

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Problematika objemově nestálých zemin při výstavbě dopravních staveb

Bc. Lucie Mlčochová

Diplomová práce

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie Mlčochová**
Osobní číslo: **D16404**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Problematika objemově nestálých zemin při výstavbě
dopravních staveb**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Diplomová práce bude vypracována v následujících přílohách:

1. Úvod a vymezení cíle práce.
2. Teoretická část práce popisující fyzikální a chemické vlastnosti objemově nestálých zemin.
3. Laboratorní zkoušky související s problematikou objemových změn zemin.
4. Praktické měření a vyhodnocení objemových změn vybraných typů zemin v laboratoři VVCD.
5. Popis a sanace poruch staveb v důsledku objemových změn zemin.
6. Zhodnocení, diskuse a závěr práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN 73 6133 - Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací
2. ČSN P ENV 1997-1 Eurokód 7, Navrhování geotechnických konstrukcí. Část 1: Obecná pravidla, Praha 1996
3. ČSN EN 1997-2 Eurokód 7, Navrhování geotechnických konstrukcí. Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy, Praha 1996
4. Vaníček, I.: Mechanika zemin, Skripta FSV ČVUT, 2000
5. ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení
6. ČSN 73 0037 (730037) - Zemní tlak na stavební konstrukce, 1. 1. 1992

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.

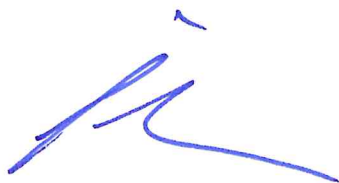
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce:

26. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

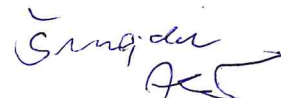
25. ledna 2019



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry



V Pardubicích dne 29. října 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Diplomová práce byla vytvořena s technologiemi prostředky Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 22. ledna 2019

Bc. Lucie Mlčochová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu této práce Ing. Alešovi Šmejdovi, Ph.D. za cenné rady, veškerou pomoc v laboratořích a všechnen čas, který mi věnoval při zpracovávání diplomové práce.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá problematikou objemově nestálých zemin, zkoumá typické jevy provázející jílovité zeminy, tedy bobtnání a smršťování. Práce se zaměřuje na identifikaci bobtnání a smršťování pomocí přímých i nepřímých metod. V práci je popis experimentálního měření vybraných zemin, zahrnující stanovení základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností, zrnitosti zemin, konzistenčních mezí, bobtnacího potenciálu, bobtnacího tlaku a meze smrštění. Práce porovnává výsledky nepřímých metod oproti přímým metodám a vyjadřuje chybovost daných metod. Součástí práce je také popis a sanace poruch dopravních staveb v důsledku objemových změn.

KLÍČOVÁ SLOVA

jílovité zeminy, bobtnání, smršťování, přímé a nepřímé metody identifikace bobtnání

TITLE

Problematics of swelling soils in construction of transport structures

ANNOTATION

This diploma thesis deals with swelling soil, examines typical phenomena resulting in clay soils, ie swelling and shrinkage. Thesis is focused on the identification of swelling and shrinkage using both direct and indirect methods. The thesis describes experiments on some specific soils, determines their basic physical and hydrophysical properties, grain size curves, consistency limits, swelling potential, swelling pressure and shrinkage limit. The thesis compares the results of indirect methods with direct methods and expresses the error rate of the given methods. Part of the thesis is the description and remediation of transport structures failures due to volume changes.

KEYWORDS

clay soils, swelling, shrinkage, direct and indirect methods of identification swelling

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Teoretická část.....	12
1.1 Objemově nestálé zeminy, jílovité zeminy.....	12
1.1.1 Definice a vznik jílovitých zemin.....	12
1.1.2 Vlastnosti jílovitých zemin.....	13
1.1.3 Základní jílové minerály.....	14
1.1.4 Voda v zemině.....	16
1.2 Identifikace bobtnání, smršťování.....	17
1.2.1 Přímé metody identifikace bobtnání.....	18
1.2.2 Nepřímé metody identifikace bobtnání.....	19
1.2.3 Smršťování.....	23
2 Vlastnosti a klasifikace zemin použité při experimentu.....	26
2.1 Základní fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti.....	26
2.1.1 Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy.....	26
2.1.2 Objemová hmotnost vysušené zeminy.....	26
2.1.3 Zdánlivá hustota pevných částic.....	27
2.1.4 Hmotnostní vlhkost.....	27
2.1.5 Pórovitost.....	27
2.1.6 Číslo pórovitosti.....	27
2.1.7 Stupeň nasycení (saturace zeminy).....	28
2.2 Klasifikace zemin.....	28
2.2.1 Zrnitostní složení zeminy.....	29
2.2.2 Plasticita jemných částic.....	32
2.3 Zhutnitelnost zeminy.....	35
3 Praktické měření a vyhodnocení laboratorních zkoušek.....	36
3.1 Vybrané typy zemin.....	36

3.2	Stanovení základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností.....	37
3.2.1	Stanovení objemových hmotností a vlhkosti přirozeného vzorku.....	37
3.2.2	Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic	37
3.2.3	Stanovení pórovitosti, čísla pórovitosti a stupně nasycení	38
3.2.4	Souhrn výsledků	39
3.3	Stanovení zrnitosti zemin	39
3.3.1	Sítový rozbor	39
3.3.2	Hustoměrná zkouška.....	41
3.3.3	Souhrn výsledků	43
3.4	Stanovení konzistenčních mezí.....	44
3.4.1	Mez tekutosti	44
3.4.2	Mez plasticity.....	46
3.4.3	Souhrn výsledků	47
3.5	Proctorova zkouška.....	47
3.5.1	Souhrn výsledků	49
3.6	Bobtnání.....	50
3.6.1	Příprava zkušebních těles.....	51
3.6.2	Volné bobtnání.....	52
3.6.3	Bobtnací tlak.....	56
3.7	Smršťování.....	61
3.7.1	Vyhodnocení zkoušky a souhrn výsledků	63
3.8	Porovnání objemových změn s nepřímými metodami	64
3.8.1	Klasifikace jílových minerálů.....	64
3.8.2	Klasifikace a porovnání bobtnajícího potenciálu.....	65
3.8.3	Porovnání bobtnacího tlaku	67
3.8.4	Porovnání meze smrštění	68
4	Popis a sanace poruch staveb v důsledku objemových změn.....	70

4.1	Úprava objemově nestálých zemin.....	70
4.1.1	Úprava vápnem (CaO).....	71
4.2	Poruchy dopravních staveb.....	72
4.2.1	Poruchy netuhé vozovky.....	72
4.2.2	Poruchy vozovky s cementobetonovým krytem.....	74
4.2.3	Porucha na dálnici D47.....	75
	ZÁVĚR.....	77
	LITERATURA.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
	SEZNAM TABULEK.....	86

ÚVOD

Bobtnání a smršťování nepříznivě ovlivňuje výstavbu a provoz dopravních staveb. Což se prokázalo na několika stavbách v České republice. V současné době bylo mnoho staveb zasaženo těmito negativními vlivy objemových změn. Ty výrazně snižují kvalitu a životnost dopravních staveb a zvyšují náklady na výstavbu a údržbu. To je jen jeden z mnoha důvodů, proč je důležité se touto problematikou zabývat. Řádný inženýrskogeologický průzkum, volba správných stavebních materiálů a vhodná úprava zemin dokáží minimalizovat bobtnání a smršťování zemin.

Já se ve své diplomové práci zabývám zjišťováním bobtnání a smršťování zemin. S tématem experimentálního stanovení vlastností zemin jsem se poprvé obeznámila ve své bakalářské práci. Proto jsem ráda, že jsem mohla s podobným tématem pokračovat i v diplomové práci. Na tématu mám ráda spojení teorie a laboratorních experimentů.

Tématem diplomové práce je problematika objemově nestálých zemin, které jsou v současnosti jednou z hlavních příčin poruch liniových dopravních staveb. Cílem je popsat fyzikální a chemické vlastnosti objemově nestálých zemin a se zaměřením na metody identifikace bobtnání jílovitých zemin. Dalším cílem je charakteristika základních popisných vlastností zemin a laboratorních zkoušek, které souvisí s problematikou objemových změn zemin. Hlavním cílem této práce je praktické měření a vyhodnocení objemových změn vybraných typů zemin v laboratoři VVCD. Posledním cílem je popsat poruchy a sanace staveb v důsledku objemových změn zemin.

Mezi rizikové zeminy náchylné na objemové změny vlivem kolísavé vlhkosti patří zejména jílovité a sprašovitě zeminy. Pro pochopení této problematiky je nutné znát zeminu samotnou, její strukturu a vnitřní vazby mezi elementy pevné, kapalné a plynné fáze. Proto se v první části práce budu věnovat všeobecným poznatkům z mechaniky soudržných jílovitých zemin. Zvláště se zaměřím na rozpoznávání bobtnavých zemin přímými laboratorními metodami a nepřímými metodami založených na empirických vztazích, které vycházejí z mechanicko-fyzikálních vlastností a mineralogického složení zeminy. V následující kapitole charakterizují základní fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti zemin, podle kterých se klasifikují a pojmenovávají zeminy do určitých skupin. Ve třetí kapitole popíšu všechny provedené laboratorní zkoušky. Na vybraných jemnozrnných zeminách určím základní popisné fyzikální a hydrofyzikální

vlastnosti a podle zrnitosti a plasticity zeminy zatřídím a pojmenuji. Laboratorním měřením v edometru zjistím hodnoty bobtnacího potenciálu a bobtnacího tlaku. Na základě poměrného objemového smrštění zemin stanovím mez smrštění. Dále vypočítám prediktivní hodnoty bobtnání a smrštění testovaných zemin podle vybraných nepřímých metod. Tyto výsledky porovnám s přímými laboratorními metodami a vyjádřím procentuální odchylku nepřímých metod. Zkoumané zeminy poté upravím pomocí vápna, které zlepšuje geotechnické vlastnosti jílovitých zemin. Stanovím na nich bobtnací tlak a bobtnací potenciál a vypočtu procentuální zlepšení těchto parametrů. V poslední kapitole stručně popíši sanace poruch dopravních staveb v důsledku objemových změn.

Po přečtení mé práce by měl mít čtenář představu o jílovitých zeminách a jejich nepříznivých vlastnostech při kontaktu s vodou, tedy bobtnání a smrštění, a dozvědět se o možnosti vylepšení vlastností těchto zemin a také o přesnosti nepřímých metod identifikace bobtnání.

1 Teoretická část

1.1 Objemově nestálé zeminy, jílovité zeminy

Dopravní stavby jsou kromě vlivu dopravy a stárnutí konstrukčních materiálů vystaveny měnícím se povětrnostním podmínkám, na nichž má velký podíl voda. Jak již bylo zmíněno, jílovité zeminy se řadí do skupiny zemin, které jsou v dopravním stavitelství náchylné na objemové změny, a to jak vlivem vysychání, tak i vlivem velké sorpce vody.

1.1.1 Definice a vznik jílovitých zemin

Dle dostupných pramenů definoval „jíl“ Georgius Agricola již v roce 1546. Tato definice byla často přezkoumána a pozměněna, ale její hlavní znaky jsou zachovány dodnes – např. popis jílu na základě zrnitosti a plasticity. Novou definici jílu shrnuli ve své práci Guggenheim a Martin (1995), která vyplynula ze závěrů nomenklaturních komisí AIPEA (Association Internationale Pour l'Étude des Argiles) a CMS (Clay Mineral Society). Jíl je v publikaci definován jako *směsný přírodní materiál, primárně složený z jemně zrnitých minerálů, který je obecně plastický při přiměřeném obsahu vody a ztvrdne po vysušení či vypálení*. [1]

Jíly jsou jemně zrnité sedimenty, který vznikly fyzickým nebo chemickým zvětráváním horniny. Jsou tvořeny především jílovými minerály – fylosilikáty. Kromě nich jíly obsahují i jiné minerály (např. modifikace SiO_2 , živce, karbonáty, oxidy a hydroxidy železa a hliníku) a organickou hmotu. Frakce jílu je dle definována jako jemnozrná s velikostí zrn menší než 0,002 mm. V sedimentologii se považují za jílovitou frakci zrna až do 0,004 mm, naopak v oblasti koloidní chemie jsou to zrna jen do 0,001 mm. Barva jílu závisí na minerálních příměsích, zejména pak na kovech v nich obsažených. Může být šedavě bílá, žlutošedá, modrošedá, zelená, červená až hnědá a černá barva.

Podle vzniku se rozlišují dvě základní skupiny jílu:

- Reziduální jíly (eluvia) – vznikly zvětráváním mateční horniny a zůstaly na místě svého vzniku. Mocnost zeminy v našich podmínkách dosahuje řádově jen několika metrů.
- Přemístěné sedimentární jíly – vznikly zvětráváním horniny. Z místa zvětrání byly erodovány a transportovány na nové místo, kde se ukládaly. Dle druhu transportu to jsou například aluvia (zeminy transportované vodou) nebo deluvia (gravitační projevy na svazích). Mocnost sedimentovaných vrstev může dosahovat i stovek metrů.

Podle obsahu jílových minerálů se jíly dělí na:

- Kaolinitické jíly – převládajícím minerálem je kaolinit, který vznikl zvětráváním živce. Obvykle se jedná o nevytříděný sediment tvořící reziduální horninu.
- Illitické jíly – převládá illit, který vznikl zvětráváním horniny bohaté na slídu. Patří mezi nejběžnější nezpevněné sedimenty.
- Montmorillonitické jíly – vznikají zvětráváním bazických vulkanických hornin. Jsou to transportované sedimenty, vzniklé přeplavením bentonitů (=montmorillonitické reziduální jíly, které nebyly z místa vzniku transportovány).

1.1.2 Vlastnosti jílovitých zemin

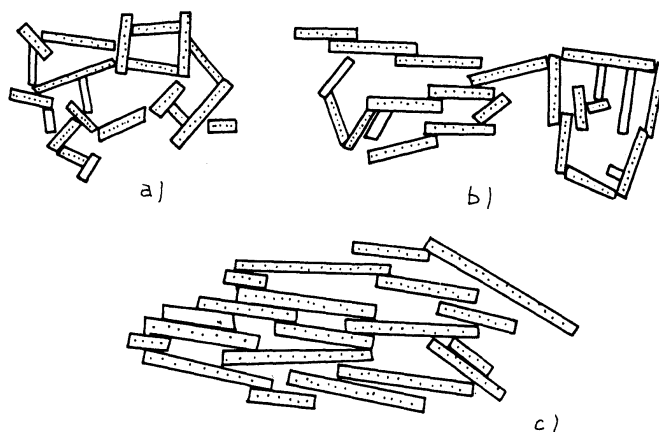
Jílovité zeminy jsou soudržné, tvárné a plastické do určité vlhkosti. Při nadměrném vysušení se zemina stává pevným a křehkým materiálem. Zeminy jsou všeobecně považovány za partikulární látky. Ty jsou složeny ze vzájemně se dotýkajících pevných částic, které se přímo nebo prostřednictvím kapalně a plynné fáze ovlivňují. Určité mechanicko-fyzikální vlastnosti jílovitých zemin, které mohou způsobovat bobtnání a smršťování, se odvíjí od jejich struktury a vazeb mezi jednotlivými částicemi, ale i na mineralogickém složení.

Vazby a struktury mezi pevnými částicemi

Jednotlivé pevné částice na sebe mohou působit podle vzdálenosti silami velkého nebo malého dosahu. V obou případech jde o síly jak odpudivé, tak přitažlivé. U jílových částic, zejména pak u těch koloidní velikosti (do 0,001 mm) vznikají síly velkého dosahu, typickým příkladem jsou částice ve vodním prostředí, které podmiňuje jejich rozptyl. Vlivem izomorfní výměny kationtů je celkový náboj jílových částic záporný. Ten je vyrovnáván adsorpcí kationtů, které se při kontaktu s vodou hydratují a vzniká tzv. elektrická dvojvrstva. Částice se vzájemně přitahují van der Waalsovými – Londonovými silami a odpuzují Coulombovými silami jejich elektrických dvojvrstev. Kromě sil malého a velkého dosahu mohou vznikat mezi částicemi také třecí, křehké nebo poddajné vazby.

Disperzní struktura je taková, kdy jsou vlivem sil velkého dosahu udržovány dvě jílové částice vzájemně rovnoběžně bez jejich přímého kontaktu. V disperzní stavbě převládají odpudivé síly nad přitažlivými. Podél bazálních ploch jílových částic vzniká elektrická dvojvrstva, která je za obvyklých podmínek ve vodním prostředí ($\text{pH} < 7$) záporně nabitá. Hrany částic jsou naopak nabitě kladně. Různý elektrický náboj má za následek flokulační strukturu typu „hrana – plocha“. Při velmi malé tloušťce elektrické dvojvrstvy převažují přitažlivé síly nad odpudivými

a dochází k „solné“ flokulaci. Na rozdíl od flokulace „hrana – plocha“ jsou částice přitahovány van der Waalsovými – Londonovými silami, a proto je jejich uspořádání poněkud paralelní. Lze tedy konstatovat, že bobtnání je danou mírou ovlivněno chemickým složením vody a prostředím, ve kterém se zemina nachází. [2]

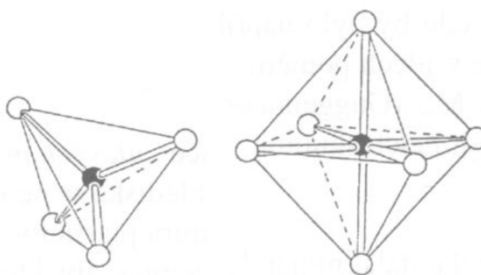


Obr. 1: Flokulace (a), „solná“ flokulace (b), disperze (c). [3]

1.1.3 Základní jílové minerály

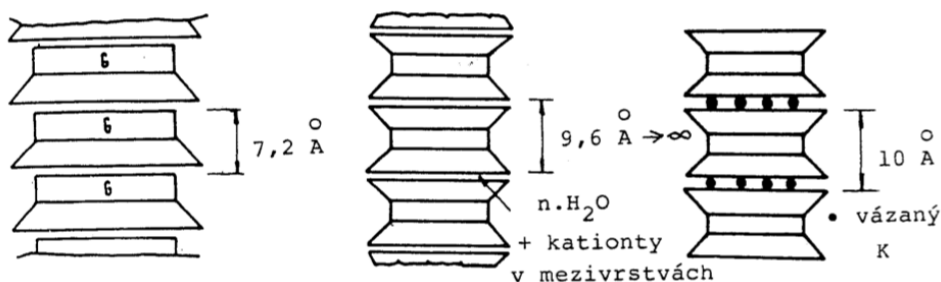
Jílové minerály jsou nositeli charakteristických vlastností – velmi dobrá sorpční schopnost, vysoká hodnota výměny kationtů, bobtnání a plasticita. Jílové minerály patří do skupiny fylosilikátů, tedy vrstevnatých silikátů, jejichž částice jsou ploché, destičkovité. Vznikly zvětráváním prvotních minerálů, např. živců a slíd. Složením jsou jílové minerály vodnaté hlinitokřemičitany. Mezi nejčastěji se vyskytující jílové minerály patří **kaolinit**, **illit** a **montmorillonit**. Jejich základní stavební jednotkou je kombinace jedné nebo dvou vrstev čtyřstěnnů Si-O s vrstvou osmistěnnů Al-OH. Kaolinit se skládá z vrstvy čtyřstěnnů a vrstvy osmistěnnů, tloušťka této základní dvojvrstvy je 7,2 Å. Illit a montmorillonit mají dvě vrstvy čtyřstěnnů, mezi které je vložena vrstva osmistěnnů a tvoří tak trojvrstvu tloušťky 10 Å (Ångström¹). Schéma ideálního čtyřstěnnu Si-O a osmistěnnu Al-OH je znázorněno na Obr. 2. Souvrství jednotlivých jílových minerálů je schematicky vyobrazeno na Obr. 3.

¹ Ångström neboli angstrom (symbol Å) je jednotka délky. Hodnota jednoho angstromu je rovna 0,1 nm.



Obr. 2: Čtyřstěn křemíku (vlevo) a osmistěn hliníku (vpravo). [1]

Vlastní elementární částice minerálu se skládá z mnoha základních jednotek (kaolinit je složen z několika set, naopak montmorillonit jen z několika jednotek kvůli jeho schopnosti snadného rozptýlu ve vodě). Mezi základními stavebními jednotkami jsou určité vazby, které ovlivňují chování jílovitých zemin. Vazby mezi nimi jsou buď značně pevné (kaolinit, illit) nebo velmi slabé (montmorillonit). Jednotky kaolinitu jsou spojeny poměrně pevnými vodíkovými vazbami, což způsobuje menší schopnost sorpce vody a tím i menší bobtnavost jílu. Illit má záporně nabitě jednotky, vazba mezi nimi je iontová prostřednictvím nevýměnných kationtů K^+ , které spojují jednotky relativně pevně. Výměnné kationty jsou pouze na koncích částice, proto schopnost illitu vázat vodu a bobtnat je vyšší než u kaolinitu. U montmorillonitu se stýkají vrstvy kyslíku a vytvářejí velmi slabé vazby, které vyvolávají jen van der Waalsovy – Londonovy síly. Důsledkem slabých vazeb je snadné štěpení podél stykových ploch základních stavebních jednotek a následná sorpce molekul vody a iontů do mezivrstev. Montmorillonitické jíly tak podléhají největším změnám objemu vlivem bobtnání (tzv. vnitrokrystalické bobtnání).



Obr. 3: Souvrství kaolinitu, montmorillonitu a illitu (zleva). [3]

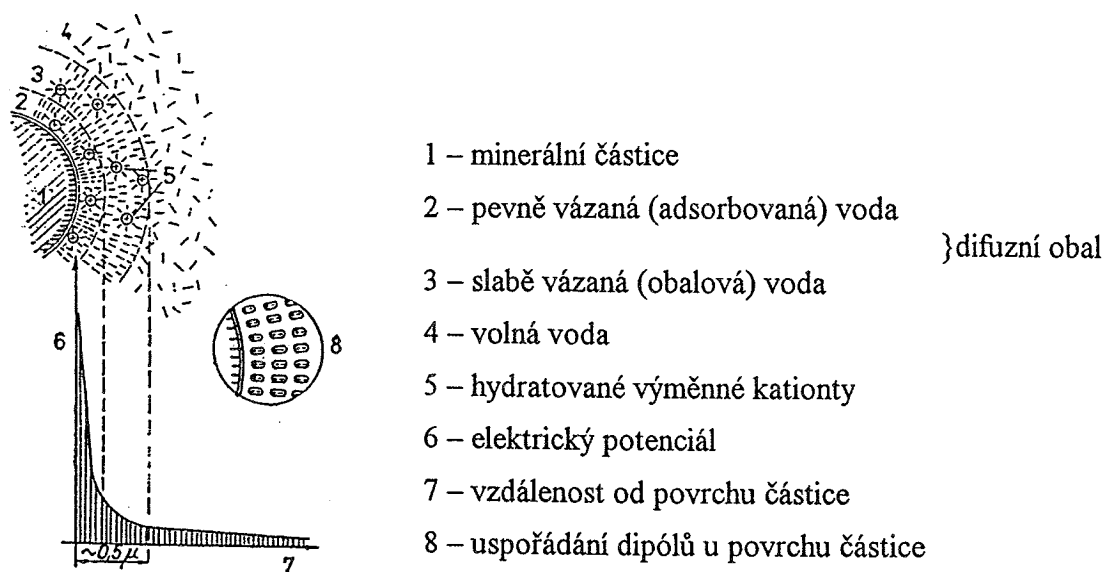
Některé jílové minerály, obzvláště pak illit a montmorillonit mají schopnost izomorfní výměny kationtů. Nejčastěji dochází k náhradě křemíku Si^{4+} hliníkem Al^{3+} ve vrstvě čtyřstěnnů illitu a hliníku Al^{3+} hořčíkem Mg^{2+} ve vrstvě osmistěnnů montmorillonitu. Tato substituce má za následek celkový negativní náboj jílovité částice a slabou deformaci krystalické mřížky vlivem rozdílných velikostí vyměněných kationtů. Míra schopnosti výměny kationtů je přímo závislá na specifickém povrchu minerálů (kaolinit 10–20 m^2/g , illit 80–100 m^2/g , montmorillonit až

800 m²/g). Větší specifický povrch částic způsobuje více substitucí kationtů a tím je i celkový elektrický náboj vyšší. Vznik elektrického náboje má zásadní vliv na vzájemné působení s vodou. [2, 3]

Výše zmíněné struktury a vazby mezi částicemi jsou příčinou velkých objemových změn soudržných jemnozrných zemin. Tyto změny objemu jsou ovlivněny proměnlivou vlhkostí zemin a způsobují, zejména u jílovitých zemin, bobtnání a smršťování.

1.1.4 Voda v zemině

Obsah vody v zemině má zásadní vliv na objemové změny. Voda v kapalně formě se v zemině vyskytuje jako voda **volná**, **vázaná** a voda **strukturální**. Voda volná vyplňuje objem pórů nasycené zeminy. Dle jejího pohybu se dělí na vodu gravitační a kapilární. Voda vázaná tvoří okolo částic jílových minerálů difuzní vodní obal (Obr. 4). Podle velikosti vzájemných vazeb – elektromolekulárních sil se tato voda dělí na slabě vázanou (obalovou, osmotickou) a pevně vázanou (adsorbovanou). Voda strukturální se nachází v krystalické mřížce jílových minerálů buď jako chemicky vázaná nebo krystalická. [4]



Obr. 4: Difuzní obal okolo jílové částice. [4]

Stupeň nasycení bobtnavých jíků

Všeobecně je známo, že plně saturovaná zemina má maximální hodnotu stupně nasycení rovnou jedné. To však nemusí platit pro bobtnavé jíly, zejména pak ty, které jsou schopné sorbovat velké množství vody – tedy jíly montmorillonitické. Důvodem jsou velké vazebné síly

pevně vázané (adsorbované) vody, které činí 10^2 až 10^3 MPa, proto se vlastnosti této vody značně liší od vody volné. Objemová hmotnost pevně vázané vody dosahuje hodnot i přes 2000 kg/m³ (voda volná má cca 1000 kg/m³). Toto zvýšení objemové hmotnosti mezivrstevní vody způsobuje, že stupeň nasycení bobtnavých jíílů při jejich plné saturaci přesahuje teoretickou maximální hodnotu jedna. [4,5] Tato skutečnost může identifikovat bobtnavé jíily již při stanovení základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností zkoumaného materiálu.

1.2 Identifikace bobtnání, smršťování

Bobtnající zeminy lze definovat jako jílovité zeminy, které vykazují značné změny objemu vlivem interakce s vodou. Jílovité zeminy jsou z velké části tvořeny jílovými minerály, které mají schopnost vázat do své vnitřní struktury obrovské množství vody a tím mění celkový objem jílových částic. Jestliže zemina vodu přijímá, objem se zvětšuje a proces nazýváme **bobtnáním**. V opačném případě, tj. kdy zeminy vodu ztrácí vysycháním, se objem zmenšuje a proces nazýváme **smršťováním**. Objemové změny jsou nepřímo závislé na sorpčních schopnostech jílových minerálů.

Objemová změna – celkové bobtnání může být kombinací mechanického, vnitrokrytalického nebo osmotického bobtnání. Mechanické bobtnání je způsobeno nadměrným tlakem v pórech. Osmotické bobtnání je způsobeno velkým rozdílem v koncentraci iontů vázaných elektrostaticky blízko povrchů jílových částic a iontů v pórové vodě. Vnitrokrytalické bobtnání je způsobeno hydratací vyměnitelných kationtů. Ty se hydratují při kontaktu s vodou a rozšiřují tak prostor mezi vrstvami jílových minerálů. Vnitrokrytalické bobtnání je typické pro montmorillonitické jíily.

Při výstavbě dopravních staveb se první fáze projektu opírá o geologické mapové podklady, které nabízí informace o geologickém podloží, údaje o podzemní vodě a podobně. Tyto informace umožňují rychlou identifikaci potenciálně bobtnavých zemín v zájmovém území. Pro upřesnění charakteristiky geologického podloží je však vždy nutné provést kvalitní inženýrskogeologický průzkum. Potenciálně bobtnavé zeminy lze předběžně identifikovat přímo v terénu vizuálním vjemem. Mezi rozpoznávací znaky bobtnavých jíílů patří například praskliny na povrchu půdy vzniklé vysušením a smrštěním zeminy nebo soudržná, měkká, lepkavá konzistence zeminy nasáklé vodou.

Jílovité zeminy, u nichž se vyskytuje značný potenciál k bobtnání, lze identifikovat pomocí bobtnacího potenciálu a volného bobtnání, případně stanovením bobtnacího tlaku. Přestože byl učiněn značný vývoj ve výzkumu bobtnajících jílovitých zemin, v současné době neexistuje dostatečně účinná metoda predikce bobtnání zeminy. Bobtnací potenciál je možno zjistit přímými laboratorními metodami měření v edometru nebo stanovit pomocí nepřímých metod na základě mineralogického složení, konzistenčních mezí, indexových vlastností a obsahu jílovité frakce.

1.2.1 Přímé metody identifikace bobtnání

Pro určení bobtnacího potenciálu přímým laboratorním měřením jsem zvolila metodu měření volného bobtnání a metodu stanovení bobtnacího tlaku. Obě zkušební metody byly provedeny v klasickém edometru – v přístroji, který umožňuje pouze jednoosou deformaci a vzorku je tak znemožněno se deformovat do stran. Příprava a realizace uvedených zkušebních metod se řídila dle normy ČSN EN ISO 17892-5 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním. Velikost hodnot bobtnacího tlaku a potenciálu závisí zejména na zrnitosti, mineralogickém složení a vysušené objemové hmotnosti.

1.2.1.1 Volné bobtnání

Hodnota volného bobtnání je vyjádřena jako procentuální poměr nárůstu tloušťky vztažená k počáteční tloušťce zkušebního zhutněného vzorku důsledkem nabobtnání zeminy po interakci s vodou. Zkušebnímu tělesu v edometru je umožněno se volně deformovat v jednom směru bez jakéhokoli aplikovaného zatížení.

Volné bobtnání neboli swell index jílovitých zemin lze také vyjádřit jednoduchou zkouškou, kterou vyvinuli Holtz a Gibbs (1956). Test spočívá v postupném rozptýlení 10 cm³ suché zeminy v odměrném válci objemu 100 ml naplněného vodou. Zemina se musí nechat hydratovat a ustálit na dně alespoň 24 hodin. Poté jsou zaznamenány změny v objemu zeminy. Bobtnání je vyjádřeno jako procentuální nárůst objemu k původnímu objemu půdy.

$$S = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100$$

kde: S – volné bobtnání – bobtnací potenciál [%],

V_0 – počáteční objem zeminy [cm³],

V_1 – objem zeminy po nabobtnání [cm³].

1.2.1.2 Bobtnací tlak

Bobtnací tlak je charakterizován jako poměr síly vyvolané vzorkem nasáklého vodou při zamezení jeho deformací a plochy vzorku, na kterou síla působí. Vzorek má po zalití vodou tendenci bobtnat a zvyšovat svůj objem. Pro stanovení bobtnacího tlaku zkušební tělesa se musí zabránit jeho objemové deformaci aplikovaným zatížením. Svislé osově napětí se musí zvyšovat postupným přitěžováním tak, aby se zachoval původní objem zkušební tělesa. Obecně se bobtnací tlak stanoví dle následující rovnice:

$$\sigma_{sw} = \frac{F}{A}$$

kde: σ_{sw} – bobtnací tlak [kPa],

F – maximální síla vyvolaná vzorkem [kN],

A – plocha vzorku, na kterou působí síla F [m²].

1.2.2 Nepřímé metody identifikace bobtnání

Predikce bobtnání u jílovitých zemin může být zjištěna na základě jejího mineralogického složení. Jílovité zeminy obsahují řadu jílových minerálů, které na sebe vážou vodu vnitřně krystalickými nebo osmotickými procesy, a tak dochází k bobtnání zemin. Podle chemického složení a krystalické struktury minerálů se liší i jejich schopnost absorbovat vodu a tím se mění i potenciál k bobtnání. Nepřímé metody odhadují potenciál k bobtnání prostřednictvím empirických vztahů nebo grafických znázornění mezi indexovými vlastnostmi, konzistenčními mezemi, zrnitostí a mineralogií.

1.2.2.1 Metody určení mineralogického složení

Základním faktorem, který ovlivňuje objemové změny zeminy je její mineralogické složení. Níže zmíněné metody jsou nejčastěji používanými prostředky k vyšetření mineralogie zkoumaného materiálu.

- RTG difrakční analýza – je založena na určení mřížkové krystalické struktury podle vlnové délky rentgenového záření, výsledkem je poměrné zastoupení jednotlivých minerálů.
- Diferenční termická analýza (DTA) – je založena na sledování teplotního rozdílu zkoumaného vzorku a srovnávacího materiálu.
- Elektronový mikroskop – umožňuje přímou identifikaci jílových minerálů.

1.2.2.2 Metody identifikace jílových minerálů

Zastoupení určitého typu jílového minerálu v zemině lze také přibližně odhadnout z mechanicko-fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností. Metody k identifikaci jílových minerálů uvádí např. Skempton (1953), Holtz a Kovacs (1981) a Shaw et al. (1998).

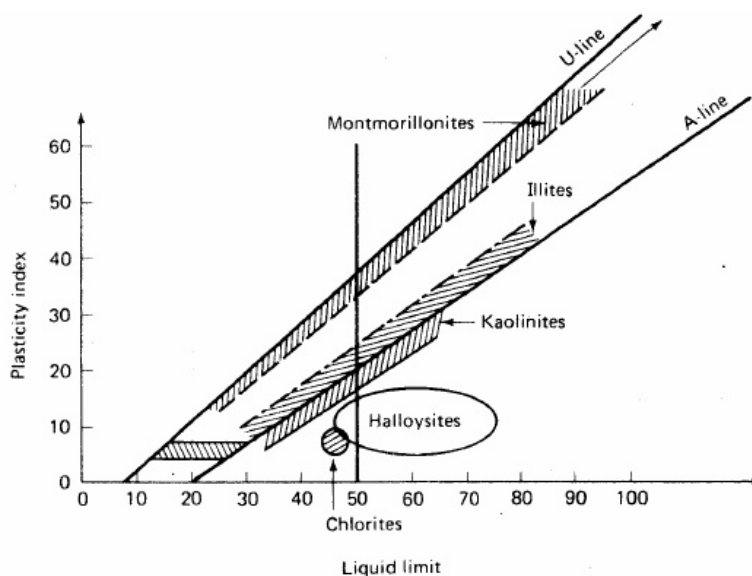
Skempton (1953) určuje typ jílového minerálu z indexu koloidní aktivity (viz 2.2.2), který signalizuje koloidní vlastnosti jílu. Závisí především na množství a typu přítomných jílových minerálů a organických koloidů a na obsahu elektrolytů v pórové vodě. [6] Pro některé jílové minerály uvedl typické hodnoty koloidní aktivity a definoval tři třídy aktivity, Tab. 1. [7]

Tab. 1: Hodnoty koloidní aktivity jílových minerálů a třídy aktivity. [7]

Minerál	Index koloidní aktivity
Kaolinit	0,33 - 0,46
Illit	0,9
Ca-montmorillonit	1,5
Na-montmorillonit	7,2

Třída	Index koloidní aktivity
neaktivní jíly	< 0,75
normální jíly	0,75 - 1,25
aktivní jíly	> 1,25

Holtz a Kovacs (1981) odhadují složení jílových minerálů prostřednictvím diagramu plasticity s vyznačenými lokacemi jílových minerálů, Obr. 5. V oblasti nad linií A se vyskytují minerály se sorpčními vlastnostmi typickými pro bobtnavé jílovité zeminy. [8]



Obr. 5: Oblasti jílových minerálů v diagramu plasticity. [8]

Shaw et al. (1998) stanovuje typ jílového minerálu z hodnoty kationtové výměnné kapacity CEC, Tab. 2. Kationtová výměnná kapacita určuje celkové množství vyměnitelných kationtů ve vztahu k určitému druhu jílového minerálu. Na površích jílových minerálů se vyskytují záporně nabitá místa schopná zadržovat kationty elektrostatickou silou. Počet kationtů, které jsou adsorbovány záporně nabitými místy je vyjádřen právě prostřednictvím CEC, udává se v mmol+/100 g zeminy. [9]

Tab. 2: Hodnoty CEC pro jílové minerály dle Shawa et al. [9]

Poměr CEC	Jílový minerál
< 0,02	Kaolinit
0,2 - 0,35	Illit a kaolinit
0,35 - 0,55	Smíšené
0,55 - 0,75	Smíšené s vyšším podílem smektitů
0,75 - 0,95	Převládající smektit s možností živce
> 0,95	Smektit a živce, nebo CEC z jiných než jílových minerálů

1.2.2.3 Metody stanovení bobtnajícího potenciálu

Experimentální studii bobtnavých jílu byla v posledních letech věnována zvýšená pozornost. Z rozsáhlých výzkumů byly na základě vztahů mezi indexovými vlastnostmi, konzistenčními mezemi, zrnitostí a mineralogií navrženy různé formy empirických rovnic pro stanovení bobtnajícího potenciálu. V následujícím textu uvedu pro porovnání jen vybrané vztahy, podle Seeda et al. (1962), Chena (1975) a podle Nayaka a Christensena (1971).

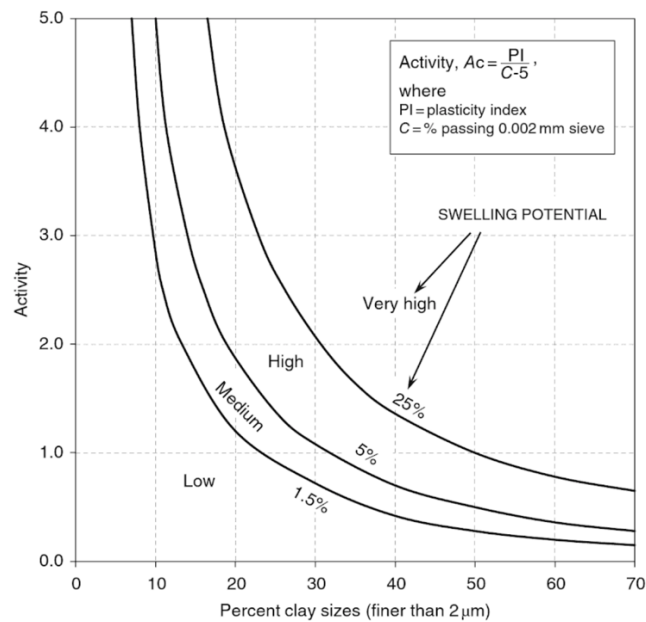
Společným znakem výzkumů zmíněných autorů je příprava a realizace experimentu. Zkušební vzorky zeminy byly zhutněny při optimální vlhkosti na požadovanou maximální objemovou hmotnost sušiny. Zhutněné vzorky byly za konstantního přitížení 6,9 kPa (1 psi) zality vodou. Po nabobtnání definovali pojem bobtnající potenciál jako procentuální poměr přírůstku tloušťky k počáteční tloušťce zkušební vzorku.

Seed et al. (1962) zrealizoval celou řadu experimentů na uměle připravených vzorcích zemin, kdy smíchal typické jílové minerály s odlišným podílem písku. Z analýzy výsledků testovaných zemin odvodil empirický vztah mezi bobtnajícím potenciálem S a indexem plasticity I_p .

$$S = 2,16 \times 10^{-3} (I_p)^{2,44}$$

Seed et al. (1962) z výzkumu stanovil i jiný výraz v závislosti na obsahu jílové frakce C a indexu koloidní aktivity I_A :

$$S = 3,6 \times 10^{-5} (I_A)^{2,44} (C)^{3,44}$$



Obr. 6: Grafické odvození bobtnajícího potenciálu podle Seeda et al. [10]

Chen (1975) ze svého výzkumu zjistil, že bobtnající potenciál zeminy závisí na počáteční vlhkosti a objemové hmotnosti sušiny, kdy bobtnající potenciál klesá se zvyšující se vlhkostí a roste se zvyšující se objemovou hmotností sušiny. Na základě vyhodnocených měření odhadl vztah pro bobtnající potenciál zeminy z indexu plasticity I_p . Předpokladem je přirozená vlhkost v rozmezí 15 % - 20 % a objemová hmotnost suché zeminy 1630 - 1790 kg/m³.

$$S = 0,2558 \times e^{0,0838 I_p}$$

Tab. 3: Bobtnající potenciál podle Chena. [11]

Bobtnající potenciál	Index plasticity
Nízký	0 - 15
Střední	10 - 35
Vysoký	20 - 55
Velmi vysoký	> 35

Nayak a Christensen (1971) provedli experiment na 18 uměle připravených vzorcích, smíchaných v různém poměru z písku a jílových minerálů. Z naměřených dat odvodili empirický vztah pro bobtnající potenciál S závislý na indexu plasticity I_p , obsahu jílové frakce C a počáteční vlhkosti w .

$$S = 0,0229 I_p^{1,45} C / w + 6,38$$

1.2.2.4 Metody stanovení bobtnacího tlaku

Bobtnací schopnosti zeminy lze identifikovat kromě bobtnacího potenciálu také pomocí bobtnacího tlaku. Niže zmíním dva autory, kteří definovali empirické vztahy bobtnacího tlaku na základě experimentů, zahrnující jak podmínky uložení zeminy v přirozeném prostředí, tak i fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti.

Komornik a David (1969) laboratorně stanovili bobtnací tlak na několika přírodních nenarušených vzorcích jílovitých zemin. Z naměřených hodnot vyjádřili empirický vztah pro bobtnací tlak následující rovnicí, kde w_L je mez tekutosti, ρ_d je počáteční objemová hmotnost vysušené zeminy v kg/m^3 a w je počáteční vlhkost. Bobtnací tlak σ_{sw} je zde počítán v kg/cm^2 .

$$\log \sigma_{sw} = \bar{2},132 + 0,0208 w_L + 0,000665 \rho_d - 0,0269 w$$

Nayak a Christensen (1971), viz předešlá podkapitola 1.2.2.3, uvedli kromě bobtnacího potenciálu taky vztah pro odhadnutí bobtnacího tlaku v závislosti na indexu plasticity I_p , obsahu jílové frakce C a počáteční vlhkosti w . Experiment provedli na stejných, 18 uměle připravených zeminách. Bobtnací tlak σ_{sw} je v následujícím vzorci uveden v kN/m^2 . [12]

$$\sigma_{sw} = 2,5 \times 10^{-1} (I_p)^{1,12} \times C^2 / w^2 + 25$$

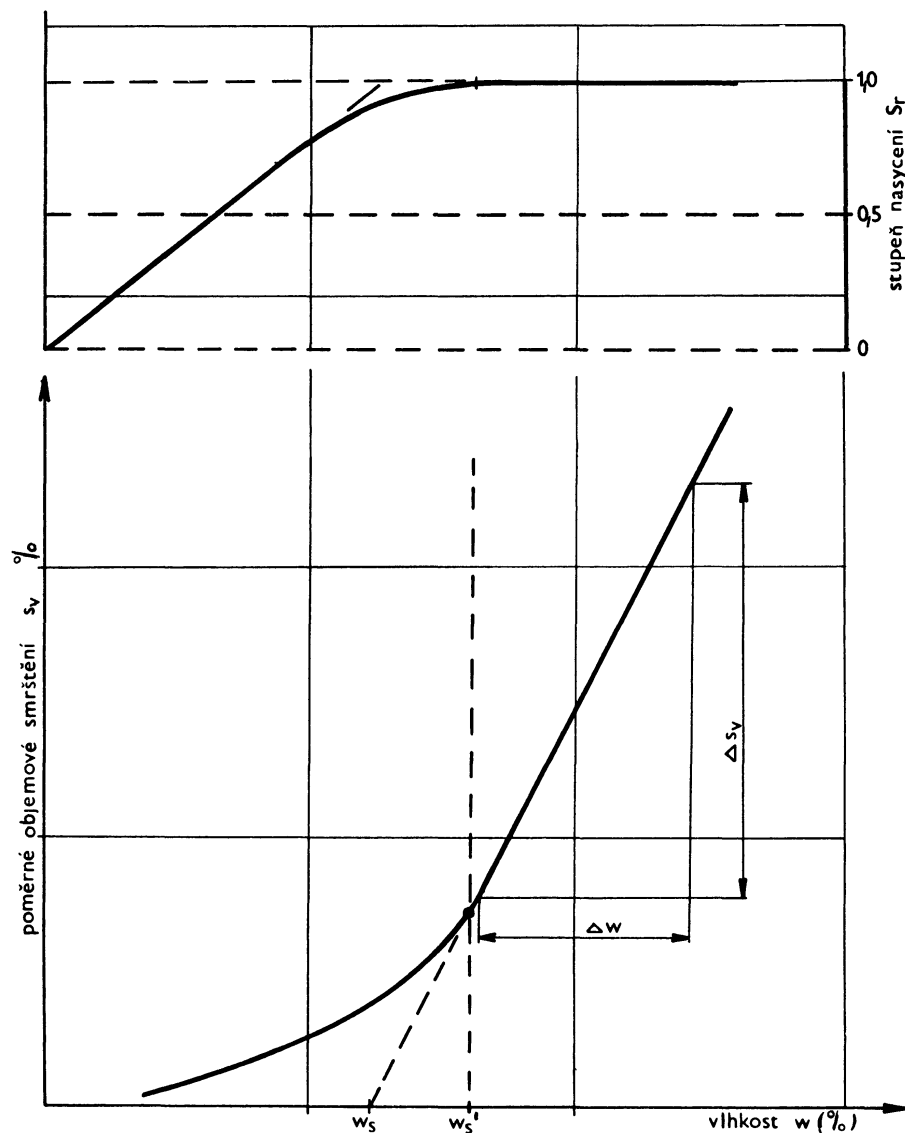
1.2.3 Smršťování

Smršťování zemin je proces, při kterém dochází ke zmenšování objemu zeminy způsobené úbytkem vody. Dle normy ČSN 72 1019 Laboratorní stanovení smršťování zemin je smršťování charakterizováno součinitelem objemového smršťování s_v a mezí smrštění w_s . Zmíněná norma popisuje způsob laboratorního stanovení objemového smršťování jemnozrnných soudržných zemin.

Definice důležitých pojmů dle ČSN 72 1019:

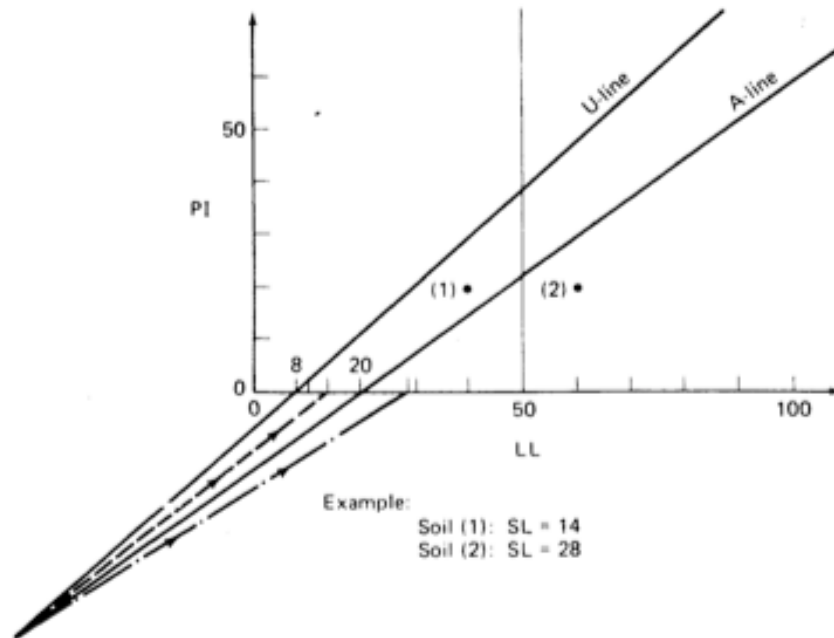
- poměrné objemové smrštění s_{vi} – poměr zmenšení objemu vzorku zeminy důsledkem snížení jeho vlhkosti k objemu vysušeného vzorku,
- součinitel objemového smršťování s_v – poměr rozdílu objemových smrštění v lineárním průběhu smršťování k rozdílu příslušných vlhkostí,
- mez lineárního smršťování w_s' – nejmenší vlhkost lineární části čáry smršťování,
- mez smrštění w_s – vlhkost odpovídající průsečíku lineární části čáry smršťování s osou vlhkosti. [13]

Průběh smršťování zeminy se znázorňuje graficky jako čára smrštění, která vyjadřuje závislost poměrného objemového smrštění s_{vi} na vlhkosti w_i (Obr. 7). Norma předpokládá od počátku smršťování plně nasycené zeminy ($S_r = 1$), které se smršťují lineárně, tj. změna objemu zeminy odpovídá změně objemu vody. Tento lineární průběh čáry smrštění je charakterizován konstantním součinitelem objemového smršťování s_v . V okamžiku, kdy začne klesat stupeň nasycení pod hodnotu jedna, má zemina vlhkost na mezi lineárního smršťování w_s' . Při teoretickém prodloužení lineární části k vodorovné ose vlhkosti dostaneme průsečík, který je označován jako mez smrštění w_s . Mez smrštění je tedy vlhkost, která by odpovídala plné saturaci smrštěného vzorku. Reálné smršťování zeminy probíhá i nadále za uvedené meze, avšak objemové změny již nejsou vůči vlhkosti tak zřetelné. Tento průběh smršťování je nejednoznačný a pro geotechnickou praxi nemá zásadní význam.



Obr. 7: Závislost poměrného objemového smrštění na vlhkosti. [13]

Casagrande během působení na Harvardově univerzitě navrhl metodu pro stanovení meze smrštění z diagramu plasticity (Obr. 8). Tato metoda spočívá v prodloužení U-linie a A-linie za hranici diagramu. Linie se protnou v bodě se souřadnicemi -43,5 pro mez tekutosti a -46,4 pro index plasticity. Přímkou a určitým bodem v diagramu plasticity se proloží přímka. Tam, kde přímka protne vodorovnou osu meze tekutosti, označuje Casagrande jako mez smrštění.



Obr. 8: Casagrandeho metoda pro odhad meze smrštění. [8]

Casagrande také přibližně vyjádřil závislost mezi vlhkostí na mezi smrštění w_s , mezi tekutostí w_L a indexu plasticity I_p následující rovnicí.

$$w_s = 15 \cdot w_L / (15 + I_p)$$

2 Vlastnosti a klasifikace zemin použité při experimentu

Zeminu v přirozeném stavu tvoří pevné částice horniny a póry, které jsou vyplněny vzduchem a vodou. Zemina se tedy skládá ze třech fyzikálních fází – z pevné, kapalné a plynné fáze. Na vzájemném poměru těchto fází se určují základní fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti zeminy. Prostřednictvím těchto základních charakteristik jsem mohla zkoumané zeminy zařadit do klasifikačních skupin a dále je využít při experimentálním zhodnocení objemových změn.

2.1 Základní fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti

- Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy ρ
- Objemová hmotnost vysušené zeminy ρ_d
- Zdánlivá hustota pevných částic (měrná hmotnost zeminy) ρ_s
- Hmotnostní vlhkost w
- Pórovitost n
- Číslo pórovitosti e
- Stupeň nasycení S_r

2.1.1 Objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy

Pro stanovení objemové hmotnosti přirozeně vlhkého vzorku se užívá norma ČSN EN ISO 17892-2 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 2: Stanovení objemové hmotnosti. Objemová hmotnost zeminy ρ [kg/m³] je vyjádřena jako poměr hmotnosti a celkového objemu přirozeně vlhkého vzorku.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kde: m – hmotnost přirozeně vlhké zeminy [kg],
 V – objem přirozeně vlhké zeminy [m³].

2.1.2 Objemová hmotnost vysušené zeminy

Pro stanovení objemové hmotnosti vysušeného vzorku se užívá norma ČSN EN ISO 17892-2 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 2: Stanovení objemové hmotnosti. Objemová hmotnost vysušené zeminy ρ_d [kg/m³] je vyjádřena jako poměr hmotnosti vysušeného vzorku při teplotě 105–110 °C a celkového objemu přirozeně vlhkého vzorku.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kde: m_d – hmotnost vysušené zeminy [kg],

V – objem přirozeně vlhké zeminy [m^3].

2.1.3 Zdánlivá hustota pevných částic

Pro stanovení zdánlivé hustoty pevných částic se užívá norma ČSN EN ISO 17892-3 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic. Zdánlivá hustota pevných částic, též nazývaná jako měrná (specifická) hmotnost zeminy ρ_s [kg/m^3] je definována jako poměr hmotnosti pevných částic zeminy vysušené při 105–110 °C k jejich objemu.

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s} \quad [kg/m^3]$$

Kde: m_d – hmotnost pevných částic vysušené zeminy [kg],

V_s – objem pevných částic [m^3].

2.1.4 Hmotnostní vlhkost

Pro stanovení hmotnostní vlhkosti se užívá norma ČSN EN ISO 17892-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti. Hmotnostní vlhkost w [%] je vyjádřena jako poměr hmotnosti vody ve vzorku a hmotnosti vysušeného vzorku.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde: m_w – hmotnost vody ve vzorku [g],

m_d – hmotnost vysušené zeminy [g].

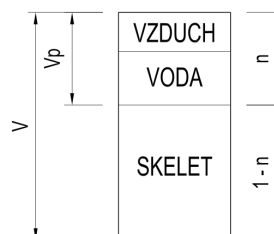
2.1.5 Pórovitost

Množství pórů v zemině je popsáno pórovitostí n [%], která je definována jako poměr objemu pórů k celkovému objemu vzorku.

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde: V_p – objem pórů [m^3],

V – celkový objem vzorku zeminy [m^3].

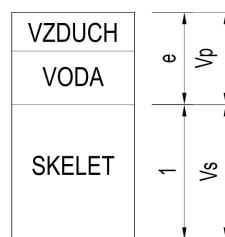


2.1.6 Číslo pórovitosti

Vedle pórovitosti je další objemovou charakteristikou, vyjadřující obsah pórů v zemině, číslo pórovitosti e [-], které je definováno jako poměr objemu pórů k objemu pevných částic vzorku.

$$e = \frac{V_p}{V_s} [-]$$

Kde: V_p – objem pórů [m^3],
 V_s – objem pevných částic [m^3].

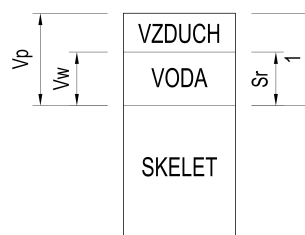


2.1.7 Stupeň nasycení (saturace zeminy)

Stupeň nasycení S_r [-] vyjadřuje množství vody obsažené v pórech zeminy a je definován jako poměr objemu vody v pórech k celkovému objemu pórů.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} [-]$$

Kde: V_w – objem vody ve vzorku [m^3],
 V_p – objem pórů [m^3].



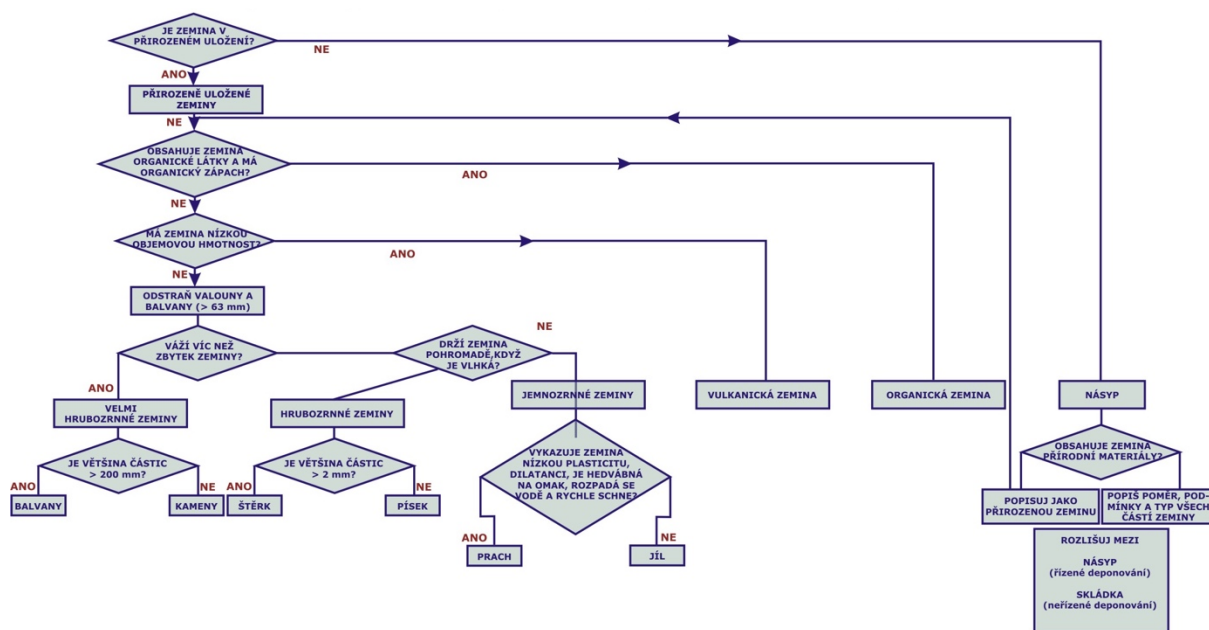
2.2 Klasifikace zemin

Při klasifikaci a popisu zeminy se postupuje dle následujících technických norem:

- ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 1: Pojmenování a popis,
- ČSN EN ISO 14688-2 Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařídování zemin – Část 2: Zásady pro zařídování,
- ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací; tato norma klasifikuje zeminy pro silniční účely a vychází ze starého klasifikačního systému zrušené normy ČSN 72 1002 Klasifikace zemin pro dopravní stavby.

Výše zmíněné normy zařídují zeminy do určitých skupin, v nichž mají podobné složení a geotechnické vlastnosti a lze tak předběžně určit chování a vhodnost dané zeminy při zakládání a výstavbě nejen dopravních staveb. Předběžné zařídění zeminy je stanoveno pomocí blokového rozhodovacího diagramu znázorněného na Obr. 9.

Klasifikace zemin podle ČSN 73 6133 - Příloha A je nezbytná k posuzování vhodnosti zemin pro pozemní komunikace – posuzuje vhodnost zeminy do násypu a vhodnost zeminy pro podloží vozovky (pro aktivní zónu). Dle této normy se navrhuje a provádějí úpravy nevhodných zemin a také se dle ní provádí a kontrolují zemní práce.



Obr. 9: Blokový diagram dle ČSN EN ISO 14688-1. [17]

Pro přesnější zařazení a pojmenování zeminy je nutno provést laboratorní zkoušky. Mezi základní fyzikální vlastnosti, dle kterých se zemina klasifikuje, patří:

- zrnitost zeminy,
- plasticita jemných částic.

Postup při zařizování zemin:

- sestavení zrnitostní křivky a určení procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí (obsah štěrku Gr, obsah písku Sa, obsah jemnější frakce Si + Cl),
- zařazení a pojmenování zeminy dle diagramu,
- doplňující popis zeminy dle charakteru zrnitostní křivky a plasticity.

2.2.1 Zrnitostní složení zeminy

Laboratorní zkouška pro stanovení zrnitosti se řídí normou ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti. Zrnitost popisuje zeminy na základě hmotnostního podílu jednotlivých zrnitostních frakcí obsažených v dané zemině. Rozdělení zemin do skupin dle velikosti zrn znázorňuje ČSN EN ISO 14688-1, viz Tab. 4.

Tab. 4: Velikost zrn frakcí. [18]

Skupiny zemin	Frakce	Značka	Velikost zrn mm
velmi hrubozrná zemina	velký balvan	LBo	od 630
	balvan	Bo	od 200 do 630 včetně
	valoun	Co	od 63 do 200 včetně
hrubozrná zemina	štěrk	Gr	od 2,0 do 63 včetně
	hrubozrný štěrka	CGr	od 20 do 63 včetně
	střednězrný štěrka	MGr	od 6,3 do 20 včetně
	jemnozrný štěrka	FGr	od 2,0 do 6,3 včetně
	písek	Sa	od 0,063 do 2,0 včetně
	hrubozrný písek	CSa	od 0,63 do 2,0 včetně
	střednězrný písek	MSa	od 0,2 do 0,63 včetně
	jemnozrný písek	FSa	od 0,063 do 0,2 včetně
jemnozrná zemina	prach	Si	od 0,002 do 0,063 včetně
	hrubozrný prach	CSi	od 0,02 do 0,063 včetně
	střednězrný prach	MSi	od 0,0063 do 0,02 včetně
	jemnozrný prach	FSi	od 0,002 do 0,0063 včetně
	jíl	Cl	do 0,002 včetně

Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí se znázorňuje graficky jako zrnitostní křivka. Je to součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna.

Základní vlastnosti zemin ovlivňují zejména hrubozrné a jemnozrné frakce, proto se při zařďování zeminy vyloučí velmi hrubozrné frakce a zaznamená se jejich hmotnostní podíl. Hrubozrné zeminy, tj. štěrkovité a písčité částice s podílem jemnozrných částic pod 10 % se podrobují síťovému rozboru. U jemnozrných zemin (podíl jemné frakce nad 10 %), zahrnující prachovitou a jílovitou složku, se zrnitost zjišťuje kombinací síťového rozboru a hustoměrné zkoušky.

Síťový rozbor je založen na prosévání skrze standardizovanou sadu sít za sucha či za mokra. Hmotnostní podíly na jednotlivých sítích jsou vyjádřeny v procentech původní navážky. Hustoměrná metoda vychází ze Stokesova usazovacího zákona. Metoda je založena na sedimentaci zeminy v kapalině. S časem větší částice rychleji klesají a hustota suspenze, měřená hustoměrem v odměrném válci, v horní části klesá.

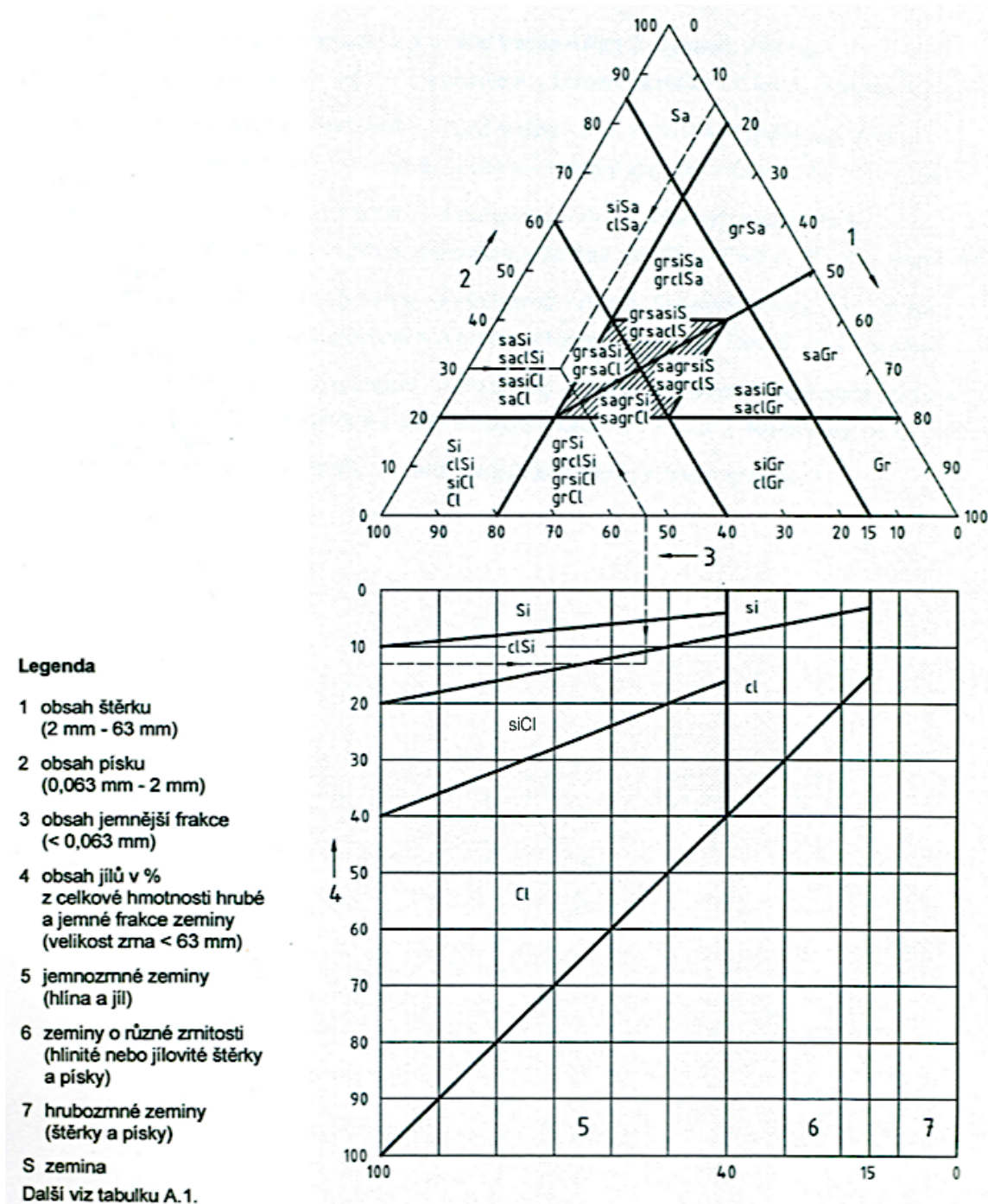
Stručný popis zrnitostní křivky určuje tzv. číslo nestejnozrnitosti C_u a číslo křivosti C_c . Sklon střední části křivky je charakterizován číslem nestejnozrnitosti a tvar je přibližně charakterizován číslem křivosti. Jsou definovány jako poměry průměrů zrn:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

kde d_{10} , d_{30} , d_{60} jsou průměry zrn příslušející 10 %, 30 % a 60 % propadu. Číslo křivosti a číslo nestejnozrnitosti se určuje především u písčitých a šterkovitých zemín.

Na základě podílu jednotlivých frakcí se zemina zatřídí dle diagramu ČSN EN ISO 14688-2 zobrazeného na Obr. 10.

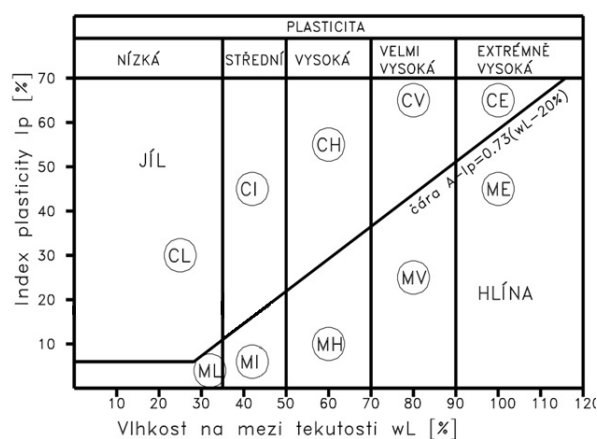


Obr. 10: Diagram pro zařídění zemin na základě zrnitosti. [19]

2.2.2 Plasticita jemných částic

Dalším důležitým znakem při klasifikaci jemnozrných zemin je plasticita. Je to vlastnost soudržné zeminy měnit své mechanické chování v závislosti na množství a druhu jílových minerálů a jejich rozdílné schopnosti vázat vodu. Plasticita materiálu je určena pomocí konzistenčních mezí, indexu plasticity a podle polohy v plasticitním diagramu (Obr. 11).

DIAGRAM PLASTICITY



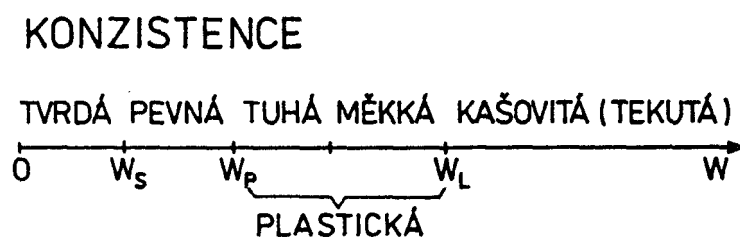
Obr. 11: Plasticitní diagram. (Zdroj: interní materiály VVCD)

Do konzistenčních (Atterbergových) mezí řadíme mez tekutosti, mez plasticity a mez smrštění. Mez tekutosti a plasticity se stanovuje podle technické normy ČSN EN ISO 17892-12 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí. Při určení meze smrštění se postupuje dle ČSN 72 1019 Laboratorní stanovení smršťování zemin.

Mez tekutosti w_L je empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického. Mez plasticity w_P je empiricky stanovená vlhkost, při které je zemina vysušená natolik, že ztrácí svoji plasticitu. Mez smrštění w_S je přechodná vlhkost mezi pevným a tvrdým stavem, kdy zemina při dalším vysoušení prakticky nemění svůj objem. Index plasticity I_P je definován jako početní rozdíl mezi mezí tekutosti a mezí plasticity.

$$I_P = w_L - w_P$$

Jednotlivé stavy se označují jako konzistence a graficky jsou znázorněny společně s konzistenčními mezemi na Obr. 12.



Obr. 12: Konzistence a konzistenční meze. [3]

Konzistence soudržných zemin se vyjadřuje pomocí stupně konzistence I_C . Je definován jako rozdíl meze tekutosti a přirozené vlhkosti zeminy v poměru k jejímu indexu plasticity.

$$I_C = \frac{w_L - w}{I_P}$$

Pojmenování jemnozrnných zemin na základě hodnoty indexu konzistence uvádí norma ČSN EN ISO 14688-2, viz Tab. 5.

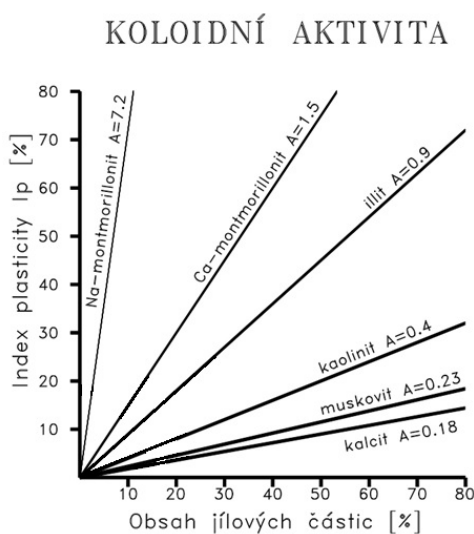
Tab. 5: Konzistence prachů a jílu. [19]

Konzistence hlín a jílu	Index konzistence
Velmi měkké	< 0,25
Měkké	0,25 - 0,50
Tuhé	0,50 - 0,75
Pevné	0,75 - 1,00
Velmi pevné	> 1,00

Další charakteristikou soudržných zemin je index koloidní aktivity I_A , který definoval Skempton (1953) jako poměr indexu plasticity k podílu jílové frakce zeminy.

$$I_A = \frac{I_P}{\text{podíl zrn} < 0,002\text{mm}}$$

Skempton zjistil, že index plasticity pro určitou zeminu roste s podílem jílové frakce. Index koloidní aktivity pomáhá určit mineralogické složení v jemnozrnných zeminách. Koloidní aktivitu jílu lze znázornit graficky dle Obr. 13.



Obr. 13: Grafické znázornění indexu koloidní aktivity minerálů. (Zdroj: interní materiály VVCD)

2.3 Zhutnitelnost zeminy

Zkouška zhutnitelnosti neboli Proctorova zkouška je založena na empirickém stanovení různých objemových hmotností v závislosti na vlhkosti za určitého zhutnění zeminy. S rostoucí vlhkostí roste i objemová hmotnost zhutňovaného materiálu až do dosažení maximální objemové hmotnosti vysušené zeminy $\rho_{d,max}$ za tzv. optimální vlhkosti w_{opt} . Při dalším zvyšování vlhkosti zeminy klesá objemová hmotnost vysušeného materiálu. Proctorova zkouška se řídí normou ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Tato norma umožňuje odhadnout objemovou hmotnost směsi, která může být dosažena na staveništích. V závislosti na maximální velikosti zrna zeminy se zvolí Proctorova zkouška standardní nebo modifikovaná.

Cílem zkoušky je určit maximální objemovou hmotnost vysušené zeminy $\rho_{d,max}$ při optimální vlhkosti w_{opt} a stanovit tak správný stupeň zhutnění porušené zeminy. Zhutnění zeminy příznivě ovlivňuje objemové změny, pevnost a únosnost zeminy a zároveň snižuje možnosti sedání zeminy.

Charakteristiky optimálního zhutnění byly využity při přípravě zkušebních vzorků pro experimentální vyhodnocení objemových změn testovaných materiálů, tj. k určení bobtnání a smršťování zemin.

3 Praktické měření a vyhodnocení laboratorních zkoušek

V této části se budu věnovat laboratornímu měření a vyhodnocení objemových změn na vybraných typech zemin v laboratoři VVCD. Na vzorcích byly postupně provedeny zkoušky pro zjištění základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností. Tyto vlastnosti jsou důležité pro klasifikaci a zařazení zeminy a další laboratorní zkoušky spojené s objemovými změnami zeminy (tj. bobtnání a smršťování).

3.1 Vybrané typy zemin

Zemina z lokality Nové Veselí

- sonda: J131
- hloubka odběru: 0,7 – 1,5m
- lokalita: okres Žďár nad Sázavou, Kraj Vysočina
- barva po nadrcení a prosetí: světle hnědá, béžová



Obr. 14: Zemina z lokality Nové Veselí.

Zemina z lokality Rokycansko

- sonda: J104
- hloubka odběru: 1,4 – 2,7m
- lokalita: okres Rokycany, Plzeňský kraj
- barva po nadrcení a prosetí: světle hnědá, mírně načervenalá



Obr. 15: Zemina z lokality Rokycansko.

Zemina z lokality Chvaletice

- sonda: V104
- hloubka odběru: 0,6 – 1,0m
- lokalita: okres Pardubice, Pardubický kraj
- barva po nadrcení a prosetí: světle šedá



Obr. 16: Zemina z lokality Chvaletice.

Zemina z lokality Jindice

- sonda: 597
- hloubka odběru: 0,5 – 1,0m
- lokalita: okres Kutná Hora, Středočeský kraj
- barva po nadrcení a prosetí: hnědá, načervenalá



Obr. 17: Zemina z lokality Jindice.

3.2 Stanovení základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností

3.2.1 Stanovení objemových hmotností a vlhkosti přirozeného vzorku

Základem pro tuto laboratorní zkoušku je mít neporušený vzorek z vrtného jádra většího průměru, než jsou zkušební vyřezávací válečky - Obr. 18. Nejdříve jsem provedla kalibraci čistých a suchých prstenců – zvažila jsem je s přesností na 0,01 g a změřila jejich vnitřní rozměry s přesností na 0,05 mm. Poté jsem vyřezávací prstence konstantní silou zatlačovala břitem do neporušeného vzorku, dokud nebyl vyplněn zeminou a neměl přebytky protlačené zeminy na vrchní straně. Následně jsem odřezala zbytky materiálu okolo prstence, seřízla přebytečnou zeminu na obou koncích a zarovнала ji s okraji prstence. Vzorek jsem zvažila s přesností na 0,01 g, nechala vysušit při 110 °C v sušárně a znovu zvažila. Ze zaznamenaných hmotností a objemu prstence jsem pomocí vztahů definovaných v podkapitole 2.1 postupně vypočítala objemovou hmotnost přirozeně vlhké zeminy ρ , přirozenou vlhkost zeminy w a objemovou hmotnost vysušené zeminy ρ_d .



Obr. 18: Část vrtného jádra (vlevo), zkušební vyřezávací prstence (vpravo).

3.2.2 Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic

Pro výpočet měrné hmotnosti pevných částic vzorku zeminy ρ_s [g/cm³] jsem použila zkušební metodu pomocí pyknometru. Pyknometrická metoda je založena na zjištění objemu zeminy o známé hmotnosti metodou stanovení objemu vytlačené kapaliny. Tato metoda je vhodná pro zeminy s velikostí částic pod 4 mm. Pro každou testovanou zeminu jsem připravila tři pyknometry a výsledné hodnoty měrné hmotnosti jsem zprůměrovala.

Nejprve jsem provedla kalibraci hmotnosti suchého pyknometru a hmotnosti pyknometru naplněného čistou vodou dané teploty. Vysušený a rozdrcený zkušební vzorek minimální hmotnosti 10 g jsem nasypala do suchého pyknometru a zvažila. Pyknometr se vzorkem jsem

doplnila čistou vodou přibližně 1 cm nad zeminu, mírně protřepala a nechala povařit v pískové lázni po dobu 10 minut. Důvodem bylo odstranění vzduchových pórů. Pyknometr se saturovaným vzorkem jsem po zchladnutí zcela zaplnila čistou vodou a zvažila. Veškeré dílčí hmotnosti pyknometru byly měřeny s přesností na 0,01 g.



Obr. 19: Pyknometry v pískové lázni (vlevo) a pyknometry se vzorkem a vodou (vpravo).

Na závěr jsem přešla k vyhodnocení pyknometrické zkoušky. Zdánlivou hustotu pevných částic ρ_s jsem stanovila dle následujícího vztahu:

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_w \quad [\text{g/cm}^3]$$

kde: m_0 – hmotnost suchého pyknometru [g],

m_1 – hmotnost pyknometru zcela naplněného vodou [g],

m_2 – hmotnost suchého pyknometru s vysušeným vzorkem [g],

m_3 – hmotnost pyknometru se vzorkem a vodou [g],

m_4 – hmotnost vysušeného vzorku [g],

ρ_w – hustota vody za dané teploty [g/cm³].

3.2.3 Stanovení pórovitosti, čísla pórovitosti a stupně nasycení

Pro výpočet pórovitosti n jsem použila již zjištěné fyzikální veličiny ρ_d a ρ_s . Z pórovitosti jsem vyjádřila číslo pórovitosti e . Saturaci zeminy S_r jsem vypočítala ze známých veličin ρ_d , ρ , ρ_w a pórovitosti.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \cdot 100 \quad [\%]$$

$$e = \frac{n}{100 - n} \quad [-]$$

$$S_r = \frac{\rho - \rho_d}{\rho_w n} \quad [-]$$

Kde: ρ_d – objemová hmotnost vysušené zeminy [kg/m^3],
 ρ – objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy [kg/m^3],
 ρ_s – zdánlivá hustota pevných částic [kg/m^3],
 ρ_w – objemová hmotnost vody [kg/m^3],
 n – pórovitost.

3.2.4 Souhrn výsledků

Výsledky laboratorních zkoušek pro stanovení základních fyzikálních a hydrofyzikálních vlastností všech testovaných materiálů jsem shrnula do následující Tab. 6.

Tab. 6: Základní charakteristiky testovaných materiálů.

Materiál	ρ [kg/m^3]	ρ_d [kg/m^3]	ρ_s [kg/m^3]	w [%]	n [%]	e [-]	S_r [-]
Nové Veselí	1985	1655	2674	19,9	38,1	0,62	0,87
Rokycansko	2122	1859	2700	14,2	31,2	0,45	0,85
Chvaletice	1946	1568	2701	24,1	41,9	0,72	0,90
Jindice	2061	1653	2697	24,7	38,7	0,63	1,05

3.3 Stanovení zrnitosti zemín

Pro provedení zkoušky zrnitosti jsem odebrala vzorek vysušené zeminy o hmotnosti cca 1,5kg. Následně jsem zkušební navážku promísila s vodou a promývala přes síto 0,063mm. Promýváním zeminy jsem docílila oddělení zrn jemné frakce, která ulpěla na písčité a štěrkovité frakci. Hrubozrné částice zachycené na síti jsem vysušila v sušárně při 110 °C a provedla na nich síťový rozbor. Odplavené jemné částice jsem také vysušila a podrobila je hustoměrné zkoušce.

3.3.1 Síťový rozbor

Zvážený a vysušený vzorek zeminy, který při promývání nepropadl sítem 0,063 mm, jsem po dobu 15 minut prosévala skrze sadu sít na vibračním stole (Obr. 20). Zachycené zbytky zeminy na jednotlivých sítích jsem zvažila s přesností na 0,01 g a vyjádřila procentuální podíly propadu k celkové hmotnosti navážky. Frakce zeminy f_n propadlé jakýmkoli sítem jsem vypočítala z rovnice:

$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} \cdot 100$$

kde: f_n – frakce zeminy propadlé sítem [%],

m_1 – hmotnost zeminy propadlé sítím s nejmenším otvorem [g],

m_2, m_n – hmotnost zeminy propadlé sítí po sobě jdoucimi až do zvolené velikosti oka [g]

m – celková hmotnost vysušeného vzorku zeminy [g].



Obr. 20: Sada sít na vibračním stole.

Výsledky síťového rozboru

Sítovému rozboru jsem postupně podrobila všechny hrubozrnné frakce testovaných materiálů. Pro názornou ukázkou uvádím podrobné výsledky jen pro materiál z Nového Veselí a z Rokycanska, hmotnostní podíly na jednotlivých sítích a celkové propady jsou uvedeny v Tab. 7. Pro ostatní materiály uvedu jen souhrnné výsledky v podobě zrnitostních křivek a podílu jednotlivých frakcí, viz podkapitola 3.3.3.

Tab. 7: Síťový rozbor – Nové Veselí a Rokycansko.

NOVÉ VESELÍ				ROKYCANSKO			
m sušina		1548,03 [g]		m sušina		1608,87 [g]	
m písč. fr.		544,03 [g]		m písč. fr.		373,06 [g]	
velikost síta [mm]	Zůstatek na sítu		Propad	velikost síta [mm]	Zůstatek na sítu		Propad
	[g]	[%]	[%]		[g]	[%]	[%]
5,6	7,05	0,46	99,5	5,6	2,45	0,15	99,8
4,5	4,83	0,31	99,2	4,5	2,66	0,17	99,7
3,55	6,48	0,42	98,8	3,55	3,12	0,19	99,5
2,5	11,96	0,77	98,0	2,5	5,49	0,34	99,1
2	11,95	0,77	97,3	2	4,57	0,28	98,9
1,6	17,95	1,16	96,1	1,6	5,80	0,36	98,5
0,5	161,75	10,45	85,7	0,5	64,97	4,04	94,5
0,25	119,16	7,70	78,0	0,25	74,74	4,65	89,8
0,063	202,90	13,11	64,9	0,063	209,26	13,01	76,8

3.3.2 Hustoměrná zkouška

Z vysušené jemné frakce, která při promývání propadla sítím 0,063 mm, jsem odebrala vzorek o hmotnosti cca 60 g a rozptýlila ho ve vodě v odměrném válci. Po řádném promíchání směsi zeminy s vodou jsem do vzniklé suspenze ponořila hustoměr, změřila teplotu suspenze a zaznamenala první čtení na hustoměru. Následně jsem zaznamenávala čtení na hustoměru s přesností na 0,001g/ml ve zvolených časových intervalech od počátečního čtení až do ustálení hustoty suspenze. Po ustálení jsem přešla k vyhodnocení hustoměrné zkoušky.

Prvním krokem při vyhodnocení bylo opravit reálné čtení na hustoměru o teplotu suspenze. Následující vztah vyjadřuje pravé čtení hustoměru H_{op} :

$$H_{op} = R'_h + t_m$$

kde: H_{op} – pravé čtení hustoměru,

R'_h – odečtená hodnota na hustoměru,

t_m – oprava o teplotu.

V dalším kroku jsem určila efektivní hloubku hustoměru H_r . Ta je závislá na druhu použitého hustoměru a pravém čtení hustoměru H_{op} . Následovala kalibrace hustoměru, na základě které byla sestavena následující rovnice:

$$H_r = 225,4 - 4,7 \cdot H_{op}$$

kde: H_r – efektivní hloubka hustoměru [mm],

H_{op} – pravé čtení hustoměru [mm].

Poté jsem přešla k výpočtu náhradního průměru zrna d_i pomocí Stokesova usazovacího zákona:

$$d_i = 0,005531 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_r}{(\rho_s - 1) \cdot t}}$$

kde: d_i – náhradní průměr zrna [mm],

η – dynamická viskozita vody [mPas],

H_r – efektivní hloubka hustoměru [mm],

ρ_s – zdánlivá hustota pevných částic [g/cm³],

t – čas [min].

Na závěr jsem z níže uvedené rovnice stanovila hmotnostní podíl frakce menší než náhradní průměr zrna K :

$$K = \frac{100 \cdot \rho_s \cdot H_{op}}{m \cdot (\rho_s - 1)}$$

kde: K – hmotnostní podíl frakce menší než náhradní průměr zrna [%],

ρ_s – zdánlivá hustota pevných částic [g/cm^3],

H_{op} – pravé čtení hustoměru [mm].

m – hmotnost sušiny zkušební vzorku [g].

Výsledky hustoměrné zkoušky

Hustoměrné zkoušce jsem postupně podrobila všechny jemnozrné frakce testovaných materiálů. Pro názornou ukázkou uvádím průběžné výsledky jen pro materiál z Nového Veselí a z Rokycanska, viz Tab. 8 a Tab. 9. Pro ostatní materiály uvedu jen souhrnné výsledky v podobě zrnitostních křivek a podílu jednotlivých frakcí, viz podkapitola 3.3.3.

Tab. 8: Hustoměrná zkouška – Nové Veselí.

Čas [min]	Teplota [°C]	Čtení [g/ml]	R'h [mm]	Hop [mm]	Hr [mm]	d _i [mm]	K [%]	K [%] k celku
0,25	21°C	1,0284	28,40	28,60	90,98	0,0020	48,6	31,5
0,5	21°C	1,0278	27,80	28,00	93,80	0,0015	47,5	30,8
1	21°C	1,0262	26,20	26,40	101,32	0,0011	44,8	29,1
2	21°C	1,0236	23,60	23,80	113,54	0,0008	40,4	26,2
3	21°C	1,0202	20,20	20,40	129,52	0,0007	34,6	22,5
4	21°C	1,0188	18,80	19,00	136,10	0,0006	32,3	20,9
5	21°C	1,0166	16,60	16,80	146,44	0,0006	28,5	18,5
6	21°C	1,0142	14,20	14,40	157,72	0,0005	24,4	15,9
7	21°C	1,0116	11,60	11,80	169,94	0,0005	20,0	13,0
8	21°C	1,0090	9,00	9,20	182,16	0,0005	15,6	10,1
9	21°C	1,0068	6,80	7,00	192,50	0,0005	11,9	7,7
10	21°C	1,0048	4,80	5,00	201,90	0,0005	8,5	5,5
11	21°C	1,0028	2,80	3,00	211,30	0,0005	5,1	3,3
12	21°C	1,0012	1,20	1,40	218,82	0,0005	2,4	1,5
13	21°C	1,0002	0,20	0,40	223,52	0,0004	0,7	0,4
14	21°C	1,0000	0,00	0,20	224,46	0,0004	0,3	0,2
15	21°C	0,9998	-0,20	0,00	225,40	0,0004	0,0	0,0

zdánlivá hustota [kg/m^3]	2674
hmotnost vzorku ve válci [g]	58,92
viskozita vody 21°C	0,9798

Tab. 9: Hustoměrná zkouška – Rokycansko.

Čas [min]	Teplota [°C]	Čtení [g/ml]	R'h	Hop [mm]	Hr [mm]	di[mm]	K [%]	K [%] k celku
0,3	23°C	1,0262	26,20	26,80	99,44	0,0018	44,0	33,8
0,5	23°C	1,0250	25,00	25,60	105,08	0,0015	42,0	32,3
0,7	23°C	1,0242	24,20	24,80	108,84	0,0013	40,7	31,3
0,8	23°C	1,0238	23,80	24,40	110,72	0,0012	40,1	30,8
1,0	23°C	1,0226	22,60	23,20	116,36	0,0011	38,1	29,3
1,3	23°C	1,0220	22,00	22,60	119,18	0,0010	37,1	28,5
1,8	23°C	1,0208	20,80	21,40	124,82	0,0009	35,1	27,0
2,3	23°C	1,0192	19,20	19,80	132,34	0,0008	32,5	25,0
3	23°C	1,0180	18,00	18,60	137,98	0,0007	30,5	23,5
4	23°C	1,0168	16,80	17,40	143,62	0,0006	28,6	21,9
5	23°C	1,0158	15,80	16,40	148,32	0,0006	26,9	20,7
6	23°C	1,0148	14,80	15,40	153,02	0,0005	25,3	19,4
7,5	23°C	1,0140	14,00	14,60	156,78	0,0005	24,0	18,4
9	23°C	1,0130	13,00	13,60	161,48	0,0004	22,3	17,2
10,5	23°C	1,0122	12,20	12,80	165,24	0,0004	21,0	16,1
12	23°C	1,0112	11,20	11,80	169,94	0,0004	19,4	14,9
13,5	23°C	1,0100	10,00	10,60	175,58	0,0004	17,4	13,4

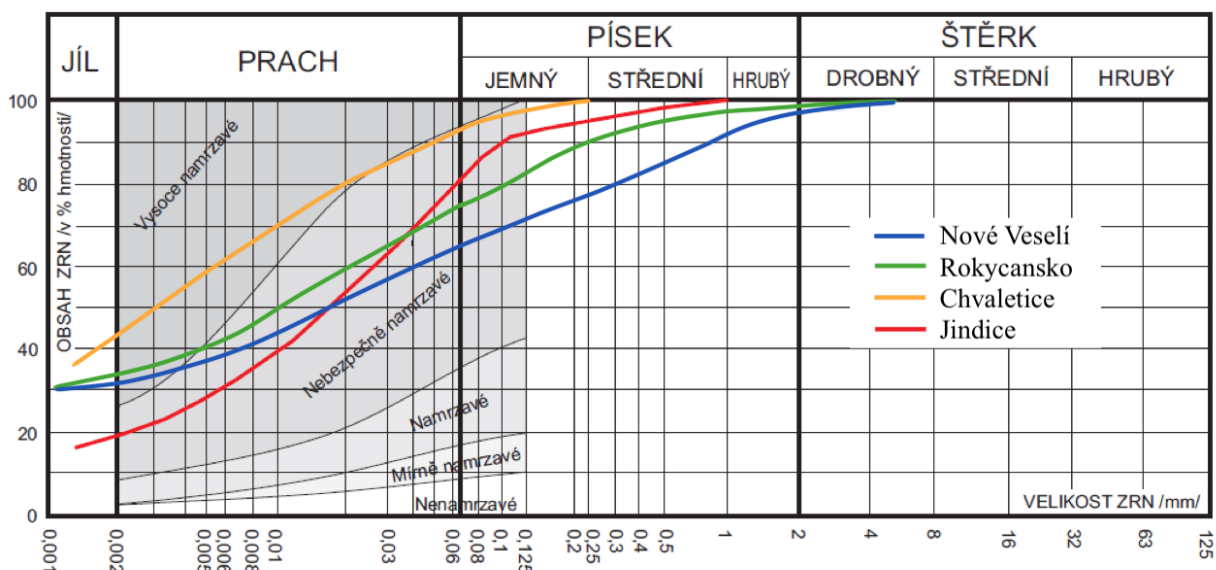
zdánlivá hustota [kg/m ³]	2700
hmotnost vzorku ve válci [g]	60,93
viskozita vody 23°C	0,9354



Obr. 21: Vysušená jemnozrná frakce z Nového Veselí.

3.3.3 Souhrn výsledků

Výsledky síťového rozboru a hustoměrné zkoušky všech materiálů jsem graficky vynesla jako křivky zrnitosti do jednoho společného grafu, viz Obr. 22. Na základě zrnitostního složení, tj. podílu jednotlivých frakcí, jsem zeminy zařídila podle klasifikačního trojúhelníku a pomocného čtvercového diagramu dle ČSN EN ISO 14688-2. Zeminy jsem také zařídila dle normy ČSN 73 6133, která vychází ze starého klasifikačního systému pro dopravní stavby. Podíly jednotlivých frakcí a klasifikace vybraných zemin jsou uvedeny v Tab. 10.



Obr. 22: Křivky zrnitosti zkoušených materiálů.

Tab. 10: Klasifikace zkoušených materiálů dle ČSN EN ISO 14688-2.

Materiál	Štěrkovitá frakce [%]	Písčítá frakce [%]	Jemnozrná frakce [%]	Podíl zrn <0,002mm [%]	Klasifikace dle ČSN EN ISO 14688-2	Klasifikace dle ČSN 73 6133
Nové Veselí	2,7	32,4	64,9	31,5	sasiCl	F4 - CS
Rokycansko	1,1	22,1	76,8	34,0	sasiCl	F6 - CI
Chvaletice	0,0	6,5	93,5	43,5	Cl	F8 - CH
Jindice	0,0	18,5	81,5	19,0	siCl	F6 - CI

3.4 Stanovení konzistenčních mezí

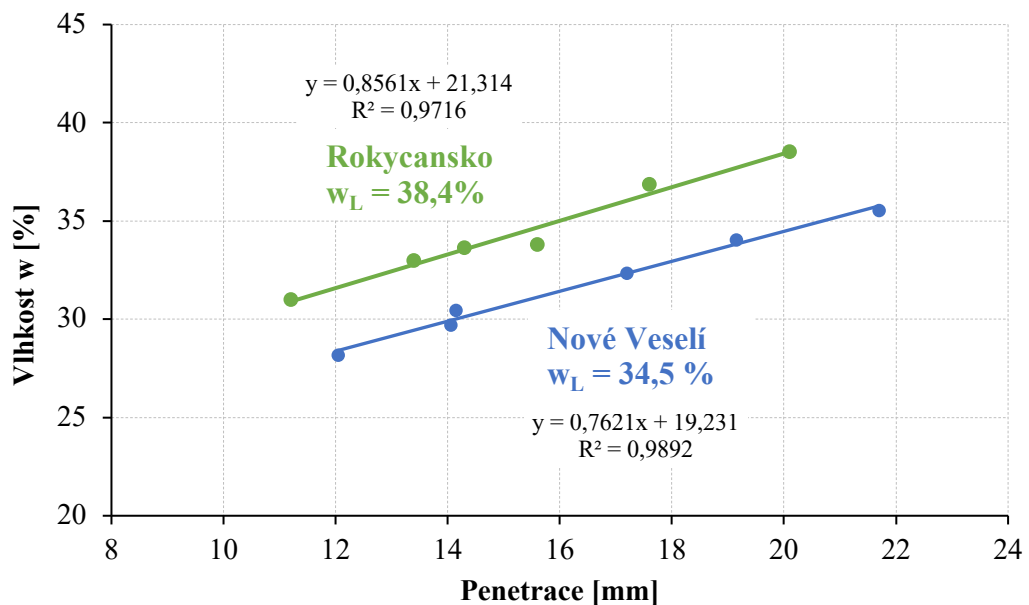
Konzistenční meze patří mezi klíčové vlastnosti, podle kterých se určuje plasticita jemnozrných soudržných zemin. Hodnoty mezí závisí především na zrnitosti a mineralogickém složení materiálu. V této podkapitole je uvedena zkouška pro stanovení meze tekutosti a meze plasticity. Mez smrštění jakožto vlastnost, která souvisí s objemovými změnami, je řešena v podkapitole 3.7 Smršťování.

3.4.1 Mez tekutosti

Mez tekutosti w_L zkoumaného materiálu jsem stanovila pomocí kuželové penetrační zkoušky (penetrace 20 mm při použití kužele 80 g / 30°). Nejprve jsem připravila pastu z přirozené zeminy s maximální velikostí částic do 0,4 mm a z destilované vody tak, aby první kuželová penetrace byla okolo 15 mm. Poté jsem část zkušební vzorku přemístila do míchací nádoby

a umístila pod penetrační kužel tak, aby se jeho hrot dotýkal uhlazeného povrchu zeminy. Po vniknutí kužele do vzorku jsem zaznamenala jeho pozici s přesností na 0,1 mm a odebrala vzorek z penetrační zóny kužele o hmotnosti ± 10 g. Následovala řada měření za použití stejného zkušební vzorku, avšak s jinými vlhkostmi. Na jednotlivých odebraných vzorcích jsem stanovila vlhkost zeminy dle 2.1.4. Vztahy mezi vlhkostí a penetrací kužele jsem v lineárním měřítku vynesla do grafu, proložila je přímkou a odečetla vlhkost, která odpovídá 20 mm penetraci kužele.

Pro názornou ukázkou grafického znázornění průběhu penetrační zkoušky uvádím výsledky pro zeminu z Nového Veselí a z Rokycanska, viz Obr. 23. Pro ostatní materiály jsou uvedeny pouze výsledné hodnoty meze tekutosti, viz podkapitola 3.4.3.



Obr. 23: Grafické vyjádření meze tekutosti – Nové Veselí a Rokycansko.



Obr. 24: Penetrometr.

3.4.2 Mez plasticity

Zkoušku pro stanovení meze plasticity w_p jsem provedla současně s penetrační kuželovou zkouškou. Z připravené pasty jsem odebrala zkušební vzorek o hmotnosti cca 20 g a válela ho mezi dlaněmi do tvaru koule, dokud se na jejím povrchu neobjevily jemné prasklinky. Následně jsem vzorek rozdělila na dva dílčí vzorky, na kterých byla stanovena mez plasticity. Každý ze dvou dílčích vzorků jsem rozdělila na čtyři rovnoměrné části a vytvarovala je do válečků o průměru zhruba 6 mm. V dalším kroku jsem za stejného rolovacího tlaku válela válečky mezi prsty a povrchem skleněné desky až do zmenšení průměru válečku na 3 mm. Postup hnětení a válení válečků se opakoval až do okamžiku, kdy se válečky začaly drobit. Právě tehdy měla zemina takovou vlhkost odpovídající vlhkosti na mezi plasticity w_p . Na obou dílčích vzorcích jsem stanovila vlhkost zeminy dle 2.1.4 a zprůměrovala. Výsledné hodnoty mezí plasticity všech vybraných materiálů jsou souhrnně uvedeny v následující podkapitole 3.4.3.



Obr. 25: Zkušební dílčí vzorky s vlhkostí na mezi plasticity.

3.4.3 Souhrn výsledků

Podle naměřených hodnot konzistenčních mezí w_L a w_P jsem dopočetla index plasticity I_P a index konzistence I_C . Z obsahu jílové frakce jsem stanovila index koloidní aktivity I_A . Do následující Tab. 11 jsem shrnula výsledné hodnoty konzistenčních mezí a indexových vlastností všech testovaných zemín.

Tab. 11: Konzistenční meze a indexové vlastnosti testovaných materiálů.

Materiál	w [%]	w_L [%]	w_P [%]	I_P [%]	I_C [-]	I_A [-]
Nové Veselí	19,9	34,5	19,2	15,2	0,95	0,48
Rokycansko	14,2	38,4	20,8	17,7	1,37	0,52
Chvaletice	24,1	62,0	28,3	33,7	1,12	0,77
Jindice	24,7	44,0	21,5	22,5	0,86	1,18

Na závěr jsem dle norem ČSN EN ISO 14688-2 a ČSN 73 6133 všechny vybrané zeminy pojmenovala dle zrnitosti, plasticity a konzistence následovně:

- **Nové Veselí** – písčítoprachovitý jíl / jíl písčítý, nízká plasticita a pevná konzistence,
- **Rokycansko** – písčítoprachovitý jíl / jíl se střední plasticitou, velmi pevná konzistence,
- **Chvaletice** – jíl / jíl s vysokou plasticitou, velmi pevná konzistence,
- **Jindice** – prachovitý jíl / jíl se střední plasticitou, pevná konzistence.

3.5 Proctorova zkouška

Princip zkoušky spočívá v tom, že na volně nasypanou vrstvu zeminy ve válci dopadá pěch předepsané hmotnosti z předepsané výšky. Výstupem zkoušky je závislost mezi objemovou hmotností vysušené zeminy a vlhkostí, kterou znázorňujeme graficky tzv. hutnicí křivkou. V závislosti na maximální velikosti zrna zeminy jsem zvolila standardní Proctorovu zkoušku.

Proctor Standard

Pro standardní Proctorovu zkoušku jsem připravila a zvažila čistý zkušební moždír průměru 100 mm a výšky 120 mm. Vysušený a rozdrcený vzorek o hmotnosti cca 15 kg jsem rozdělila do pěti rovnoměrných částí, které jsem důkladně saturovala odlišným množstvím vody tak, aby vlhkost vzorku byla vždy vyšší než u předešlého. Dílčí vzorky jsem poté hutnila ve třech vrstvách v předepsaném moždíři. Každá vrstva byla zhutněna 25 údery předepsaného pěchu. Pro hutnění zeminy byl použit automatický hutnicí přístroj Proctor s pěchem hmotnosti 2,5 kg

a výškou dopadu 305 mm. Po zhutnění jsem odejmula nástavec, seřízla přebytečnou zeminu a zarovнала ji s okrajem moždíře. Vzorek zeminy jsem i s moždířem zvážíla s přesností na 1 g a odebrala dva reprezentativní vzorky k určení vlhkosti (jeden vzorek z vrchní části moždíře a jeden ze spodní). Tento postup jsem aplikovala na další čtyři dílčí vzorky. Po vysušení všech reprezentativních vzorků jsem stanovila jednotlivé vlhkosti dle podkapitoly 2.1.4. Poté jsem vypočítala objemovou hmotnost zhutněné vlhké a suché směsi každého zkušebního tělesa podle rovnic:

$$\rho = (m_2 - m_1) \times 1000 / V$$

$$\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + w)$$

kde: ρ – objemová hmotnost vlhké zhutněné směsi [kg/m^3],
 ρ_d – objemová hmotnost suché zhutněné směsi [kg/m^3],
 m_1 – hmotnost moždíře [g],
 m_2 – hmotnost moždíře a zhutněné vlhké směsi [g],
 V – objem moždíře [cm^3],
 w – vlhkost směsi [%].

Výsledné hodnoty vlhkosti a jim odpovídající objemové hmotnosti suché směsi jsem vynesla v lineárním měřítku do grafu a proložila je spojitou křivkou. Maximum na této křivce odpovídá optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti vysušené zeminy.



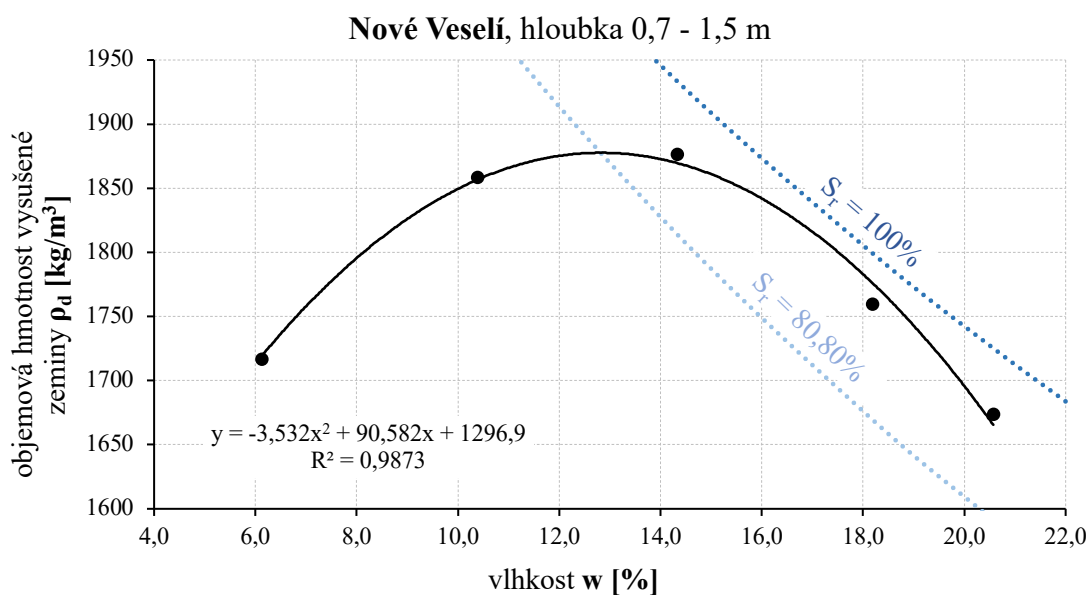
Obr. 26: Proctorova zkouška – hutnicí přístroj, dílčí vzorek v moždíři před a po zhutnění (zleva).



Obr. 27: Proctorova zkouška – seříznutý dílčí vzorek v moždíři, reprezentativní vzorky před vysušením (zleva).

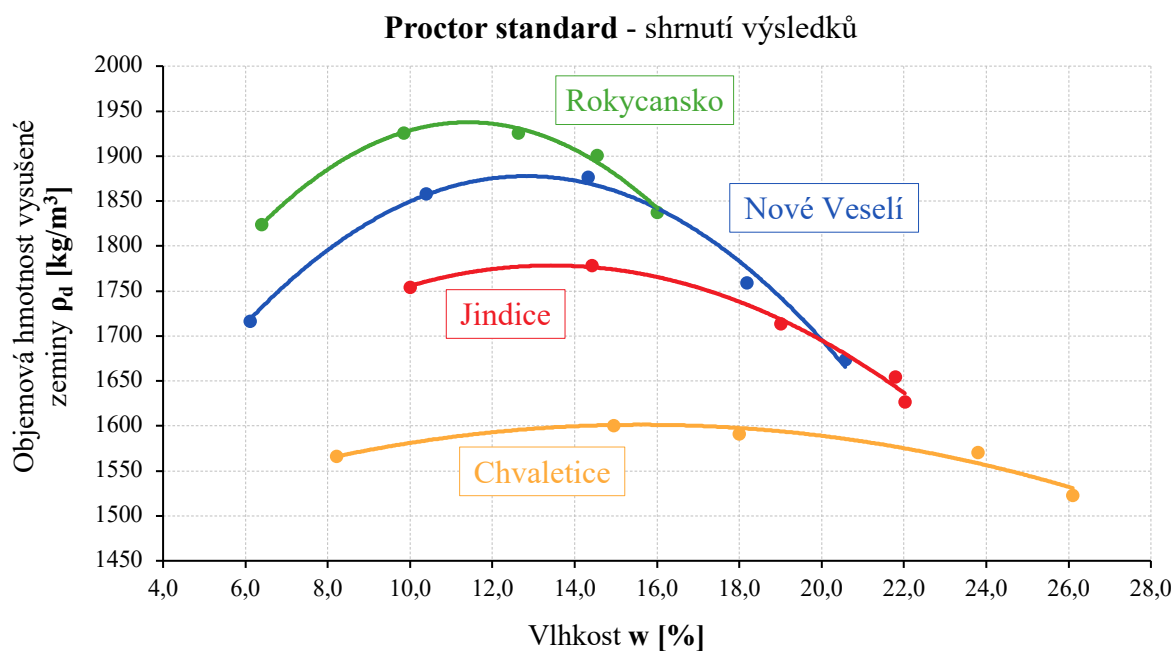
3.5.1 Souhrn výsledků

Výsledkem zkoušky je grafické znázornění závislosti vlhkosti na objemové vysušené hmotnosti zeminy. Pro zhotovitele zemního tělesa je důležité do grafu znázornit i saturační křivky, a to křivku pro 100 % saturaci (popř. 95 %) a křivku při optimální vlhkosti. Tyto křivky vymezují prostor optimálního zhutnění při různých vlhkostech a objemových hmotnostech. Pro názornou ukázkou uvádím průběh Proctorovy zkoušky a saturační křivky jednoho vybraného materiálu – Nové Veselí, viz Obr. 28.



Obr. 28: Proctor Standard se saturačními křivkami – Nové Veselí.

Pro účely této diplomové práce nejsou průběhy saturačních křivek podstatné, a proto zde shrnu pouze průběhy Proctorovy zkoušky a stanovím dvě charakteristiky – optimální vlhkost w_{opt} a maximální objemovou hmotnost suché zeminy $\rho_{d,max}$. Hutnicí křivky všech materiálů jsem graficky znázornila do jednoho společného grafu na Obr. 29.



Obr. 29: Proctor standard pro všechny vybrané materiály.

Z jednotlivých spojitých křivek jsem odečetla maximum, které odpovídá optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti vysušené zeminy. Výsledky Proctor standard všech vybraných zemin jsem shrnula do následující Tab. 12.

Tab. 12: Výsledky Proctor Standard testovaných materiálů.

Materiál	$\rho_{d,max}$ [kg/m ³]	w_{opt} [%]
Nové Veselí	1878	12,82
Rokycansko	1937	11,41
Chvaletice	1603	15,60
Jindice	1786	13,59

3.6 Bobtnání

Míru bobtnání testovaných jílovitých zemin jsem vyjádřila prostřednictvím bobtnacího potenciálu a bobtnacího tlaku. Pro stanovení obou charakteristik jsem použila laboratorní metodu měření v edometru. Předpokladem pro edometrickou zkoušku je neporušený nasycený zkušební vzorek. Popis edometru a zkušební postupy včetně přípravy zkušebních vzorků uvádí norma ČSN EN ISO 17892-5 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním.

Bobtnající potenciál a bobtnací tlak jsem v první řadě stanovila na všech vybraných zeminách bez příměsi. Poté jsem tyto charakteristiky stanovila i na zeminách upravených vápnem. Pro závěrečné porovnání všech testovaných zemin jsem zvolila stejné procentuální zastoupení vápna ve vzorku, a to 2 % a 4 % vápna.

3.6.1 Příprava zkušebních těles

Příprava zkušebních vzorků pro stanovení charakteristik bobtnání byla složena ze čtyř kroků. V prvním kroku proběhla kalibrace edometrických prstenců. Ve druhém byla směs zeminy smíchána s požadovaným množstvím vody. Ve třetím kroku byla připravená vlhká zemina zhutněna v moždíři dle Proctora. V posledním, čtvrtém kroku byly ze zhutněné směsi vyřezány zkušební tělesa.

Kalibrace edometrických prstenců

Nejdříve jsem provedla kalibraci edometrických vyřezávacích prstenců průměru cca 113 mm a výšky cca 20 mm. Vnitřní průměr jsem změřila ve dvou na sobě kolmých směrech a výšku prstenců jsem přeměřila na čtyřech různých místech. Všechny rozměry byly měřeny pomocí posuvného měřítka s přesností na 0,05 mm. Následně jsem stanovila střední hodnoty a vypočítala kruhovou plochu A a objem prstence V . Prstence jsem zvážila s přesností na 0,01 g.

Příprava směsi zeminy

Nejprve jsem si připravila rozdrcenou a vysušenou zeminu dané hmotnosti m_d . Posléze, k dosažení požadované výsledné optimální vlhkosti směsi w_{opt} jsem vypočítala potřebné množství vody m_w dle následujícího vztahu.

$$m_w = 0,01w_{opt} \cdot m_d$$

Pro přípravu směsi zeminy upravované vápnem jsem musela navíc určit i hmotnost potřebného vápna. Hmotnost vápna m_{CaO} jsem v závislosti na jeho procentuálním zastoupení v zemině vypočítala podle následujících rovnic:

$$m_{CaO} = 0,02 \cdot (m_d + m_w) \quad \text{pro zeminu se 2 \% vápna,}$$

$$m_{CaO} = 0,04 \cdot (m_d + m_w) \quad \text{pro zeminu se 4 \% vápna.}$$

Následně jsem vysušenou zeminu důkladně promíchala s vypočteným množstvím vody, v případě upravených zemin byla suchá směs nejdřív promíchána s vápnem a až poté s vodou.

Hutnění vlhké směsi

Neporušený a kompaktní vzorek je hlavním předpokladem pro edometrickou zkoušku, proto jsem v tomto kroku zeminu zhutnila. Zkušební zemina byla připravena umělým zhutněním vlhké směsi požadované optimální vlhkosti w_{opt} . Hutnění probíhalo v hutnícím moždíři k dosažení požadované objemové hmotnosti směsi dle Proctorovy zkoušky (viz podkapitola 3.5).

Vyřezávání zkušebních vzorků

Edometrické vyřezávací prstence jsem umístila břitem na zhutněnou zeminu. Pomocí hydraulického lisu byly prstence zatlačovány konstantní silou do vzorku, dokud nebyly vyplněny zeminou s přebytkem protlačené zeminy na vrchní straně. Přebytky zeminy okolo prstence jsem odřezala nožem a zeminu zarovнала s okraji prstence, Obr. 30. Vzorek zeminy i s prstencem jsem zvažila s přesností na 0,01 g. Z odřezků jsem odebrala část zeminy a z hmotnosti před a po vysušení jsem stanovila počáteční kontrolní vlhkost w_0 (viz podkapitola 2.1.4), která by se měla blížit optimální vlhkosti w_{opt} . Ze známého objemu prstence V a hmotnosti zkušebního tělesa m jsem dopočítala objemovou hmotnost zeminy ρ a následně i objemovou hmotnost vysušené zeminy ρ_d .



Obr. 30: Edometrické prstence se zhutněnou testovanou zeminou.

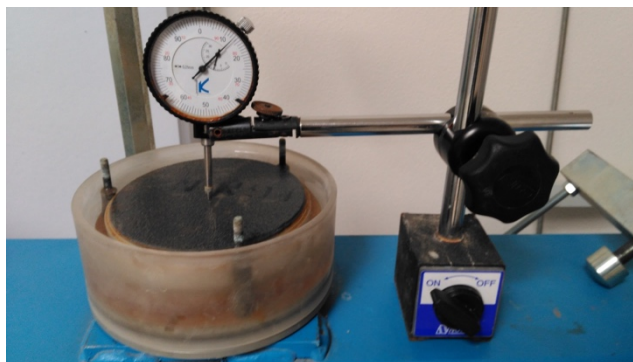
3.6.2 Volné bobtnání

Níže popsaná laboratorní zkouška slouží k určení bobtnajícího potenciálu vzorku zeminy při jeho sycení vodou. Postupně jsem v edometrech měřila deformace vzorků zemin, způsobené bobtnáním, na všech čtyřech vybraných zeminách bez příměsí. Poté jsem bobtnající potenciál

určila i na zeminách zlepšených vápnem – nejdříve s 2 % příměsí a poté i se 4 % příměsí vápna. Pro každou zeminu jsem tedy připravila 3 sady vzorků – bez vápna, s 2 % CaO a s 4 % CaO.

3.6.2.1 Postup zkoušky

Na dno edometrické krabice jsem v pořadí osadila spodní filtrační destičku, edometrický prstenec se vzorkem zeminy (připravený dle podkapitoly 3.6.1) a horní filtrační destičku. Filtrační destičky umožňují volnou drenáž vody a zároveň částečně zabraňují odnosu jemnozrnných částic zeminy. Poté jsem instalovala číselníkový úchylkoměr tak, aby se jeho hrot dotýkal horní filtrační destičky. Pomocí tohoto zařízení jsem měřila jednoosou deformaci vzorku. Následně jsem z měřidla odečetla počáteční čtení s přesností na 0,01 mm a vzorek v edometrické krabici jsem zalila vodou. Vzorku bylo umožněno volně bobtnat ve svislém směru bez jakéhokoli přitížení (hmotnost horní filtrační destičky je zanedbána). Edometrický prstenec znemožňoval deformaci vzorku zeminy do stran. Největší nárůst deformací (bobtnání) jsem zaznamenala během prvního dne měření. Po třech až čtyřech dnech od zalití vodou nevykazoval vzorek zeminy již další změny v objemu – deformace se ustálily. Z měřidla jsem odečetla koncové čtení. Poté jsem vypustila vodu z edometrické krabice a rozebrala ji. Ze zkušebního tělesa jsem odebrala vzorek zeminy ke stanovení koncové vlhkosti vzorku w_I (viz podkapitola 2.1.4). Nakonec jsem přešla k vyhodnocení zkoušky.



Obr. 31: Průběh volného bobtnání v edometru.

Změnu výšky Δh vzorku vlivem nabobtnání zeminy jsem vypočítala jako rozdíl koncového a počátečního čtení indikátorových hodinek. Bobtnající potenciál zeminy S jsem vyjádřila jako procentuální poměr změny výšky vzorku k počáteční výšce vzorku:

$$S = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100$$

kde: S – bobtnající potenciál [%],

Δh – změna výšky vzorku [mm],

h – počáteční výška vzorku [mm].



Obr. 32: Ukázka vzorků zemin po nabobtnání – Chvaletice vlevo, Jindice vpravo.

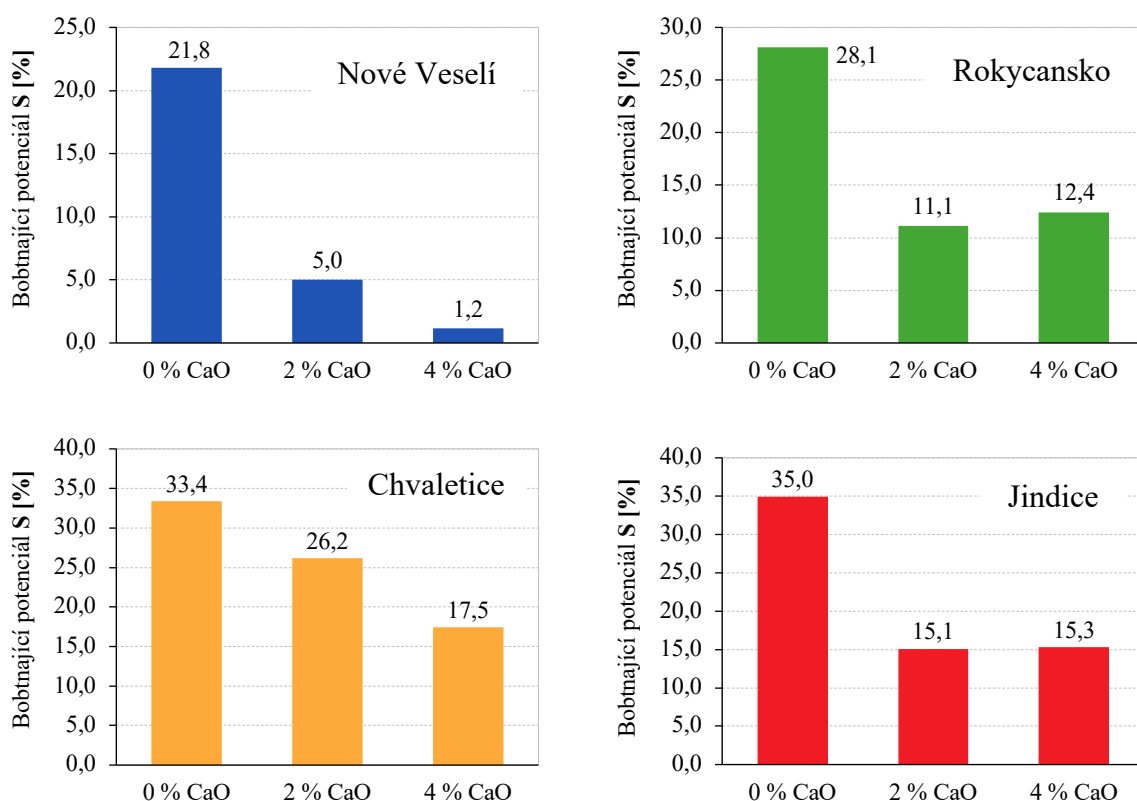
3.6.2.2 Vyhodnocení zkoušky a souhrn výsledků

Během průběhu volného bobtnání jsem na vzorcích, zejména na těch neupravených vápnem, zpozorovala částečné vymílání částic zeminy. Viditelné odplavení částic bylo při okrajích horní filtrační destičky. Po ustálení bobtnání a rozebrání edometrické sestavy nemělo zkušební těleso pravidelný tvar, viz Obr. 32. Odplavení částic a změna tvaru tělesa zeminy by měly jistý vliv na hodnoty bobtnajícího potenciálu, ale při vyhodnocení experimentu nebyly tyto faktory zohledněny.

Jako první jsem určila bobtnající potenciál na neupravených zeminách a poté na zeminách s přidaným vápnem. Koncové hmotnostní vlhkosti vzorků zemin byly po nabobtnání vyšší než vlhkosti vstupní, což se dalo očekávat. Neupravená zemina vlivem interakce s vodou změnila svou konzistenci, byla měkká a rozbířdala se. Výsledky volného bobtnání upravených zemin potvrzují předpoklad stabilizace. S rostoucím podílem vápna klesá bobtnající potenciál, snižují se koncové vlhkosti vzorku a mění se i konzistence zeminy, na dotyk je pevnější a tvrdší.

Výsledné hodnoty bobtnajícího potenciálu jednotlivých materiálů v závislosti na procentuálním obsahu vápna jsem znázornila do grafů na Obr. 33. K nejvýraznějším objemovým změnám došlo u vzorků zemin z Chvaletic a Jindic. Nejpriznivěji na přítomnost vápna reagovala zemina z Nového Veselí. U vzorků zemin z Rokycanska a Jindic se 4 % obsahem vápna jsem zaznamenala mírný nárůst bobtnajícího potenciálu oproti vzorkům s 2 % obsahem vápna. Tento jev byl nejspíš zapříčiněn mechanickým poškozením vzorku během jeho přípravy, což potvrzují

i vyšší koncové vlhkosti vzorků. Za zmínku stojí i pravděpodobnost špatné chemické reakce vápna s vlhkou zeminou.



Obr. 33: Grafy bobtnajícího potenciálu v závislosti na obsahu vápna testovaných materiálů.

Výsledky z volného bobtnání všech testovaných materiálů neupravených i upravených vápnem jsem shrnula do Tab. 13. V posledním sloupci tabulky uvádím pokles bobtnajícího potenciálu zemin s vápnem vůči zemině bez vápna, vyjádřený v procentech.

Při vyhodnocení zkoušky jsem předpokládala, že připravený vzorek zeminy měl totožný objem s objemem edometrického prstence. Nepřesnosti během přípravy zkušebních těles, jako nedokonalé seříznutí a zarovnání vzorku s okraji prstence nebo odloupení hrubších zrn, nebyly při stanovení bobtnacího potenciálu zohledněny. Hodnoty bobtnajícího potenciálu závisí na vstupních fyzikálních parametrech, především na objemové hmotnosti vysušené zeminy. Čím větší je počáteční objemová hmotnost sušiny určitého materiálu, tím výraznější bobtnání zeminy. V teoretické části práce jsem uvedla, že bobtnání závisí i na obsahu a druhu jílových minerálů, proto by bylo dobré tuto problematiku prozkoumat i z mineralogického a chemického hlediska.

Tab. 13: Hodnoty bobtnacího potenciálu neupravených a upravených zemin.

Materiál	Obsah CaO	Vstupní vlhkost	Objemová hmotnost	Obj. hmot. sušiny	Koncová vlhkost	Bobtnací potenciál	Pokles potenciálu vlivem CaO
	[%]	w_0 [%]	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]	w_1 [%]	S [%]	[%]
Nové Veselí	0%	12,9	2240	1984	24,5	21,8	
	2%	14,1	2187	1916	18,9	5,0	77,1
	4%	13,5	2114	1863	16,8	1,2	94,7
Rokycansko	0%	13,3	2269	2002	29,3	28,1	
	2%	12,3	2217	1975	19,2	11,1	60,5
	4%	11,9	2068	1849	25,7	12,4	55,9
Chvaletice	0%	16,6	1846	1584	45,7	33,4	
	2%	15,3	1842	1597	42,8	26,2	21,6
	4%	15,0	1696	1474	41,5	17,5	47,7
Jindice	0%	14,1	2097	1838	35,6	35,0	
	2%	14,2	1952	1710	31,1	15,1	56,9
	4%	13,3	1863	1645	35,3	15,3	56,2

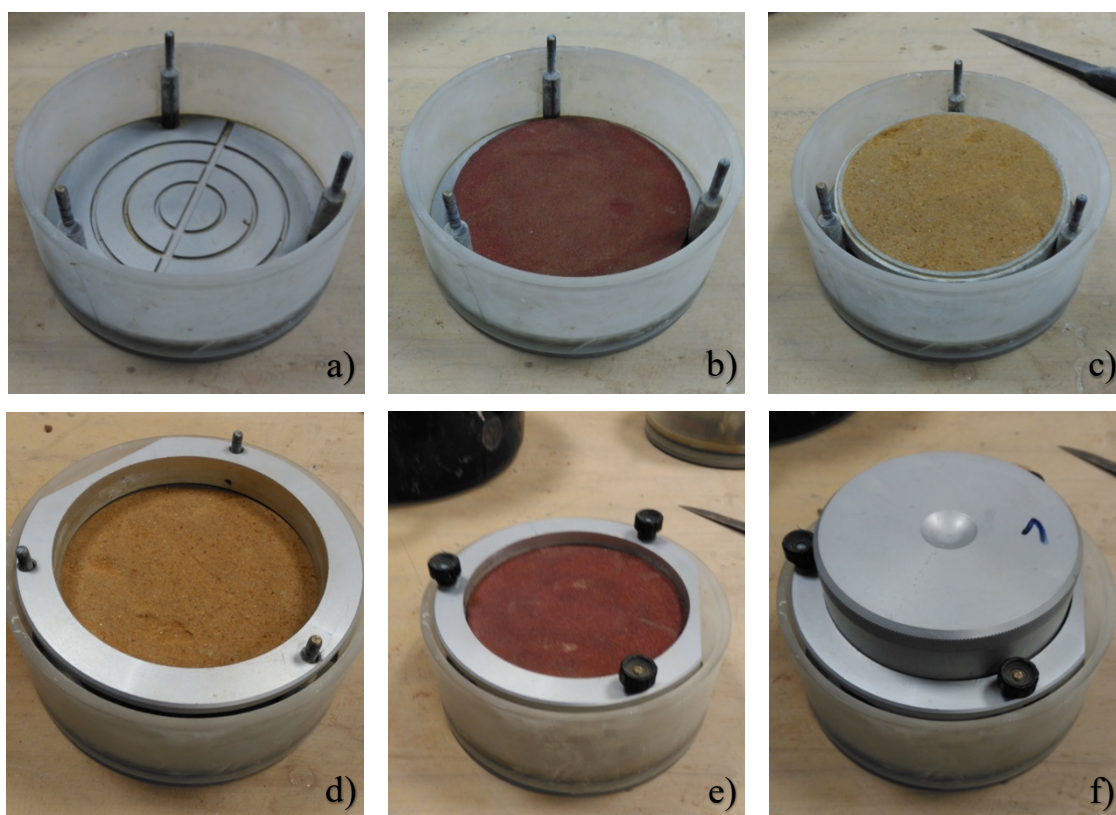
3.6.3 Bobtnací tlak

Jak již bylo zmíněno, jílovitá zemina má schopnost bobtnat a zvětšovat svůj objem při zvyšování její vlhkosti. Je-li zemině během sycení vodou zároveň bráněno zvětšovat svůj objem, tak na své okolí vyvozuje bobtnací tlak. Laboratorní zkoušku pro stanovení bobtnacího tlaku jsem provedla v edometru pomocí pákového zatěžovacího ramene. Princip zkoušky spočívá v určení právě takového množství zatížení, které dokáže zkušební vzorek saturované zeminy přenést, aniž by změnil svůj objem, ať už v kladném či záporném smyslu. Nejdříve jsem stanovila bobtnací tlak na vybraných zeminách nezlepšených vápnem. Poté jsem bobtnací tlak určila i na zeminách upravených vápnem – nejdříve s dvouprocentní příměsí a poté i se čtyřprocentní příměsí vápna. Pro každou testovanou zeminu jsem připravila 3 sady vzorků – bez vápna, s 2 % CaO a s 4 % CaO.

3.6.3.1 Postup zkoušky

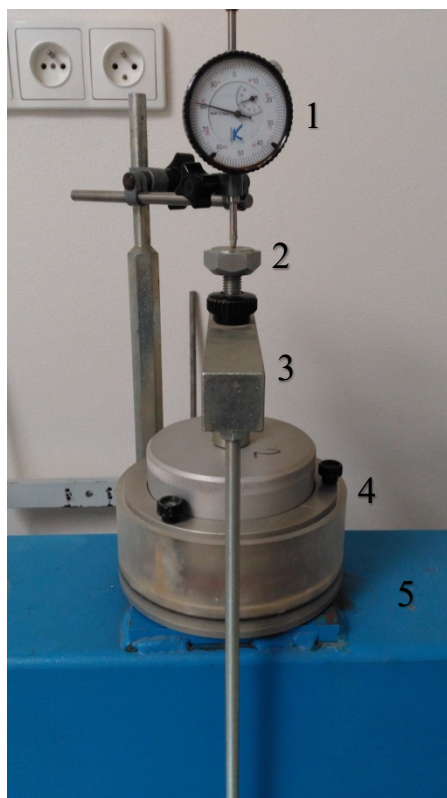
Zkušební postup byl složen z několika kroků. Nejdříve jsem sestavila edometrickou krabici. Na dno edometrické krabice jsem umístila filtrační destičku a zkušební vzorek v edometrickém prstenci (připravený dle podkapitoly 3.6.1). Pomocí centrážního kroužku a šroubů jsem vycentrovala prsteneček se vzorkem a zajistila jeho pevnou pozici. Na zkušební vzorek jsem

umístila horní filtrační destičku a roznášecí píst. Roznášecí píst je vybaven středovým ložiskem pro aplikaci zatížení. Postup sestavení krabice je znázorněn na Obr. 34 – a) až f).



Obr. 34: Postup při sestavení edometrické krabice – a) tělo edometrické krabice, b) spodní filtrační destička, c) edometrický prstenec se vzorkem, d) centrážní kroužek, e) horní filtrační destička, f) roznášecí píst s ložiskem.

V dalším kroku jsem uložila sestavenou edometrickou krabici do pevného lůžka ocelové konstrukce. Součástí ocelové konstrukce je rameno páky se závěsem pro závaží a zatěžovací rám. Zatěžovací rám jsem k roznášecímu pístu upevnila šroubem tak, aby rameno páky bylo ve vodorovné poloze. Rameno páky přenáší aplikované zatížení do zatěžovacího rámu a následně do roznášecího pístu. Pákový zatěžovací systém vyvozuje desetinásobné zvýšení síly. Například závaží o hmotnosti 1 kg vyvodí na zkušební vzorek zatížení hmotnosti 10 kg. Následně jsem k ocelové konstrukci připevnila číselníkový úchylkoměr tak, aby se jeho hrot dotýkal upevňovacího šroubu a aby mu byl umožněn pohyb nahoru a dolů. Sestavená krabice v zatěžovacím rámu je znázorněna na Obr. 35.



- 1 – číselníkový úchylkoměr
- 2 – upevňovací šroub
- 3 – zatěžovací rám
- 4 – edometrická krabice
- 5 – ocelová konstrukce

Obr. 35: Sestavená edometrická krabice upevněná v zatěžovacím rámu.

Po sestavení edometrické krabice a zatěžovacího rámu jsem přešla k dalšímu kroku, a to k aplikaci zatížení. Nejprve jsem stanovila návrhový počáteční tlak v závislosti na typu zeminy a hloubce odběru. Testované zeminy jsou pevné konzistence, a proto jsem zvolila počáteční tlak rovný efektivnímu svislému napětí in situ σ'_0 .

$$\sigma'_0 = \rho \cdot h \cdot g$$

Kde: σ'_0 – efektivní svislé napětí in situ [Pa],

ρ – objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy [kg/m^3],

h – hloubka odběru zeminy [m],

g – tíhové zrychlení [m/s^2].

Počáteční tlak je na zkušební vzorek aplikován zavěšením závaží do závěsu pákového ramene. Závaží vyvozuje desetinásobně větší sílu. Počáteční požadovanou hmotnost závaží m_0 jsem vypočítala podle následující rovnice:

$$m_0 = \frac{\sigma'_0 \cdot A}{10 \cdot g}$$

kde: m_0 – počáteční potřebná hmotnost závaží [kg],

σ'_0 – efektivní svislé napětí *in situ* [Pa],
 A – kruhová plocha zkušebního vzorku [m²],
 g – tíhové zrychlení [m/s²].

Požadovanou zátěž jsem opatrně a bez rázů zavěsila do závěsu ramene páky. V průběhu několika dní jsem sledovala svislou deformaci (sedání) vzorku. Rekonsolidací jsem uvedla zeminu do stavu, ve kterém byla před odběrem z terénu. Počáteční zatížení tak simuluje zatížení nadloží. Přibližně po 3 dnech od aplikace počátečního zatížení se deformace ustálila. Z deformačního měřidla jsem odečetla počáteční čtení s přesností na 0,01 mm. Poté jsem edometrickou krabici se vzorkem zaplnila vodou. Vzorek zeminy po kontaktu s vodou začal ihned bobtnat. Podle potřeby jsem zvyšovala svislé napětí zavěšením dalšího závaží tak, aby bylo zachováno počáteční čtení. Zhruba po třech až čtyřech dnech bylo dosaženo rovnováhy, vzorek zeminy nevykazoval deformace jak v záporném, tak ani v kladném směru. Zaznamenala jsem celkovou hmotnost zavěšeného závaží m_1 a přešla k rozebírání edometrické sestavy. Nejprve jsem vypustila vodu z edometrické krabice a odejmula veškeré závaží. Ze zkušebního tělesa jsem odebrala vzorek zeminy ke stanovení koncové vlhkosti vzorku w_1 , (viz podkapitola 2.1.4). Nakonec jsem přešla k vyhodnocení zkoušky.

Nejdříve jsem vypočítala výsledné svislé zatížení, které odpovídá bobtnacímu tlaku. Hodnotu svislého osového zatížení jsem vypočítala jako rozdíl celkové hmotnosti naneseného závaží m_1 a počáteční hmotnosti závaží m_0 . Bobtnací tlak je charakterizován jako poměr síly vyvolané nasyceným vzorkem a plochy vzorku, na kterou síla působí. Bobtnací tlak σ_{sw} jsem stanovila následující rovnicí:

$$\sigma_{sw} = \frac{(m_1 - m_0) \cdot 10 \cdot g}{A}$$

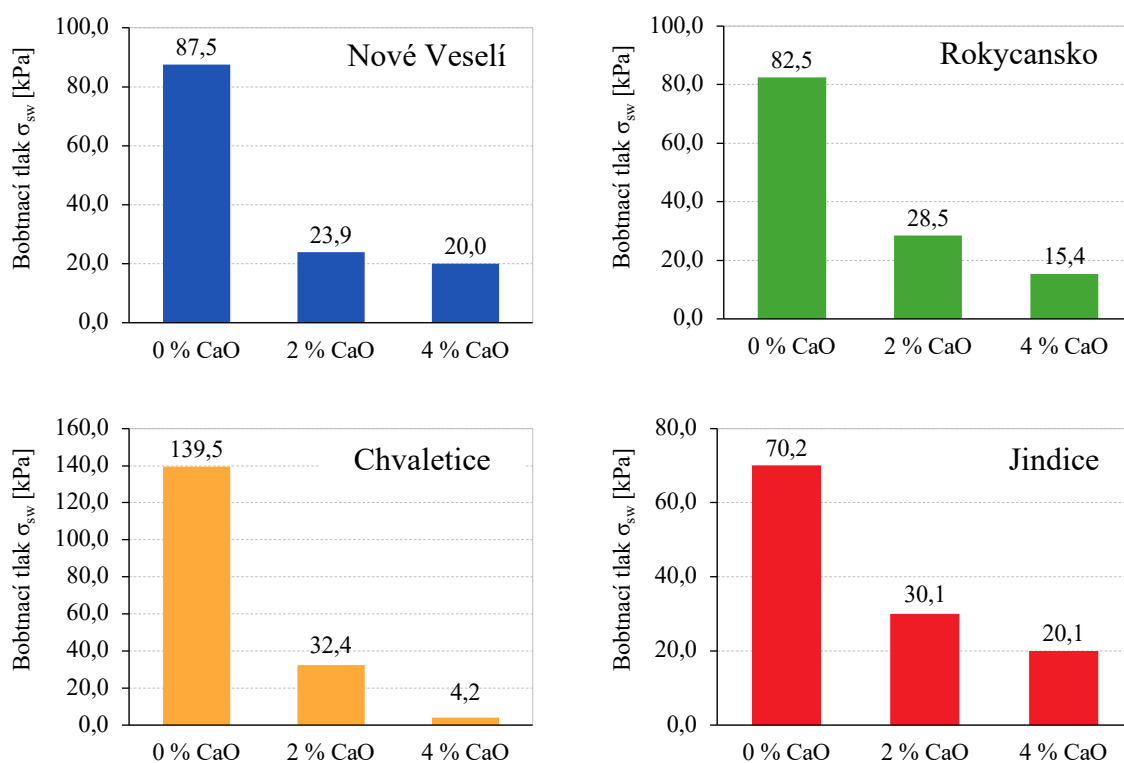
kde: σ_{sw} – bobtnací tlak [Pa],
 m_1 – celková hmotnost naneseného závaží [kg],
 m_0 – počáteční potřebná hmotnost závaží [kg],
 A – kruhová plocha zkušebního vzorku [m²],
 g – tíhové zrychlení [m/s²].

3.6.3.2 Vyhodnocení zkoušky a souhrn výsledků

Jako první jsem stanovila bobtnací tlak na neupravených zeminách a poté na zeminách s přidaným vápnem. Dle očekávání byly koncové hmotnostní vlhkosti vzorků zemin vyšší než

vlhkosti vstupní. Nárůst vlhkosti vzorků nebyl tak výrazný jako u vzorků podrobených volnému bobtnání, což je patrně způsobeno stálým svislým zatížením na vzorek. Stejně jako u volného bobtnání, tak i u této zkoušky byl potvrzen předpoklad stabilizace zemin po přidání vápna. S rostoucím podílem vápna klesal bobtnací tlak zeminy společně s její koncovou vlhkostí.

Výsledné hodnoty bobtnacího tlaku jednotlivých zemin v závislosti na procentuálním obsahu vápna jsem znázornila do grafů na Obr. 36. Nejvyšší bobtnací tlak jsem naměřila na zemině z Chvaletic, který dosahoval bezmála 140 kPa. Tato zemina na druhou stranu nejpříznivěji reagovala na přítomnost vápna. Při 4 % obsahu CaO jsem zaznamenala o 97 % nižší bobtnací tlak. Ostatní zeminy reagovaly na přítomnost vápna méně účinně, ale znatelně.



Obr. 36: Grafy bobtnacího tlaku v závislosti na obsahu vápna testovaných materiálů.

Naměřené bobtnací tlaky všech testovaných materiálů neupravených i upravených vápnem jsem shrnula do Tab. 14. V posledním sloupci tabulky uvádím pokles bobtnacího tlaku zemin s vápnem vůči zemině bez vápna, vyjádřený v procentech.

Tab. 14: Hodnoty bobtnacího tlaku neupravených a upravených zemín.

Materiál	Obsah CaO [%]	Vstupní vlhkost w_0 [%]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Obj. hmot. sušiny ρ_d [kg/m ³]	Koncová vlhkost w_1 [%]	Bobtnací tlak σ_{sw} [kPa]	Pokles tlaku vlivem CaO [%]
Nové Veselí	0%	12,9	2142	1897	16,2	87,5	
	2%	11,7	2086	1869	14,8	23,9	72,7
	4%	11,5	2040	1830	14,4	20,0	77,1
Rokycansko	0%	12,4	2135	1899	17,5	82,5	
	2%	11,9	2111	1887	14,9	28,5	65,5
	4%	11,3	2068	1858	14,3	15,4	81,3
Chvaletice	0%	16,2	2019	1737	32,5	139,5	
	2%	15,6	2074	1794	20,9	32,4	76,8
	4%	15,4	1980	1716	18,2	4,2	97,0
Jindice	0%	14,1	2047	1794	23,7	70,2	
	2%	13,8	2016	1772	20,1	30,1	57,1
	4%	13,5	1936	1706	18,9	20,1	71,4

Předpokladem při vyhodnocení této zkoušky je neporušený vzorek. Velikost bobtnacího tlaku závisí zejména na objemové hmotnosti vysušené zeminy. Se zvyšující se objemovou hmotností vysušené zeminy roste bobtnací tlak. Je to z důvodu vyššího obsahu jemnozrnných částic včetně jílových minerálů, které na sebe dokážou vázat vodu.

3.7 Smršťování

Laboratorní zkoušku pro stanovení smršťovacích charakteristik jsem započala přípravou zhutněného zkušební vzorku dle Proctora. Vysušenou a rozdrčenou zeminu jsem důkladně promíchala s požadovaným množstvím vody k dosažení optimální vlhkosti zeminy a zhutnila do moždíře hutnicím automatickým přístrojem. Z připraveného vzorku zeminy jsem pomocí vyřezávacích prstenců vyřezala zkušební tělíska tvaru válce o průměru ± 50 mm a výšce ± 50 mm. Zkušební tělíska jsem zvažila s přesností na 0,01 g a posuvným měřítkem změřila počáteční rozměry – průměr ve dvou navzájem kolmých směrech a výšku tělíska, vše s přesností na 0,05 mm. Zkušební tělesa jsem poté vložila do sušárny s počáteční teplotou 40 °C. Teplotu v sušárně jsem postupně zvyšovala přibližně po 2 hodinách o 10 °C až do dosažení 110 °C. Od počátku vysoušení jsem v intervalech cca 30 minut vzorky vždy zvažila a přeměřila jejich rozměry až do ustálení hmotnosti jednotlivých tělísek. Poté jsem přešla k vyhodnocení zkoušky. Z jednotlivých průběžných měření rozměrů a hmotnosti jsem stanovila objem vzorku V_i a odpovídající vlhkost w_i dle následujících vztahů:

$$V_i = \frac{\pi \cdot (d_{1i} + d_{2i})^2 \cdot h_i}{16}$$

$$w_i = \frac{m_i - m_d}{m_d} \cdot 100$$

kde: V_i – objem vzorku i -tého měření,
 d_{1i}, d_{2i} – průměr vzorku ve dvou navzájem kolmých směrech i -tého měření,
 h_i – výška vzorku i -tého měření,
 w_i – vlhkost vzorku i -tého měření,
 m_i – hmotnost vzorku i -tého měření,
 m_d – hmotnost vysušeného vzorku.

Následně jsem dle následujícího vztahu stanovila poměrné objemové smrštění zeminy s_{vi} :

$$s_{vi} = \frac{V_i - V_d}{V_d}$$

kde: s_{vi} – poměrné objemové smrštění i -tého měření,
 V_d – objem vysušeného vzorku.

Vypočtené hodnoty poměrného objemového smrštění zeminy s_{vi} při vlhkosti w_i jsem vynesla do grafu a proložila jimi křivku s lineární částí. Z grafu jsem stanovila mez smrštění w_s jako teoretický průsečík lineární části s vodorovnou osou vlhkosti. Součinitel objemového smršťování s_v jsem vyjádřila ze vztahu:

$$s_v = \frac{\Delta s_v}{\Delta w}$$

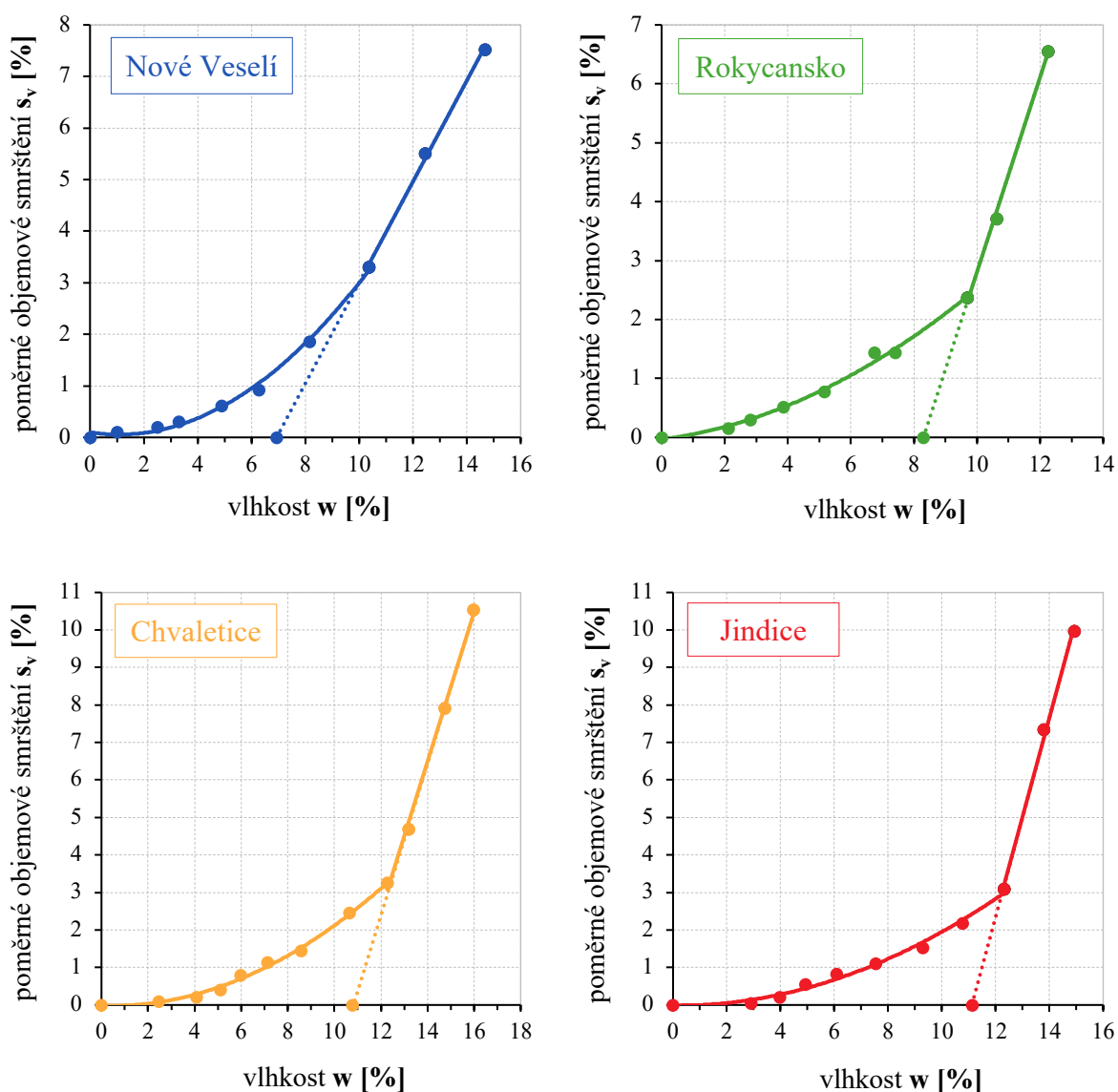
kde: Δs_v – rozdíl poměrných objemových smrštění na přímkové části čáry smrštění,
 Δw – rozdíl příslušných vlhkostí odpovídající Δs_v .



Obr. 37: Zkušební tělíčko před zahájením smršťovací zkoušky.

3.7.1 Vyhodnocení zkoušky a souhrn výsledků

Laboratorní smršťování zeminy jsem provedla na všech zkoumaných materiálech – pro každou zeminu jsem připravila a vyhodnotila tři dílčí zkušební vzorky. Z grafického vyjádření závislosti poměrného objemového smrštění na vlhkosti jsem pro všechny dílčí vzorky určila mez smrštění a součinitel objemového smrštění. Na Obr. 38 je graficky znázorněn průběh čáry smršťování pro každou zeminu zvlášť a vždy jen pro jeden dílčí vzorek. Pro ostatní dílčí vzorky uvedu jen hodnoty charakterizující smršťování.



Obr. 38: Grafy závislosti poměrného objemového smrštění na vlhkosti – čáry smršťování.

Získané hodnoty z dílčích vzorků jsem zprůměrovala a určila tak výsledné charakteristiky smršťování jednotlivých zemin, které jsem shrnula do Tab. 15. Při vyhodnocení zkoušky jsem předpokládala plně saturované neporušené vzorky (tj. stupeň nasycení je roven jedné).

Tab. 15: Výsledné charakteristiky objemového smršťování.

Materiál	Č. vzorku	Mez smrštění w_s [%]	Souč. obj. smršťování s_v [-]	Mez smrštění w_s [%]	Souč. obj. smršťování s_v [-]
Nové Veselí	1	6,94	0,98	7,61	1,18
	2	7,87	1,20		
	3	8,01	1,35		
Rokycansko	1	8,30	1,65	8,20	1,64
	2	8,48	1,73		
	3	7,81	1,55		
Chvaletice	1	10,78	2,02	10,66	1,95
	2	10,20	1,94		
	3	10,99	1,88		
Jindice	1	11,12	2,66	11,14	2,45
	2	10,71	2,20		
	3	11,60	2,48		

3.8 Porovnání objemových změn s nepřímými metodami

V této podkapitole vyjádřím charakteristiky bobtnání a smršťování zkoumaných zemin pomocí vybraných nepřímých metod, popsanych v podkapitole 1.2.2 a 1.2.3 a poté je porovnám s laboratorními přímými metodami. Srovnání bobtnacího tlaku a bobtnacího potenciálu jsem provedla pouze na neupravených zeminách (tj. bez přidaného vápna), pro které mají empirické vztahy uplatnění.

3.8.1 Klasifikace jílových minerálů

Jako první identifikuji výskyt jílových minerálů v zemině. Přítomnost určitého jílového minerálu v testovaných zeminách byla stanovena nepřímými metodami, a to dle Skempton, (1953) a dle Holtze a Kovacse (1981) – viz podkapitola 1.2.2.2. Metoda dle Skempton vychází z hodnot indexu koloidní aktivity I_A , metoda Holtze a Kovacse vychází ze závislosti meze tekutosti w_L na indexu plasticity I_P (tj. diagram plasticity). Klasifikace převládajících minerálů

zkoumaných zemin jsou uvedeny v Tab. 16. Pro přesné určení mineralogického složení by bylo vhodné využít některých metod popsanych v podkapitole 1.2.2.1, nebo přímo provést chemický rozbor zeminy. Mineralogické složení zemin z obou metod vychází podobně a slouží pouze pro orientační odhad mineralogie. Pro geotechnickou praxi jsou tyto výsledky dostačující.

Tab. 16: Klasifikace jílových minerálů nepřímými metodami.

Materiál	Jílové minerály		
	I_A	Skempton, 1953	Holtz a Kovacs, 1981
Nové Veselí	0,48	kaolinit - illit	illit
Rokycansko	0,52	kaolinit - illit	illit
Chvaletice	0,77	illit	illit
Jindice	1,18	illit - montmorillonit	illit - montmorillonit

3.8.2 Klasifikace a porovnání bobtnajícího potenciálu

Nejdříve jsem ohodnotila bobtnající potenciál dle Seeda et al. (1962) a dle Chena (1975), viz podkapitola 1.2.2.3. Metoda podle Seeda klasifikuje potenciál na základě závislosti mezi indexem koloidní aktivity I_A a obsahem jílových částic C . Chenova metoda vychází z hodnoty indexu plasticity I_p . Obě metody hodnotí bobtnající potenciál zemin jako nízký, střední nebo vysoký, Tab. 17.

Tab. 17: Klasifikace bobtnacího potenciálu.

Materiál	Bobtnací potenciál	
	Seed et al., 1962	Chen, 1975
Nové Veselí	nízký	střední
Rokycansko	nízký	střední
Chvaletice	vysoký	střední - vysoký
Jindice	nízký - střední	střední - vysoký

Následně jsem vyjádřila konkrétní hodnoty bobtnajícího potenciálu z empirických rovnic podle Seeda et al. (1962), Chena (1975) a podle Nayaka a Christensena (1971) a shrnula je do Tab. 18.

Tab. 18: Hodnoty bobtnacího potenciálu podle nepřímých metod.

Materiál	Hodnoty bobtnacího potenciálu S [%]		
	Seed et al., 1962*	Chen, 1975	Nayak a Christensen, 1971
Nové Veselí	1,66	0,92	9,30
Rokycansko	2,39	1,12	10,77
Chvaletice	11,53	4,31	16,86
Jindice	4,30	1,69	9,30

*dle vztahu $S = 2,16 \times 10^{-3} (I_p)^{2,44}$

Empiricky vypočtené hodnoty jsem porovnávala s výsledky laboratorního měření volného bobtnání, viz Tab. 19. Odchytky jsem vyjádřila podle následujícího vzorce:

$$Error = 100 \cdot \frac{S_{emp} - S_{lab}}{S_{lab}}$$

kde: *Error* – procentuální odchytky [%],

S_{emp} – bobtnací potenciál stanovený empiricky [%],

S_{lab} – bobtnací potenciál stanovený laboratorně [%].

Tab. 19: Porovnání bobtnacího potenciálu stanoveného empiricky a laboratorně.

Materiál	Odchytky bobtnacího potenciálu [%]		
	Seed et al., 1962*	Chen, 1975	Nayak a Christensen, 1971
Nové Veselí	-92,38	-95,80	-57,38
Rokycansko	-91,52	-96,00	-61,71
Chvaletice	-65,42	-87,08	-49,45
Jindice	-87,69	-95,18	-73,38

*dle vztahu $S = 2,16 \times 10^{-3} (I_p)^{2,44}$

Nepřímé metody vykazují výrazné odchytky oproti naměřeným hodnotám volného bobtnání. Všechny prediktivní hodnoty značně podhodnotily bobtnací potenciál. Na základě tohoto zjištění jsem usoudila, že vybrané nepřímé metody identifikace bobtnacího potenciálu nejsou spolehlivé a dostatečně přesné pro geotechnickou praxi.

3.8.3 Porovnání bobtnacího tlaku

V této části jsem odhadla bobtnací tlak zkoumaných zemin na základě empirických vztahů uvedených v podkapitole 1.2.2.4. Vztahy zohledňují mechanicko-fyzikální vlastnosti zeminy. Vypočtené hodnoty bobtnacího tlaku z rovnic podle Komorníka a Davida (1969) a podle Nayaka a Christensena (1971) jsem shrnula do Tab. 20.

Tab. 20: Hodnoty bobtnacího tlaku podle nepřímých metod.

Materiál	Hodnoty bobtnacího tlaku σ_{sw} [kPa]	
	Komorník a David, 1969	Nayak a Christensen, 1971
Nové Veselí	30,82	56,90
Rokycansko	44,56	80,36
Chvaletice	63,67	124,91
Jindice	40,30	40,98

Empiricky stanovené hodnoty bobtnacího tlaku jsem porovnávala s výsledky laboratorního měření, viz Tab. 21. Procentuální odchylky jsem vyjádřila dle následujícího vzorce:

$$Error = 100 \cdot \frac{\sigma_{sw,emp} - \sigma_{sw,lab}}{\sigma_{sw,lab}}$$

kde: *Error* – odchylka [%],

$\sigma_{sw, emp}$ – bobtnací tlak stanovený empiricky [kPa],

$\sigma_{sw, lab}$ – bobtnací tlak stanovený laboratorně [kPa].

Tab. 21: Porovnání bobtnacího tlaku stanoveného empiricky a laboratorně.

Materiál	Odchylky bobtnacího tlaku [%]	
	Komorník a David, 1969	Nayak a Christensen, 1971
Nové Veselí	-64,78	-34,98
Rokycansko	-45,96	-2,54
Chvaletice	-54,37	-10,49
Jindice	-42,57	-41,61

Metoda dle Komornika a Davida vykazuje značné odchylky oproti naměřeným hodnotám z laboratorní zkoušky. Jako perspektivní považuji metodu podle Nayaka a Christensena, vypočtené odchylky bobtnacího tlaku pro zeminu z Rokycanska a Chvaletic jsou uspokojivé. Všechny prediktivní hodnoty podhodnotily bobtnací tlak. Na základě tohoto zjištění jsem usoudila, že uvedené nepřímé metody identifikace bobtnacího tlaku nejsou až na výjimky spolehlivé a dostatečně přesné pro geotechnickou praxi.

3.8.4 Porovnání meze smrštění

Mez smrštění zkoumaných materiálů jsem odhadla na základě Casagrandeho metod, viz podkapitola 1.2.3. První metoda odečítá hodnotu meze smrštění z diagramu plasticity a druhá metoda je založena na empirickém vztahu, obě metody zohledňují index plasticity I_p a mez tekutosti w_L . Výsledky z obou metod jsou shrnuty v Tab. 22.

Tab. 22: Hodnoty meze smrštění podle nepřímých metod.

Materiál	Hodnoty meze smrštění w_s [%]	
	Casagrande, diagram plasticity	Casagrande, empirický vzorec
Nové Veselí	15,19	17,10
Rokycansko	15,84	17,65
Chvaletice	15,43	19,10
Jindice	17,61	17,60

Stanovené meze smrštění dle Casagrandeho metody jsem porovnávala s výsledky laboratorního měření, viz Tab. 23. Odchylky jsem vyjádřila podle následujícího vzorce:

$$Error = 100 \cdot \frac{w_{s,emp} - w_{s,lab}}{w_{s,lab}}$$

kde: $Error$ – odchylka [%],

$w_{s,emp}$ – mez smrštění stanovená empiricky [%],

$w_{s,lab}$ – mez smrštění stanovená laboratorně [%].

Tab. 23: Porovnání meze smrštění stanovené empiricky a laboratorně.

Materiál	Odchyly meze smrštění [%]	
	Casagrande, diagram plasticity	Casagrande, empirický vzorec
Nové Veselí	99,72	124,78
Rokycansko	93,28	115,32
Chvaletice	44,76	79,20
Jindice	58,07	57,94

Casagrandeho metody vykazují výrazné odchyly oproti hodnotám z laboratorních zkoušek. Všechny prediktivní hodnoty značně nadhodnotily mez smrštění. Na základě tohoto zjištění jsem usoudila, že pro geotechnickou praxi bude odhadnutí meze smrštění podle Casagrandeho dostačující.

4 Popis a sanace poruch staveb v důsledku objemových změn

V této kapitole se zaměřím na poruchy dopravních staveb způsobené bobtnáním a smršťováním a jejich následné sanace. Nekvalitní inženýrskogeologický průzkum, nevhodné způsoby založení a v neposlední řadě nedodržení technologických postupů výstavby často vede k objemovým změnám a deformacím již realizovaných staveb. Sanace vzniklých poruch jsou často nákladné a technicky i časově náročné, které často vyžadují odstavení stavby z provozu. Nejlepší prevencí vzniku poruch je návrh úpravy objemově nestálé zeminy provedením laboratorních zkoušek v rámci geotechnického průzkumu. Je nutné provést i průkazní laboratorní zkoušky upravených zemin, které se často podceňují.

4.1 Úprava objemově nestálých zemin

Klasifikace zemin pro dopravní stavby podle ČSN 73 6133 posuzuje vhodnost zeminy do násypu a vhodnost zeminy do podloží vozovky (pro aktivní zónu). Dle této normy se navrhuje a provádějí úpravy nevhodných zemin a také se dle ní provádí a kontrolují zemní práce. Tato norma třídí zeminy do několika skupin z hlediska jejich použitelnosti pro stavbu zemního tělesa – viz Tab. 24. Určení vhodnosti zeminy a její případné úpravy závisí zejména na mechanicko-fyzikálních vlastnostech (zrnitost, plasticita, vlhkost, zhutnitelnost, únosnost) a chemickém složení zeminy.

Tab. 24: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa a jejich úpravy dle ČSN 73 6133. [22]

Podmínky použití	NEPOUŽITELNÉ ^a k jakémukoli použití	NEVHODNÉ k přímému použití bez úpravy	PODMÍNEČNĚ VHDNÉ k přímému použití bez úpravy *	VHDNÉ k přímému použití bez úpravy
	Nelze upravit běžnými technologiemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit ^c	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než 6 % ^b , bahna, rašelina, humus, ornice, CE, ME	ML, MI, CL, CI MH, MV, CH, CV	S-F MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW, G-F
Násyp		MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F S-F

^a Netýká se podloží násypu a svahů zářezu.
^b Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2.
^c Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu.

Cílem úpravy zemin je dosažení lepších geotechnických vlastností a lepší zpracovatelnosti zeminy. Nevhodné a podmíněčně vhodné zeminy se upravují mechanicky, příměsí pojiva, či jejich kombinací. Mechanická úprava spočívá ve smíchání granulometricky nevhodné zeminy s jinou zeminou za účelem dosažení příznivější křivky zrnitosti. Zemina upravená chemicky, tj. s příměsí pojiva, mění své mechanicko-fyzikální vlastnosti – snižuje se vlhkost a plasticita zeminy, zvyšuje se únosnost zeminy.

Objemově nestálé zeminy, tj. jíly a jílovité zeminy se střední a vysokou plasticitou, se při použití do zemního tělesa upravují vápnem podle ČSN EN 227-11. Jemnozrnné zeminy s nízkou plasticitou se mohou modifikovat cementem nebo hydraulickým silničním pojivem (dle ČSN EN 14 227-10 nebo ČSN EN 14 227-13). Zmíněné úpravy jsou pouze doporučené, je zapotřebí vždy vycházet ze skutečných mechanicko-fyzikálních vlastností zeminy a z ekonomických nákladů jednotlivých druhů úprav. [22] Ve své práci jsem vlastnosti zkoumaných zemin zlepšovala vápnem, proto se v textu níže budu zabývat jen úpravou pomocí vápna.

4.1.1 Úprava vápnem (CaO)

Zeminy náchylné k objemovým změnám je vhodné upravit pomocí vápna. Zlepšení zeminy vápnem má okamžité a dlouhodobé účinky. Okamžité účinky jsou způsobeny chemickými reakcemi mezi vápnem, jílovými minerály a vodou a dochází tak ke změně struktury jílových minerálů. Tato změna struktury je provázána tzv. flokulací jílových částic. Dlouhodobé chemické působení mezi jílem a vápnem má za následek vznik nového druhu minerálu a zlepšení geotechnických vlastností zeminy.

- Okamžité účinky:
 - snížení obsahu vody v zemině, tj. snížení vlhkosti zeminy,
 - zvýšení meze plasticity a snížení indexu plasticity,
 - zlepšení podmínek zhutňování – zvýšení optimální vlhkosti, Proctorova křivka je plošší (interval vlhkosti pro optimální hutnění se zvětší),
 - zvýšení pevnosti a CBR, snížení namrzavosti.
- Dlouhodobé účinky:
 - zvýšení pevnosti v důsledku pucolánové reakce,
 - dlouhodobý růst poměru únosnosti CBR,
 - stabilita směsi po saturaci, zvýšení odolnosti proti mrazu. [22]

4.2 Poruchy dopravních staveb

Objemové změny v zemním tělese dopravních staveb (způsobené bobtnáním a smršťováním zemin) se projevují deformacemi ve vozovkách nebo ve ztrátě geometrie kolejí, které nepříznivě ovlivňují bezpečnost provozu. Tyto deformace mohou ovšem souviset i s jinými faktory – např. nedostatečná únosnost proti nadměrnému zatížení vozovky, resp. železničního svršku nebo nadměrné zatékání vody do podloží nebo tělesa násypu vlivem špatného odvodňovacího zařízení.

4.2.1 Poruchy netuhé vozovky

Deformace vozovky vzniklé bobtnáním a smršťováním materiálů v podloží nebo zemním tělese např. nevhodně upravenými jíly se projevují viditelným boulením na vozovce či její krajnici. Tyto poruchy ovlivňují pohodlí a bezpečnost silničního provozu. V dalším textu zmíním možné poruchy způsobené objemovými změnami materiálů.

4.2.1.1 Místní hrboly a prohlubně

Vyskytují se lokálně jako kruhové nebo oválné vyvýšeniny/prohlubně průměru 1-3 m. Sanace se provádí vybouráním vozovky, výměnou vrstev vozovky a podloží a hloubkovým odvodněním vozovky.



Obr. 39: Hrbol u okraje vozovky vzniklý objemovou změnou podkladních vrstev. [23]

4.2.1.2 Podélné hrboly a prohlubně

Podélné hrboly/prohlubně jsou orientované kolmo na osu vozovky. Mají různou výšku a šířku, často jsou provázeny příčnými trhlinami. Sanace se provádí výměnou porušených vrstev, při probíhajících objemových změnách podkladu se proříznou stmelené vrstvy na celou tloušťku a utěsní se zálivkou.



Obr. 40: Podélné hrboly způsobené objemovými změnami. [23]

4.2.1.3 Plošná deformace vozovky

Plošná deformace je charakteristická nepravidelným střídáním hrbolů a prohlubní s největšími deformacemi v místech opakovaného zatížení. Porucha obvykle zasahuje do všech konstrukčních vrstev a podloží. Sanace se při ztrátě únosnosti vozovky provádí zesílením nebo rekonstrukcí vozovky – po ustálení deformací vyrovnání frézováním a položení nové obrusné vrstvy.



Obr. 41: Plošná deformace vozovky (vlevo), plošná deformace se ztrátou únosnosti vozovky (vpravo). [23]

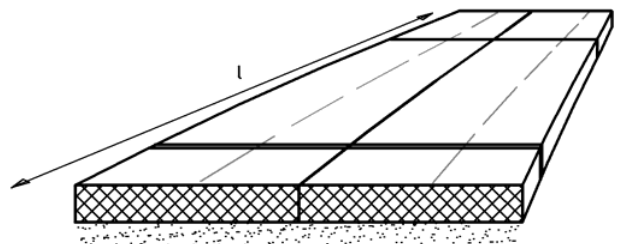
Přehlížení a neprovedení včasné sanace výše zmíněných poruch může vést k rozšíření poruchy a vzniku dalších poruch jako jsou například síťové trhliny s postupným vývojem výtluků, které mohou vést až k prolomení vozovky. Prolomení vozovky je konečné stadium porušení konstrukce, vozovka se stává nesjízdnou pro běžný silniční provoz. V tom případě je nutná rekonstrukce celého zasaženého úseku vozovky provedením hloubkové drenáže, ochranné vrstvy, podkladní vrstvy a nového krytu vozovky. [23]

4.2.2 Poruchy vozovky s cementobetonovým krytem

Poruchy cementobetonového krytu vzniklé bobtnáním a smršťováním materiálů v podloží nebo zemním tělese se projevují viditelným nadzvednutím desek či trhlinami na vozovce. Tyto poruchy ovlivňují pohodlí, plynulost a bezpečnost silničního provozu. V dalším textu zmíním možné poruchy způsobené objemovými změnami materiálů.

4.2.2.1 Zvlnění cementobetonového krytu

Zvlnění se vyskytuje na delším úseku vozovky a je charakteristické kombinací zdvihů a poklesů jednotlivých desek. Tyto zdvihy jsou způsobeny bobtnáním zeminy pod aktivní zónou nebo nevyhovujícím podložím vozovky, případně špatnou hloubkovou drenáží. Rozšíření poruchy může vést ke zvýšení výšky zvlnění za vzniku příčných a jiných typů trhlin. Sanace se provádí vytvořením dilatačních spár a stabilizací desek podinjektováním nebo se vymění celé desky. V krajním případě se sanace řeší rekonstrukcí vozovky. Jako dočasné opatření se na daných úsecích vozovky může snížit dovolená rychlost.

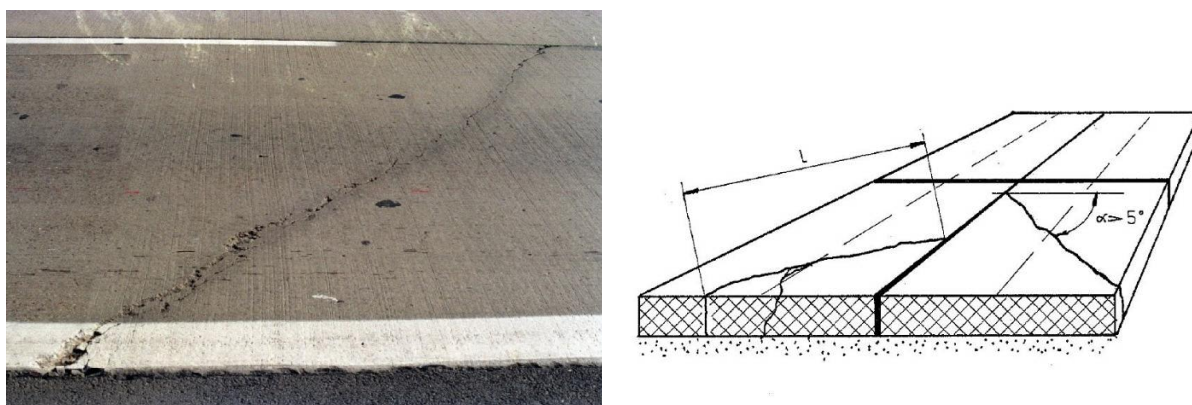


Obr. 42: Zvlnění cementobetonového krytu. [24]

4.2.2.2 Šikmá trhlina

Trhlina prostupuje celou tloušťkou desky. Trhlina je vedena pod úhlem větším než 5° (od kolmé spojnice podélných hran) ve směru od podélné hrany k podélné, popř. od podélné k příčné hraně (ve vzdálenosti větší než 1,2 m od rohu). Trhliny mohou být jednoduché nebo větvené. Tato porucha může být zapříčiněna bobtnáním v podloží, ale i nerovností podkladu či jeho rozdílnou únosností pod deskou. Šikmé trhliny, které vykazují pohyb a šíří se, jsou závažné a mohou způsobovat rozpad betonu podél trhliny, postupné vydrolování rozpadlého materiálu, vznik výtluků, či větvení jednoduché trhliny za vzniku dalších větví.

Vlasové trhliny se neošetřují, nicméně se musí sledovat jejich stav a případné šíření trhliny. Oprava méně rozvinuté trhliny bez šíření se provede prořezáním trhliny na šířku min. 8 mm a hloubku min. 25 mm a utěsněním zálivkou, případně se mohou k zamezení posunů dodatečně vložit šikmé nebo horizontální kotvy. Více rozvinuté poruchy/trhliny se obvykle řeší výměnou části nebo celé desky. V případě sanací v záruční době se provede výměna celé desky. [24]



Obr. 43: Šikmá trhlina cementobetonového krytu. [24]

4.2.3 Porucha na dálnici D47

Porucha dálničního úseku pozemní komunikace D47 (dnešní D1) je zřejmě nejdiskutovanější poruchou dnešní doby, která nastala vlivem objemových změn v násypu. Porucha komunikace byla lokalizována u soutoku řek Odry a Opavice, okres Ostrava – město. Při výstavbě se použily druhotné suroviny – uhelná hlušinová sypanina, ocelářská struska a studený odval.

Příčina poruchy:

Násyp byl vybudován především ze studeného odvalu, který byl certifikovaný jako umělé kamenivo, homogenizovaný materiál, šterkodrt' B-0-125, a protože studený odval nebyl vyjmenován v žádném z předpisů, nebyla ani ověřena jeho objemová stálost. Laboratorní zkoušky prokázaly heterogenitu materiálu a měnící se chemické složení, některé naměřené hodnoty se výrazně lišily od hodnot uvedených v certifikaci. Později byla prokázána i značná objemová nestálost studeného odvalu. Změna objemu v násypu byla zřejmě způsobena chemickými reakcemi mezi materiály a vodou, za vzniku zásaditého prostředí. Vzhledem k heterogenitě materiálu násypu nebylo možné určit, jak dlouho budou objemové změny pokračovat. Změny v objemu násypu měly za následek zvlnění dálnice, poruchy jsou však i na přilehlých navazujících stavebních objektech. [25]

Sanace:

K odstranění špatného stavu komunikace do doby psaní této práce nedošlo. V současné době se vedou soudní spory se zhotoviteli stavby. Ředitelství silnic a dálnic odhaduje, že bude třeba kompletně opravit devět kilometrů dálnice s nákladem 4,2 miliardy korun. Půjde tak téměř o novostavbu. V současné době provizorní opravy vyšli na 50 milionů korun.



Obr. 44: Zvlnění dálnice D47. [26]

ZÁVĚR

Cílem teoretické části práce bylo popsání fyzikálních a chemických vlastností objemově nestálých zemin a jak se dají tyto zeminy v praxi identifikovat. Jako potenciálně bobtnavé zeminy jsem označila jíly a jílovité zeminy. Uvedla jsem jejich obecnou definici, dělení jílu z hlediska vzniku a obsahu jílových minerálů. Popsala jsem charakteristické vlastnosti jílovitých zemin a jílových minerálů a jejich vazby mezi pevnými částicemi a vodou. Nashromáždila jsem informace vybraných přímých a nepřímých metod identifikace bobtnání a smršťování jílovitých zemin. Dalším cílem bylo charakterizovat základní popisné vlastnosti jemnozrnných zemin související s laboratorními zkouškami. Definovala jsem základní fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti a podle jakých norem se stanovují. Popsala jsem platný klasifikační systém pro zatřídění a pojmenování zemin dle zrnitosti a plasticity.

Hlavním cílem této práce bylo praktické měření a vyhodnocení objemových změn vybraných typů zemin v laboratoři VVCD. Na vybraných jemnozrnných zeminách jsem laboratorně stanovila základní popisné fyzikální a hydrofyzikální vlastnosti, provedla zrnitostní rozbor a stanovila konzistenční meze. Všechny zeminy jsem na základě zrnitosti a plasticity klasifikovala jako jíly. Následně jsem experimentálně určila charakteristiky bobtnání a smršťování. Hodnoty bobtnacího potenciálu a bobtnacího tlaku ukazovaly na středně až vysoce bobtnavé jíly. Charakteristiky bobtnání jsem vypočítala také pomocí nepřímých metod, založených na empirických vztazích. Výsledky experimentů jsem porovnávala s vypočtenými výsledky nepřímých metod. Zjistila jsem výrazné odchylky bobtnacího potenciálu oproti naměřeným hodnotám, odchylky bobtnacího tlaku nebyly tak výrazné jako u potenciálu, avšak stále značné. Všechny nepřímé metody podhodnotily bobtnací potenciál a bobtnací tlak. Nejmenší odchylky vykazovala metoda podle Nayka a Christensena. Na základě výsledků jsem usoudila, že vybrané nepřímé metody identifikace bobtnání nejsou spolehlivé a dostatečně přesné pro geotechnickou praxi. Výrazné odchylky bobtnacího potenciálu mohly být způsobeny rozdílným měřením volného bobtnání. Zatímco nepřímé metody měření volného bobtnání byly založeny na konstantním přitížení 6,9 kPa, tak v experimentu jsem volné bobtnání měřila bez jakéhokoliv aplikovaného zatížení na vzorek.

Výsledky přímého a nepřímého stanovení bobtnání ukazují, že k objektivnímu posouzení bobtnání by bylo zapotřebí většího množství zkušebních vzorků téže zeminy. Což vzhledem k omezenému množství materiálu a počtu edometrických krabic v laboratoři nebylo možné.

Bobtnající potenciál a bobtnací tlak jsem také stanovila na zeminách upravených vápnem. Výsledné hodnoty bobtnání ukazovaly až na výjimky na klesající trend se vzrůstajícím podílem vápna. Posledním cílem bylo popsat poruchy a sanace staveb v důsledku objemových změn. Popsala jsem účinky úpravy jílovitých zemin vápnem. Dále jsem uvedla poruchy a sanace netuhých a cementobetonových vozovek. Zmínila jsem poruchu na dálnici D47, která je zřejmě nejdiskutovanějším problémem, vlivem objemových změn v podloží, v dnešní době. Tímto považuji všechny cíle za splněné.

Hlavním výstupem práce jsou provedené experimenty na vybraných vzorcích a jejich porovnání s nepřímými metodami. Obecným přínosem práce je srovnání přímých a nepřímých metod identifikace bobtnání a smršťování.

Zajímavým navázáním a rozšířením mé práce by bylo provedení laboratorních zkoušek na více vzorcích a tím stanovit statistickou odchylku nepřímých metod, či stanovit nové empirické vztahy pro jílovité zeminy nacházejících se na území České republiky.

LITERATURA

- [1] WEISS, Zdeněk a Miloš KUŽVART. *Jílové minerály: jejich nanostruktura a využití*. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0868-5.
- [2] FEDA, Jaroslav. *Mechanics of particulate materials: the principles*. New York: Elsevier Scientific Pub. Co., 1982. ISBN 04-449-9713-X.
- [3] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Vyd. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1437-1.
- [4] LAMBOJ, Ladislav a Zdeněk ŠTĚPÁNEK. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3094-6.
- [5] HAUSMANNOVÁ, Lucie. *Experimentální ověření množství sorbované vody při plném nasycení bentonitu*. Praha, 2011. Diplomová práce. ČVUT Fakulta stavební. Vedoucí práce Vašíček Radek.
- [6] ČSN EN ISO 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin: Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [7] SKEMPTON, A.W. The colloidal activity of clays. *Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering*. Zurich, Switzerland, 1953, 57-61.
- [8] HOLTZ, R. D. a William D. KOVACS. *An introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, c1981. ISBN 01-348-4394-0.
- [9] Cations and Cation Exchange Capacity – Queensland. *Soil Quality Website* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://soilquality.org.au/factsheets/h1-cations-and-cation-exchange-capacity-queensland>

- [10] SEED, H.B., Jr. WOODWARD a R. LUNDGREN. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Zurich, Switzerland, 1962, 53-88.
- [11] CHEN, F. H. *Foundations on expansive soils*. New York: Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. ISBN 04-444-1393-6.
- [12] NAYAK, N. V. a R. W. CHRISTENSEN. SWELLING CHARACTERISTICS OF COMPACTED, EXPANSIVE SOILS. *Clays and Clay Minerals*. 1971, **1971**(19), 251-261.
- [13] ČSN 72 1019. *Laboratorní stanovení smršťování zemin*. 1989.
- [14] ELARABI, Hussein. *Evaluation of predicted equations for swelling potential*. , 341 - 344. DOI: 10.3233/978-1-61499-656-9-341.
- [15] ZUMRAWI, Magdi. Swelling Potential of Compacted Expansive Soils. Journal of Engineering Research & Technology. 2013. ISSN 2278-0181.
- [16] RANGANATHAM, B. V. a B. SATYANARAYANA. A Rational Method of Predicting Swelling Potential for Compacted Expansive Clays. *Proc. 6th Inter. Conf. Soil*. 1965, , 92-96.
- [17] Popis a zatřídění skalních hornin a zemin podle evropských norem. *KATEDRA GEOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/CviceniInzenyrskaGeologie/KAPITOLY/7_EU%20normy/7_EU%20normy_v3do.htm
- [18] ČSN EN ISO 14688-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin: Část 1: Pojmenování a popis*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [19] ČSN EN ISO 14688-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin: Část 2: Zásady pro zatřídování*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[20] KOMORNIK, Amos a D. DAVID. Prediction of Swelling Pressure of Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1969, 209-226.

[21] ČERNÍKOVÁ, Monika. Přímé a nepřímé metody identifikace bobtnání jílovitých zemin. *Geotechnika*. 2017(2).

[22] TP 94: Úprava zemin [online]. 1.11.2013 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_94.pdf

[23] TP 82: Katalog poruch netuhých vozovek [online]. 1.3.2010 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_82.pdf

[24] TP 62: Katalog poruch vozovek s cementobetonovým krytem [online]. 1. srpna 2010 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_62.pdf

[25] KRESTA, František. Co bobtná v dálnici: odpadky, stavební odpad, studený odval NH, vysokopecní či ocelářenská struska?: Seminář “Fámy a fakta o dálnici D47” [online]. Praha, 2012 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <http://www.ivd.cz/download/Kresta.pdf>

[26] [online]. In: . 2017 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2131713-901-zavad-ostravske-dalnice-d47-o-odpovednosti-ma-rozhodnout-vlada>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AIPEA	Association Internationale Pour l'Étude des Argiles Mezinárodní společnost pro výzkum jílu
CEC	kationtová výměnná kapacita
CMS	Clay Mineral Society
ČSN EN	Česká technická norma, převzatá z Evropské normy
TP	Technické podmínky
VVCD	Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

A	kruhová plocha zkušebního vzorku
C	podíl jílové frakce
C_u	číslo nestejnozrnatosti
C_c	číslo křivosti
d_{1i}, d_{2i}	průměr vzorku ve dvou navzájem kolmých směrech i-tého měření
d_i	náhradní průměr zrna
e	číslo pórovitosti
F	maximální síla vyvolaná vzorkem
f_n	frakce zeminy propadlé sítím
g	tíhové zrychlení
h	hloubka odběru zeminy / výška vzorku
h_i	výška vzorku i-tého měření
H_{op}	pravé čtení hustoměru
H_r	efektivní hloubka hustoměru
I_A	index koloidní aktivity jílu
I_C	index konzistence
I_p	index plasticity
K	hmotnostní podíl frakce menší než náhradní průměr zrna
m	hmotnost vzorku
m_d	hmotnost vysušeného vzorku
m_w	hmotnost vody ve vzorku
n	pórovitost
R'_h	odečtená hodnota na hustoměru

S	bobtnající potenciál
S_r	stupeň nasycení
s_v	součinitel objemového smrštění
s_{vi}	poměrné objemové smrštění i-tého měření
t	čas
t_m	oprava o teplotu
V	celkový objem vzorku
V_d	objem vysušeného vzorku
V_i	objem vzorku i-tého měření
V_s	objem pevných částic
w	hmotnostní vlhkost
w_L	mez tekutosti
w_P	mez plasticity
w_{opt}	optimální vlhkost dle Proctor standard
w_S	mez smrštění
w_S'	mez lineárního smrštění
g	tíhové zrychlení
η	dynamická viskozita vody
ρ	objemová hmotnost přirozeně vlhké zeminy
ρ_d	objemová hmotnost vysušené zeminy
$\rho_{d,max}$	maximální objemová hmotnost vysušené zeminy dle Proctor standard
ρ_s	zdánlivá hustota pevných částic
ρ_w	objemová hmotnost vody
Δh	změna výšky vzorku
Δs_v	rozdíl poměrných objemových smrštění na přímkové části čáry smrštění
Δw	rozdíl příslušných vlhkostí odpovídající Δs_v
σ'_0	efektivní svislé napětí in situ
σ_{sw}	bobtnací tlak

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Flokulace (a), „solná“ flokulace (b), disperze (c). [3].....	14
Obr. 2: Čtyřstěn křemíku (vlevo) a osmistěn hliníku (vpravo). [1].....	15
Obr. 3: Souvrství kaolinitu, montmorillonitu a illitu (zleva). [3]	15
Obr. 4: Difuzní obal okolo jílové částice. [4]	16
Obr. 5: Oblasti jílových minerálů v diagramu plasticity. [8].....	20
Obr. 6: Grafické odvození bobtnajícího potenciálu podle Seeda et al. [10].....	22
Obr. 7: Závislost poměrného objemového smrštění na vlhkosti. [13].....	24
Obr. 8: Casagrandeho metoda pro odhad meze smrštění. [8].....	25
Obr. 9: Blokový diagram dle ČSN EN ISO 14688-1. [17].....	29
Obr. 10: Diagram pro zařazení zemín na základě zrnitosti. [19]	32
Obr. 11: Plasticitní diagram. (Zdroj: interní materiály VVCD)	33
Obr. 12: Konzistence a konzistenční meze. [3]	33
Obr. 13: Grafické znázornění indexu koloidní aktivity minerálů. (Zdroj: interní materiály VVCD).....	34
Obr. 14: Zemina z lokality Nové Veselí.	36
Obr. 15: Zemina z lokality Rokycansko.	36
Obr. 16: Zemina z lokality Chvaletice.....	36
Obr. 17: Zemina z lokality Jindice.....	36
Obr. 18: Část vrtného jádra (vlevo), zkušební vyřezávací prstence (vpravo).....	37
Obr. 19: Pyknometry v pískové lázni (vlevo) a pyknometry se vzorkem a vodou (vpravo)....	38
Obr. 20: Sada sít na vibračním stole.	40
Obr. 21: Vysušená jemnozrná frakce z Nového Veselí.....	43
Obr. 22: Křivky zrnitosti zkoušených materiálů.....	44
Obr. 23: Grafické vyjádření meze tekutosti – Nové Veselí a Rokycansko.	45
Obr. 24: Penetrometr.	46
Obr. 25: Zkušební dílčí vzorky s vlhkostí na mezi plasticity.	46
Obr. 26: Proctorova zkouška – hutnicí přístroj, dílčí vzorek v moždíři před a po zhutnění (zleva).	48
Obr. 27: Proctorova zkouška – seříznutý dílčí vzorek v moždíři, reprezentativní vzorky před vysušením (zleva).	49
Obr. 28: Proctor Standard se saturačními křivkami – Nové Veselí.....	49
Obr. 29: Proctor standard pro všechny vybrané materiály.	50

Obr. 30: Edometrické prstence se zhutněnou testovanou zeminou.	52
Obr. 31: Průběh volného bobtnání v edometru.	53
Obr. 32: Ukázka vzorků zemin po nabobtnání – Chvaletice vlevo, Jindice vpravo.	54
Obr. 33: Grafy bobtnacího potenciálu v závislosti na obsahu vápna testovaných materiálů.	55
Obr. 34: Postup při sestavení edometrické krabice – a) tělo edometrické krabice, b) spodní filtrační destička, c) edometrický prstenec se vzorkem, d) centrážní kroužek, e) horní filtrační destička, f) roznášecí píst s ložiskem.	57
Obr. 35: Sestavená edometrická krabice upevněná v zatěžovacím rámu.	58
Obr. 36: Grafy bobtnacího tlaku v závislosti na obsahu vápna testovaných materiálů.	60
Obr. 37: Zkušební tělísko před zahájením smršťovací zkoušky.	62
Obr. 38: Grafy závislostí poměrného objemového smršťování na vlhkosti – čáry smršťování.	63
Obr. 39: Hrbol u okraje vozovky vzniklý objemovou změnou podkladních vrstev. [23]	72
Obr. 40: Podélné hrboly způsobené objemovými změnami. [23]	73
Obr. 41: Plošná deformace vozovky (vlevo), plošná deformace se ztrátou únosnosti vozovky (vpravo). [23]	73
Obr. 42: Zvlnění cementobetonového krytu. [24]	74
Obr. 43: Šikmá trhлина cementobetonového krytu. [24]	75
Obr. 44: Zvlnění dálnice D47. [26]	76

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty koloidní aktivity jílových minerálů a třídy aktivity. [7].....	20
Tab. 2: Hodnoty CEC pro jílové minerály dle Shawa et al. [9].....	21
Tab. 3: Bobtnající potenciál podle Chena. [11].....	22
Tab. 4: Velikost zrn frakcí. [18]	30
Tab. 5: Konzistence prachů a jílu. [19].....	34
Tab. 6: Základní charakteristiky testovaných materiálů.	39
Tab. 7: Sítový rozbor – Nové Veselí a Rokycansko.....	40
Tab. 8: Hustoměrná zkouška – Nové Veselí.....	42
Tab. 9: Hustoměrná zkouška – Rokycansko.....	43
Tab. 10: Klasifikace zkoušených materiálů dle ČSN EN ISO 14688-2.	44
Tab. 11: Konzistenční meze a indexové vlastnosti testovaných materiálů.....	47
Tab. 12: Výsledky Proctor Standard testovaných materiálů.....	50
Tab. 13: Hodnoty bobtnacího potenciálu neupravených a upravených zemin.....	56
Tab. 14: Hodnoty bobtnacího tlaku neupravených a upravených zemin.....	61
Tab. 15: Výsledné charakteristiky objemového smrštění.	64
Tab. 16: Klasifikace jílových minerálů nepřímými metodami.	65
Tab. 17: Klasifikace bobtnacího potenciálu.	65
Tab. 18: Hodnoty bobtnacího potenciálu podle nepřímých metod.....	66
Tab. 19: Porovnání bobtnacího potenciálu stanoveného empiricky a laboratorně.	66
Tab. 20: Hodnoty bobtnacího tlaku podle nepřímých metod.	67
Tab. 21: Porovnání bobtnacího tlaku stanoveného empiricky a laboratorně.....	67
Tab. 22: Hodnoty meze smrštění podle nepřímých metod.	68
Tab. 23: Porovnání meze smrštění stanovené empiricky a laboratorně.	69
Tab. 24: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa a jejich úpravy dle ČSN 73 6133. [22]	70