

Lucie FOJTOVÁ¹, Marian MARSCHALKO², Radka FRANEKOVÁ³, Luděk KOVÁŘ⁴

POTŘEBY SROVNÁNÍ METOD PRO MĚŘENÍ VLHKOSTI NA MEZI TEKUTOSTI DLE ČSN A
NOVĚ PŘIJÍMANÉ EVROPSKÉ LEGISLATIVY

NEEDS OF COMPARISON FOR LIQUID LIMIT MEASUREMENT ACCORDING TO CZECH
STATE STANDARD AND NEW RECEIVED EUROPEAN LEGISLATION

Abstrakt

Cílem publikace je studium korelace mezi metodikou stanovení vlhkosti na mezi tekutosti pomocí Casagrandeho misek dosud platné české státní normy a metodikou založenou na principu kuželové zkoušky dle nově implementované evropské normy. To umožní lepší návaznost využití rozsáhlého statistického souboru průzkumů realizovaných pro účely zakládání staveb v minulosti, které jsou k dispozici v Geofondu, na nově prováděné inženýrskogeologické průzkumy dle nové evropské normy v souvislosti s vlhkostí na mezi tekutostí pro velmi rozšířené jílovité zeminy. Rozpětí hodnot u zjištěných vzorků se pohybovalo od 21,49 do 49,56 % dle Casagrandeho a u kuželové zkoušky se pohybovalo v hodnotách od 24,11 do 51,07 %. Rozdíl výsledků u identických vzorků dosahoval hodnot od 1,15 do 4,19 %. Studovaný průměrný rozdílový koeficient mezi metodami má hodnotu 2,55 %.

Klíčová slova: vlhkost na mezi tekutosti, kompatibilita norem, inženýrská geologie, Ostravská pánev
Key words: liquid limit measurement, compatibility of standards, engineering geology, Ostrava Basin

1 ÚVOD

Cílem studie je analýza korelace mezi metodikou stanovení vlhkosti na mezi tekutosti pomocí Casagrandeho misek dle ČSN a metodikou založenou na principu kuželové zkoušky dle evropské normy. To by umožnilo lepší kompatibilitu a návaznost využití rozsáhlého statistického souboru průzkumů realizovaných pro účely zakládání staveb v souvislosti s vlhkostí na mezi tekutosti.

V *první etapě* byla provedena srovnávací studie obou výše uvedených metodik, která je teoretickým základem pro následně realizované laboratorní práce.

V rámci Ostravské pánve, po vyspecifikování lokalit, proběhly odběry vzorků jílovitých zemín. Následné *studium v laboratořích* fy K - GEO bylo zaměřeno na laboratorní zkoušky odebraných vzorků metodami Casagrandeho misek a kuželovou zkouškou.

V *poslední etapě* byla realizována srovnávací analýza pro určení korelační závislosti, která je důležitou pomůckou pro inženýrskogeologickou praxi.

¹ Ing. Lucie Fojtová, Institut geologického inženýrství, Fakulta hornicko-geologická, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava-Poruba, tel. (+420) 59 732 3505, e-mail: lucie.fojtova@vsb.cz.

² Doc. Ing. Marian Marschalko, Ph.D., Institut geologického inženýrství, Fakulta hornicko-geologická, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava-Poruba, tel. (+420) 59 732 3505, e-mail: marian.marschalko@vsb.cz.

³ Bc. Radka Franeková, Institut geologického inženýrství, Fakulta hornicko-geologická, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, Ostrava-Poruba, tel. (+420) 59 732 3505, e-mail: radka.franekova.st@vsb.cz.

⁴ Ing. Luděk Kovář, Ph.D., K-Geo, Mastná, Ostrava, tel. (+420)59 611 7633, e-mail: ludek.kovar@kgeo.cz.

2 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE A PŘEDMĚT NOREM

Tyto technické specifikace popisují zkušební metody pro stanovení konzistenčních mezí zeminy. Soudržné zeminy jsou směsi jílových, prachových a často i písčitých zrn. V přírodě mohou obsahovat vázanou i volnou vodu. Množství vázané vody narůstá v zemině s podílem a typem jílového minerálu a výměnných kationtů. Fyzikální stav soudržné zeminy, závislý na vlhkosti, je tzv. konzistence nebo konzistenční stav. *Konzistenční meze* jsou mezí tekutosti, mezí plasticity a mezí smrštění. Tyto meze jsou nazývány jako konzistenční nebo Atterbergovy (podle norského odborníka Atterberga, který je první použil pro charakterizování zemin).

Mezí tekutosti se rozumí vlhkost zeminy vyjádřená v % hmoty vysušené zeminy (tj. zeminy vysušené při teplotě 100 až 110°C) do stálé hmotnosti, při níž zemina přechází ze stavu plastického do tekutého. Zkušební vzorek může být získán z přirozené zeminy nebo ze zeminy, u které byl odstraněn materiál zachycený při prosévání na síte o průměru oka 0, 4 mm (nebo jemu nejbližším). Norma přijala kužele o tvarech 60 g / 60° a 80 g / 30°.

Mez tekutosti (liquid limit) w_L je empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického.

Mez plasticity je nejnižší vlhkost zeminy, při které je zemina plastická. Stanovení meze plasticity se obvykle provádí souběžně se stanovením meze tekutosti.

Mez plasticity (plastic limit) w_p je empiricky stanovená vlhkost, při které je zemina natolik vysušená, že ztrácí svoji plasticitu.

Index plasticity (plasticity index) I_p je početní rozdíl mezi mezí tekutosti a mezí plasticity zeminy.

Stupeň tekutosti (liquidity index) I_L je rozdíl přirozené vlhkosti a meze plasticity zeminy v poměru k indexu plasticity zeminy.

Stupeň konzistence (consistency index) I_C je rozdíl meze tekutosti a přirozené vlhkosti zeminy v poměru k jejímu indexu plasticity.

Index koloidní aktivity jílu (activity index) I_A je poměr indexu plasticity k podílu jílovité frakce zeminy.

Podíl jílovité frakce (clay size fraction) CF je suchá hmotnost zrn, která mají ekvivalentní průměr rovný nebo menší než 0,002 mm, dělená celkovou suchou hmotností zkušební vzorku (nebo suchou hmotností zkušební vzorku po odstranění hrubé frakce).

Hrubá frakce (coarse fraction) jsou částice zeminy, které jsou zadrženy na sítu o průměru oka 4 mm.

Mez tekutosti w_L se určuje 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 mísky o podložku v délce $12,5 \pm 0,5$ mm, a to při rychlosti dvou úderů za sekundu. Podrobný postup předepisuje ČSN 72 1014 – Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin. 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 sekund. Postup je uveden v nové evropské normě ČSN CEN ISO/TS 17892/12: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí.

3 TEORIE K NORMÁM

3.1 Resumé norem

3.1.1 ČSN 72 1014 Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin

Tato technická specifikace popisuje celkem tři způsoby stanovení konzistenčních mezí, a to stanovení meze tekutosti pomocí misky standardním způsobem, stanovení meze tekutosti pomocí misky jednobodovou metodou a stanovení meze tekutosti pomocí kužele (Vasiljev). Vzhledem k tomu, že předmětem studie dle starší normy bylo pouze stanovení meze tekutosti pomocí misky jednobodovou metodou, která byla v minulosti nejvíce používána, je tato metoda blíže specifikována v této kapitole.

Zemina se v přípravném stádiu nechá vyschnout na vzduchu, poté se rozmělní pryžovou třenkou a proseje sítem 0,5 mm. Podíl zeminy, která propadne sítem z celkového množství celého vzorku, se zaznamená.

Pro správné provedení zkoušky je nutné správné seřízení přístroje a důkladná příprava vzorku.

Minimální množství zeminy pro jednobodovou metodu je 50 g přirozené zeminy. Tento suchý vzorek je nasypan na skleněnou desku, kde se přivlhčí destilovanou vodou a nožem se důkladně promíchává a hněte. Hnětení by mělo trvat alespoň 10 minut. Vlhkost zeminy musí být taková, aby se koláček zeminy slil přibližně po 25 úderech misky.

Zemina se poté uloží do vzduchotěsné váženky a nechá se nejméně 24 hodin uležet za normální pokojové teploty. Bezprostředně před zkouškou se zemina hněte po dobu alespoň jedné minuty.

Z prohněteného těsta se odebere nožem část zeminy a vloží se do misky nad místo, kde se miska opírá o podkladovou desku. Povrch zeminy v misce je třeba uhladit nožem do roviny rovnoběžné s podkladovou deskou. Koláček zeminy v misce by měl mít v nejvyšším místě maximální tloušťku 1 cm. Vyřezávacím nožem (obr.1a) se v koláčku zeminy vyřízne (vytlačí) rýha, jejíž osa prochází středem závěsu misky (obr.1b). Poté se přístroj zapne a miska s rozříznutým koláčkem zeminy se nechá dopadat z výšky 1 cm na podkladovou desku. Proces je třeba přerušit v okamžiku, kdy se obě poloviny koláčku slíjí v dolní části rýhy na požadovanou délku 12,5 mm ($\pm 0,5$ mm). Počet úderů, který byl potřebný pro slití obou polovin koláčku zeminy, se zaznamená. Tento počet úderů N nesmí být vyšší než 30 a nižší než 20, v opačném případě se zkouška musí opakovat.

Z obou polovin koláčku je odebrán vzorek zeminy přibližně ze středu v množství asi 10 g a uložen do vzduchotěsně uzavřené váženky. U vzorku se stanoví vlhkost podle ČSN 72 1012 (Laboratorní stanovení vlhkosti zemin).

Při *vyhodnocení* se z odebraného vzorku stanovuje vlhkost podle ČSN 72 1012, která odpovídá příslušnému počtu úderů misky N . Mez tekutosti w_L se stanoví podle vzorce:

$$w_L = w_N - \left(\frac{N}{25} \right)^{0,12}$$

kde w_N je vlhkost příslušná zemině, která se slila po N úderech,

0,12 je tangenta přímky funkce „vlhkost - počet úderů“.

Hodnoty vlhkostí na mezi tekutosti se uvádějí v celých procentech sušiny.

U výsledku meze tekutosti w_L je třeba zaznamenat, že byla stanovena jednobodovou metodou a jaký podíl z celkového množství zeminy zaujímají zrna průměru většího než 0,5 mm.



Obr. 1a: (vlevo) Štěrka, nůž a vyřezávací nůž; **Obr. 1b:** (vpravo) Casagrandeho přístroj s rýhou uprostřed misky před slitím obou koláčků

3.1.2 ČSN CEN ISO/TS 17892/12: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí vlhkosti zemín.

Tato technická specifikace popisuje stanovení meze tekutosti pomocí kuželové zkoušky a stanovení meze plasticity. Vzhledem ke studiu meze tekutosti, bude v této kapitole přiblížen pouze postup pomocí kuželové zkoušky pro její stanovení.

Pro tuto zkoušku byl přijat kužel s parametry 60 g (hmotnost)/ 60° (vrcholový úhel) a 80 g/ 30° a bylo prokázáno, že získané výsledky zkoušek meze tekutosti pomocí těchto tvarů kuželů jsou shodné.

Zkouška by měla proběhnout pokud možno na zemině v jejím přirozeném stavu. Pro stanovení meze tekutosti je třeba mít kolem 200 g zeminy, jež byla proseta sítím s otvory 0,4 mm nebo jemu nejbližším. Je možné stanovit mez tekutosti i mokrou metodou (sedimentace až na čistou vodu, což je zdoluhavé a časově těžko realizovatelné, viz Příloha 2, odstavec 6 – 15), ale vzhledem k tomu, že tato metoda nebyla předmětem zkoumání, nebude v této kapitole blíže popsána. Pokud je v zemině hrubozrný materiál, je třeba jej odstranit. Přednost by se měla dát spíše ručnímu odstraňování zrn, než prosévání za mokra.

Připravená pasta se důkladně promíchá, a pokud je třeba, může se přidat takové množství destilované vody, aby první kuželová penetrace dosahovala hodnot do 7 mm u kužele 60 g/ 60° a 15 mm u 30 g/ 80°.

Část promíchané zeminy se přemístí plochým nožem do čisté a suché misky, přičemž je snaha nepromíchat zkušební vzorek se vzduchem. Prebytečnou zeminu je potřeba stáhnout srovnávacím pravítkem z důvodu vytvoření hladkého rovného povrchu.

Penetrační kužel, který je aretován ve zdvižené pozici, musí být spuštěn tak, že se takřka dotýká povrchu zeminy. Kužel je ve správné pozici právě tehdy, pokud při jemném pohybu s miskou hrot kužele označí povrch zeminy.

Poté se kužel uvolní a ponechá ve spuštěné pozici po dobu $5 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ (obr.2a,b). Jestliže přístroj není vybavený automatickým uvolňovacím a zajišťovacím zařízením, je třeba dát pozor, aby při uvolňování nedošlo ke škrubnutí přístrojem.

Penetrace kuželem (hloubka zaboření kuželu) se vypočítá jako rozdíl mezi počáteční a konečnou polohou dřívku kuželu a zaokrouhlí se na 0,1 mm.

Poté se kužel vytáhne a očistí a do misky se přidá trochu vlhké zeminy tak, aby se nevytvořila vzduchová bublina. Povrch se vyrovná.

Postup je třeba opakovat, dokud rozdíl mezi dvěma následujícími penetracemi není menší než 0,5 mm pro kužel 80 g/ 30° a 0,4 mm pro kužel 60 g/ 60° **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Musí se vypočítat průměr posledních dvou penetrací.

Z penetrační zóny kužele se odebere vzorek (± 10 g), na kterém se stanoví vlhkost podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemín - Část 1: Stanovení vlhkosti zemín.

Celý tento postup je třeba opakovat nejméně třikrát (celkem 4 zkoušky) za použití stejného zkušební vzorku, ale s jinými vlhkostmi. Množství vody vysušené (nebo dodané) musí být takové, aby rozsah penetračních hodnot, byl pokryt čtyřmi a více se opakujícími testy.

Co se týče výsledků testů vztah mezi vlhkostí (%) a penetrací kužele se vynese v semilogaritmickém měřítku s vlhkostí na vodorovné ose a penetrací kužele, v logaritmickém měřítku na ose svislé. Poté se vykreslí nejlepší přímková náhrada, spojnice vynesných bodů. Z grafu se musí odečíst vlhkost, která odpovídá 10 mm penetraci kužele při použití kužele 60 g/ 60°, nebo vlhkost, která odpovídá 20 mm penetraci kužele při použití kužele 80 g/ 30°.



Obr. 2a: (vlevo) Kuželová zkouška - zaboření kužele do těsta; **Obr. 2b:** (vpravo) Penetrometr po zaboření

3.2 Metodické rozdíly v obou normách

Ke dni 1. 5. 2008 byla norma ČSN 72 1014 Laboratorní stanovení meze tekutosti zemín zrušena. Nahradila ji nová evropská norma ČSN CEN ISO/TS 17892-12 Geotechnický průzkum a zkoušení – laboratorní zkoušky zemín – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí. Obě normy popisují zkušební metodu pro stanovení konzistenčních mezí zeminy. Mez tekutosti w_L se určuje pomocí Casagrandeho přístroje (ČSN 72 1014) nebo Vasiljevovým kuželem (ČSN CEN ISO/TS 17892-12). Uvedené metody nejsou rovnocenné.

Vlhkost a plasticita rozhodujícím způsobem ovlivňují mechanické vlastnosti zemín. Pokud má zemina kašovitou konzistenci, je tekutá, nemá žádnou pevnost a není tedy schopná přenášet žádné zatížení. Naproti tomu stejná zemina s velmi malou vlhkostí může mít tvrdou konzistenci, taková zemina má vysokou pevnost a je schopná přenášet poměrně velká zatížení. Určitá soudržná zemina má stálé meze konzistence. Stálý je též rozdíl mezi mezí tekutosti a mezi plasticity, tzv. číslo plasticity I_p .

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 $12,5 \pm 0,5$ mm, a to při rychlosti dvou úderů za sekundu. Použijeme-li Vasiljevův kužel, odpovídá mezi tekutosti ta vlhkost, při níž se hladký kovový kužel se středovým úhlem 30° a s hmotností 80 g (60 g/ 60°), položený na uhlazený povrch vzorku, zaboří vlastní tíhou do hloubky 10 mm během 5 sekund.

Dle neplatné normy ČSN 72 1014 pomocí Casagrandeho přístroje byla zkouška realizovaná především jednobodově. To znamená, že se celý postup prováděl pouze jedenkrát a zkouška měla jediný výsledek. Zatímco u evropské normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12, kdy je zkouška realizovaná Vasiljevovým kuželem, je nutno postup opakovat vždy čtyřikrát. Jedná se tedy o zkoušku čtyřbodovou. Z toho vyplývá, že současná norma je přesnější díky většímu počtu měření. Výsledné hodnoty

jsou sice velmi podobné, ale ne úplně stejné. Proto je třeba tyto metody rozlišovat. Symbolem w_L označujeme obvykle vlhkost na mezi tekutosti z Casagrandeho zkoušky, symbolem \bar{w}_L ze zkoušky podle Vasiljeva.

Vyhodnocení výsledků se provádí pomocí počítačových programů. Jedním z nich je program „Klasifikační rozbory zemin“ od Ing. Vratislava Štěpánka (www.stepanek.cz). Tento program automaticky vyhodnotí, po zadání všech požadovaných hodnot, mez tekutosti. Dle staré normy zpracovával pouze křivky a tabelární přehled. U nové normy jsou zpracovány i protokoly ke všem popisným zkouškám.

4 SROVNÁNÍ NOREM NA ZÁKLADĚ REALIZOVANÝCH MĚŘENÍ

Pro stanovení meze tekutosti bylo provedeno celkem 52 zkoušek ve dvou etapách (tab.1). První etapa byla realizovaná s použitím Vasiljevovy zkoušky dle nové evropské normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 s názvem „Geotechnický průzkum a zkoušení – laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí“. Druhá fáze představovala měření identických vzorků pomocí metody Casagrandeho mísky dle starší normy ČSN 72 1014 s názvem „Laboratorní zkoušení meze tekutosti zemin“. Poté následovala fáze korelace výsledků z obou metod vždy u identického vzorku, aby mohlo být vůbec toto srovnání provedeno.

Pozorováním skupin výsledků pomocí Vasiljeva a Casagrandeho byla konvenčně stanovena hranice hrubé chyby (4 %) mezi hodnotami výsledků obou metod dle zkušeností z průběhu celé studie. Tato hranice je níže graficky znázorněna v grafech (viz. obr.3) s výsledky zkoušek (žlutá čára). Zkoušky s hodnotami nad uvedenou hranici je doporučeno zopakovat. Celá skupina měření měla takto nepoužitelných (s hrubou chybou nad 4 %) 9,43 % hodnot.

Grafy regresních závislostí (viz obr.4) ukazují závislost výsledků zkoušek dle Casagrandeho na výsledcích dle Vasiljeva. Použitá regrese umožňuje analyzovat, jakým způsobem ovlivňují hodnoty jedné nebo více nezávislých proměnných hodnotu jedné závislé proměnné. Lineární regrese, která se uplatňuje u těchto dvou metodik měření, byla provedena pomocí jedné z nejpoužívanějších metod nejmenších čtverců, proložením přímkou sadou pozorování.

Hodnota spolehlivosti by se měla co nejvíce blížit číslu 1, protože to je hodnota vyjadřující stav s nejvyšší přesností dané hodnoty. U celé skupiny prováděných zkoušek je tato hodnota 0,9780 (viz tab. 2), což znamená, že tyto výsledky jsou poměrně velmi přesné. Také chyba střední hodnoty je u těchto výsledků nízká (1,043 -viz tab. 2).

Bylo provedeno *geostatistické vyhodnocení*, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 3.

Střední hodnota je parametr rozdělení náhodné veličiny, který je definován jako vážený průměr daného rozdělení. Průměr rozdílů výsledků byl u zkoušek vykonávaných samostatně 3,046 %, zatímco u zkoušek, které proběhly pod dohledem zkušeného laboranta, činil pouze 2,549%. Z těchto hodnot je patrné, že při dohledu laboranta byla měření o 0,496 % přesnější. V tomto případě (1. skupina měření) jsou měření charakterizována nižším rozptylem naměřených hodnot. Rozdíly měření se pohybovaly nejvíce v rozmezí 1 – 3 % a nejsou zde žádné hodnoty pod 1 %, a nepřesných výsledků přesahujících hranici 4 % je pouze 5. Zatímco při samostatném měření je rozptyl hodnot mnohem větší a vyskytuje se zde celkem 15 hodnot vyšších než 4 %, zároveň je tady ale i stejný počet hodnot pod hranici 1 %, což představuje nejpřesnější měření. Přehledněji to znázorňuje tab. 4 a histogramy četnosti (viz obr. 5, obr. 6, obr. 7).

Medián je ta hodnota argumentu X, která má největší absolutní četnost. Taková hodnota x_i , že přibližně 50% hodnot je větších a 50% menších než tato hodnota. U této statistické hodnoty nejsou v obou skupinách měření velké odchylky.

Směrodatná odchylka vyjadřuje, jak se hodnoty liší od průměrné hodnoty (střední hodnoty). Na výsledcích naměřených samostatně jsou patrné větší odchylky než u hodnot měřených s asistencí,

převážně se to projevuje na zkoušce dle Casagrandeho, což poukazuje na skutečnost, že při měření touto metodou bez dostatečných zkušeností jsou výsledky méně přesné.

Rozptyl výběru představuje tzv. charakteristiku variability. Tato hodnota velmi dobře ukazuje, jak jsou dlouholeté zkušenosti důležité pro správné provedení obou zkoušek, především pak u Casagrandeho zkoušky, kde je rozptyl největší. V případě rozptylu hodnot rozdílů obou metod je pak tato hodnota o téměř sedm jednotek větší v případě samostatného měření.

Špičatost určuje relativní strmou nebo plochost rozdělení v porovnání s normálním rozdělením. Při výpočtu špičatosti se užívá čtvrté mocniny. Kladná špičatost znamená, že rozdělení je poměrně strmé, tak je tomu v případě výsledků u samostatného měření, zatímco u měření s dohledem laboranta je špičatost záporná, což znamená, že rozdělení je poměrně ploché.

Šikmost označuje stupeň asymetričnosti rozdělení veličiny kolem střední hodnoty. Kladné zešikmení označuje rozdělení s asymetrickou stranou, která se vychyluje směrem k více kladným hodnotám. Záporné zešikmení označuje rozdělení s asymetrickou stranou, která se vychyluje směrem k více záporným hodnotám. Při výpočtu šikmosti se užívá třetí mocniny. Naměřené výsledky obou skupin jsou zešikmeny kladně, hodnoty samostatného měření jsou vychýleny více.

Minimum je nejmenší naměřená hodnota.

Maximum je nejvyšší naměřená hodnota.

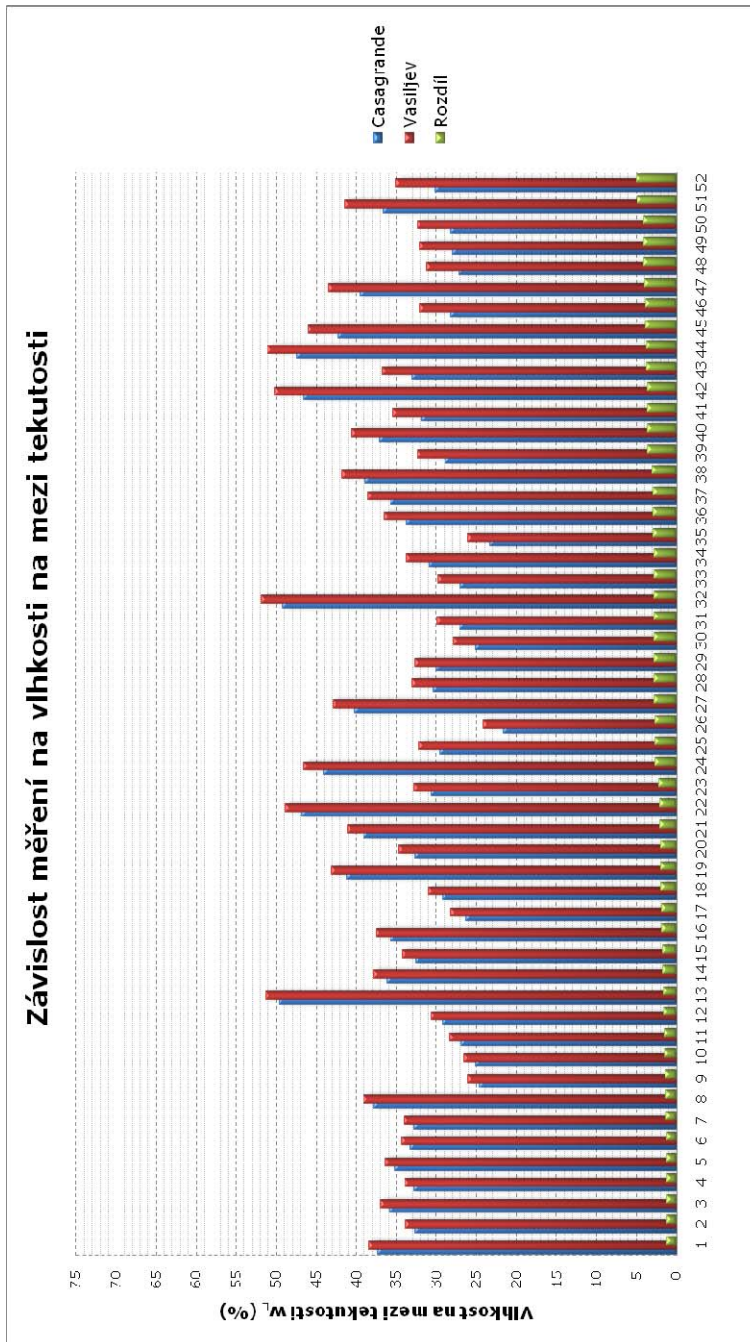
Rozdíl min – max je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou. Při celé skupině zkoušek bylo *rozpětí hodnot* od 27,22 % do 73,37 % u Casagrandeho a od 28,86 % do 65,22 % u Vasiljeva. Výsledný rozdíl hodnot u totožných vzorků byl od 0,024 % do 12,03 %. Dále je to patrné i z tab. 1, obr. 3 a tab. 4).

Součet je součet všech měřených hodnot. I zde lze pozorovat mnohem vyšší hodnotu součtu výsledků v první skupině měření (samostatné), než u druhé skupiny (se zkušeným laborantem).

Počet je celkový počet hodnot.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty (šikmým písmem jsou znázorněny hodnoty s rozdílem větším než 4 % a s doporučením opakování obou zkoušek)

Číslo	Vzorek	Casagrande	Vasiljev	Rozdíl	Číslo	Vzorek	Casagrande	Vasiljev	Rozdíl
1	23326	37,25	38,40	1,15	27	23327	40,14	42,8,	2,66
2	23303	32,65	33,80	1,15	28	23301	30,32	33,00	2,68
3	23304	35,73	36,90	1,17	29	23312	29,95	32,63	2,68
4	23309	32,72	33,90	1,18	30	23316	25,06	27,78	2,72
5	23339	35,11	36,30	1,19	31	23335	27,07	29,80	2,73
6	23305	33,18	34,37	1,19	32	23318	49,08	51,83	2,75
7	23311	32,8	34,02	1,22	33	23340	26,92	29,67	2,75
8	23313	37,82	39,06	1,24	34	23341	30,89	33,65	2,76
9	23319	24,57	25,98	1,41	35	23307	23,21	26,00	2,79
10	23306	25,05	26,50	1,45	36	23342	33,61	36,41	2,80
11	23320	26,80	28,29	1,49	37	23330	35,65	38,5	2,85
12	23322	29,11	30,65	1,54	38	23343	38,75	41,68	2,93
13	23317	49,56	51,2	1,64	39	23344	28,79	32,34	3,55
14	23324	36,12	37,85	1,73	40	23345	36,98	40,53	3,55
15	23323	32,49	34,24	1,75	41	23314	31,73	35,30	3,57
16	23321	35,66	37,44	1,78	42	23346	46,52	50,13	3,61
17	23331	26,29	28,10	1,81	43	23328	33,02	36,70	3,68
18	23332	29,11	30,99	1,88	44	23347	47,31	51,07	3,76
19	23334	41,18	43,06	1,88	45	23348	42,18	46,00	3,82
20	23315	32,64	34,60	1,96	46	23329	28,16	32,00	3,84
21	23336	39,01	41,02	2,01	47	23349	39,52	43,43	3,91
22	23325	46,72	48,80	2,08	48	23350	27,17	31,17	4,00
23	23337	30,62	32,79	2,17	49	23300	27,97	32,00	4,03
24	23338	44,01	46,59	2,58	50	23351	28,19	32,25	4,06
25	23308	29,45	32,06	2,61	51	23352	36,59	41,37	4,78
26	23310	21,49	24,11	2,62	52	23333	30,09	35,00	4,91

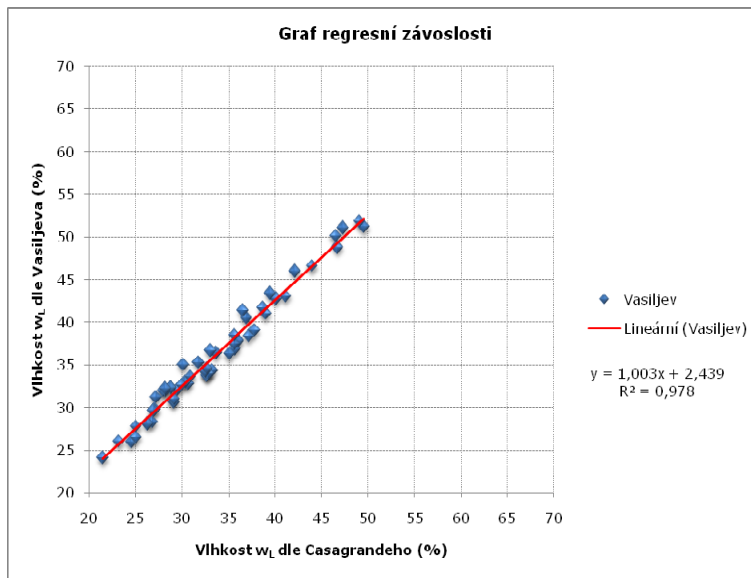


Obr. 3: Graf závislosti hodnot naměřených s pomocí zkušeného laboranta u Vasiljevova kužele - jednotlivá měření seřazená dle velikosti rozdílu vlhkosti na mezi tekutosti

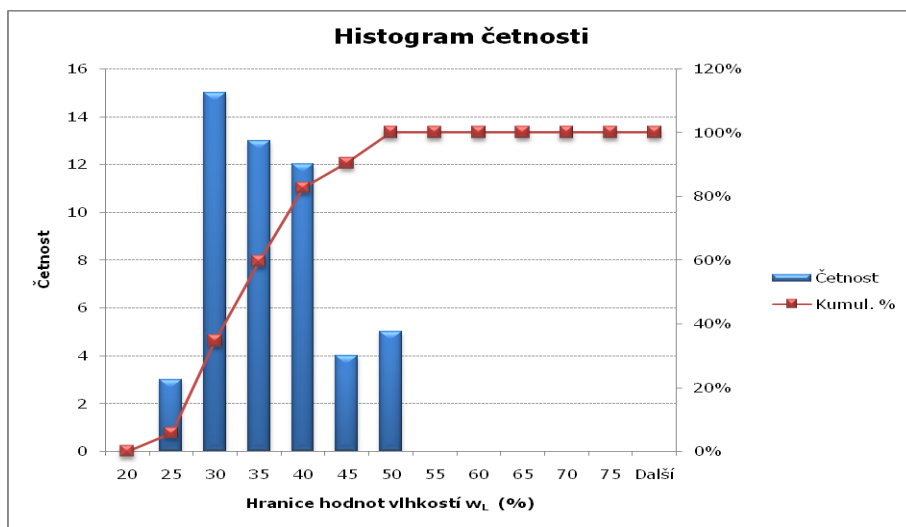
Pozn.: Vasiljevův kužel (červený sloupec) a Casagrandeho misky (modrý sloupec) s uvedením jejich rozdílu (zelený sloupec) na vlhkosti na mezi tekutosti. Žlutou čarou je znázorněna hranice hodnot s rozdílem 4 % (konvenční hranice), nad kterým je doporučeno opakování zkoušek.

Tabulka 2: Parametry regresní závislosti hodnot měření Casagrandeho na Vasiljevovi

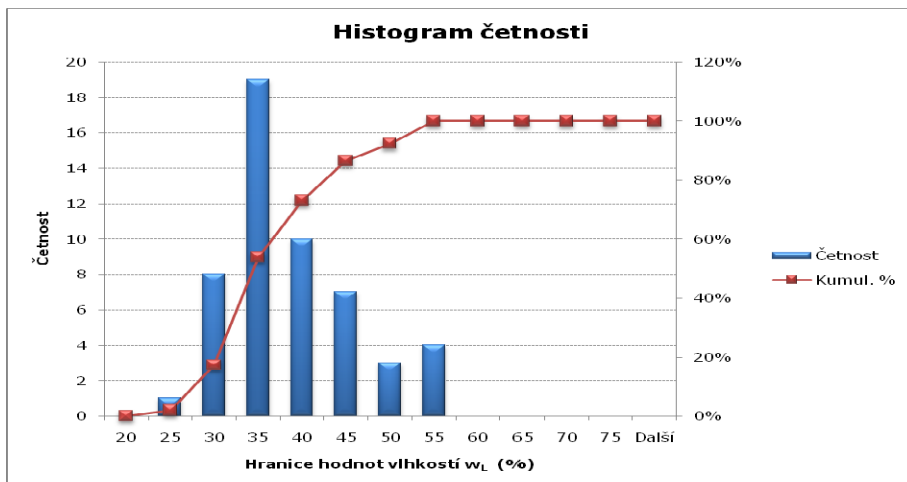
Regresní statistika	
Násobné R	0,988957747
Hodnota spolehlivosti R	0,978037426
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,977598175
Chyba střední hodnoty	1,043435149
Pozorování	52



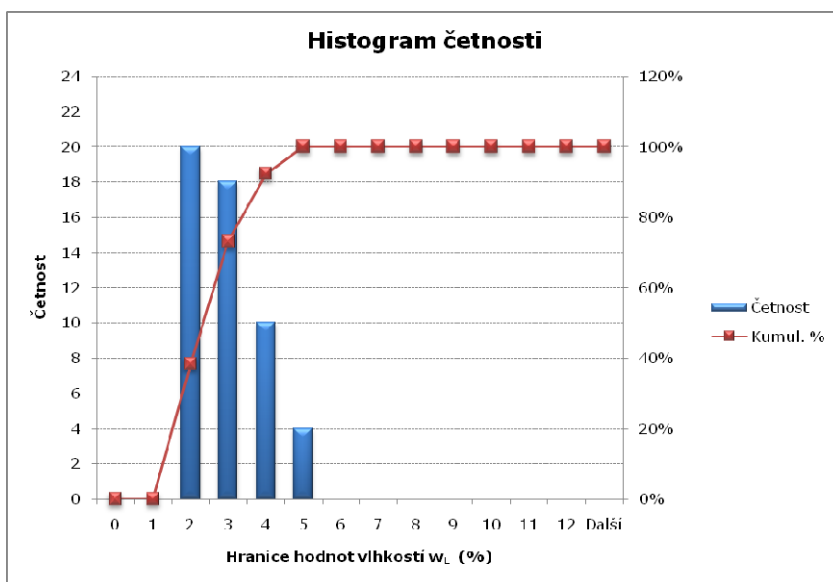
Obr. 4: Regresní závislost hodnot měření Casagrandeho na Vasiljevovi



Obr. 5: Histogram četnosti hodnot vlhkosti na mezi tekutosti dle Casagrandeho



Obr. 6: Histogram četnosti hodnot vlhkosti na mezi tekutosti dle Vasiljeva



Obr. 7: Histogram četnosti rozdílů hodnot vlhkosti na mezi tekutosti u zkoušek dle Casagrandeho a Vasiljeva

Tabulka 3: Tabulka s uvedením hodnot geostatistických parametrů skupiny měření s asistencí zkušeného laboranta (analýza dat)

<i>Casagrande</i>		<i>Vasiljev</i>		<i>Rozdíl</i>	
Stř. hodnota	33,6925	Stř. hodnota	36,23192308	Stř. hodnota	2,539423077
Chyba stř. hodnoty	0,953262473	Chyba stř. hodnoty	0,966767602	Chyba stř. hodnoty	0,143300729
Medián	32,685	Medián	34,485	Medián	2,64
Směr. odchylka	6,874073449	Směr. odchylka	6,971460319	Směr. odchylka	1,033356256
Rozptyl výběru	47,25288578	Rozptyl výběru	48,60125897	Rozptyl výběru	1,067825151
Špičatost	-0,18959265	Špičatost	-0,1593365	Špičatost	-0,78527328
Šikmost	0,617485563	Šikmost	0,638333452	Šikmost	0,385714018
Rozdíl max-min	28,07	Rozdíl max-min	27,72	Rozdíl max-min	3,76
Minimum	21,49	Minimum	24,11	Minimum	1,15
Maximum	49,56	Maximum	51,83	Maximum	4,91
Součet	1752,01	Součet	1884,06	Součet	132,05
Počet	52	Počet	52	Počet	52

Tabulka 4: Tabulka s uvedením základních kategorií měření dle přesnosti měření vlhkosti na mezi tekutosti

	<i>naměřené hodnoty</i>	
	<i>Počet hodnot</i>	<i>Průměr v %</i>
<i>Velmi přesné měření (do 1 %)</i>	0	-
<i>Přesné měření (1 - 3 %)</i>	47	2,346
<i>Nepřesné měření (nad 4 %)</i>	5	4,356
<i>Všechny hodnoty</i>	52	2,549

4.1 Rozdíly a chyby v normách

Obě zkoušky jsou zatíženy chybami. Je známo, že výsledky zkoušek jsou ovlivněny osobním přístupem laboranta, což má za následek vznik rozdílů mezi jednotlivými naměřenými výsledky zkoušek. Konzistenční meze jsou ovlivněny oxidací a jinými změnami zkušebního vzorku v důsledku např. dlouhodobého skladování nebo nevhodné manipulace se vzorkem. To se týká zejména citlivých jíílů, jíílů s obsahem sulfidů a organických zemín. Stanovení konzistenčních mezí u takovýchto jíílů musí proto proběhnout ihned po prohnětení (ČSN CEN ISO/TS 17892-12).

Na výsledky zkoušky meze tekutosti u obou metod má vliv i délka doby potřebná pro provedení zkoušky a počáteční vlhkost zeminy. Při zkoušce Vasiljevovým kuželem mohou vznikat chyby ze špatného promíchání těsta a to před uležením vzorku nebo před samotnou zkouškou.

4.1.1 Chyby při kuželové zkoušce dle Vasiljeva

Pro tuto zkoušku je třeba mít připraveno 200 g zeminy. Větší vliv na výsledky zkoušek má drsnost povrchu kuželu, menší pak odchylka úhlu kuželu nebo tupost vrcholu kuželu. Aby nedocházelo k ovlivnění zkoušky z těchto důvodů, je třeba přístroj pečlivě zkontrolovat minimálně jednou za rok. Z obou norem je patrné, že se v průběhu let změnila hmotnost kužele. Stará norma ČSN 72 1014 uvádí, že celková hmotnost kužele i s rovnovážným zařízením musí být rovna $76 \text{ g} \pm 0,2 \text{ g}$. V nové normě ČSN CEN ISO/TS 17892-12 je pak uvedeno, že hmotnost kužele se odvíjí od jeho úhlu. Kužel musí mít 60 g při vrcholovém úhlu kužele 60° , respektive 80 g při vrcholovém úhlu kužele 30° (použito při měření). Na tuto zkoušku má vliv i dodržení správných parametrů dalších pracovních pomůcek (např. váha, sada sít, míchací nádoba atd.), jejichž parametry jsou uvedeny v normě ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Pro správnou realizaci zkoušky je třeba všechny uvedené podmínky zkoušky dodržovat a měřicí zařízení musí splňovat parametry normy. Tato kuželová zkouška je méně ovlivněna chybou způsobenou lidským faktorem, jako je tomu u zkoušky dle Casagrandeho, protože je více

mechanizovaná a provádí se minimálně čtyřikrát (čtyřbodová metoda) a tyto čtyři výsledky se průměrují. Laborant pouze odečte penetraci na penetrometru.

4.1.2 Chyby při zkoušce dle Casagrandeho

Casagrandeho metoda je alternativní metoda pro stanovení meze tekutosti zeminy. Jak Casagrandeho přístroj, tak i metodika zkoušky procházely mnoha malými, avšak významnými proměnami od dob, kdy byl tento postup poprvé představen Casagrandem v roce 1932. V minulosti měl např. Casagrandeho přístroj kličku, kterou se otáčelo rychlostí 2 otáčky za vteřinu, čímž se mísa s rozfíznutým koláčkem zeminy uvedla do pohybu. Později byl tento přístroj automatizován tak, že klička byla nahrazena motorkem. Další rozdílností je možnost různé drsnosti povrchu Casagrandeho mísky daného jednak délkou jejího používání, respektive různou drsností již od výroby.

Pro tuto zkoušku je potřeba 50 g zeminy. Co se týče samotného vykonávání zkoušky, největší nepřesnosti vznikají při samotné zkoušce z nesprávného odhadnutí délky slití obou koláčků zeminy. Je třeba přesně určit, při kterém úderu se oba koláčky zeminy slijí na požadovanou délku 12,5 mm ($\pm 0,5$ mm). Ne vždy je tato situace úplně zřejmá a osobní přístup laboranta zde hraje roli. Každý laborant může přesné slití koláčku vidět při jiném počtu úderů. Dalším aspektem je dlouholetá zkušenost. V minulosti, kdy platila stará norma ČSN 72 1014, bylo proto často vyžadováno, aby v jedné laboratoři tuto zkoušku vykonávala pouze jedna osoba. Geologové, kteří poté využívali výsledky k dalšímu zpracování, si na přístup jednoho laboranta zvykli a dokázali s ním dále lépe spolupracovat. U této zkoušky je třeba věnovat také zvýšenou pozornost správnému tvaru vyřezávacího nože a seřízení přístroje, především výšky zdvihu mísky.

Rozdíly v naměřených hodnotách jsou pak způsobeny především uvedenými chybami. Vzhledem k tomu, že se jedná o přesné měření, může i malá odchylka způsobit větší rozdíl ve výsledcích.

4.2 Zvyklosti laboratoře

Vykonávání zkoušek přesně dle evropské normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12 je velice obtížné a zdoluhavé. Jde především o přípravu vzorku dle normy. V ní se uvádí, že „je potřeba mít kolem 200 g přirozené zeminy proseté sítem s otvory 0,4 mm nebo jemu nejbližšímu“, přičemž přirozená zemina je vzorek odebraný např. z vrty apod. a doručení do laboratoře. Má svou přirozenou vlhkost a většinou tuhou konzistencí, proto je téměř nemožné ho přesít sítem. Dále je uvedeno, že „zemina se musí nechat přiměřenou dobu sedimentovat a pak se musí slít čistá voda. Tato suspenze musí být částečně vysušena na vzduchu nebo v sušárně při teplotě, která nepřesáhne 50 °C, případně filtrací, až se z ní stane tuhá pasta. Lokálnímu přeschnutí povrchu nebo okrajů se musí zabránit opakovaným promícháním. Pasta má mít konzistenci odpovídající zhruba penetraci 7 mm při použití kužele 60 g / 60° nebo 15 mm pro kužel 80 g / 30°.“ Ve skutečnosti by však tento postup mohl trvat měsíc i déle, což je nepřijatelné z časových důvodů.

Laboratoře se normou řídí, ale zkoušky vykonávají dle svých zvyklostí. Ty jsou uvedeny v psaném dokumentu a do výsledného protokolu se uvádí, že zkouška je provedena v souladu s metodickým postupem dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12 a zvyklostí laboratoře.

4.3 Vliv petrografického složení zemin na vlhkost na mezi tekutosti

Dalším aspektem, který je pro zkoušky důležitý, je *minerální složení zemin*, především pak jílových minerálů. Ty patří mezi nejrozšířenější minerály v horninovém systému zemské kůry a jsou podstatnou částí půdního horizontu.

Jíl je hornina, která obsahuje alespoň 50 hmotnostních % částic menších než 2 μm . Je to směsný přírodní materiál, primárně složený z jemně zrnitých minerálů, který je obecně plastický při přiměřeném obsahu vody a ztvdne po vysušení či vypálení. Součástí jílu bývají především fylosilikáty, tj. silikáty s vrstevnou strukturou, ale kromě nich mohou být v jílech obsaženy i jiné minerály a organická hmota, které mohou, ale také nemusí ovlivňovat jejich plasticitu či tvrdnutím vysušení a

vypálení. Mezi tyto minerály mohou patřit například krystalické i nekrystalické modifikace SiO_2 , minerály skupiny alofanů, živce, zeolity, karbonáty či oxidy a hydroxidy železa a hliníku.

Při specifikaci „jílových minerálů“ se objevují jisté problémy. Z obecně mineralogického hlediska se nemůžeme při definici minerálů opírat o klasifikační kategorie, jako jsou velikost částic či míra plasticity, neboť tyto mezi ně nepatří (a ani nemohou patřit). Ztotožňovat pojem „jílové minerály“ s minerály, které jsou obsaženy v jílech, je také nepřijatelné a to nejen proto, že v jílech může být obsažena celá řada minerálů patřících do různých skupin platného mineralogického systému, ale také proto, že odporuje dosavadnímu chápání pojmu „jílový minerál“ odbornou komunitou. Přes tyto problémy se spojená nomenklaturní komise AIPEA a CMS (Guggenheim a Martin, 1995) dohodla, že minerály přítomné v jílech lze rozdělit do dvou následujících skupin:

1. Jílové minerály

Mezi ně patří nejen všechny fylosilikáty, ale také další minerály, jako například minerály skupiny alofanů, či některé hydroxidy, oxy – hydroxidy a oxidy, které udělují jílům plasticitu a které se vytvrzují po vysušení či vypálení. Na rozdíl od fylosilikátů, bývají však obvykle pouze minoritními složkami jílu.

2. Doprovodné minerály

Jsou pak ty minerály, které sice mohou být v jílech obsažené, ale nepatří mezi výše uvedené jílové minerály (Weiss, et al, 2005).

Soudržné zeminy jsou směsi jílových, prachových a často i písčitých zrn. V přírodě mohou obsahovat vázanou i volnou vodu. Množství vody narůstá v zemině s podílem a typem jílového minerálu a výměnných kationtů. 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 (tím větší je i její číslo plasticity I_p).

Kromě mezi konzistence, existuje ještě řada dalších příbuzných charakteristik. Zde jsou nejdůležitější.

1. *Sorpční schopnost*, tj. množství a rychlost nasávání vody vysušenou, rozmělněnou zeminou. (Určil ji Enslin).
2. *Aktivita jílu* je vyjádřena jako podíl čísla plasticity I_p (%) a procentuálního podílu jílového zrna $d < 0,002$ mm na zrnitostní skladbě zeminy. Jíly se stejným mineralogickým složením, původem a geologickou minulostí mají stejnou aktivitu. (Určil ji Skempton).
3. *Maximální molekulární vlhkost* w_{\max} je množství vody, které ze zeminy neodstraníme ani odstředivou silou rovnou 70 000 násobku zemské přitažlivosti. (Určil ji Lebeděv).

5 ZÁVĚR

Předmětem studie je vlhkost na mezi tekutosti, která je stavem empiricky stanoveným, při němž nastává přechod z měkce plastického do tekutého (kašovitého) stavu, tudíž po jeho dosažení se zemina začíná chovat jako tekutá látka.

Vlhkost na mezi tekutosti je zásadní zejména pro zjišťování konzistenčních stavů, které mají rozhodující podíl pro stanovení směrných normových charakteristik zemin, jež představují důležité geotechnické parametry jemnozrnných zemin (jako tříd základové půdy dle normy ČSN 73 1001 Základová půda pod plošnými základy) pro průzkumy tzv. první geotechnické kategorie. Je vstupním parametrem pro výpočet indexu konzistence a indexu plasticity zemin, které s výše uvedeným úzce souvisí.

Studie byla realizována dvěma metodikami zjišťování vlhkosti na mezi tekutosti Casagrandeho miskami a kuželovou zkouškou dle Vasiljeva. Zjišťování nemělo základ pouze v porovnávání dvou rozdílných metod pro jeden parametr, ale v nalezení důležité kontinuity starší české normy (ČSN 72 1014 Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin) a nově implementované evropské normy (ČSN CEN ISO/TS 17892/12: Geotechnický průzkum a zkoušení – laboratorní zkoušky zemin – Část

12: Stanovení konzistenčních mezí). Další význam je vázán na používání obrovského souboru v minulosti realizovaných inženýrskogeologických průzkumů se stanovením tohoto parametru a na potřebu je v současnosti využívat v nově realizovaných průzkumech dle zjištěného korelačního stavu. Archivní práce lze snadno získávat prostřednictvím Geofondu ČR.

Studie byla hodnocena na základě 52 realizovaných laboratorních zkoušek, přičemž každá zkouška byla provedena na identickém vzorku základové půdy. Výchozí postup spočíval v nakrájení nožem, vysušení v sušárně, rozdužení pomocí elektrického mlýna, přivlhčení destilovanou vodou a smíchání. Na závěr před realizací samotných zkoušek se vzorek nechal ustát po dobu 24 hodin za účelem rovnoměrného rozložení vlhkosti.

Následně byly realizovány Casagrandeho misková zkouška a Vasiljevova kuželová zkouška. Je důležité si uvědomit, že kuželová zkouška je dle normy provedena čtyřikrát na jednom vzorku, zatímco Casagrandeho pouze jednou. Další významné rozdíly jsou zřejmé jak v použití přístrojů, tak v samotném provedení zkoušky.

Rozpětí hodnot u zjištěných vzorků se pohybovalo od 21,49 do 49,56 % dle Casagrandeho a u kuželové zkoušky se pohybovalo v hodnotách od 24,11 do 51,07 %. Rozdíl výsledků u identických vzorků dosahoval hodnot od 1,15 do 4,19 %. Průměrný rozdílový koeficient mezi metodami je 2,549 %.

Průměrné rozdílové koeficienty je možno v budoucnu použít jako korelační součinitele, přičemž jejich použití by bylo potřeba upřesnit ještě větším souborem porovnávacích zkoušek. Nicméně jejich zjištění je důležité, protože usnadní použití archivních hodnot dle Casagrandeho a v současnosti realizovaných zkoušek dle Vasiljeva u jednoho inženýrskogeologického průzkumu v rámci stejné lokality.

LITERATURA

- [1] ČSN CEN ISO/ TS 17892 – 12 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemín – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí, Praha: Český normalizační institut, 2005. 15 s.
- [2] ČSN CEN ISO/TS 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemín - Část 1: Stanovení vlhkosti zemín, Praha: Český normalizační institut, 2005. 12 s.
- [3] ČSN 72 1012 Laboratorní stanovení vlhkosti zemín, Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 s.
- [4] ČSN 72 1014 Laboratorní stanovení meze tekutosti zemín, Praha, ÚMN, 1968, 9 s.
- [5] Hulla, J., Šimek, J., Turček, P.: Mechanika zemín a zakladanie stavieb, Bratislava, Alfa, 1991, 336 s.
- [6] Šimek, J., Jesenák, J., Eichler, J., Vaniček, I.: Mechanika zemín. 1.vyd., Praha, SNTL, 1990, 388 s.
- [7] Šucha, V.: Íly v geologických procesoch, Acta Geologica Universitatis Comenianae, ISBN, 2001, 159 s.
- [8] Weiss, Z., Kužvart, M. Jílové minerály – jejich nanostruktura a využití, Praha, Karolinum, 2005, 281 s.

Oponentní posudek vypracoval: RNDr. Miloslav Kopecký, CSc.

