



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# LABORATORNÍ ZKOUŠKY DEGRADACE VYBRANÝCH SEDIMENTÁRNÍCH HORNIN V DŮSLEDKU JEJICH SATURACE VODOU

LABORATORY TESTS OF THE DEGRADATION OF SELECTED SEDIMENTARY ROCKS AS A RESULT OF  
THEIR WATER SATURATION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Noémi Nagyová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geotechniky  
Studentka: **Noémi Nagyová**  
Vedoucí práce: **Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Laboratorní zkoušky degradace vybraných sedimentárních hornin v důsledku jejich saturace vodou**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Sedimentární horniny mohou vykazovat významné objemové změny v důsledku jejich cyklické saturace vodou a následného vysychání. Z inženýrského hlediska tedy hrozí, že pokud je např. násypové těleso zhotoveno z podobného materiálu, může docházet k vzniku sedání v koruně náspu nikoliv z důvodu stlačování podloží ale samotného tělesa náspu. Tento mechanicko-hydraulický proces degradace (rozpadu) sedimentů v důsledku změny jejich stupně nasycení je označován pojmem „slaking“. V zahraničí byl "slaking" efekt zkoumán řadou autorů a je spojován s poruchami (nadměrnými sedáními) vysokých násypů např. přehrad. Opodstatněnost tohoto tématu spočívá ve faktu, že zmíněné typy hornin se v našich podmínkách často využívají pro výstavbu zemních těles liniových staveb.

### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

V první části bakalářské práce bude provedena rešerše dostupné literatury v následujících oblastech: a) ozřejmění procesu „slaking“ z geomechanického hlediska, b) sumarizace laboratorních postupů pro měření tohoto jevu a nejdůležitějších výsledků, c) návaznost na chování (poruchy) geotechnických staveb. V druhé části bude realizován soubor zkoušek 1D stlačitelnosti na vzorcích vybraných drcených jílovitých břidlic. Jejich saturace vodou bude provedena při konstantním zatížení. Bude sledována změna objemu (čísla pórovitosti).

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

- KIKUMOTO, Mamoru; PUTRA, Andius Dasa; FUKUDA, Takumi. Slaking and deformation behaviour. Géotechnique, 2016, 66.9: 771-785.

- SAKAI, Takayuki; NAKANO, Masaki. Effects of slaking and degree of compaction on the mechanical properties of mudstones with varying slaking properties. *Soils and Foundations*, 2019, 59.1: 56-66.
- CETIN, HASAN; LAMAN, MUSTAFA; ERTUNC, Aziz. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey. *Engineering geology*, 2000, 56.3-4: 225-242.
- VACULÍKOVÁ, Jana. Rozpad sedimentů díky kapilárně stlačenému vzduchu: přehlížení erozní mechanismus. Diplomová práce UK, 2015.
- SHARMA, Keshab; KIYOTA, Takashi; KYOKAWA, Hiroyuki. Effect of slaking on the engineering behaviour of the crushed mudstones. *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center (ERS)*, 2013, 46: 73-82.

Další podklady budou poskytnuty v průběhu řešení závěrečné práce.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 27. 11. 2023

L. S.

---

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.  
vedoucí ústavu

---

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá laboratorními testy vybraných sedimentárních hornin, je tvořena ze dvou částí, teoretické a praktické. V první části je popsán proces „slaking“, při kterém se geomateriály rozpadají při opakovaných cyklech nasycení a vysušení. Následně jsou popsány typy „slakingu“, možné hlavní příčiny způsobující degradaci a jednotlivé metody pro měření tohoto jevu.

V praktické části byly provedeny zkoušky jednoosé stlačitelnosti a zrnitostní rozbory. Zkoušky stlačitelnosti byly do předepsaného napětí prováděny standardním způsobem. V následujícím kroku zatížení bylo přistoupeno k saturaci vzorku při udržování konstantního zatížení a hodnoty objemové změny byly nepřetržitě měřeny. Po ustálení hodnot bylo v zatěžování pokračováno a po zbytek zkoušky byl vzorek udržován ponořený pod vodní hladinou. V rámci navrženého testovacího programu byl zhodnocen vliv napětí při saturaci, doba saturace, počáteční číslo pórovitosti a rozměry vzorků. Granulometrické rozbory byly provedeny před a po zkouškách stlačitelnosti. Bylo tak možné určit změnu struktury projevující rozpadem částic v důsledku „slaking“ efektu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Slaking, sedimentární hornina, cykly nasycení a vysušení, degradace, laboratorní zkoušky, zrnitostní rozbory, jednoosá stlačitelnost, změna objemu, změna struktury



## **ABSTRACT**

The work deals with laboratory tests of selected sedimentary rocks and consists of two parts, theoretical and practical. The first part describes the process of "slaking," in which geomaterials disintegrate during repeated cycles of wetting and drying. Then the appearances and types of "slaking," are described as same as the possible main causes of degradation, and the various methods for measuring this phenomenon are described.

In the practical part, one-dimensional compressibility tests and grain size analyses were carried on. Compressibility tests were performed in the standard way until the prescribed pressure. In the next loading step, the sample was saturated while maintaining constant pressure, and the volumetric changes were continuously measured. Loading continued when the values were stabilized and for the rest of the test, the sample was kept submerged under the water surface. Within the proposed testing program several tasks were evaluated. One of them was the influence of the pressure during saturation, as same as the duration of saturation, the initial porosity number and the sample dimensions. Grain size analyses were performed before and after the compressibility tests. After all this it was possible to determine the structural changes performing by particle disintegration due to the "slaking" effect.

## **KEYWORDS**

Slaking, sedimentary rock, cycles of wetting and drying, degradation, laboratory tests, grain size analyses, one-dimensional compressibility, volume change, structural change

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NAGYOVÁ, Noémi. *Laboratorní zkoušky degradace vybraných sedimentárních hornin v důsledku jejich saturace vodou*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Laboratorní zkoušky degradace vybraných sedimentárních hornin v důsledku jejich saturace vodou* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 5. 2024

---

Noémi Nagyová  
autor

# **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Laboratorní zkoušky degradace vybraných sedimentárních hornin v důsledku jejich saturace vodou* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 5. 2024

---

Noémi Nagyová  
autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Juraji Chalmovskému, Ph.D., bez jeho rad by tato práce nevznikla. Dále děkuji své rodině, přátelům a kolegům za pomoc a podporu za celou dobu studia.

# Obsah

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....</b>	<b>9</b>
2.1 SLAKING .....	9
2.2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ JEVU .....	11
2.2.1 <i>Slake durability test (zkouška odolnosti proti rozbředavosti)</i> .....	11
2.2.2 <i>Slake index test</i> .....	12
2.2.3 <i>Accelerated slaking test (zrychlený test rozpadu)</i> .....	12
2.2.4 <i>Zkouška jednoosé stlačitelnosti</i> .....	12
2.2.5 <i>Zkoušky pro zjištění charakteru povrchu materiálu, chemického a mineralogického rozboru</i> .....	13
<b>3 TESTOVACÍ PROGRAM.....</b>	<b>14</b>
3.1 INŽENÝRSKO-GEOLOGICKÝ POPIS LOKALITY ODBĚRU VZORKU .....	14
3.2 TESTOVACÍ PLÁN ZKOUŠEK .....	15
3.3 METODIKA ZKOUŠEK, JEJICH PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ .....	15
3.3.1 <i>Příprava vzorků</i> .....	15
3.3.2 <i>Granulometrický rozbor</i> .....	16
3.3.3 <i>Zkouška jednoosé stlačitelnosti</i> .....	17
<b>4 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ROZBOR .....</b>	<b>21</b>
4.1 GRANULOMETRICKÝ ROZBOR.....	21
4.2 ZKOUŠKA JEDNOOSÉ STLAČITELNOSTI .....	22
4.2.1 <i>Změna napětí při saturaci</i> .....	23
4.2.2 <i>Změna doby zatížení při saturaci</i> .....	25
4.2.3 <i>Změna rozměrů vzorků</i> .....	27
4.2.4 <i>Změna počátečního čísla pórovitosti</i> .....	29
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>31</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>32</b>
<b>7 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>34</b>
<b>8 SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>35</b>
<b>9 SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>36</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>37</b>

# 1 ÚVOD

Cílem této práce je vysvětlení mechanicko-hydraulického procesu, „slaking“ z geomechanického hlediska, shrnutí laboratorních metod pro měření tohoto jevu a nejdůležitější výsledky. Dále bylo záměrem práce zjistit typy mechanismů, které mohou být hlavními příčinami rozpadu materiálu pomocí procesu „slaking“.

Hlavním cílem této práce bylo provést zkoušky jednoosé stlačitelnosti a zrnitostní rozbor, vyhodnotit výsledky a porovnat s některými daty vybrané literatury. Zkoušky jsou provedeny na drcených vzorcích jílovitých břidlic, které jsou obvyklým materiálem a často se používají pro výstavbu zemních těles v dopravním inženýrství.

K provádění zkoušek budou použity přístroje geotechnické laboratoře na ústavu geotechniky Fakulty stavební VUT. Konkrétně se budou granulometrické zkoušky provádět síťovým rozborem. Zkoušky stlačitelnosti v tzv. edometrickém přístroji za upravených podmínek.

## 2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

### 2.1 Slaking

O „slakingu“ bylo napsáno množství prací v souvislosti s těžbou uhlí (Berkovitch et al., 1959, Taylor & Spears, 1970, Taylor, 1988), se stabilitou přírodních a umělých svahů (Moriwaki & Mitchell, 1977), s rozpadem a erozí povrchu (Arulandan & Heinzen, 1977). Slaking je definován jako rozpad materiálu v důsledku cyklů sušení a zvlhčení (Taylor, 1988, Mitchell, 2005, Kikumoto M. et al., 2016). Za „slaking“ mohou být odpovědné i cykly mrznutí a tání, smršťování a bobtnání (Tindall et al., 1999), množství a druh jílových minerálů (Badger et al., 1956, Czerewko & Cripps, 2001, Gautam & Shakoore, 2013). Obecně lze výraz definovat jako rozpad, kde má význam průnik vody či vlhkosti do struktury materiálu.

Čím je počáteční vlhkost materiálu nižší, tím je materiál náchylnější k rozpadu (Cernuda et al., 1954, Arulandan & Heinzen, 1977, Moriwaki & Mitchell, 1977). Slaking také závisí na velikosti suché objemové hmotnosti. Čím je objemová hmotnost větší, tím je materiál odolnější vůči „slakingu“ (Seedsman, 1986).

V literatuře byly popsány čtyři typické vzhledy režimů makroskopicky odlišných typů „slakingu“ (Obr. 1), (Moriwaki a Mitchell, 1977, Mitchell, 1993, Sadisun et al., 2005):

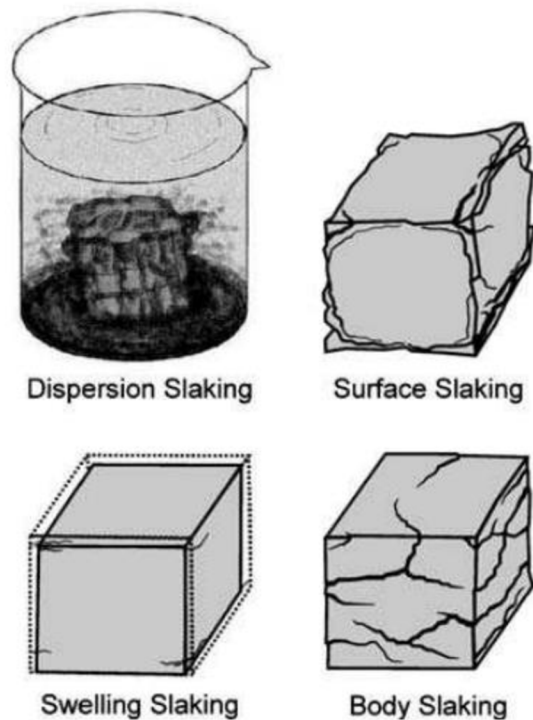
„*Dispersion slaking*“ – vzorek se po nasycení vodou rozpadá a vytvoří zakalení kapaliny bez zjevných makroskopických prasklin materiálu,

„*Surface slaking*“ – vzorek se po nasycení vodou rozpadá na kousky, rozpad postupuje od povrchu dovnitř,

„*Swelling slaking*“ – vzorek po nasycení vodou zvětší svůj objem a rozpadne se na malé částice,

„*Body slaking*“ – vzorek nasycený vodou popraská a rozpadne se na bloky.





Obr. 1 Makroskopicky odlišné typy slakingu (Sadisun et al., 2005)

Mechanismy, které mohou být hlavními příčinami rozpadu materiálu pomocí „slakingu“ jsou:

*Kapilárně-pneumatický rozpad* – vzduch stlačený kapilární vodou, která vstupuje do jednotlivých pórů při nasycení, způsobí stlačení vzduchu původně vyplňujícího póry (Arulandan & Heinzen, 1977, Moriwaki & Mitchell, 1977, Taylor, 1988, Tindall et al., 1999). To vede k porušení povrchu materiálu a jeho rozpadu.

*Přítomnost expanzních jílových minerálů* – nejcharakterističtější vlastností je jejich schopnost absorbovat vodu mezi vrstvami, což způsobuje silné odpudivé síly a vede k expanzi jílu. Když jsou tyto minerály namočeny, bobtnají, a jakmile vyschnou, zmenšují objem, čímž zanechávají v půdě velké trhliny.

*Dopad dešťových kapek* – „slaking“ bude nejvíce působit na povrchu vysušeném sluncem při silných deštích. Vstupující voda působí jako „tmelící film“ a zpomaluje rozpad, ale když se tlak vzduchu unikajícího ze zeminy překročí únosnou mez, dojde k rozpadu (Cernuda et al., 1954).

V literatuře je popsáno mnoho dalších mechanismů, které přímo či nepřímo ovlivňují „slaking“. Většina autorů však popisuje „slaking“; jako destruktivní proces způsobený tlakem unikajícího kapilárně stlačeného vzduchu při zatopení vodou, zatímco ostatní mechanismy pouze ovlivňují rychlost eroze.

## 2.2 Možnosti měření jevu

### 2.2.1 Slake durability test (zkouška odolnosti proti rozbředavosti)

Slouží ke stanovení stálosti a odolnosti materiálu. Deset úlomků vysušeného materiálu o hmotnosti 40-60 g se umístí do testovacího bubnu vyrobeného ze síta a nechají se sušit v peci do dosažení konstantní hmotnosti. Zváží se hmotnost a nechá se chladnout. Poté je buben vložen do otáčecího mechanismu a rotuje ponořená v destilované vodě. Provádějí se dva cykly, kdy dochází k opětovnému vysušení a smáčení. Výsledkem je hmotnost zbývajících horniny v bubnu po prvním a druhém cyklu udávaná v procentech původní hmotnosti. Vzorky po zkoušce se vizuálně zařazují do jednotlivých typů porušení. Touto metodou byly testovány vzorky břidlic, jílovců, prachovců a opuk (Dick & Sahkoo, 1992, Franklin & Chandra, 1972, Santi & Koncagul, 1996).



Obr. 2 Přístroj na Slake durability test – Ústav geotechniky Fakulta stavební VUT v Brně

### *2.2.2 Slake index test*

Šest vzorků o váze 150 g je 8 hodin sušeno v peci a zaznamenána jejich hmotnost. Každý vzorek je umístěn v samostatné nádobě, zalit destilovanou vodou a pozorován 6 hodin, poté je přemístěn na síto, promyt, vysušen v peci a zvážen. Slake index se spočítá jako celková ztráta váhy v procentech všech šesti vzorků (Santi, 1998).

### *2.2.3 Accelerated slaking test (zrychlený test rozpadu)*

Zrychlený test rozpadu sleduje odolnost proti „slaking“ rozdrčeného materiálu za neuzavřených (beznapěťových) podmínek. Rozdrčený jílovec se vysouší v troubě, poté se umístí do nádoby a zaznamená se hmotnost. Při procesu se do nádoby nalila destilovaná voda, dokud byl vzorek plně ponořen a pak byl udržován při konstantní teplotě 20 °C po dobu 24 hodin. Následně byla voda vypuzena z nádoby s ohledem na zachování původního uspořádání částic, po čemž byl vzorek sušen v troubě po dobu 24 hodin při teplotě 90 °C. Postup je opakován až do dosažení stanoveného počtu cyklů. Po posledním cyklu je rozložení velikosti částic vzorku stanoveno pomocí síťového rozboru (Kikumoto et al., 2016).

### *2.2.4 Zkouška jednoosé stlačitelnosti*

Zkouškou jednoosé stlačitelnosti se pozoruje objemová změna materiálu. Provádí se to pomocí edometrické zkoušky, při které se použije vzorek zeminy nízkého válce. Vzorek se umístí při počáteční vlhkosti do edometrického prstence mezi porézní destičky v edometrické krabici, aby se zajistila drenáž vzorku. Poté je edometrická krabice umístěna do přístroje a přitížena postupně svislým tlakem. Po dosažení předepsaného svislého tlaku se prováděly cykly nasycení a vysušení. Nasycení probíhalo pomocí rozdílu hladiny vody v nádrži a krabici na vzorek, dokud nebyl plně ponořen. Po plném nasycení následoval proces sušení odtahem vody, pak okolo ocelového prstence se umístily pytlíky se silikagelem (Kikumoto et al., 2016).

## 2.2.5 Zkoušky pro zjištění charakteru povrchu materiálu, chemického a mineralogického rozboru

### *Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)*

Je jím zjišťována charakteristika povrchu granulovaných materiálů s použitím stejné velikosti částic, jako při analýze XRF. Sleduje geometrii pórů, velikost pórů a drsnost jejich hran (Kikumoto et al., 2016).

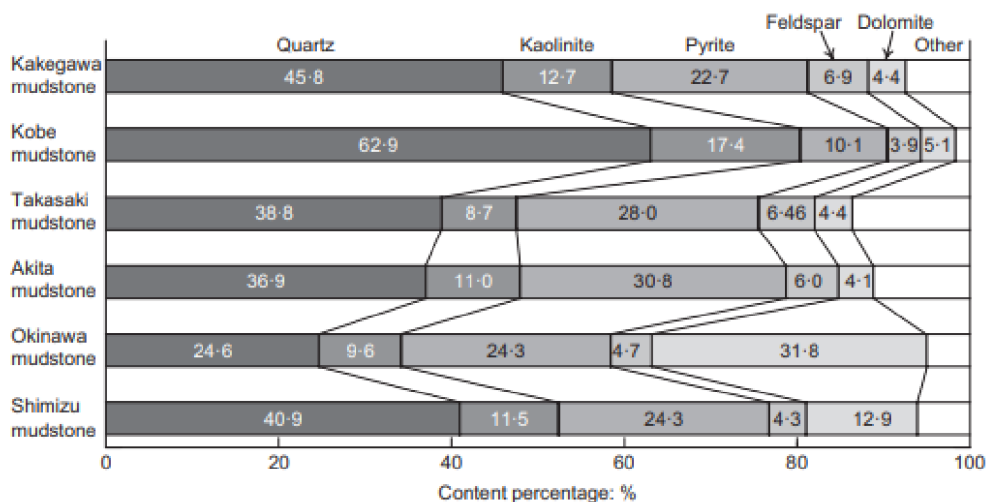
### *Rentgenová fluorescenční analýza (XRF)*

XRF slouží k určení chemických prvků nacházejících v jílovcích. Pro účel je každý vzorek vysušen v troubě a poté drcen tak, aby vznikly jednotlivé částice o průměru 0,85-2,00 mm.

### *Rentgenová difrakce (XRD)*

XRD se provádí k identifikaci složení jílovců a uhličitánovou mineralogii rozdrcených vzorků břidlic. Vzorky jsou rozdrceny na jemné částice a poté analyzovány pomocí XRD. Získané rentgenové difraktogramy jsou porovnané se standardními vzorky k detekci typů a množství materiálu (Kikumoto et al., 2016).

Na Obr. jsou výsledky mineralogického složení šesti vzorků z Japonska (Kikumoto et al., 2016).

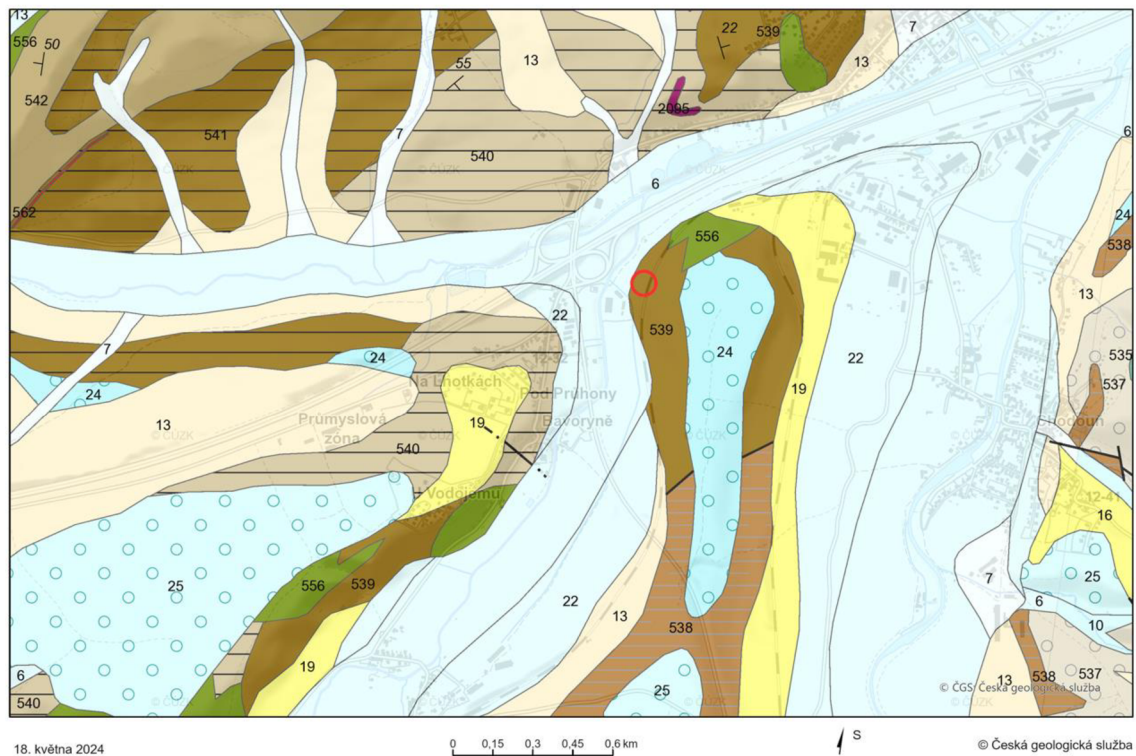


Obr. 3 Výsledek XRD vzorků z Japonska (Kikumoto et al., 2016)

## 3 TESTOVACÍ PROGRAM

### 3.1 Inženýrsko-geologický popis lokality odběru vzorku

Místo odebraných vzorků spadá do Českého masivu, podloží je tvořeno břidlicí, prachovci, pískovci a vložkami bazaltů. Odebrané vzorky materiálu pro zkoušky se zařaduje do břidlic bohdaleckého souvrství. Nejčastěji je zastoupeno černošedými jílovitými břidlicemi bohdaleckými, s lupenitou odlučností a s obsahem organického uhlíku.



Obr. 4 Geologická mapa oblasti odebraného vzorku (ČGS, 2024)

**KVARTÉR:** 6 – nivní sediment, 7 – smíšený sediment, 10 – hlína, písek, štěrk, 13 – kamenitý až hlinito-kamenitý sediment, 16 – spraš a sprašová hlína, 19 – sprašová hlína, 22 – písek, štěrk, 24 – písek, štěrk, 25 – písek, štěrk,

**SILUR:** 535 – bazalty (diabasy),

**ORDOVÍK:** 538 – zelenavé jílovce, jílovité břidlice, 539 – tmavošedé jílovce, prachovce, 540 – prachovce, tmavé břidlice, 541 – černošedé jílovité břidlice, 542 – střídání drob, pískovců, prachovců a jílovitých břidlic, 556 – bazalty a pyroklastika včetně izolovaných výskytů ve spodním a svrchním ordovíku, 562 – železné rudy, 537 – pískovce, prachovce, jílovité břidlice, na bázi diamiktity,

**PALEOZOIKUM:** 2095 – porfyrit, dolerit

## 3.2 Testovací plán zkoušek

V rámci této práce byla provedena zkouška stlačitelnosti a síťový rozbor na materiálu jílovité břidlice.

Zkoušení probíhalo v laboratoři ústavu geotechniky na Fakultě stavební VUT. Ke zkouškám stlačitelnosti byly použity edometrické přístroje, k rozboru zrnitosti byla použita soustava sít a vibračních zařízení. Celkově bylo provedeno deset zkoušek dle různých vstupních parametrů.

charakteristika vzorku	označení	průměr	výška	počáteční vlhkost	napětí
jílovitá břidlice – hutněná	EOD 1.2.24	50 mm	20 mm	6 %	300 kPa
	EOD 1.2.24	50 mm	20 mm	6 %	
	EOD 8.2.24	50 mm	20 mm	6 %	200 kPa
	EOD 12.2.24	50 mm	20 mm	6 %	
	EOD 20.2.24	50 mm	20 mm	6 %	100 kPa
	EOD 26.2.24	50 mm	20 mm	6 %	
	EOD 4.3.24	112 mm	25 mm	6 %	300 kPa
	EOD 7.3.24	100 mm	20 mm	6 %	
	EOD 14.3.24	50 mm	20 mm	6 %	
jílovitá břidlice – volně sypaná	EOD 4.4.24	50 mm	20 mm	6 %	300 kPa

Tab. 1 Plán laboratorních zkoušek

## 3.3 Metodika zkoušek, jejich provedení a vyhodnocení

### 3.3.1 Příprava vzorků

Zrna poloskalních hornin o průměru do 50 mm byla rozdrčena v drtiči na frakci 0-4 mm. Edometrické zkoušky byly prováděny s nejmenším průměrem 50 mm a počáteční výškou 20 mm. V normě (ČSN EN ISO 17892-5, 2017) se uvádí požadavek na maximální velikost zrna testované zeminy, která nemá přesáhnout 1/5 nejmenšího rozměru testovaného vzorku.

### 3.3.2 Granulometrický rozbor

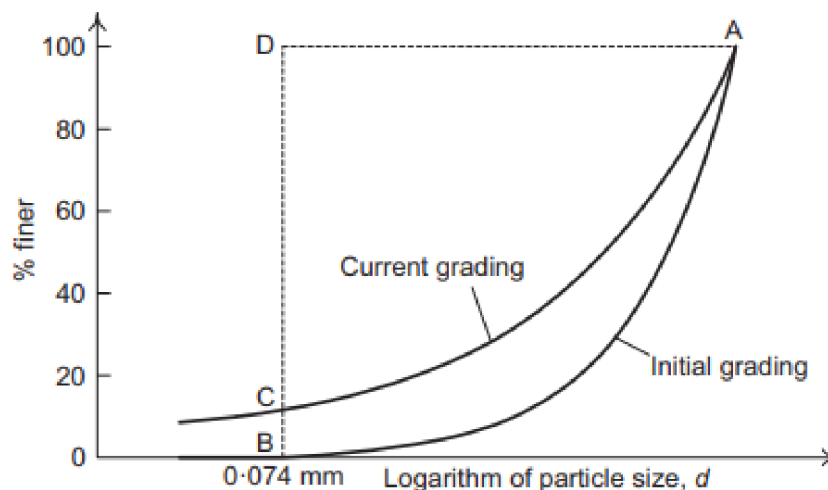
Vysušená zemina se nasype do sady sít, kde nejhrubší síta jsou nahoře a postupně směrem níž se síta zjemňují. Nejjemnější síto má velikost oka síta 0,063 mm. Po protřepání se zváží jednotlivé zůstatky na sítích.

Vyhodnocením získáme procentuální hodnotu propadu sítím, která je definováno vztahem:

$$100 \% - \frac{\text{hmotnost zstatku na síti} \times 100 \%}{\text{celková hmotnost vzorky}} \quad (3.1)$$

Graficky se vyhodnotí v zobrazení *propad sítím vs. log d*. Výsledek lze zkoumat prostřednictvím rozdílu v relativním rozpadu, Hardinovým parametrem rozbřídavosti  $Br$  (Hardin, 1985), který byl původně navržen k reprezentaci rozložení velikosti částic u zemin projevující rozpad částic a je definováno následujícím vztahem:

$$Br = \frac{ABC}{ABD} \quad (3.2)$$



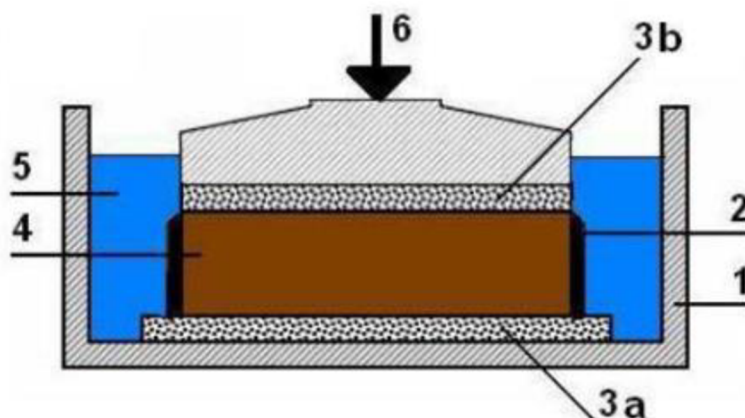
Obr. 5 Definice Hardinova parametru porušení  $Br$  (Hardin, 1985)



### 3.3.3 Zkouška jednoosé stlačitelnosti

Zařízení sloužící k měření stlačitelnosti zeminy je edometr. V edometrické krabici probíhá jednoosé stlačení a konsolidace vzorku zeminy. V tomto zařízení je zajištěno pouze svislé stlačení, přičemž vodorovné přetvoření je omezeno, což vytváří podmínky pro trojosou napjatost. Konsolidace zpravidla může probíhat v zemině trojrozměrně, ale v případě edometru je proudění vody při konsolidaci uvažováno pouze ve svislém směru. Důležitou vlastností edometru je také postupné zatěžování vzorku pomocí zatěžovacích kroků.

Nezákladnější část je edometrická krabice, na Obr. 6 můžeme vidět schéma. Do krabice se na porézní destičku umístí vzorek zeminy v edometrickém prstenci, který zabraňuje radiální deformaci v průběhu zkoušky (Obr. 7).



Obr. 6 Schéma edometrické krabice (1-edometrická krabice, 2-edometrický prstenec, 3-porézní destičky, 4-vzorek zeminy, 5-voda, 6-svislé zatížení) (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace, BFA002, podklady do cvičení, 2024)

Zemina je osazená při počáteční vlhkosti. Na horní plochu se také umístí porézní destička, které ohraničují vzorek a umožňují svislé proudění vody. Z obou stran vzorku se ještě umístí filtrační papírky, které zabraňují vyplavování částic a nezanáší porézní destičky. Následně probíhá zatěžování po krocích až do dosažení stanoveného svislého tlaku, kdy se krabice zalije vodou. Poté se pokračuje dál postupným zatěžováním už při nasyceném vzorku. Je nutné sledovat a zaznamenávat stlačení vzorku pomocí vhodného měřidla.





Obr. 7 Vzorek v prstenci před zkouškou,  $d = 50 \text{ mm}$ ,  $v = 20 \text{ mm}$



Obr. 8 Vzorek po zkoušce stlačitelnosti,  $d = 50 \text{ mm}$ ,  $v = 20 \text{ mm}$

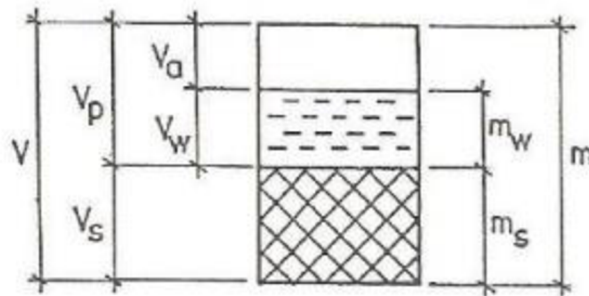
Vyhodnocením edometrické zkoušky získáváme několik klíčových parametrů, z nichž je číslo stlačitelnosti  $C_c$ . Tento parametr získáváme z naměřených závislostí. Číslo stlačitelnosti  $C_c$  se vypočítá ze vztahu mezi číslem pórovitosti  $e$  a svislým efektivním napětím  $\sigma'_a$ . Číslo pórovitosti  $e$  je definováno následujícím vztahem:

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n}{1 - n} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (3.3)$$

kde  $V_p$  je objem pórů a  $V_s$  je objem skeletu (pevných částic) vzorku zeminy (Obr. 8),  $n$  je pórovitost,  $\rho_s$  je hustota pevných částic a  $\rho_d$  je objemová hmotnost vysušené zeminy.

Pro účely vyhodnocení se však používá následující vztah:

$$e = v - 1 \quad (3.4)$$



Obr. 9 Trojfázový model zeminy (Fyzikálně indexové vlastnosti zemin, BFA002, podklady do cvičení, 2024)

pomocí kterého vypočteme číslo pórovitosti kdykoli v průběhu zkoušky, kde  $v$  je specifický objem, pro který platí:

$$v = \frac{V}{V_s} \quad (3.5)$$

kde  $V$  je objem v průběhu zkoušky a  $V_s$  objem pevné fáze zeminy vzorku na konci zkoušky, pro který platí:

$$V_s = \frac{V_f}{v_f} \quad (3.6)$$

kde  $V_f$  je objem vzorku na konci zkoušky a  $v_f$  je specifický objem vzorku na konci zkoušky, pro které platí:

$$V_f = \frac{\pi d^2}{4} (h_0 - s_a) \quad (3.7)$$

$$v_f = 1 + e_f \quad (3.8)$$

kde  $d$  je průměr vzorku,  $h_0$  je původní výška vzorku,  $s_a$  je stlačení na konci zkoušky,  $e_f$  je číslo pórovitosti vzorku na konci zkoušky, pro které platí:

$$e_f = w_f \times G_s \quad (3.9)$$

kde  $w_f$  je vlhkost vzorku zeminy na konci edometrické zkoušky a  $G_s$  je specifická hmotnost pevné fáze zemin, pro kterou platí:

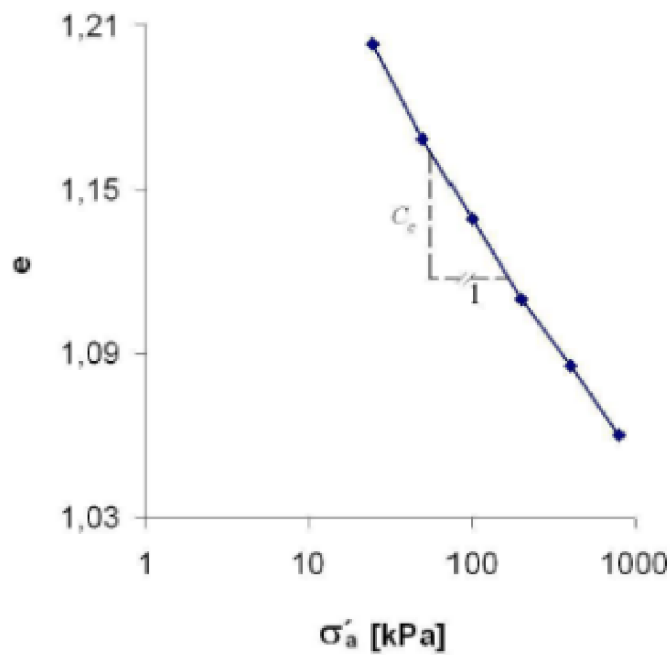
$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3.10)$$

kde  $\rho_w$  je hustota vody.

Pro číslo stlačitelnosti  $C_c$  platí vztah:

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_a} \quad (3.11)$$

kde  $\Delta$  značí přírůstky, resp. úbytky veličin.



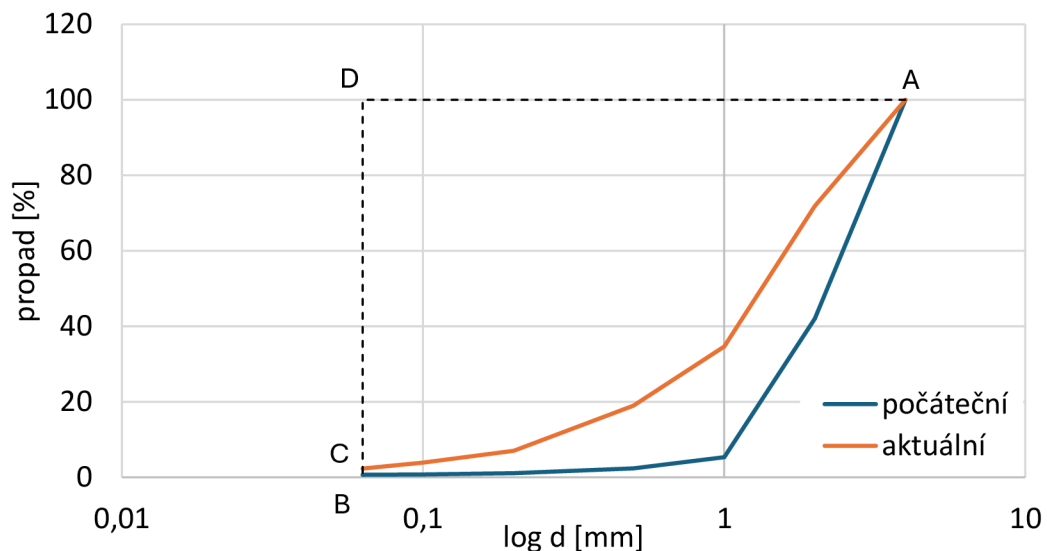
Obr. 10 Závislost čísla pórovitosti  $e$  na svislém efektivním napětí  $\sigma'_a$  (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace, BFA002, podklady do cvičení, 2024)

## 4 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ROZBOR

### 4.1 Granulometrický rozbor

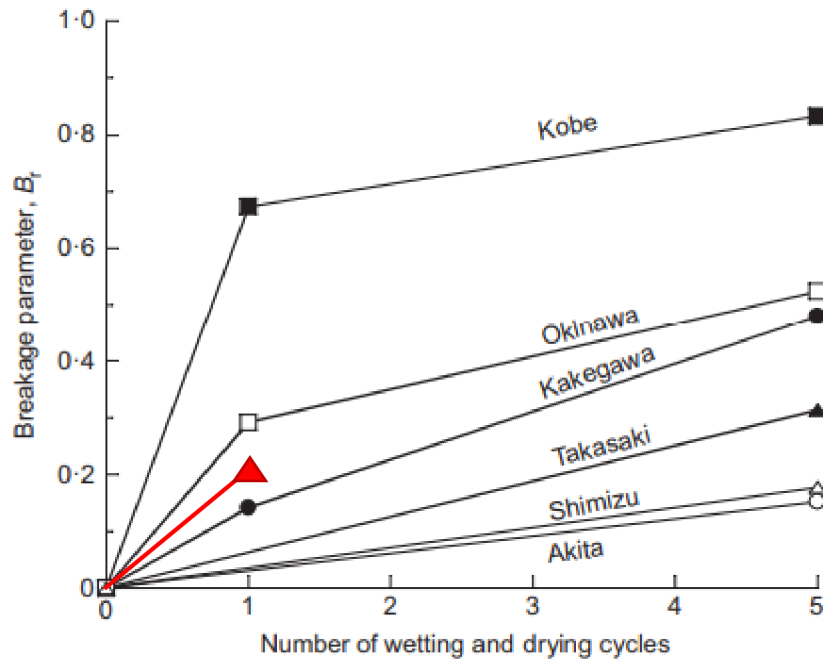
Vysušená zemina o hmotnosti 265 g byla nasypaná do sady sít o průměru ok 0,063-8 mm. Připevnila se do vibračního zařízení a byla protřepaná na 10 minut. Po protřepání byly jednotlivé zůstatky na sítích zváženy. Postup byl opakován i na vzorcích vysušených po edometrické zkoušce.

Z níže zobrazeného grafu se vypočítal podíl ploch ABC a ABD pro získání hodnoty  $B_r$ , která se rovná 0,21 a je vypočteno dle rovnice (3.2).



Obr. 11 Vyhodnocení granulometrické zkoušky dle Hardinova parametru porušení – závislost propad vs. log d

Na Obr. 11 vidíme vykreslenou výslednou hodnotu v porovnání s výsledkem z literatury, kde dle zhodnocení, materiál Kobe a Okinawa mají největší změnu, zjemnění částic (Kikumoto et al., 2016).



Obr. 12 Výsledek variace Hardinova parametru porušení  $B_r$  s cykly nasycení a vysoušení (Kikumoto et al., 2016)

## 4.2 Zkouška jednoosé stlačitelnosti

Bylo provedeno deset edometrických zkoušek, při různých vstupních parametrech. Při každé zkoušce byl použit stejný postup. V první fázi bylo na vzorek s počáteční vlhkostí nanášeno stanovené svislé napětí. V této fázi nebyl vzorek zalitý vodou. Zatížení bylo na vzorek nanášeno v krocích, každé další napětí byl dvojnásobkem předchozího napětí. V druhé fázi bylo udržováno napětí, na počátku byl vzorek zalit vodou a po zbytek zkoušky byl udržován ponořený pod vodní hladinou. Ve třetí fázi byl vzorek v několika krocích přitěžován na vyšší hodnoty napětí. Každý zatěžovací krok trval 24 hodin, pokud to nebylo změněno podle vstupních parametrů.

Výsledky jednotlivých sad zkoušek se zobrazují vždy v třech grafech. První graf zobrazuje závislost  $s_a$  vs.  $t$ , druhý graf  $\Delta\varepsilon$  vs.  $\sigma'_{sat}$ , třetí graf výsledky  $C_c$  před saturací a po saturaci vzorku.

#### 4.2.1 Změna napětí při saturaci

V první sadě zkoušek byly testovány tři vzorky, hutněných po dvou vrstvách. Při počáteční vlhkosti bylo nanесeno zatížení 300 kPa, 200 kPa, 100 kPa a následně nasyceny vodou.

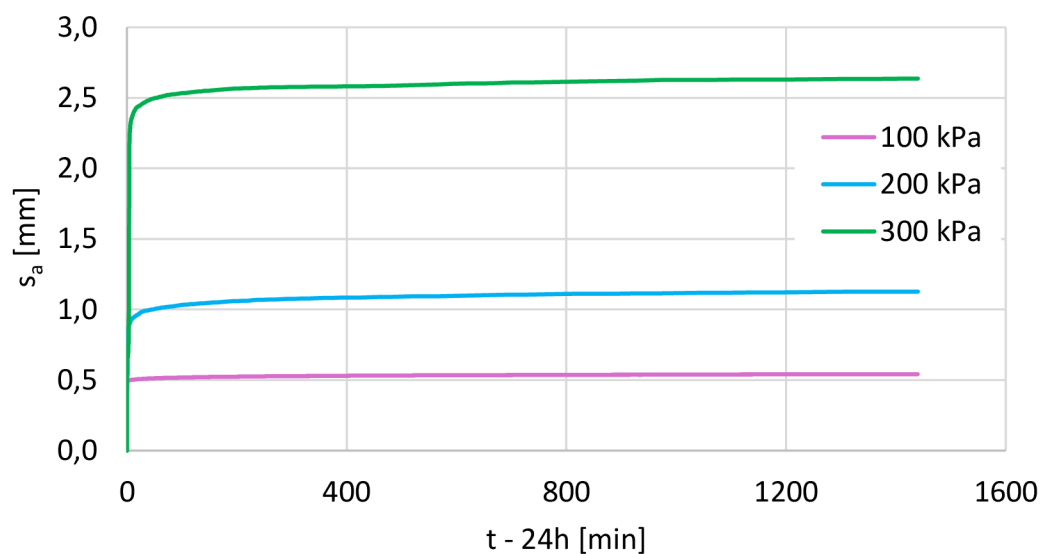
V následujících tabulkách vidíme vypočtené hodnoty přírůstku objemové změny od počátku saturace (Tab.2) a čísla stlačitelnosti materiálu před saturací  $C_{c1}$  a po saturaci  $C_{c2}$  (Tab. 3).

$\sigma'_{sat}$ [kPa]	100 kPa	200 kPa	300 kPa
$\Delta\varepsilon_{sat}$ [-]	0,002	0,030	0,099

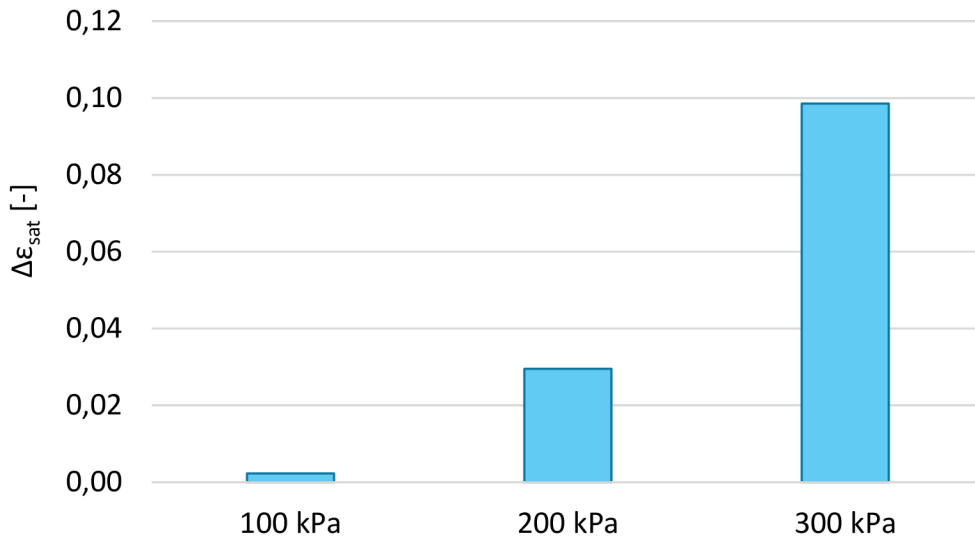
Tab. 2 Hodnoty přírůstku objemové změny  $\Delta\varepsilon_{sat}$  – změna napětí

$\sigma'$ [kPa]	100 kPa	200 kPa	300 kPa
$C_{c1}$	0,035	0,044	0,042
$C_{c2}$	0,312	0,365	0,426

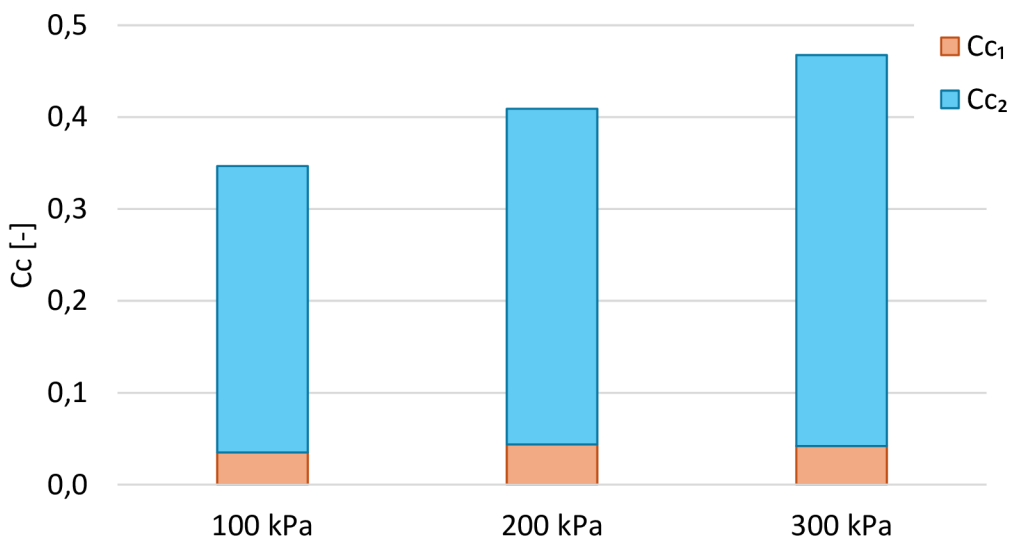
Tab. 3 Čísla stlačitelnosti  $C_{c1}$  a  $C_{c2}$  – změna napětí



Obr. 13 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost  $s_a$  vs.  $t$



Obr. 14 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost  $\Delta \varepsilon_{sat}$  vs.  $\sigma'_{sat}$



Obr. 15 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost  $C_c$  vs.  $\sigma'$

Na grafickém znázornění můžeme vidět, že výsledky po saturaci vzorků úměrně narůstají od zatížení 100 kPa po 300 kPa. Z výsledků hodnot čísla stlačitelnosti můžeme pozorovat, že hodnoty  $C_{c1}$  jsou blízké k sobě, což může znamenat, že materiál se stejnou počáteční vlhkostí, objemu materiálu a hustotou pevných částic se bude chovat podobně, ale po saturaci vodou degradace materiálu bude záviset i na velikosti zatížení.

#### 4.2.2 Změna doby zatížení při saturaci

Ve druhé sadě byly další tři vzorky testovány podle stejných vstupních parametrů, ale doba zatěžovacího kroku byla prodloužena na 72 hodin.

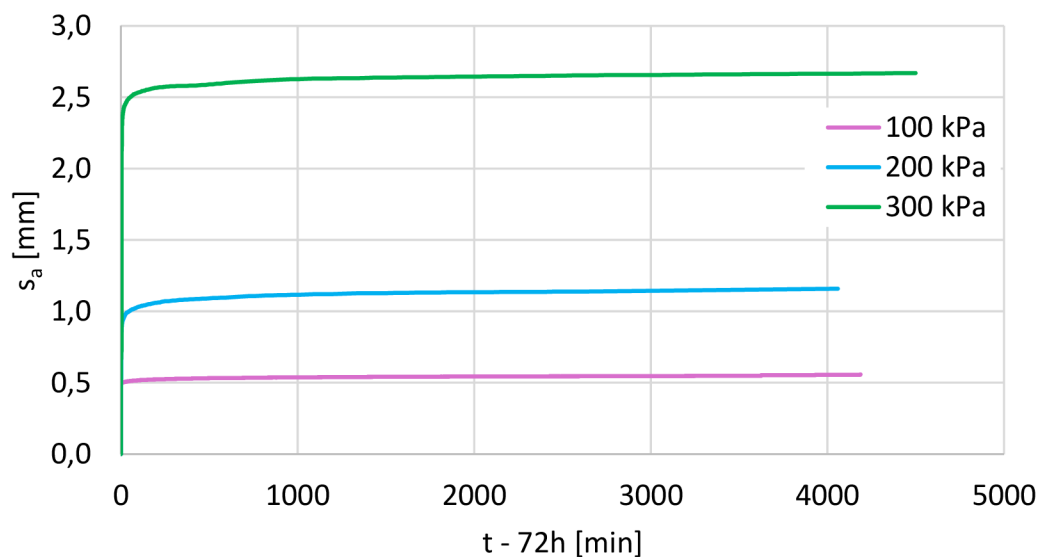
V následujících tabulkách vidíme vypočtené hodnoty přírůstku objemové změny od počátku saturace po dobu 72 hodin (Tab. 4) a čísla stlačitelnosti materiálu před saturací  $C_{c1}$  a po saturaci  $C_{c2}$  (Tab. 5).

$\sigma'_{\text{sat}}$ [kPa]	100 kPa	200 kPa	300 kPa
$\Delta\varepsilon_{\text{sat},72}$ [-]	0,017	0,031	0,100

Tab. 4 Hodnoty přírůstku objemové změny  $\Delta\varepsilon_{\text{sat},72}$  – změna doby napětí

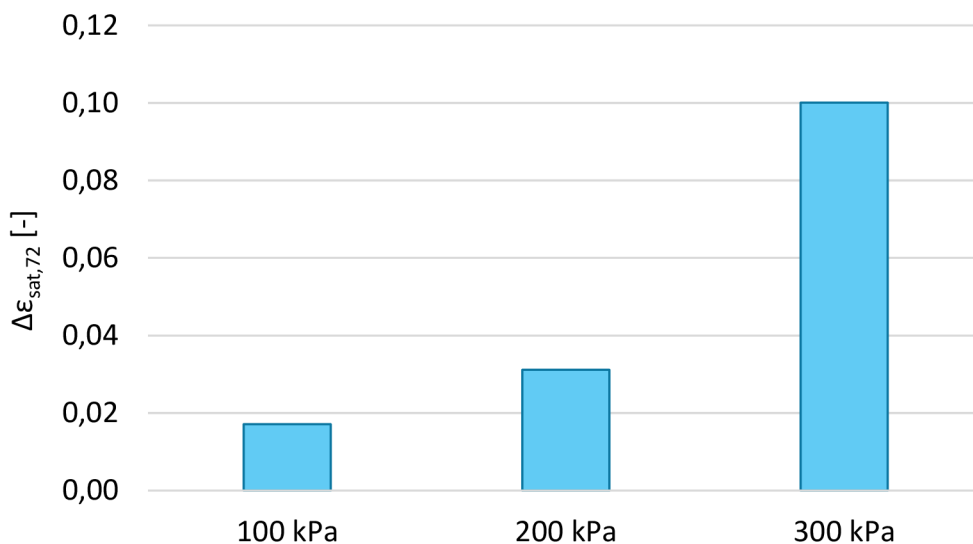
$\sigma'$ [kPa]	100 kPa	200 kPa	300 kPa
$C_{c1}$	0,035	0,044	0,042
$C_{c2}$	0,303	0,360	0,421

Tab. 5 Čísla stlačitelnosti  $C_{c1}$  a  $C_{c2}$  – změna doby napětí

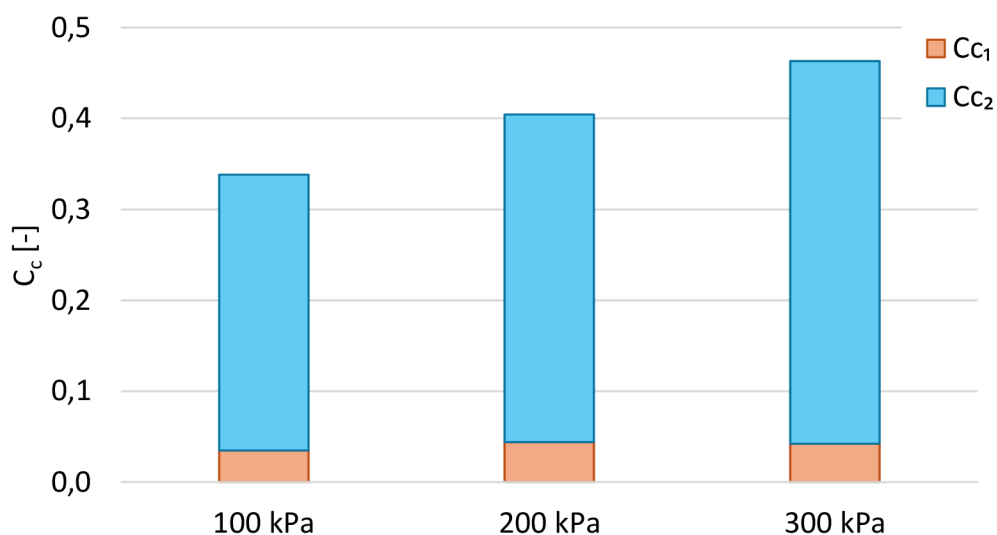


Obr. 16 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost  $s_a$  vs.  $t$





Obr. 17 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost  $\Delta \varepsilon_{sat,72}$  vs.  $\sigma'_{sat}$



Obr. 18 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost  $C_c$  vs.  $\sigma'$

Při zatížení 200 kPa a 300 kPa hodnota přírůstku objemové změny se jenom minimálně zvýšila po prodloužení doby zatěžovacího kroku, ale hodnota při zatížení 100 kPa se zvýšila skoro o deseti násobek. Tato změna by se mohla zhodnotit tím, že zatížení 100 kPa je příliš malé a může mít jiný vliv na výslednou hodnotu objemové změny.

### 4.2.3 Změna rozměrů vzorků

V třetí sadě byly tři vzorky různého rozměru, průměr 50 mm, 100 mm výšky 20 mm a vzorek průměru 112 mm a výšky 25 mm.

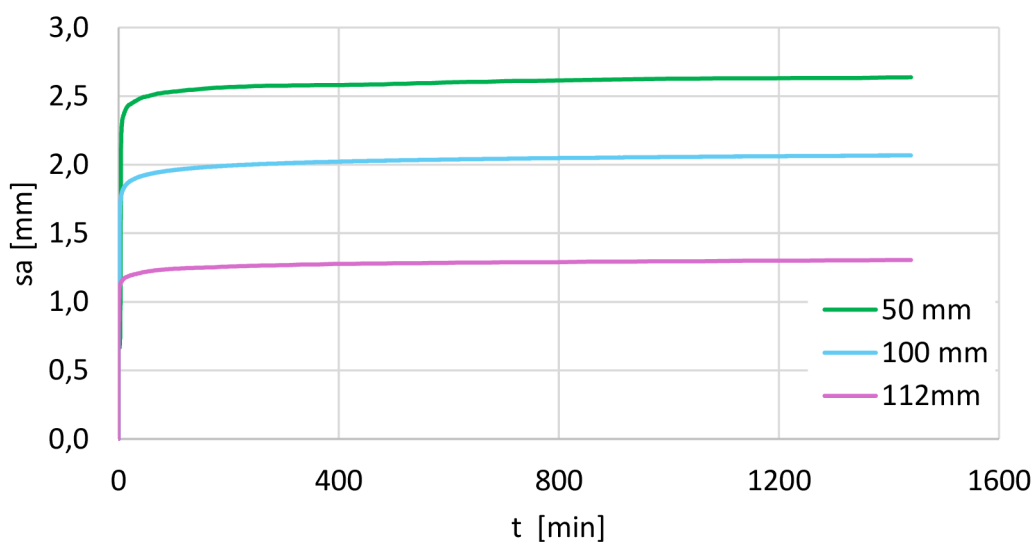
V následujících tabulkách vidíme vypočtené hodnoty přírůstku objemové změny (Tab. 6) a čísla stlačitelnosti materiálu před saturací  $C_{c1}$  a po saturaci  $C_{c2}$  (Tab. 7) na základě změny průměru a výšky vzorku.

ø vzorku [mm]	50 mm	100 mm	112 mm
$\Delta\varepsilon_{sat}$ [-]	0,099	0,045	0,020

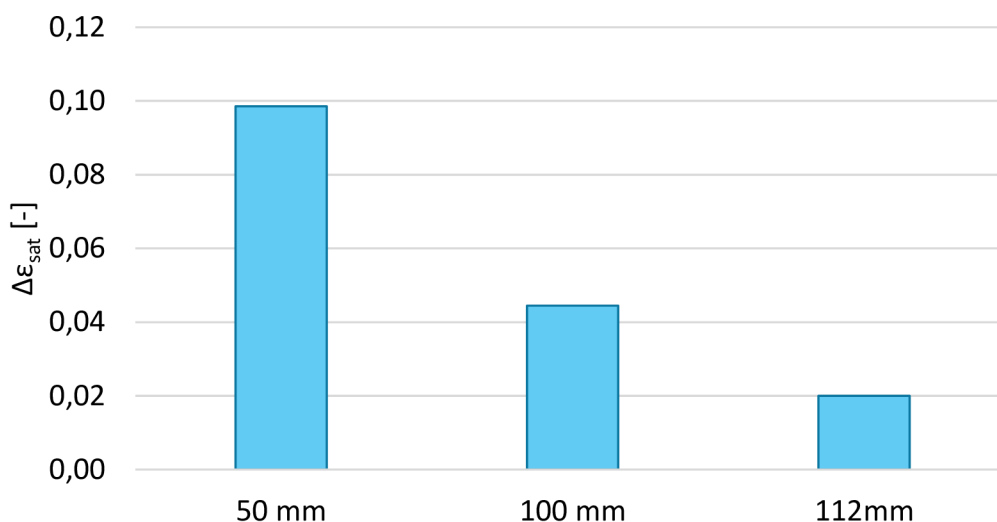
Tab. 6 Hodnoty přírůstku objemové změny  $\Delta\varepsilon_{sat}$  – změna rozměrů

ø vzorku [mm]	50 mm	100 mm	112 mm
$C_{c1}$	0,042	0,072	0,046
$C_{c2}$	0,426	0,473	0,218

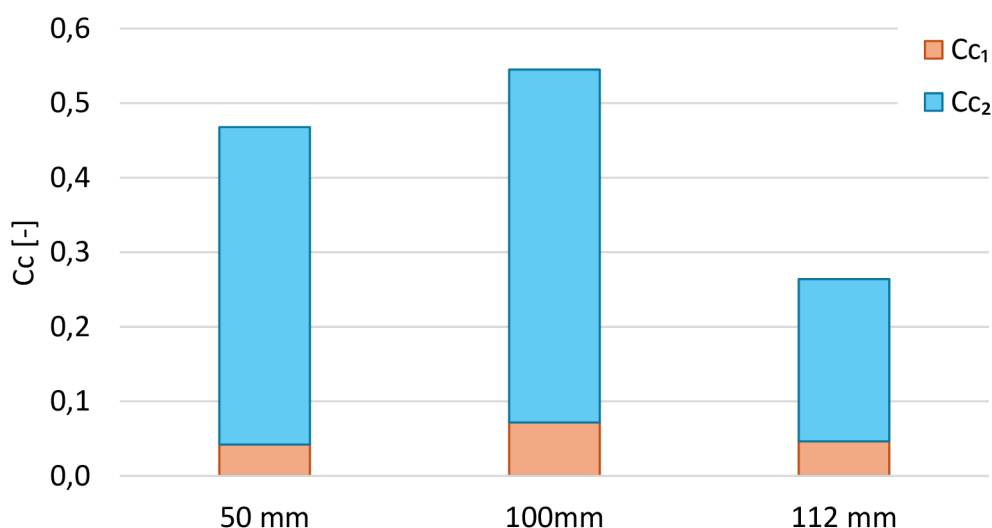
Tab. 7 Čísla stlačitelnosti  $C_{c1}$  a  $C_{c2}$  – změna rozměrů



Obr. 19 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost  $s_a$  vs.  $t$



Obr. 20 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost  $\Delta \varepsilon_{sat}$  vs.  $\sigma'_{sat}$



Obr. 21 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost  $C_c$  vs.  $\sigma'$

Rozdílné výsledky tří zkoušek mohou být ovlivněny silou na jednotkový objem skeletu. Při stejném čísle pórovitosti ale větším objemu skeletu vzorku, může působit menší kontaktní síla na kontakty zrn. V případě vrstevnatého modelu to však neplatí a na kontakty zrn by měla působit stejná síla na vzorek menšího i většího objemu skeletu. Dalším vlivem rozdílného výsledku zkoušky může být tření mezi materiálem vzorku a stěnou edometrického prstence. Poslední vliv na rozdílnost výsledků může mít vznik klenbového efektu uvnitř materiálu, tento jev může způsobit nerovnoměrně zhutněná plocha u většího průměru vzorku.

#### 4.2.4 Změna počátečního čísla pórovitosti

V poslední sadě byly testovány dva vzorky o průměru 50 mm. První vzorek byl hutněn ve dvou vrstvách a druhý volně sypaný.

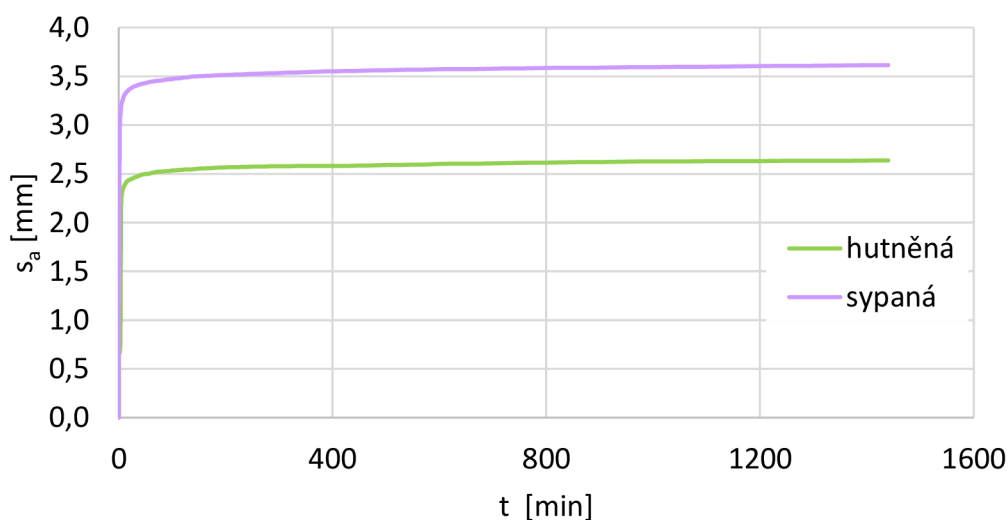
V následujících tabulkách vidíme vypočtené hodnoty přírůstku objemové změny (Tab. 8) a čísla stlačitelnosti materiálu před saturací  $C_{c1}$  a po saturaci  $C_{c2}$  (Tab. 9) při změně počátečního čísla pórovitosti.

	hutněná	sypaná
$\Delta\varepsilon_{\text{sat}} [-]$	0,099	0,123

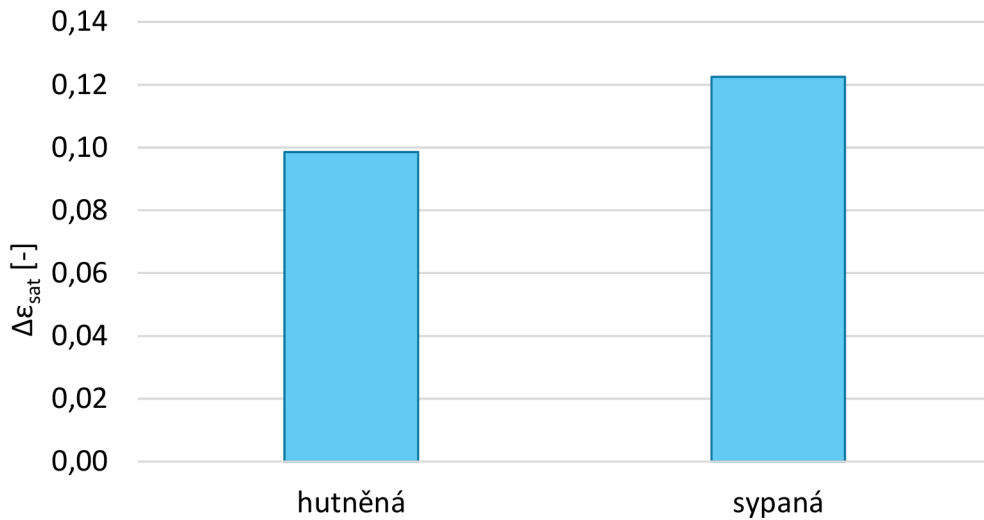
Tab. 8 Hodnoty přírůstku objemové změny  $\Delta\varepsilon_{\text{sat}}$  - změna čísla pórovitosti

	hutněná	sypaná
$C_{c1}$	0,042	0,073
$C_{c2}$	0,426	0,535

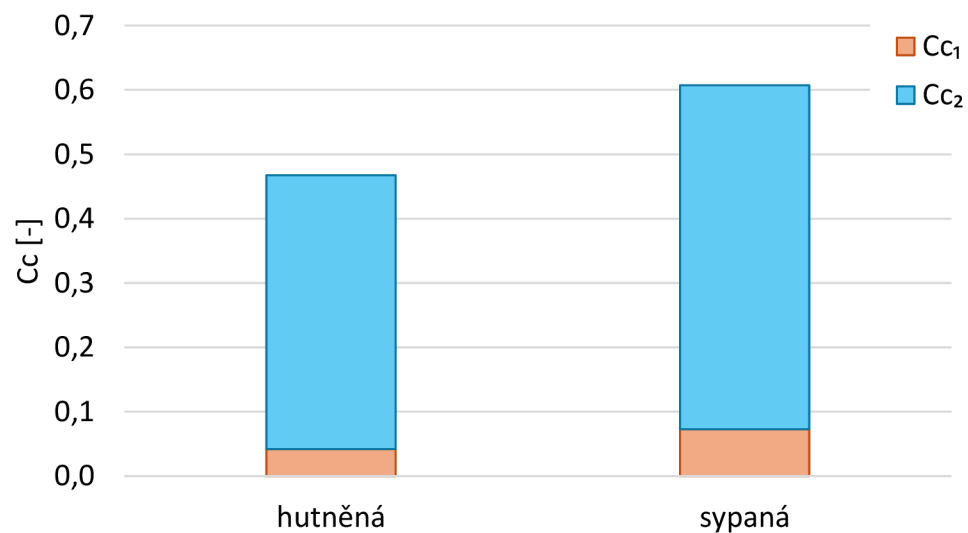
Tab. 9 Čísla stlačitelnosti  $C_{c1}$  a  $C_{c2}$  - změna čísla pórovitosti



Obr. 22 Vyhodnocení edometrické zkoušky - změna čísla pórovitosti, závislost  $s_a$  vs.  $t$



Obr. 23 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna čísla pórovitosti, závislost  $\Delta \varepsilon_{sat}$  vs.  $\sigma'_{sat}$



Obr. 24 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna čísla pórovitosti, závislost  $Cc$  vs.  $\sigma'$

Na výsledcích zkoušky můžeme pozorovat viditelný rozdíl mezi hodnotami hutněného vzorku a volně sypaného. Tento rozdíl vzniká na základě čísla pórovitosti vzorku. U hutněného materiálu jsou póry mezi zrna menší, naproti tomu u sypaného materiálu jsou větší a tím mezi kontakty zrn vznikají větší vzduchové póry a následně se materiál při zatížení víc stlačuje.

## 5 ZÁVĚR

Horniny charakteru jílovitých břidlic jsou v podmínkách České republiky obvyklým materiálem a často se využívají pro výstavbu zemních těles v dopravním stavitelství. V těchto materiálech však může docházet k jejich degradaci v důsledku cyklického sycení (vlivem srážek a jejich zasakování do zemních těles) a následného vysychání. Tato degradace vede k objemovým změnám. Z inženýrského hlediska to tedy znamená, že může docházet k sedání v úrovni nivelety komunikace, které ale není způsobeno sedáním podloží ale stlačováním materiálu zemního tělesa. Tento proces je spojen s jevem označovaným jako „slaking“. Ačkoliv je tento jev v zahraničí předmětem řady studií (Kikumoto et al., 2016), v našich podmínkách je jeho analýza zřídka.

Předmětem mé práce bylo provést základní sadu zkoušek jednoosé stlačitelnosti a zrnitostních rozborů s cílem tento efekt posoudit a analyzovat ovlivňující faktory.

Ze všech zkoumaných faktorů byl nejvýznamnější vliv napětí při saturaci. Při napětí 300 kPa, které odpovídá tíže nadloží v patě násypu, bylo udržováno konstantní v průběhu celého sycení a byla změřena poměrná objemová deformace  $\Delta\varepsilon_{\text{sat}} = 0,099$ . při napětí 100 kPa pak pouze  $\Delta\varepsilon_{\text{sat}} = 0,002$ . Druhý největší vliv měl faktor změny počátečního čísla pórovitosti, následoval vliv změny doby zatížení, a nakonec změna rozměrů vzorků.

Zkoušky zrnitosti na vzorcích před a po zkouškách stlačitelnosti odhalily výrazné změny v křivkách zrnitosti. Ve vzorcích po zkouškách stlačitelnosti byl zaznamenán nárůst podílu zrn menších průměrů, což je způsobeno degradací, drcením zrn v důsledku „slaking“ efektu.

Do budoucna by bylo zajímavé provést a vyhodnotit další zkoušky, například pro získání pevnostních parametrů jílovité břidlice a dále zkoumat chování degradace v důsledku „slakingu“.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

**Arulanandan, K., Heinzen, R., T.,** (1977), Factors influencing erosion in dispersive Clay and methods of identification. Dispersive Clay, related piping, and erosion in geotechnical projects. American Society for Testing and Materials

**Badger, C., W., Cummings, A., D., Whitmore, R., L.,** (1956), The disintegration of shales in water, Journal of the Institute of Fuel

**Berkovitch, I., Manackerman, M., Potter, N. M.** (1959), The shale breakdown problem in coal washing: Part 1. - Assessing the breakdown of shale in water.

**Cernuda, C., F., Smith, Vicente-Chandler, J.,** (1954), Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to water drop impact. Soil Science

**ČGS. (18. květen 2024).** Geologická mapa 1 : 50 000 - indexy, Geologická mapa 1 : 50 000. Načteno z Geovědní mapy 1 : 50: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

**Czerewko, M. A., Cripps, J. C.,** (2001), Assessing the durability of mudroch of mudroch using the modified jar slake index test, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology

**Dick, J., C., Shakoar, A.,** (1992), Lithological control of mudrock durability, Quarterly journal of engineering geology

**Franklin, J. A., Chandra, R.,** (1972), The slake durability test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science

*Fyzikálně indexové vlastnosti zemin, BFA002, podklady do cvičení, (2024).* Načteno z Fakulta stavební, ústav geotechniky: <https://geotech.fce.vutbr.cz/vyuka/bakalarske-studium/bfa002-mechanika-zemin/podklady-do-cviceni/>

**Gautam, T., P., Shakoar, A.,** (2013), Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions/ Engineering Geology

**Hardin, B. O.,** (1985). Crushing of soil particles, J. Geotechnical Engineering

*Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edomrická zkouška), BFA002, podklady do cvičení, (2024).* Načteno z Fakulta stavební, Ústav geotechniky: <https://geotech.fce.vutbr.cz/vyuka/bakalarske-studium/bfa002-mechanika-zemin/podklady-do-cviceni/>

**Kikumoto, M., Putra, A., D., Fukuda, T.,** (2016), Slaking and deformation behaviour, Yokohama National University

- Mitchell, J., K.,** (1993), Fundamentals of soil behavior, John Wiley&Sons, New York
- Moriwaki, Y., Mitchell, J., K.,** (1977), The role of dispersion in the slaking of intact clay. in J. L. Sherard and R. S. Decker, Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623. American Society for Testing and Materials
- Sadisun, I., A., Shimada, H., Ichinose, M., Katsui, K.,** (2005), Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test, Geotechnical and Geological Engineering
- Santi, P., M., Koncagul, E., C.,** (1996), Predicting the mode, susceptibility, and rate of weathering of shales.
- Seedsman, R.,** (1986), The behaviour of clay shales in water. Canadian geotechnical journal
- Taylor, R., K.,** (1988), Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes, Quarterly Journal of Engineering Geology
- Taylor, R., K., Spears, D., A.,** (1970), The breakdown of British coal measures rocks. International Journal of Rocks Mechanics and Mining Science
- Tindall, J., A., Kunkel, J., K., Anderson, D., E.,** (1999), Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers, Prentice – hall, Inc., New Jersey, ISBN 0-13-660713-6
- Vaculíková, J.,** (2015), Rozpad sedimentů díky kapilárně stlačenému vzduchu: přehlížený erozní mechanismus, Diplomová práce UK



## 7 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Br	Hardinova parametr porušení
$s_a$	osové stlačení
t	čas
$\Delta\varepsilon$	přírůstek objemové změny
$\sigma'$	svislé efektivní napětí
$\sigma'_{sat}$	svislé efektivní napětí při saturace
$C_{c1}$	číslo stlačitelnosti před saturací
$C_{c2}$	číslo stlačitelnosti po saturace

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

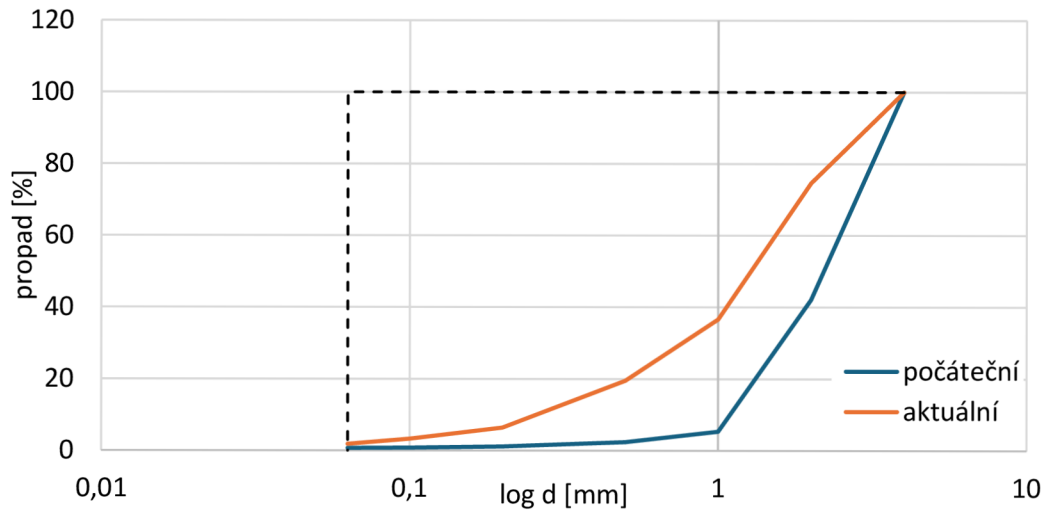
Obr. 1 Makroskopicky odlišné typy slakingu (Sadisun et al., 2005) .....	10
Obr. 2 Příklad na Slake durability test – Ústav geotechniky Fakulta stavební VUT v Brně .....	11
Obr. 3 Výsledek XRD vzorek z Japonska (Kikumoto et al., 2016).....	13
Obr. 4 Geologická mapa oblasti odebraného vzorku (ČGS, 2024) .....	14
Obr. 5 Definice Hardinova parapetru porušení Br (Hardin, 1985) .....	16
Obr. 6 Schéma edometrické krabice (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace, BFA002, podklady do cvičení, 2024) .....	17
Obr. 7 Vzorek v prstenci před zkouškou, $d = 50$ mm, $v = 20$ mm .....	18
Obr. 8 Vzorek po zkoušce stlačitelnosti, $d = 50$ mm, $v = 20$ mm .....	18
Obr. 9 Trojfázový model zeminy (Fyzikálně indexové vlastnosti zemin, BFA002, podklady do cvičení, 2024) .....	19
Obr. 10 Závislost čísla pórovitosti $e$ na svislém efektivním napětí $\sigma'_a$ (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace, BFA002, podklady do cvičení, 2024).....	20
Obr. 11 Vyhodnocení granulometrické zkoušky dle Hardinova parametru porušení – závislost $\log d$ vs. $\log d$ .....	21
Obr. 12 Výsledek variace Hardinova parametru porušení Br s cykly nasycení a vysoušení (Kikumoto et al.,2016) .....	22
Obr. 13 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost $s_a$ vs. $t$ .....	23
Obr. 14 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost $\Delta\varepsilon_{sat}$ vs. $\sigma'_{sat}$ .....	24
Obr. 15 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna napětí, závislost $C_c$ vs. $\sigma'$ .....	24
Obr. 16 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost $s_a$ vs. $t$ .....	25
Obr. 17 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost $\Delta\varepsilon_{sat,72}$ vs. $\sigma'_{sat}$ .....	26
Obr. 18 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna doby napětí, závislost $C_c$ vs. $\sigma'$ ... ..	26
Obr. 19 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost $s_a$ vs. $t$ .....	27
Obr. 20 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost $\Delta\varepsilon_{sat}$ vs. $\sigma'_{sat}$ ..	28
Obr. 21 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna rozměrů, závislost $C_c$ vs. $\sigma'$ .....	28
Obr. 22 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna čísla pórovitosti, závislost $s_a$ vs. $t$	29
Obr. 23 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna čísla pórovitosti, závislost $\Delta\varepsilon_{sat}$ vs. $\sigma'_{sat}$ .....	30
Obr. 24 Vyhodnocení edometrické zkoušky – změna čísla pórovitosti, závislost $C_c$ vs. $\sigma'$ .....	30

## 9 SEZNAM TABULEK

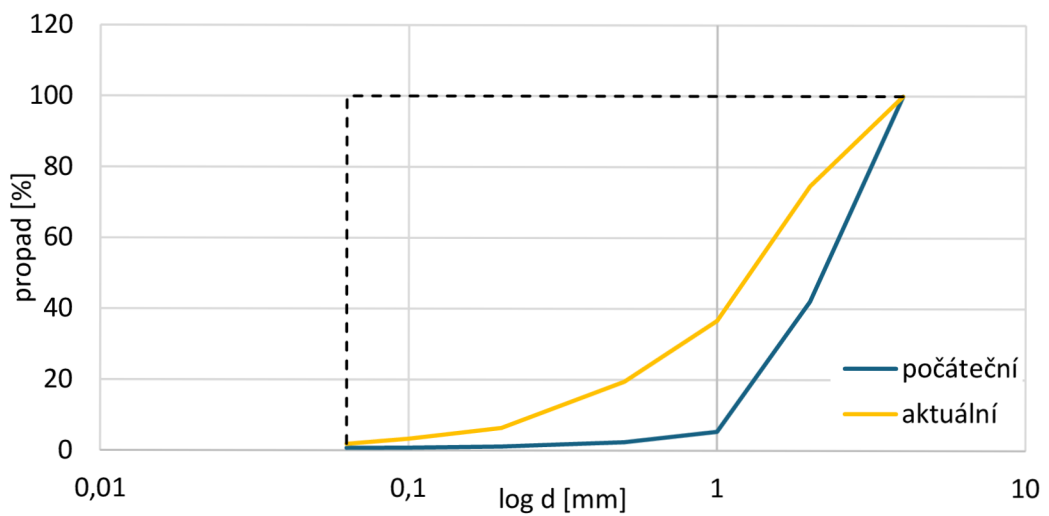
Tab. 1 Plán laboratorních zkoušek .....	15
Tab. 2 Hodnoty přírůstku objemové změny $\Delta\varepsilon_{\text{sat}}$ – změna napětí.....	23
Tab. 3 Čísla stlačitelnosti $C_{c1}$ a $C_{c2}$ – změna napětí .....	23
Tab. 4 Hodnoty přírůstku objemové změny $\Delta\varepsilon_{\text{sat},72}$ – změna doby napětí .....	25
Tab. 5 Čísla stlačitelnosti $C_{c1}$ a $C_{c2}$ – změna doby napětí .....	25
Tab. 6 Hodnoty přírůstku objemové změny $\Delta\varepsilon_{\text{sat}}$ – změna rozměrů .....	27
Tab. 7 Čísla stlačitelnosti $C_{c1}$ a $C_{c2}$ – změna rozměrů .....	27
Tab. 8 Hodnoty přírůstku objemové změny $\Delta\varepsilon_{\text{sat}}$ – změna čísla pórovitosti .....	29
Tab. 9 Čísla stlačitelnosti $C_{c1}$ a $C_{c2}$ – změna čísla pórovitosti .....	29

# **PŘÍLOHY**

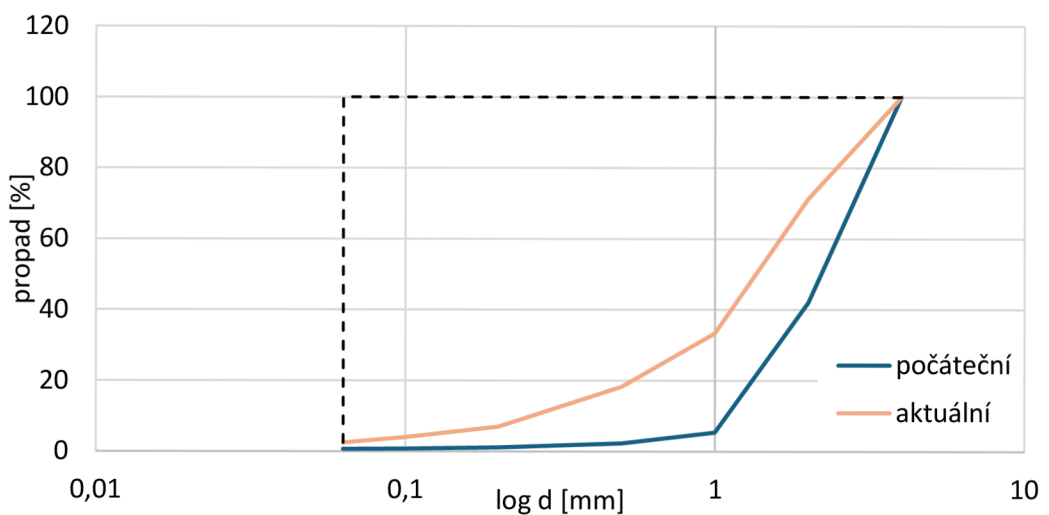
1. Přílohy granulometrického rozboru



Grafické vyhodnocení – aktuální zrnitost po zatížení 300 kPa



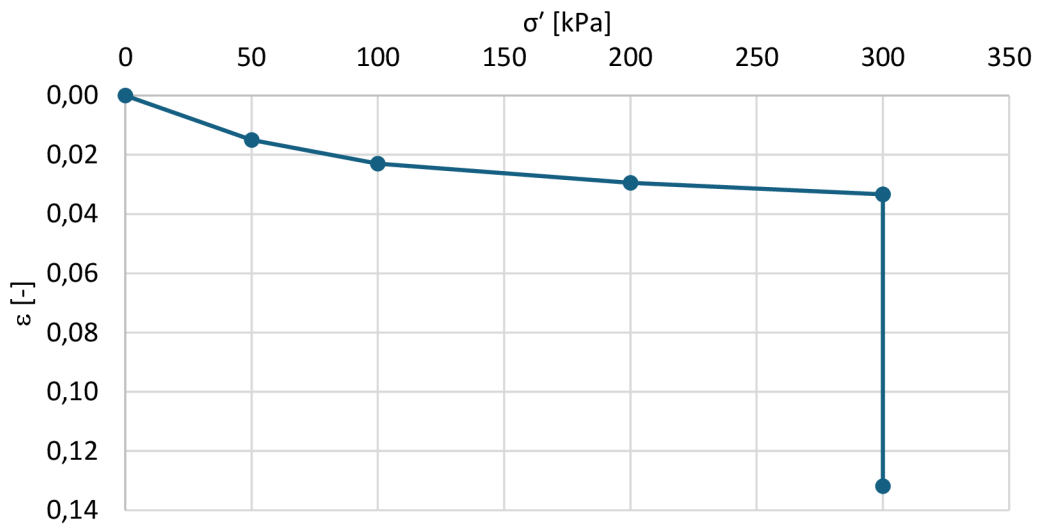
Grafické vyhodnocení – aktuální zrnitost po zatížení 200 kPa



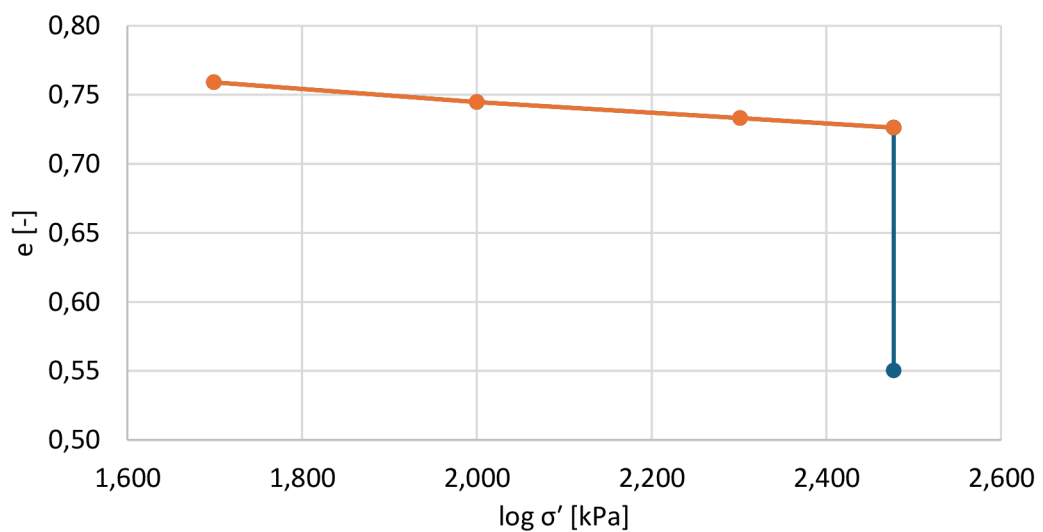
Grafické vyhodnocení – aktuální zrnitost po zatížení 100 kPa

## 2. Přílohy jednoosé stlačitelnosti

Označení vzorky	Eod 1.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	127
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	116
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	20
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,55
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,41E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,20E-05

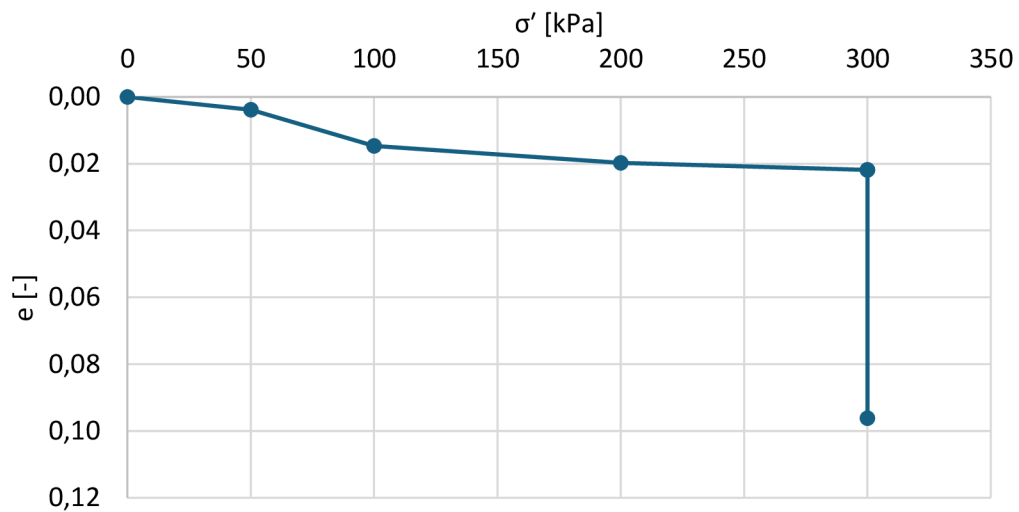


Grafické vyhodnocení  $\epsilon$  vs.  $\sigma'$

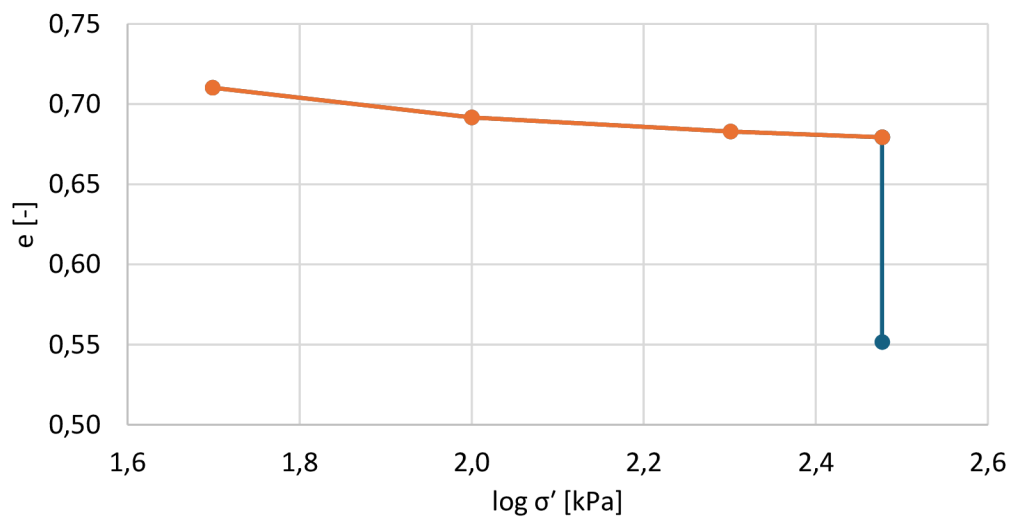


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 1.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	122
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	111
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	20
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,55
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,55E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,29E-05



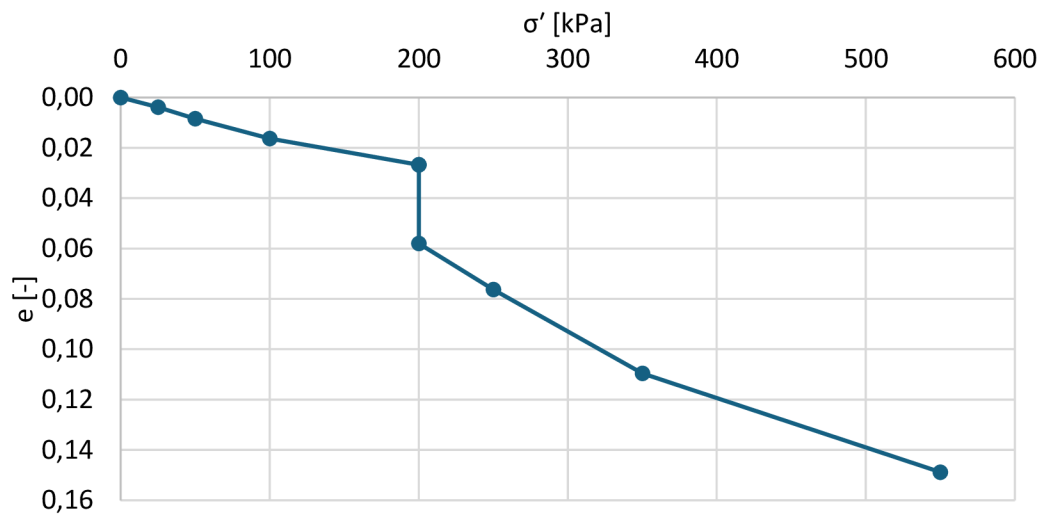
Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$



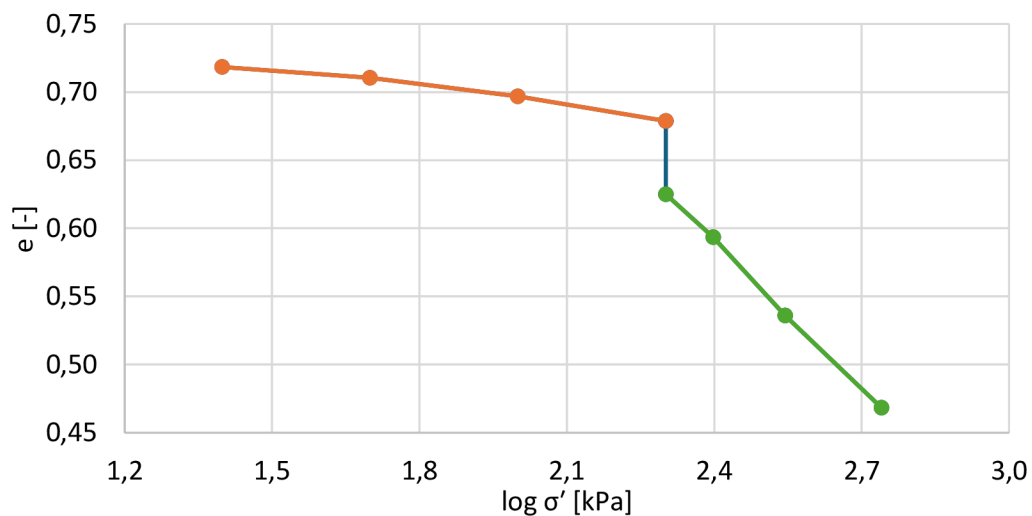
Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$



Označení vzorky	Eod 8.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	130
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	119
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	17
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,47
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,34E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,28E-05

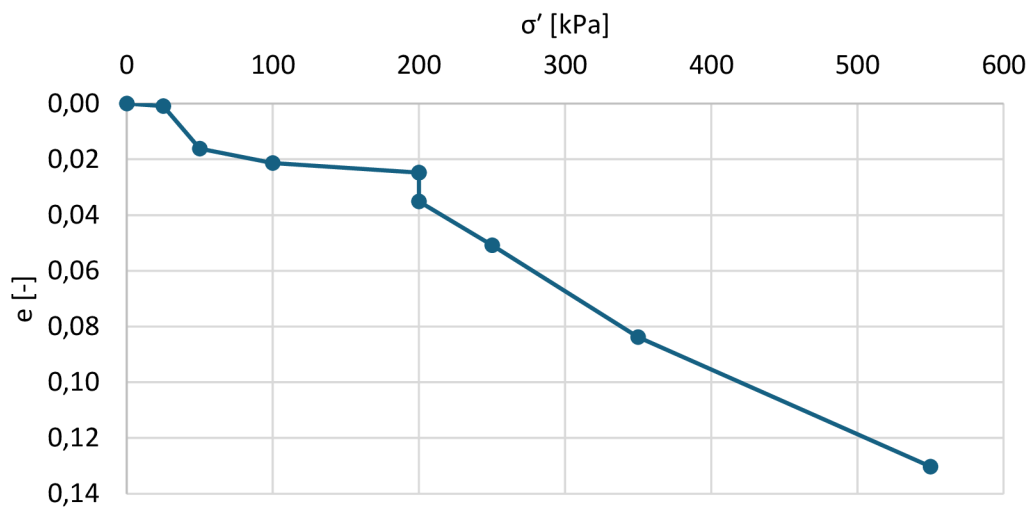


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

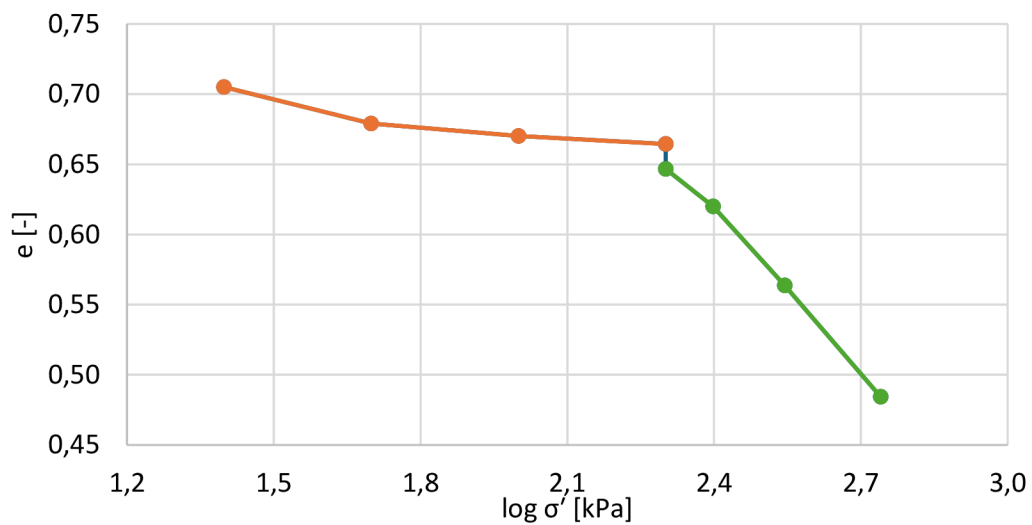


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 12.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	129
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	118
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	18
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,48
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,42E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,30E-05

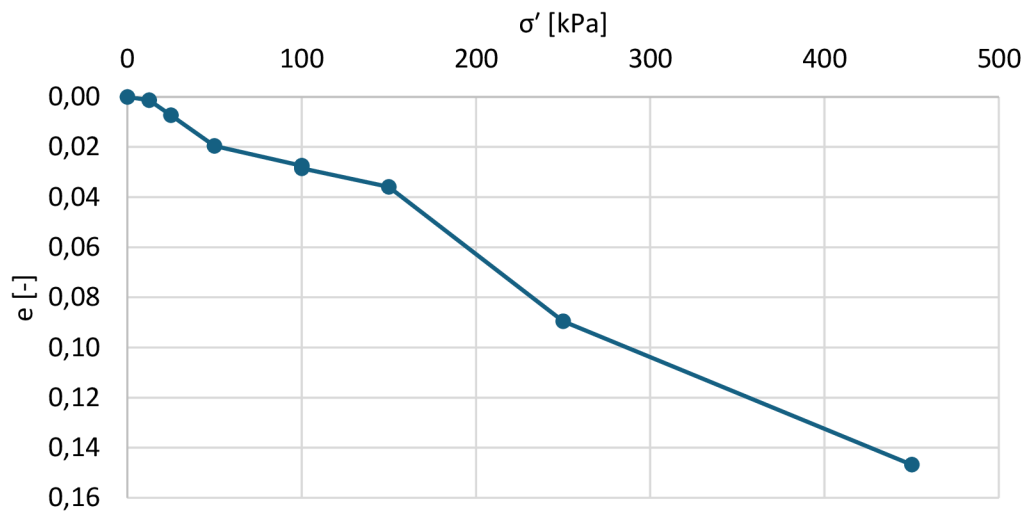


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

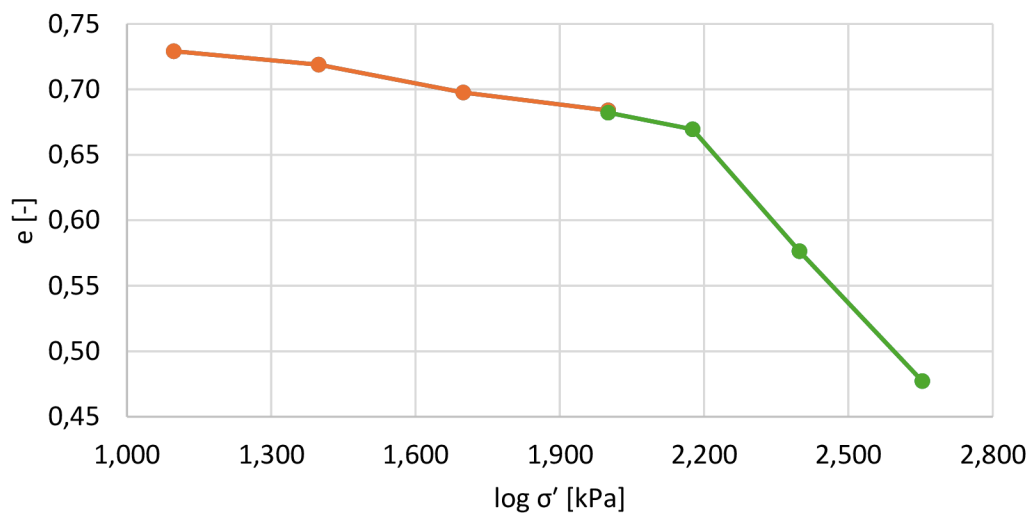


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 20.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	129
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	118
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	18
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,48
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,35E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,27E-05

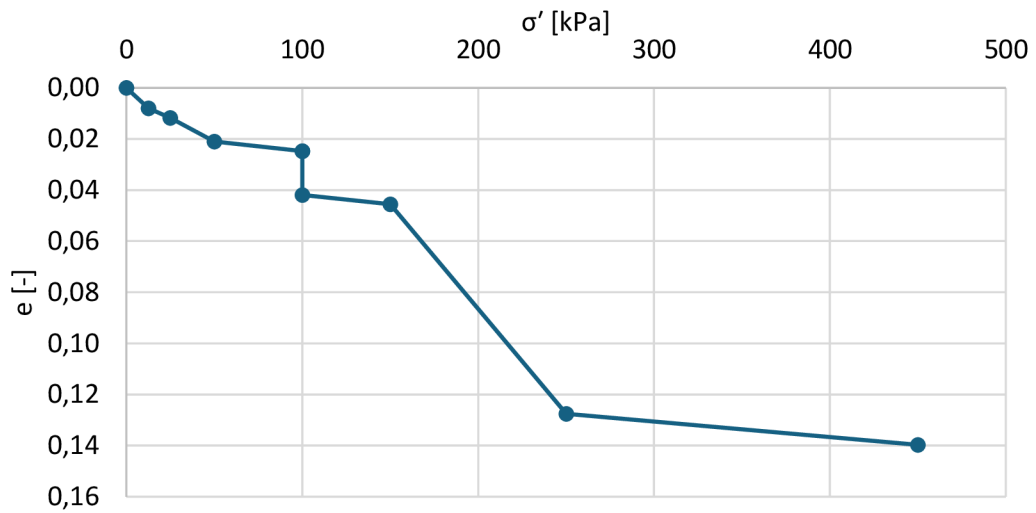


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

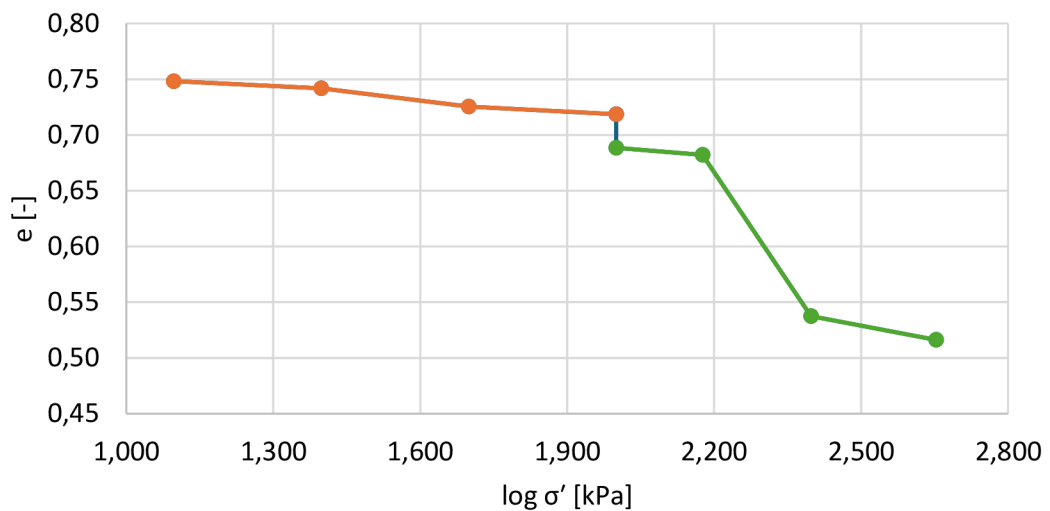


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 26.2.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	131
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	119
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	19
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,52
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,38E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,23E-05

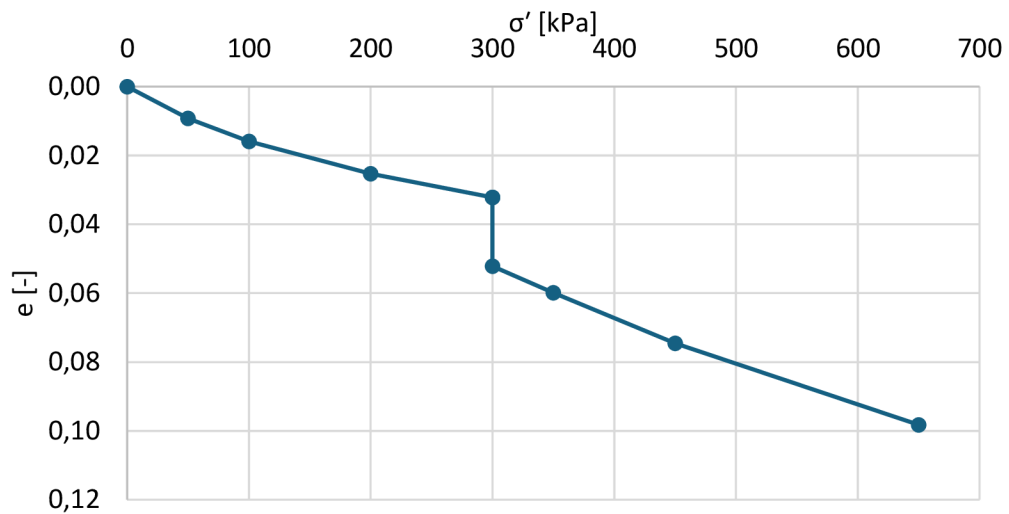


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

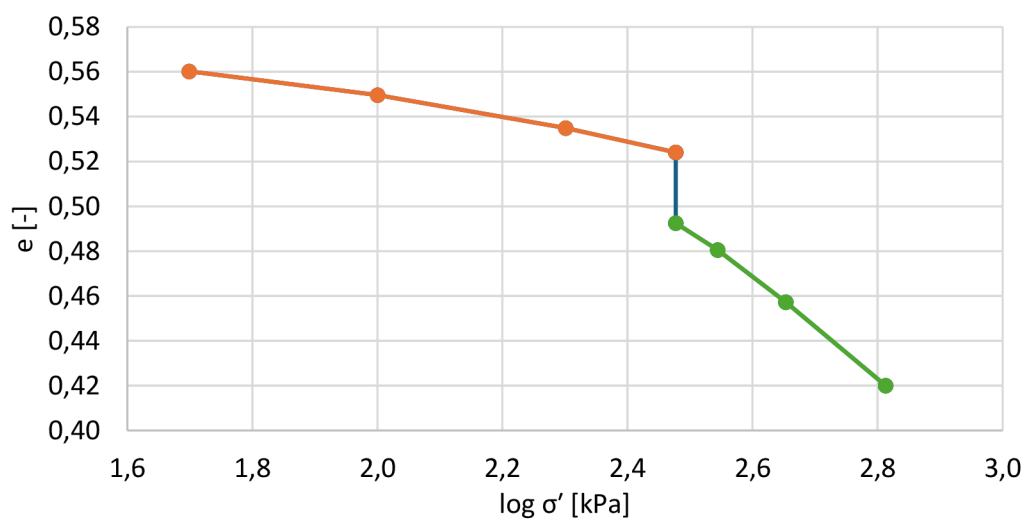


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 4.3.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	112
Výška $h_0$ [mm]	25
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	376,3
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	597
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	538
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	16
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,42
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	4,43E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,12E-05

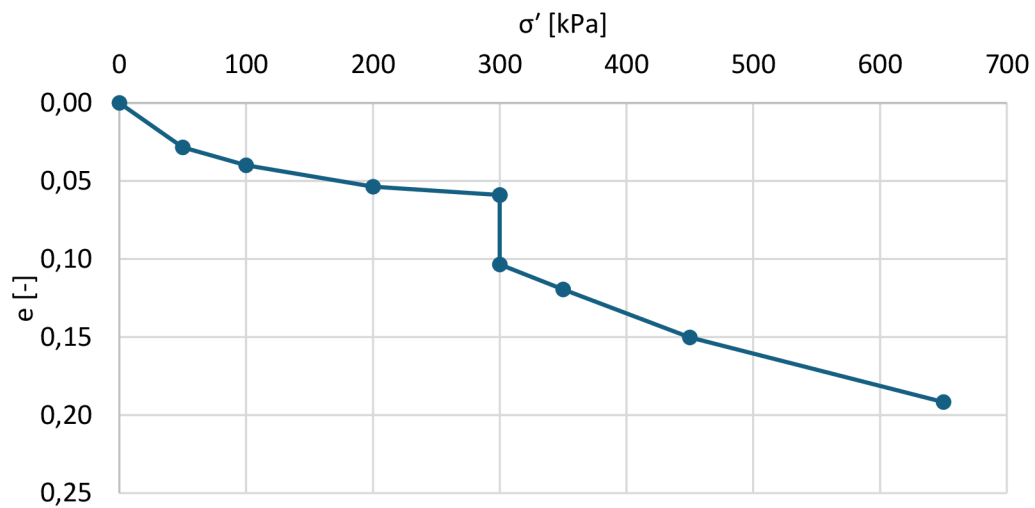


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

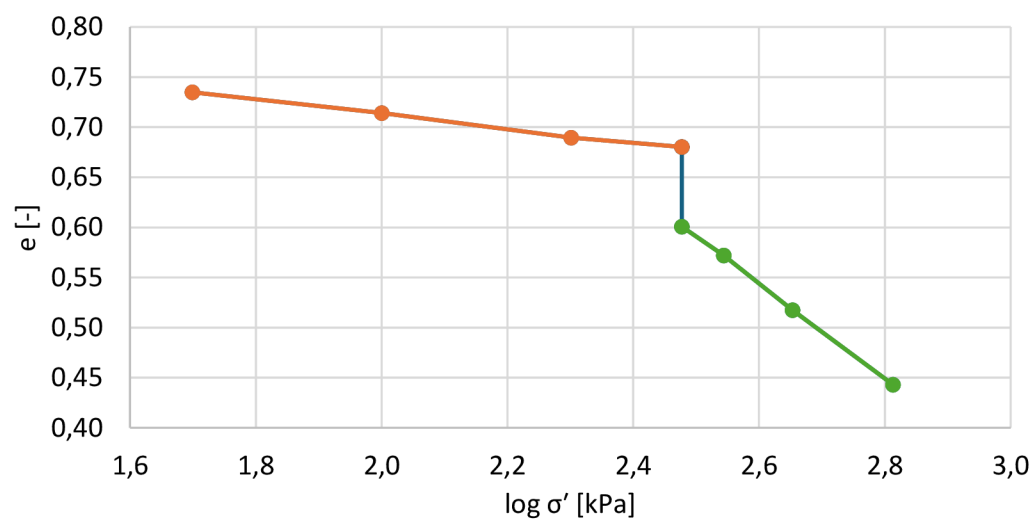


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 7.3.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	100
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	247,2
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	514
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	474
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	16
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,44
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,17E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,20E-05

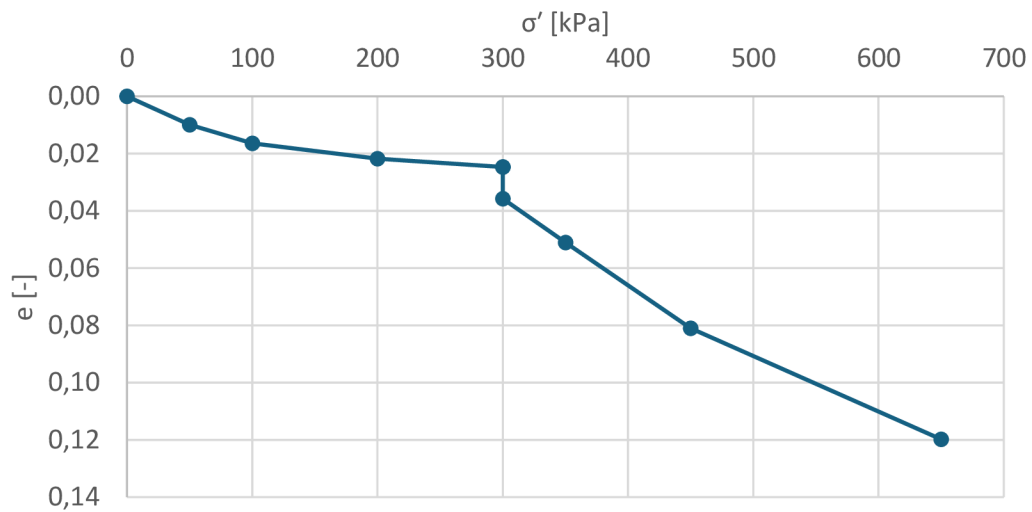


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

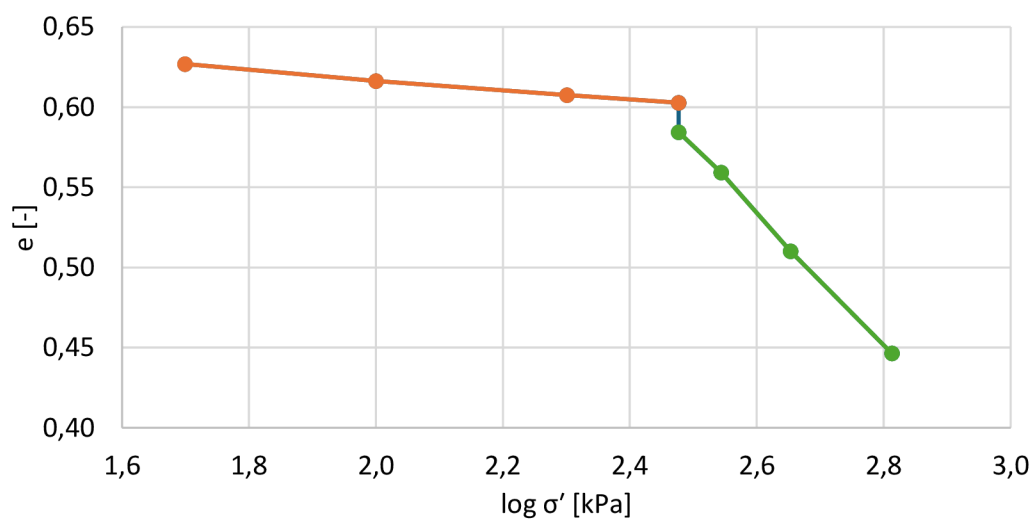


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 14.3.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	60
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	130
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	120
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	17
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,45
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3,46E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,39E-05

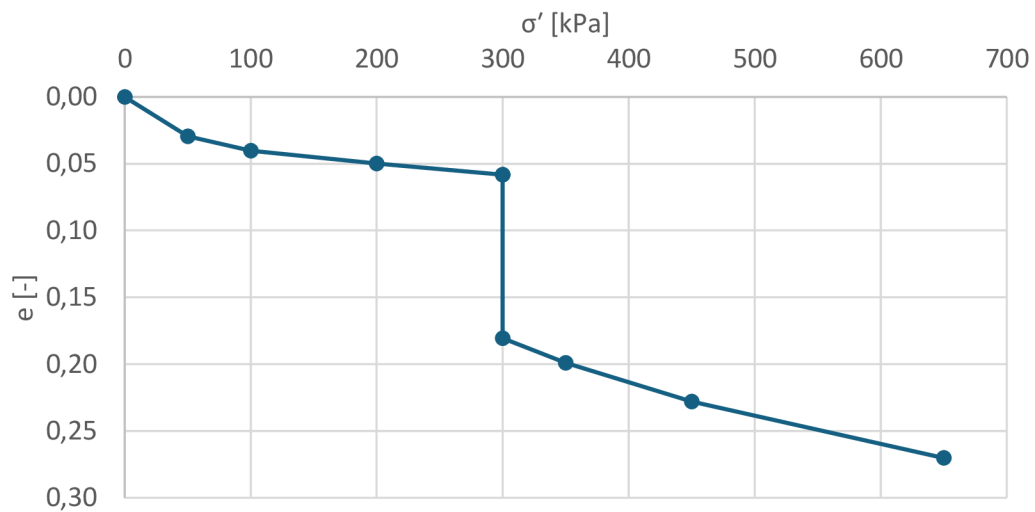


Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$

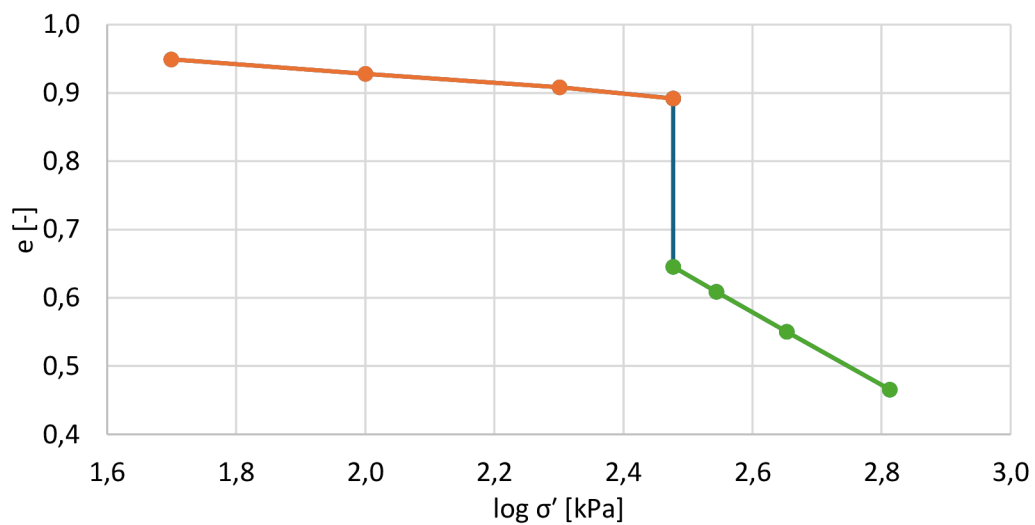


Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$

Označení vzorky	Eod 4.4.24
Průměr $\varnothing$ [mm]	50
Výška $h_0$ [mm]	20
Počáteční hmotnost zeminy $m$ [g]	55,8
Počáteční vlhkost $w$ [%]	6
Hmotnost nasycené zeminy $m_w$ [g]	125
Hmotnost vysušené zeminy $m_s$ [g]	115
Finální vlhkost $w_{fin}$ [%]	17
Finální číslo pórovitosti $e_{fin}$ [-]	0,47
Finální objem $V_{fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,87E-05
Objem skeletu $V_{s,fin}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,96E-05



Grafické vyhodnocení  $\varepsilon$  vs.  $\sigma'$



Grafické vyhodnocení  $e$  vs.  $\log \sigma'$