin.

K zatřízení zeminy došlo na základě výsledků meze tekutosti a indexu plasticity. Původní zemina byla tedy zatřízena jako **jíl se střední plasticitou** (vzorek č. 1). Přidáním jemnozrnného písku se snížila plasticita a jednalo se tudíž o **jíl s nízkou plasticitou** (vzorek č. 2 a č. 3).



Obrázek 13 – Casagrandeho diagram plasticity

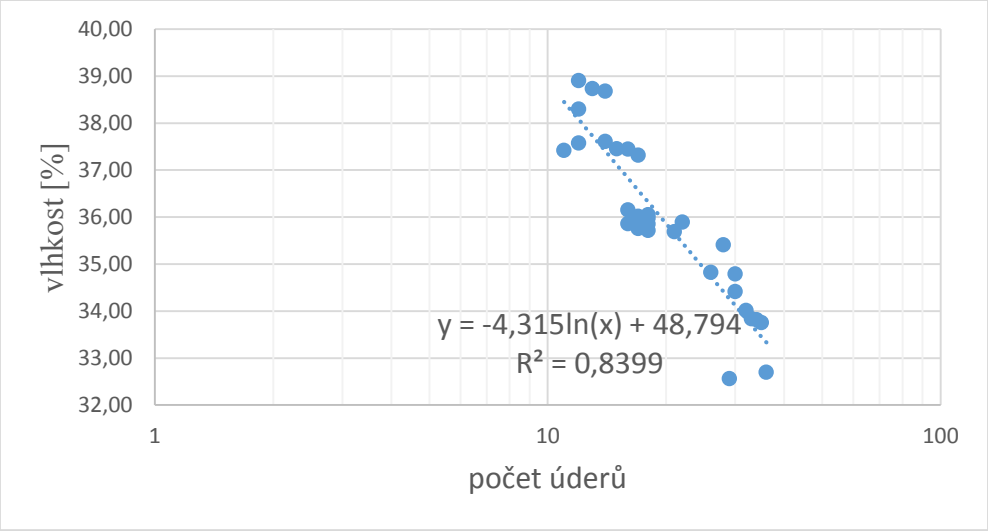
4.1. Vlastní laboratorní zkoušky meze tekutosti a plasticity

Celkem bylo provedeno deset laboratorních zkoušek, a to jak pro Vasiljevův kužel, tak pro Casagrandeho přístroj, tak i pro zkoušku stanovení meze plasticity. Na jejich základě byly stanoveny a vzájemně srovnány meze tekutosti a plasticity pro daný vzorek zeminy.

Původní zemina – Jíl se střední plasticitou (vzorek č. 1)			
číslo zkoušky	**w_L [%]** Vasiljevův kužel	**w_L [%]** Casagrandeho miska	**w_P [%]**
1.	36,53	34,62	21,76
2.	37,62	33,39	20,50
3.	37,14	35,31	21,12
4.	37,43	35,48	18,42
5.	37,04	34,90	18,63
6.	36,92	34,85	19,67
7.	36,49	35,18	19,37
8.	36,27	34,94	20,23
9.	36,31	35,04	21,41
10.	36,52	35,20	18,99

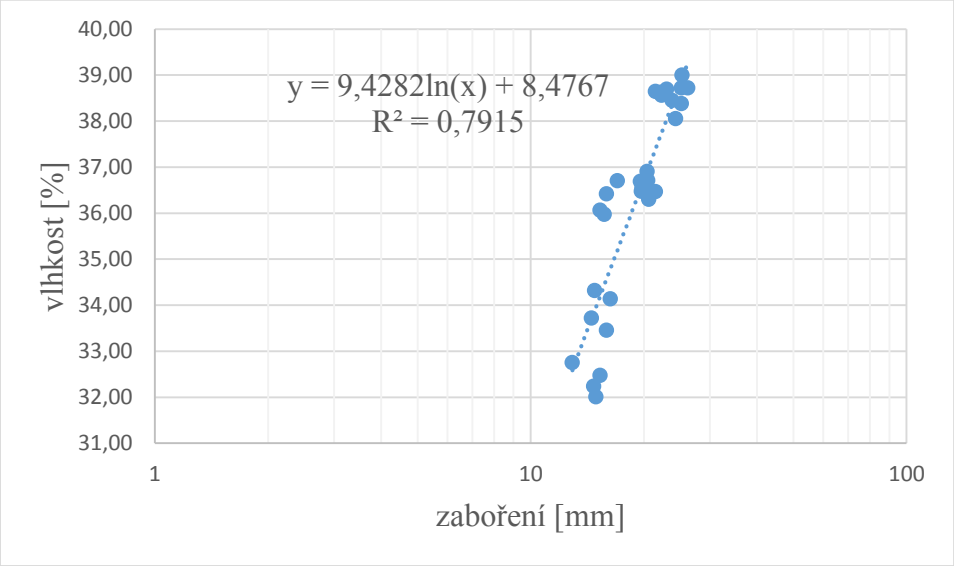
Tabulka 2 – Výsledné hodnoty zkoušek pro vzorek č. 1

Pro původní zeminu (jíl se střední plasticitou) se hodnoty pro Vasiljevův kužel pohybovaly v rozmezí od 36,27 % do 37,62 % a u Casagrandeho misky od 33,39 % do 35,48 %. Z výsledků je patrné, že mez vlhkosti pro Vasiljevův kužel dosahuje vyšších hodnot. Největší rozsah hodnot byl zaznamenán u meze plasticity, kdy se hodnoty meze plasticity pohybovaly od 18,42 % až do 21,76 %.



Graf 3 – Výsledky Casagrandeho zkoušky meze tekutosti pro vzorek č. 1

Graf 3 zobrazuje výsledky všech 10ti zkoušek pomocí Casagrandeho misky. Hodnota meze tekutosti, která odpovídá 25 úderům, by byla rovna **34,90 %**.



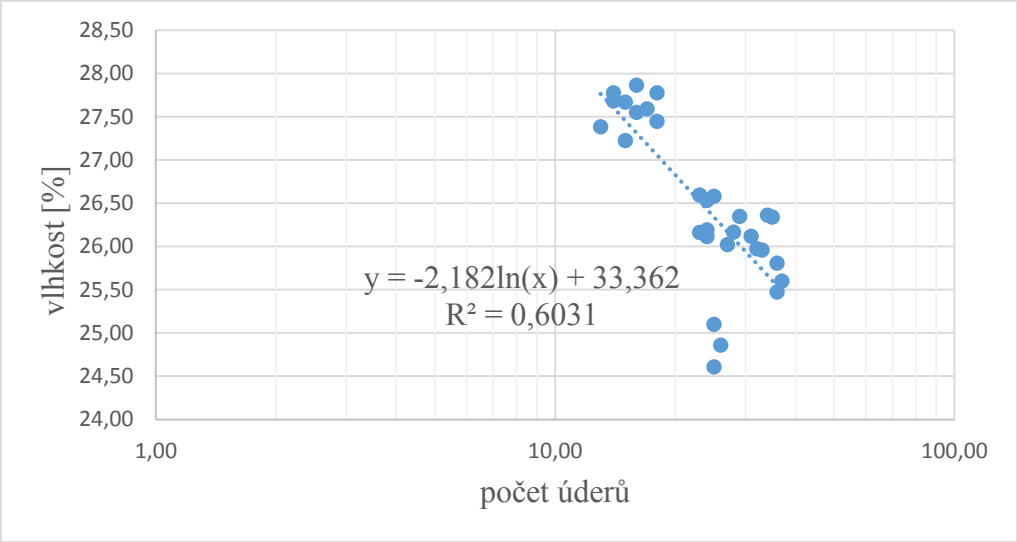
Graf 4 – Výsledky Vasiljevova kužele meze tekutosti pro vzorek č. 1

Podle grafu 4 by hodnota meze tekutosti, určená pomocí Vasiljevova kužele, dosahovala **36,72 %**.

Zemina + 25 % Sa – Jíl s nízkou plasticitou (vzorek č. 2)			
číslo zkoušky	**w_L [%]** Vasiljevův kužel	**w_L [%]** Casagrandeho miska	**w_P [%]**
1.	29,83	25,66	15,85
2.	29,92	25,99	16,18
3.	29,96	25,95	16,35
4.	29,94	26,39	16,14
5.	29,91	26,29	16,55
6.	30,29	26,34	15,19
7.	30,16	26,66	15,38
8.	29,90	26,37	15,03
9.	29,80	26,77	18,95
10.	30,28	26,79	16,21

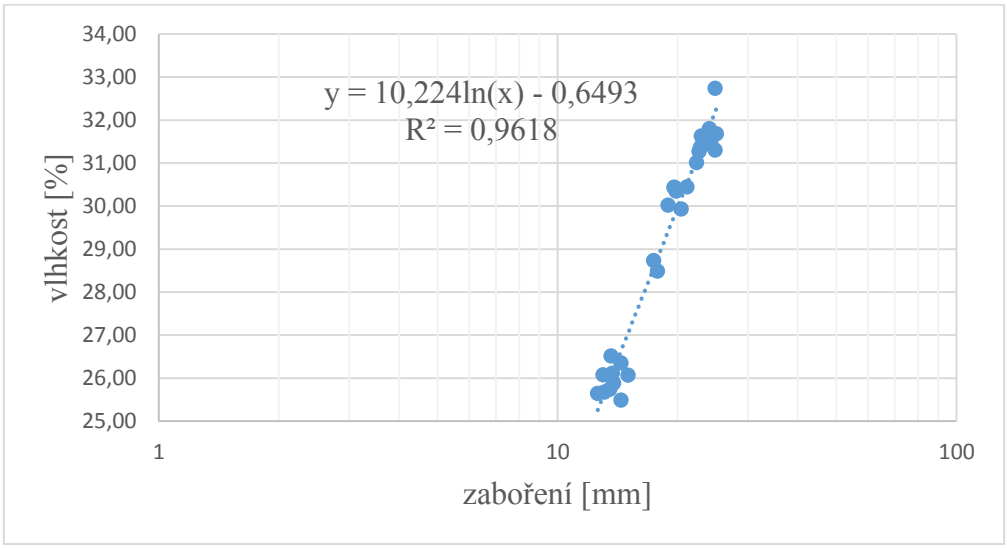
Tabulka 3 – Výsledné hodnoty zkoušek pro vzorek č. 2

U vzorku č. 2 se hodnoty meze tekutosti pro Casagrandeho misku pohybovaly v rozmezí 25,66 % až 26,79 %. Pro Vasiljevův kužel toto rozmezí bylo menší a pohybovalo se v hodnotách 29,80 % až 30,29 %. Mez plasticity dosahovala rozmezí 15,03 % až 18,95 %.



Graf 5 – Výsledky Casagrandeho zkoušky meze tekutosti pro vzorek č. 2

Graf 5 shrnuje výsledky Casagrandeho misky. Hodnota meze tekutosti v tomto případě je rovna **26,34 %**. V grafu 5 vidíme, že výsledky tří zkoušek se trochu odlišují. Mohlo dojít pravděpodobně k nedostatečnému promíchání vzorku. Na výslednou mez tekutosti to však nemělo příliš velký vliv.



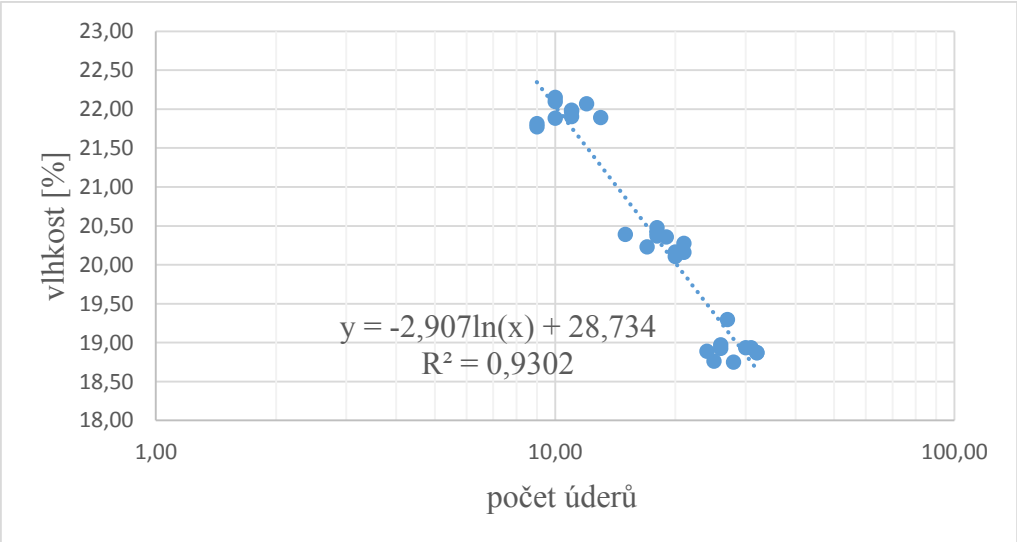
Graf 6 – Výsledky Vasiljevova kužele meze tekutosti pro vzorek č. 2

Další graf 6 zobrazuje výsledky zkoušky pomocí Vasiljevova kužele. Hodnota meze tekutosti v tomto případě činí **29,98 %**.

Zemina + 50 % Sa – Jíl se střední plasticitou (vzorek č. 3)			
číslo zkoušky	**w_L [%]** Vasiljevův kužel	**w_L [%]** Casagrandeho miska	**w_p [%]**
1.	22,55	18,99	14,74
2.	22,72	19,53	14,44
3.	22,88	18,72	14,79
4.	22,55	19,51	14,82
5.	22,92	19,57	14,48
6.	22,70	19,24	14,18
7.	23,08	19,62	14,14
8.	22,91	19,00	15,06
9.	23,04	19,31	14,50
10.	22,69	19,50	13,39

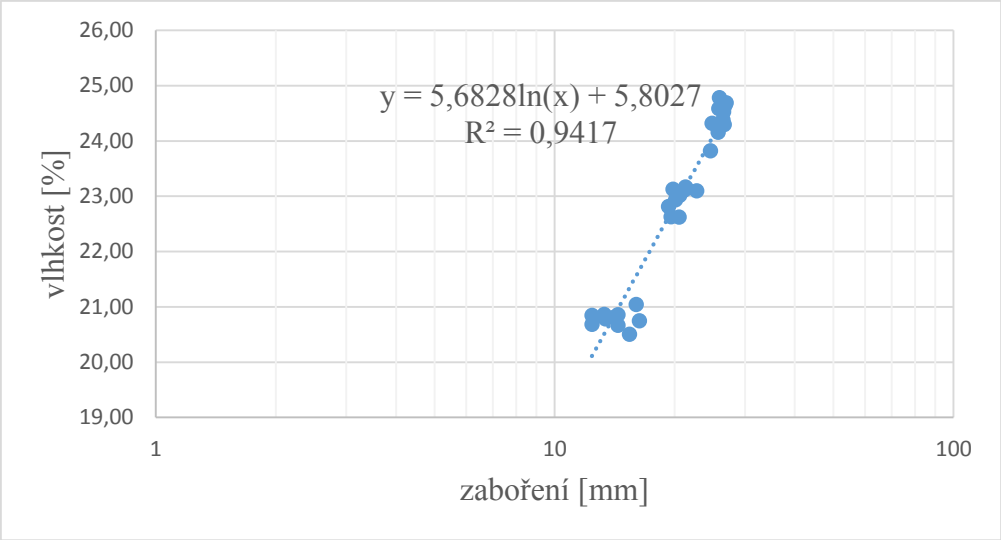
Tabulka 4 – Výsledné hodnoty zkoušek pro vzorek č. 3

U posledního vzorku se hodnoty pro Vasiljevův kužel pohybovaly od 22,55 % do 23,08 %. Pro Casagrandeho misku se pohybovaly hodnoty od 18,72 % do 19,62 %. Mez plasticity se pohybovala od 13,39 % do 15,06 %.



Graf 7 – Výsledky Casagrandeho misky meze tekutosti pro vzorek č. 3

Graf 7 zobrazuje výsledky všech zkoušek pro Casagrandeho misku. Hodnota meze tekutosti v tomto případě činí **19,38 %**.



Graf 8 – Výsledky Vasiljevova kužele meze tekutosti pro vzorek č. 3

Výsledky zkoušek pomocí Vasiljevova kužele pro vzorek č. 3 zobrazuje graf 8. V tomto případě mez tekutosti dosahuje hodnoty **22,83 %**.

4.2. Statistické vyhodnocení zkoušek

Statistické vyhodnocení (vzorek č. 1)			
	Vasiljevův kužel	Casagrandeho miska	Plasticita
Průměrná hodnota	36,83 %	34,89 %	20,01 %
Směrodatná odchylka	0,45	0,55	1,12
rozptyl	0,20	0,31	1,25
medián	36,73 %	34,99 %	19,95 %
Variační koeficient	0,0122	0,0158	0,0561
Interval spolehlivosti (95%)	36,28 % - 37,58 %	33,67 % - 35,44 %	18,47 % - 21,68 %

Tabulka 5 – Statistické vyhodnocení pro vzorek č. 1

Výsledná mez tekutosti (vzorek č. 1) pro Vasiljevův kužel je rovna **37 %** a pro Casagrandeho misku **35 %**. Mez plasticity je rovna **20 %**. Nejvyšší hodnoty rozptylu a směrodatné odchylky jsou u meze plasticity, dokazují tak velkou citlivost zkoušky na subjektivní faktory. Nejnižší má tyto statistické veličiny zkouška stanovená Vasiljevovým kuželem. Interval spolehlivosti (95 %) udává interval, ve kterém lze s pravděpodobností 95 % očekávat výsledné hodnoty zkoušek. Teoreticky jen 5 % výsledků měření by mělo překročit tyto meze intervalu spolehlivosti a tyto výsledky již mají velmi nízkou vypovídající hodnotu. Z toho můžeme

vyvodit, že výsledky zkoušky č. 2 a č. 8 u Vasiljevova kužele a zkoušky č. 2 a č. 4 u Casagrandeho misky neodpovídají intervalu spolehlivosti 95%.

Statistické vyhodnocení (vzorek č. 2)			
	Vasiljevův kužel	Casagrandeho miska	Plasticita
Průměrná hodnota	30,00 %	26,32 %	16,18 %
Směrodatná odchylka	0,17	0,35	1,04
rozptyl	0,03	0,12	1,09
medián	29,93 %	26,36 %	16,16 %
Variační koeficient	0,0057	0,0133	0,0646
Interval spolehlivosti (95%)	29,81% - 30,29%	25,73% - 26,79%	15,07% - 18,41%

Tabulka 6 – Statistické vyhodnocení pro vzorek č. 2

Výsledná mez tekutosti (vzorku č. 2) pro Vasiljevův kužel činí **30 %** a pro Casagrandeho misku činí **26 %**. Mez plasticity u tohoto vzorku dosahuje hodnoty **16 %**. I u vzorku č. 2 statistické hodnoty dokazují citlivostní charakter jednotlivých zkoušek. Nejvyšší směrodatná odchylka, rozptyl a variační koeficient je u meze plasticity, potom Casagrandeho misky a nejmenší jsou tyto hodnoty u Vasiljevova kužele. I interval spolehlivosti nám dává představu o tom, jakou vypovídající hodnotu dané výsledky mají. Největší interval spolehlivosti je u meze plasticity, pak u Casagrandeho misky a nakonec u Vasiljevova kužele.

Statistické vyhodnocení (vzorek č. 3)			
	Vasiljevův kužel	Casagrandeho miska	Plasticita
Průměrná hodnota	22,80 %	19,30 %	14,45 %
Směrodatná odchylka	0,18	0,29	0,45
rozptyl	0,03	0,08	0,20
medián	22,80 %	19,41 %	14,49 %
Variační koeficient	0,0079	0,0149	0,0309
Interval spolehlivosti (95%)	22,55 % - 23,07 %	18,78 % - 19,61 %	13,56% - 15,01 %

Tabulka 7 – statistické vyhodnocení pro vzorek č. 3

U vzorku č. 3 dosahovaly hodnoty meze tekutosti pro Vasiljevův kužel **23 %**, pro Casagrandeho misku tato hodnota byla **19 %**. Mez plasticity pro tento vzorek činí **15 %**. Statistické vyhodnocení opět potvrzuje nejvyšší hodnoty rozptylu a variačního koeficientu u meze plasticity, následovány Casagrandeho miskou a Vasiljevovým kuželem.

Ze statistického hodnocení všech zkoušek, lze vypozorovat rozdíly mezi zkouškami, především v hodnotě rozptylu a variačního koeficientu (podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty). Vyšší hodnoty těchto statistických veličin u stanovení meze plasticity, potvrzují známý fakt, že tato zkouška je nejvíce citlivá na subjektivní faktory. Následuje zkouška pomocí Casagrandeho misky a potom Vasiljevův kužel. U vzorku č. 3 se sice hodnoty rozptylu a směrodatné odchylky u plasticity rovnají hodnotám u Vasiljevova kužele vzorku č. 1, to však poukazuje na větší jistotu laboranta, při provádění zkoušek postupem času. Tento trend se projevuje u všech zkoušek, že s každým dalším vzorkem, mají výsledky lepší vypovídající hodnotu.

4.3. Srovnání zkoušek Casagrandeho misky a Vasiljevova kužele

Z uvedených výsledků je možné vypozorovat vyšší hodnoty vlhkosti pro mez tekutosti u Vasiljevova kužele. Rozdíly jsou dány různým přístupem těchto zkoušek ke stanovení meze tekutosti. Obě jsou ovlivněny nedrénovanou pevností zeminy. U Casagrandeho misky tato pevnost ovlivňuje stabilitu svahu (zářezu) v misce, zatímco u Vasiljevova kužele se jedná o nedrénovanou smykovou pevnost. Velké rozdíly mohou nastat u zemin, které jsou citlivé na opakované dynamické zatížení, k němuž dochází při Casagrandeho zkoušce.

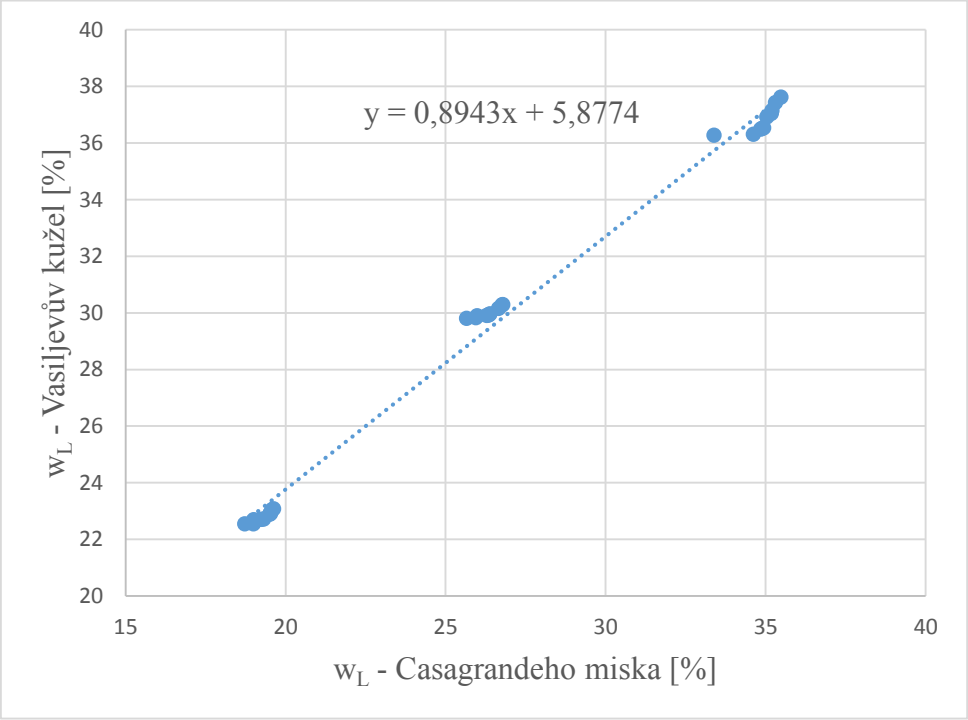
Studie (tabulka 8) srovnávající rozdíly mezi Vasiljevovým kuželem a Casagrandeho miskou. Tato studie byla provedena v roce 1979 na univerzitě v New Hampshire:

Č.	Typ zeminy	w_L [%] kužel	w_L [%] miska
1.	Boston Blue Clay	42,1	41,8
2.	Gray Clay	45,1	42,8
3.	Modeling Clay	31,3	32,8
4.	Venezuelan Clay – C1510	49,2	48,7
5.	Venezuelan Clay – C2S43	43,5	45,8
6.	Venezuelan Clay – C3S17	40,2	41,1
7.	Vickburg Buckshot Clay	59,0	58,2
8.	30/70 Mix	29,3	26,7
9.	Bin No. 12	68,4	65,9
10.	Bin No. 39	57,9	59,5
11.	Tato práce – vzorek č. 1	36,8	34,9
12.	Tato práce – vzorek č. 2	30,0	26,3
13.	Tato práce – vzorek č. 3	22,8	19,3

Tabulka 8 - Hodnoty mezí tekutosti v závislosti na typu zeminy (viz. [9])

Zeminy č. 1, 2, 4, 7, 8, 9, 11, 12 a 13 (barevně zvýrazněné) dosahovaly vyšší meze tekutosti získané pomocí Vasiljevova kužele. U dalších zemin je tomu naopak.

Srovnáním hodnot meze tekutosti mezi Casagrandeho miskou a Vasiljevovým kuželem, můžeme získat vzorec pro přepočet mezi těmito zkouškami. Přestože současná norma upřednostňuje zkoušky Vasiljevovým kuželem, mohou tyto vzorce pomoci ke stanovení důležitých parametrů zemin. Například staré záznamy uchovány v Geofondu převážně pracují s Casagrandeho metodou. Vzorce tak mohou sloužit k přepočtu starých hodnot Casagrandeho metodou na metodu kuželovou. Nebo mohou být využity pro přepočet opačný.



Graf 9 – Vyjádření závislosti Casgrandeho zkoušky a Vasiljevova kužele

Vzorec pro přepočet mezi Casagrandeho mezí tekutosti a Vasiljevem:

$$w_{L(kužel)} = 0{,}8943 * w_{L(miska)} + 5{,}8774 \qquad (5)$$

$$w_{L(miska)} = \frac{w_{L(kužel)} - 5{,}8774}{0{,}8943} \qquad (6)$$

Tabulka 9 (viz. [8]) srovnává jiné studie, které se rovněž snažily nalézt vzorce pro přepočet mezi těmito zkouškami.

autor	rovnice	Rozsah meze tekutosti
Karlsson (1961, 1977)	$LL_{kužel} = 0{,}85\ LL_{Casagrande}+5{,}02$	30 – 76 %
Sherwood a Ryley (1970)	$LL_{kužel} = 0{,}95\ LL_{Casagrande}+0{,}95$	30 – 72 %
Wires (1984)	$LL_{kužel} = 0{,}94\ LL_{Casagrande}+0{,}97$	38 – 55 %
Belviso a kol. (1985)	$LL_{kužel} = 0{,}97\ LL_{Casagrande}+1{,}19$	34 – 134 %
Wasti a Bezirci (1986)	$LL_{kužel} = 1{,}01\ LL_{Casagrande}+4{,}92$	27 – 110 %
Leroueil a Le Bihan (1996)	$LL_{kužel} = 0{,}86\ LL_{Casagrande}+6{,}34$	30 – 74 %
Dragoni a kol. (2008)	$LL_{kužel} = 1{,}02\ LL_{Casagrande}+2{,}87$	28 – 74 %
Özer (2009)	$LL_{kužel} = 0{,}90\ LL_{Casagrande}+6{,}04$	29 – 104 %
Fojtová a kol (2009)	$LL_{kužel} = 1{,}00\ LL_{Casagrande}+2{,}44$	20 – 50 %
Gronbech a kol. (2011)	$LL_{kužel} = 0{,}95\ LL_{Casagrande}+9{,}40$	100 – 340%
Di Matteo (2012)	$LL_{kužel} = 1{,}00\ LL_{Casagrande}+2{,}20$	24 – 40 %
Studie Can. J. of Soil Science	$LL_{kužel} = 0{,}99\ LL_{Casagrande}+1{,}05$	20 – 61 %
Tato práce – Bednář (2016)	$LL_{kužel} = 0{,}89\ LL_{Casagrande}+5{,}88$	19 – 35 %

Tabulka 9 – Srovnání Vasiljevova kužele a Casagrandeho přístroje od různých autorů (LL = mez tekutosti), (viz.[8])

Z tabulky 9 je zřejmé, že výsledky v této práci se příliš neliší od ostatních studií.

4.4. Zahraniční studie zabývající se problematikou stanovení meze tekutosti a meze plasticity zemin

A suggested calibration for the cone penetrometer – A. Mohajerani BE, ME, PhD, SMIEA ust (Department of civil and Geotechnical Engineering RMIT University), (viz. [6])

V článku je objasněno, proč stanovení meze tekutosti pomocí Casagrandeho metody a pomocí Vasiljevova kužele není dostatečné. Tyto metody jsou totiž závislé na tzv. nedrénované (neodvodněné) smykové pevnosti zemin. Výsledky mnoha studií ukazují, že tato smyková pevnost se pohybuje v rozmezí 3 – 0,7 kPa pro nízko až vysoko plastické zeminy. Používáním konstantní hodnoty zaboření kužele 20 mm při mezi tekutosti vlastně říkáme, že hodnota nedrénované smykové pevnosti je u všech jemnozrnných zemin stejná. A proto autor článku navrhuje zpřesnění stanovení meze tekutosti, které vezme v úvahu právě různé hodnoty

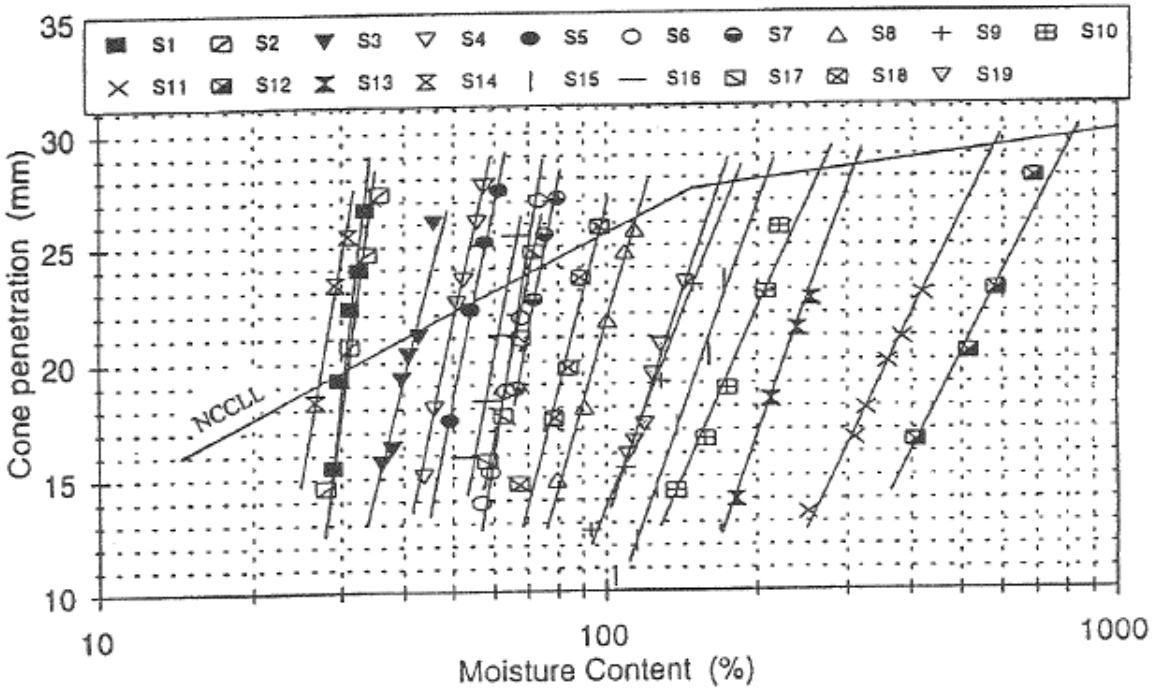
nedrénované smykové pevnosti plastických zemin. Po přezkoumání mnoha vztahů mezi Casagrandeho metodou a Vasiljevovým kuželem došla tato studie k těmto rovnicím:

$$p = 2{,}48 + 11{,}5 \log w_{L(miska)} \qquad (7)$$

$$p = 20{,}90 + 3{,}03 \log w_{L(miska)} \qquad (8)$$

Tyto funkční vztahy (také vyjádřeny jako „new calibration lines for cone penetrometer liquid limit – NCCLL“) se kříží v bodě, který odpovídá penetraci 27,5 mm při vlhkosti 150 %. Pro středně plastické zeminy rozdíly nejsou příliš velké, avšak u velmi vysoce plastických zemin už jsou rozdíly značné. A právě nový přístup NCCLL má za cíl, navrhnout kalibraci kuželové zkoušky a vzít tak v potaz nedrénovanou smykovou pevnost a podle toho určit, při jaké penetraci kužele by měla být stanovena mez tekutosti. Tyto přímky nahrazují v podstatě konstantní hodnotu penetrace 20 mm, se kterou tradiční kuželová zkouška počítá.

Graf 10 ukazuje příklad 19 různých zkoumaných zemin, z nichž zemina č. 12 (v grafu označena jako S12) ukazuje případ, kdy se hodnoty meze tekutosti (při penetraci 20 mm) můžou velmi výrazně lišit. U vzorku č. 12 byla stanovena vlhkost na mezi tekutosti pomocí Vasiljevova kužele a činila 498 %. Pomocí Casagrandeho misky byla stanovená vlhkost 875 %. Podle NCCLL tato hodnota dosahuje 825 %. Takže poměr mezi miskou a standardním kuželem byl 1,76. S modifikovanou metodou NCCLL se tento poměr snížil na 1,1.



Graf 10 – Závislost zaboření Vasiljevova kužele na vlhkosti zeminy pro různé zeminy

Následující tabulka 10 aplikuje tyto poznatky na zeminy zkoumané v této práci. Vzorek č. 1 se neliší od standardní metody (penetrace při 20 mm) a tudíž můžeme konstatovat, že daná zemina má na mezi tekutosti nedrénovanou smykovou pevnost přibližně 1,7 kPa. Přidáním jemnozrnného písku se snížila vlhkost na mezi tekutosti a také se snížila hodnota penetrace, při které by měla být stanovena mez tekutosti (podle NCCLL). Snižující se hodnoty penetrace potvrzují trend z grafu, a tudíž můžeme říct, že vzorky č. 2 a č. 3 mají vyšší nedrénovanou smykovou pevnost na mezi tekutosti oproti původnímu vzorku.

	Casagrandeho miska w_L [%]	Vasiljevův kužel w_L [%] (penetrace 20 mm)	Vasiljevův kužel w_L [%] (Mohajerani NCCLL)	Penetrace (NCCLL) [mm]
Vzorek č. 1	34,9	36,8	36,7	20
Vzorek č. 2	26,3	30	29,5	19
Vzorek č. 3	19,3	22,8	21,9	17

Tabulka 10 – Výsledky zkoušek na základě NCCLL metody

A new method of measuring plastic limit of fine materials – Sivakumar, V. a kol. (2011). časopis *Géotechnique* 61, No. 1, str. 88 – 92 (viz. [7])

Kolem stanovení meze plasticity zemin se vedou rozsáhlé diskuze, protože tradiční zkouška válení válečků je velmi subjektivní. Proto se hledají způsoby, jak objektivně stanovit mez plasticity. Doposud provedené studie udávají, že mez plasticity se pohybuje někde v rozmezí 2 – 5 mm při penetraci Vasiljevova kužele. Všechny se opírají o teorii nedrénované smykové pevnosti, z které vychází vzorec:

$$c_u = k * \frac{g*W}{d^2} \qquad (9)$$

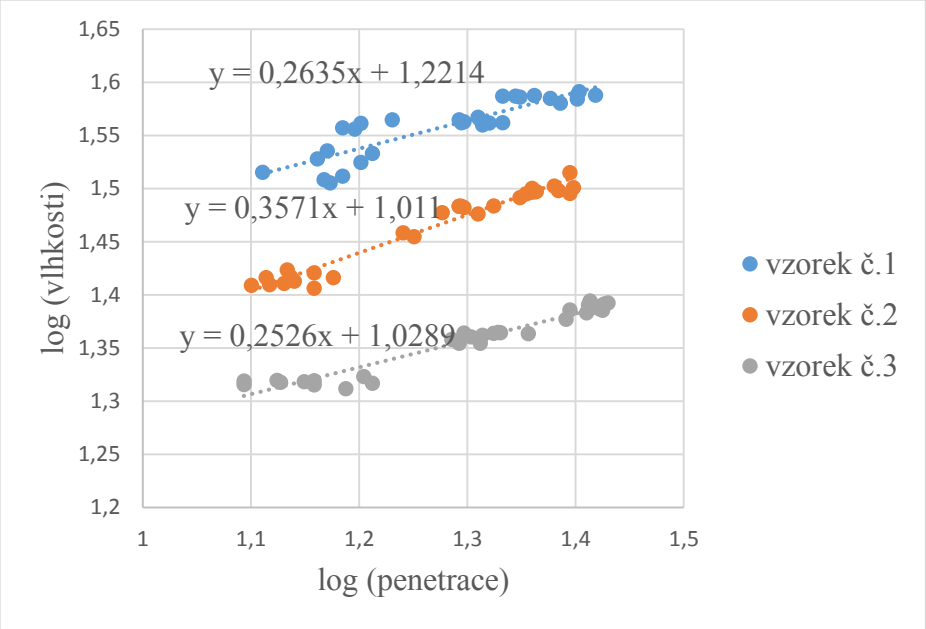
Kde *W* je váha kužele, *g* se rovná gravitačnímu zrychlení (9,81 m/s2), *d* je hloubka penetrace a *k* je koeficient, který závisí na geometrii kužele (pro standardní kužel 80g/30° k=0,867).

Tvrzení uvedená v tomto příspěvku vychází z práce Feng, T. W. (2000), který založil svá tvrzení na předpokladu lineární závislosti logaritmu penetrace kužele oproti logaritmu vlhkosti. Z toho vychází vzorec pro výpočet meze plasticity:

$$w_p = \frac{w_{L(kužel)}}{10^m} \qquad (10)$$

$$m = \frac{\Delta \log w}{\Delta \log d} \qquad (11)$$

Když tyto vzorce aplikujeme na naše vzorky, tak parametr *m* můžeme získat z grafu 11, kde horizontální osu tvoří logaritmus penetrace kužele a osu vertikální tvoří logaritmus vlhkosti.



Graf 11 – Závislost penetrace kužele na vlhkosti zeminy v logaritmickém měřítku

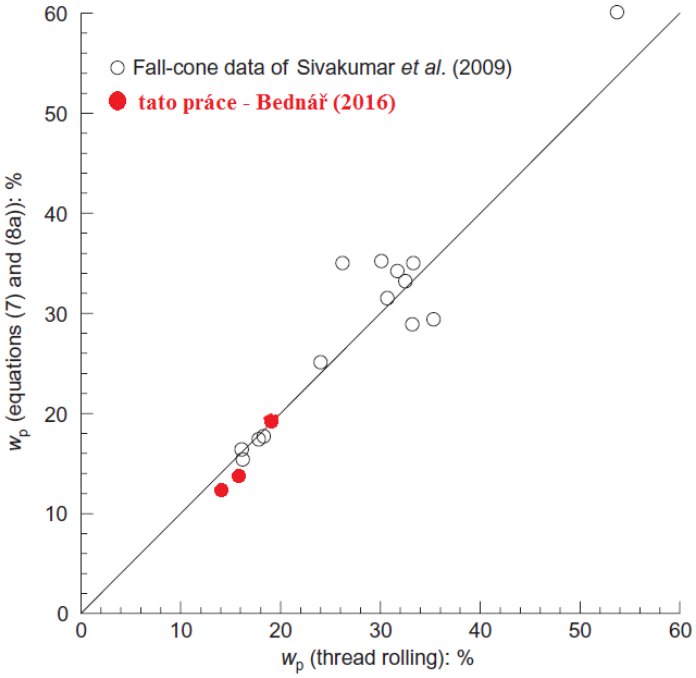
Pro výsledky z této práce je hledaný parametr *m* roven hodnotě před x (v rovnici přímky). Tento parametr vlastně určuje sklon přímky. Pro naše vzorky jsou tedy hodnoty parametrů *m* následující:

- Vzorek č. 1: $m_1 = 0{,}2635$
- Vzorek č. 2: $m_2 = 0{,}3571$
- Vzorek č. 3: $m_3 = 0{,}2526$

Když dosadíme tyto hodnoty do vzorce (10), vyjdou nám výsledné meze plasticity:

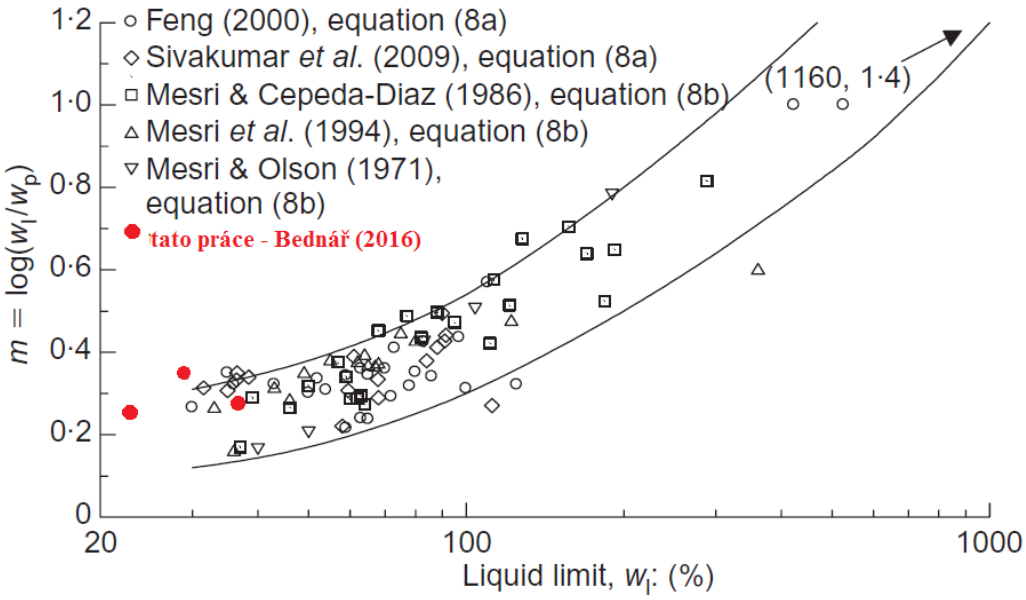
- Vzorek č. 1 = 20 %
- Vzorek č. 2 = 13 %
- Vzorek č. 3 = 12 %

Srovnáním těchto hodnot s metodou normovou tzv. válení válečků získáme následující graf 12, kde jsou hodnoty porovnány s dalšími vzorky.



Graf 12 – Závislost meze plasticity stanovené pomocí válení válečků na mezi plasticity stanovené pomocí vzorce

Zjištěné hodnoty plasticity získané pomocí vzorce (10), odpovídají přibližně tradiční zkoušce válení válečků. Spolu s druhou studií můžeme konstatovat, že tento způsob funguje. Když porovnáme naše parametry *m* s ostatními studiemi, zjistíme, že naše hodnoty odpovídají trendu znázorněném v grafu 13.



Graf 13 – graf parametrů *m* v závislosti na vlhkosti zeminy ve srovnání s jinými studiemi

Pokud bychom na to šli obráceně a z daného grafu bychom převzali parametr *m* (přibližná střednice, daného rozmezí v grafu, *m* v rozmezí 0,2 – 0,23), tak bychom došli k následujícím hodnotám meze plasticity:

- Vzorek č. 1 $w_p = 22\ \%$
- Vzorek č. 2 $w_p = 18\ \%$
- Vzorek č. 3 $w_p = 14\ \%$

5. Závěrečné srovnání provedených zkoušek

Na zkoumaných vzorcích zeminy byly vykonány dvě zkoušky pro stanovení meze tekutosti (Casagrandeho miska a Vasiljevův kužel). Pro stanovení meze plasticity byl použit normový postup tzv. válení válečků a nový postup pomocí Vasiljevova kužele. Jednotlivé výsledky spolu se statistickým vyhodnocením jsou uvedeny v tabulce 11.

	Vzorek č. 1	**Vzorek č. 2**	**Vzorek č. 3**
w_L (miska – průměrná hodnota) [%]	34,9	26,3	19,3
w_L (kužel – průměrná hodnota) [%]	36,8	30	22,8
w_L (NCCLL) [%]	36,7	29,5	21,9
Penetrace (NCCLL) [mm]	20	19	17
w_p (válení válečků – průměrná hodnota) [%]	20	16	14,5
w_p (kužel) [%]	20	13	12
I_p [-]	17	14	8
Statistické vyhodnocení			
Směrodatná odchylka (miska)	0,55	0,35	0,29
Směrodatná odchylka (kužel)	0,45	0,17	0,18
Směrodatná odchylka (plasticita)	1,12	1,04	0,45
Rozptyl (miska)	0,31	0,12	0,08
Rozptyl (kužel)	0,20	0,03	0,03
Rozptyl (plasticita)	1,25	1,09	0,2
Interval spolehlivosti 95 % (miska) [%]	33,7 – 35,4	25,7 – 26,8	18,8 – 19,6
Interval spolehlivosti 95 % (kužel) [%]	36,3 – 37,6	29,8 – 30,3	22,6 – 23,1
Interval spolehlivosti 95 % (plasticita) [%]	18,5 – 21,7	15,1 – 18,4	13,6 - 15

Tabulka 11 – Konečné hodnoty všech provedených zkoušek a statistické vyhodnocení

Přidáním jemnozrnného písku (25 %) do původního jílu, došlo ke snížení meze tekutosti o přibližně 7 %. Dalším přidáním písku (50%) došlo rovněž k přibližnému poklesu o 7 %. Mohli bychom tvrdit, že přidáváním písku se mez tekutosti snižovala lineárně, ale pro ověření tohoto tvrzení by bylo třeba provést zkoušky při dalších vzorcích o různých poměrech písku a jílu. Mez plasticity se snížila o přibližně 4 % a poté o přibližně 2 %. Takže další přidávání písku příliš nesnižuje mez plasticity. Už při 50 % obsahu písku bylo poměrně obtížné stanovit mez plasticity a dalším přidáváním by už se směs začala pravděpodobně chovat jako nesoudržná zemina. Index plasticity se při 25% obsahu písku zmenšil oproti původní zemině o 3. Při 50 % poměru písku se index plasticity vůči původní zemině snížil o 9. Smícháním jílu z pískem, tedy došlo k předpokládanému snížení plasticity. Tyto výsledky mohou nalézt uplatnění zejména při úpravě zemin. Ke snížení plasticity došlo kvůli změně zrnitostního složení a taky postupně ubývajícímu množství aktivního jílu, který by zadržoval vodu a podílel se tak na plastickém chování zeminy.

Na základě novějších poznatků, které se snaží zdokonalit uvedené zkoušky, byly stanoveny meze tekutosti a meze plasticity. Mez tekutosti podle NCCLL se příliš neliší od kuželové zkoušky, ale rozdíly už jsou patrné při jaké penetraci kužele, by se tato mez tekutosti měla určovat. Výsledky v této práci tedy potvrzují tvrzení z příspěvku [6], že pro zeminy s nízkou plasticitou by se měla hodnota penetrace (na mezi tekutosti) pohybovat pod 20 mm a naopak u více plastických zemin by měla hodnota penetrace kužele být větší než 20 mm.

Hodnoty meze plasticity na základě kuželové zkoušky se trochu liší od normové metody válení válečků. Musíme ale brát v potaz, že normová metoda je značně subjektivní, a proto si tato nová metoda zaslouží další zkoumání. Určení meze plasticity díky kuželové zkoušce má řadu výhod. Nedochází k přímému kontaktu se zeminou (výhoda pro kontaminované, nebo jinak zdraví ohrožující zeminy). Nemusíme válet válečky, ale vystačíme si pouze s kuželovou zkouškou pro stanovení meze tekutosti. Na základě dat z kuželové zkoušky můžeme zpětně přibližně stanovit mez plasticity ze starších zdrojů nebo u zkoušek, kde se stanovení meze plasticity neprovádělo.

Ze statistického hlediska můžeme vyvodit několik závěrů. Stanovení meze plasticity pomocí válení válečků je velmi subjektivní zkouška, což dokazují vysoké hodnoty rozptylu a směrodatné odchylky. Další je zkouška pomocí Casagrandeho misky, kdy mezi subjektivní faktory patří způsob vytvoření rýhy a vyhodnocení slití obou polovin. Nejvíce vypovídající výsledky má zkouška pomocí Vasiljevova kužele. Tomu nasvědčují nejnižší hodnoty rozptylu a směrodatné odchylky, a taky nejnižší rozsah intervalu spolehlivosti.

6. Závěr

Cílem této práce bylo stanovit meze tekutosti a plasticity pro různé typy zemin a dále stanovit závislost, jak se tyto meze mění u různých zemin. Byl potvrzen předpoklad, že smísením zeminy s jemnozrnným pískem, dojde ke snížení plasticity a ke snížení vlhkosti na jednotlivých konzistenčních mezích. Podařilo se stanovit mez plasticity a mez tekutosti podle současně platných norem a dále bylo využito novějších poznatků v této problematice, které berou v potaz různou nedrénovanou smykovou pevnost zemin. Výsledky v této práci potvrzují předpoklady těchto studií. Statistické vyhodnocení potvrdilo citlivost jednotlivých zkoušek na subjektivní faktory.

Z výsledků bakalářské práce plynou následující hlavní závěry:

- Přidáním písku do soudržné zeminy dosáhneme snížení plasticity.
- Vyšší hodnota vlhkosti na mezi tekutosti stanovená Vasiljevovou metodou ve srovnání s metodou dle Casagrandeho pro zeminy testované v této práci.
- Stanovení korelačního vztahu pro přepočet mezi metodami Casagrandeho miskou a Vasiljevovým kuželem.
- Stanovení meze plasticity pomocí Vasiljevova kužele, na základě zahraničních studií.
- Zpřesnění hloubky penetrace u Vasiljevova kužele pro stanovení meze tekutosti pomocí NCCLL.
- Statistické vyhodnocení ověřilo vliv subjektivních faktorů u jednotlivých zkoušek pro stanovení meze tekutosti a plasticity.

Je třeba dodat, že výsledky získané v této práci mají pouze omezený charakter. Bylo by potřeba provést více zkoušek na více soudržných zeminách. Budoucí výzkum pro přesnější stanovení konzistenčních mezí si jistě zaslouží větší pozornost a tato práce se snažila přispět svými poznatky do dané problematiky.

Chtěl bych tímto poděkovat paní doc. RNDr. Evě Hrubešové, Ph.D. za její odborné vedení, poskytování užitečných rad a materiálových podkladů a pomoc při realizaci této bakalářské práce.

7. Seznam použitých zdrojů

Seznam literatury

[1] Hulla J., Turček P. *Zakladanie stavieb.* Bratislava: Jaga, 1998.

[2] Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* Praha: SNTL, 1990.

[3] ČSN 72 1014 *Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1967.

[4] ČSN CEN ISO/TS 17892-12 *Stanovení konzistenčních mezí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[5] ČSN CEN ISO/TS 17892-1 *Stanovení vlhkosti zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[6] Mohajerani, A. *A suggested calibration for cone penetrometr liquid limit.* In: Australian Geomechanics, 1999.

[7] Sivakumar, V. a kol. *A new method of measuring plastic limit of fine materials,* Géotechnique 61, No. 1, str. 88 - 92

[8] Spagnoli G., *Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay*. Canadian Journal of Soil Science, 2012.

[9] Maureen Anne Kestler. *Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and fall cone.* University of New Hampshire, 1979.

Seznam obrázků

[1] Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* SNTL Praha, 1990.

[2] Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* SNTL Praha, 1990.

[3] ČSN CEN ISO/TS 17892-12 Stanovení konzistenčních mezí. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[4] Foto autor

[5] Foto autor

[6] Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* SNTL Praha, 1990.

[7] Maureen Anne Kestler. *Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and fall cone.* University of New Hampshire, 1979.

[8] Foto autor

[9] Foto autor

[10] Small-Scale Brickmaking, WEP, ILO, 1984

[11] Foto autor

[12] Foto autor

[13] Šimek J. a kol. *Mechanika zemin.* SNTL Praha, 1990.